Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Свадковский Владислав Андреевич

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ЦЕЛЯХ ДОСТИЖЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика:
экономика промышленности

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Научный руководитель — Трачук Аркадий Владимирович, доктор экономических наук, профессор

Москва – 2026

Оглавление

Введение 4
Глава 1 Взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий: трансформация в контексте устойчивого развития 17
1.1 Взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий: сущность, эволюция и современное состояние 17
1.2 Цели устойчивого развития как теоретическая рамка трансформации угольно-металлургического взаимодействия 27
1.3 Технологические решения и организационно-экономические предпосылки трансформации угольно-металлургического взаимодействия 37
1.4 Принципы и теоретические основания формирования модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия 67
Глава 2 Условия жизнеспособности и реализуемости модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия 85
2.1 Критерии и основные условия реализации модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия, соответствующей целям устойчивого развития 85
2.2 Методы проверки жизнеспособности модели: формирование экспертной выборки и процедура сбора данных 114
2.3 Результаты экспертной валидации условий жизнеспособности и ограничения применения модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия 127
Глава 3 Экономическое обоснование и оценка потенциальных эффектов модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия на основе частичной газификации бурых углей 143
3.1 Имитационное сопоставление сценариев полной и частичной газификации бурых углей и выбор сценария для инвестиционной оценки конкретного проекта 143
3.2 Инвестиционная состоятельность термококсового проекта 159
3.3 Инструментарий согласования интересов участников 184
3.4 Экономический эффект трансформации: оценка на уровне компании, отрасли и национальной экономики 201
Заключение 226

Список сокращений и условных обозначений 232
Список литературы 234
Список иллюстративного материала 261
Приложение А Основные научные подходы к трансформации взаимодействия угледобывающей и металлургической отраслей 266
Приложение Б Сравнительная характеристика подходов международной и российской научной литературы к трансформации взаимодействия отраслей 268
Приложение В Социально-экономические последствия технологической трансформации угледобывающих и металлургических предприятий в контексте устойчивого развития 269
Приложение Г Структура экспертной выборки и система присвоения весовых коэффициентов 270
Приложение Д Систематизация технологических решений в области переработки угля 272
Приложение Е Систематизация технологических решений в области производства металлургической продукции 273
Приложение Ж Анкета экспертного опроса по оценке условий жизнеспособности модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия 274
Приложение И Технологическая схема проекта и параметры переработки бурого угля в термококс 276
Приложение К Финансовая модель проекта: P&L, CF и FCFF за расчетный горизонт 281
Приложение Л Расчеты чувствительности показателя КУЕСЭ проекта и внутренней цены термококса к логистическому коэффициенту 294

Введение

Актуальность темы исследования. Низкоуглеродная трансформация мировой экономики изменяет условия функционирования ресурсоемких отраслей, прежде всего угледобывающей и металлургической промышленности. Ужесточение требований к углеродной отчетности, рост внимания инвесторов к устойчивости производственных цепочек и необходимость обновления капиталоемких активов делают традиционную связку «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс» менее устойчивой в долгосрочной перспективе. По оценке Международного энергетического агентства, на черную металлургию приходится около 8% мирового конечного энергопотребления и 7% выбросов CO_2 мировой энергетической системы. Углеродоемкость доменно-конвертерного маршрута составляет около 2,2 т CO_2 на 1 т сырой стали с учетом прямых и косвенных выбросов, а сырье и энергия в совокупности формируют 60-80% себестоимости производства стали. При этом для российской промышленности задача трансформации не может сводиться к одномоментному отказу от угольной ресурсной базы, поскольку предприятия этих отраслей часто выполняют системообразующую функцию для территорий присутствия.

В этих условиях особое значение приобретает поиск траекторий, позволяющих не разрушать сложившиеся производственные и социальные связи, а переводить их в новую технологико-экономическую конфигурацию. Одним из таких направлений является глубокая переработка бурых углей методом газификации. Бурые угли обладают значительной ресурсной базой, но ограниченно применимы в классическом коксовании, поэтому их вовлечение в производство термококса или водорода может стать основой для формирования новых производственных цепочек между угледобывающими и металлургическими предприятиями.

Научная проблема состоит в том, что в существующих исследованиях технологические альтернативы, инвестиционная оценка и организационно-экономический механизм взаимодействия участников чаще анализируются раздельно. Водородные сценарии рассматриваются преимущественно как долгосрочная траектория декарбонизации металлургии, тогда как технологии переработки бурых углей описываются в основном через инженерные параметры. В литературе недостаточно раскрыт и вопрос о том, при каких

технологических, логистических и инвестиционных условиях глубокая переработка бурых углей может стать экономически жизнеспособной формой межфирменного взаимодействия.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки модели, связывающей выбор технологического сценария, операционную сопоставимость продуктов переработки, инвестиционную состоятельность проекта и распределение экономического эффекта между участниками производственной цепочки. Такая постановка позволяет рассматривать трансформацию угольно-металлургического взаимодействия не как замену одного сырьевого продукта другим, а как изменение производственно-экономической логики связи между сырьевой базой, переработкой, металлургическим потреблением и целями устойчивого развития.

Количественный масштаб проблемы подтверждается тем, что в 2024 г. мировой выпуск стали составил 1884,6 млн т, а сталелитейный сектор формирует около 7% энергетических выбросов CO_2; уголь обеспечивает около 75% спроса отрасли на энергию. Эти отраслевые показатели характеризуют глобальный масштаб проблемы и не смешиваются с упрощенной проектной границей углеродного расчета.

Степень разработанности темы исследования. Проблематика трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий находится на пересечении экономики промышленности, энергетических и сырьевых рынков, технологий глубокой переработки угля, инвестиционного анализа капиталоемких проектов и исследований устойчивого развития. Отдельные технологические, экономические и организационные аспекты данной проблематики получили существенное развитие в научной литературе. Угольно-металлургическое взаимодействие преимущественно исследуется фрагментарно – с позиции отдельных предприятий, технологий или стадий производственной цепочки.

Технологические основы глубокой переработки угля представлены в работах Ю.А. Плакиткина, С.Р. Исламова, И.В. Петрова, С.Г. Степанова, А.Е. Череповицына, Д.А. Логинова и других авторов. В этих исследованиях рассмотрены свойства угольного сырья, технологические режимы газификации, получение синтез-газа, водорода и углеродсодержащих продуктов, включая термококс, а также возможные направления их промышленного использования, достаточно подробно раскрыты технологическая осуществимость переработки

бурых углей и состав потенциально получаемых продуктов. Однако экономические последствия их использования в металлургическом производстве, условия формирования межотраслевой производственной цепочки и распределение создаваемого эффекта между ее участниками исследованы в меньшей степени.

В зарубежной литературе значительное внимание уделяется декарбонизации тяжелой промышленности, снижению углеродоемкости металлургического производства и применению водорода в качестве энергоносителя и восстановителя. Эти вопросы представлены в работах К. Батайля, В. Вогля, Ж. Фана, С. Фридмана, Дж. Риссмана, М. Байлеры и в аналитических материалах Международного энергетического агентства. В них раскрыты основные технологические направления низкоуглеродной трансформации металлургии и оценены их потенциальные энергетические и экологические последствия. Большинство таких исследований ориентированы на нормативно-целевые сценарии глубокой декарбонизации и в меньшей степени учитывают условия стран и регионов, сохраняющих высокую зависимость от собственной угольной ресурсной базы.

В технологических исследованиях установлено, что возможность применения продуктов переработки угля в металлургии определяется не только их энергетической ценностью и стоимостью, но и восстановительной функцией, реакционной способностью, механической прочностью и поведением материала в составе шихты. Следовательно, термококс и водород не являются полностью взаимозаменяемыми продуктами и требуют самостоятельной инженерно-технологической проверки. В то же время в существующей литературе недостаточно разработан экономический инструмент предварительного сопоставления сценариев их получения и использования, который позволял бы отбирать перспективные варианты до проведения детальной инженерной проработки.

Методологическую основу экономического анализа промышленной трансформации образуют исследования инновационно-инвестиционных процессов и эффективности инновационного развития предприятий А.В. Трачука и Н.В. Линдер. Вопросы технологической модернизации и стратегического управления промышленными предприятиями раскрыты в работах Н.М. Абдикеева, Т.А. Гилевой, Г.И. Гумеровой и других авторов. Смежные организационно-экономические аспекты представлены исследованиями

финансового обеспечения развития компаний энергетического сектора Н.В. Кузнецова, государственного стимулирования модернизации производственной базы А.В. Шарковой.

Результаты указанных исследований создают основу для оценки инновационной активности, технологической модернизации, конкурентоспособности и инвестиционной эффективности промышленных предприятий. Однако применительно к глубокой переработке бурых углей недостаточно разработана процедура, связывающая предварительное сравнение технологических сценариев с последующей инвестиционной оценкой. В частности, требует обоснования двухэтапная логика принятия решения, при которой сначала выполняется операционное энерго-стоимостное сопоставление альтернатив, а детальный инвестиционный анализ проводится для сценария, отобранного по результатам данного сопоставления.

Теоретические основания межфирменного взаимодействия, координации производственных цепочек и выбора организационных форм сотрудничества раскрыты в работах О.И. Уильямсона, Дж. Барни, Д. Тиса, Р. Гулати, Дж. Дайера, Х. Сингха и других авторов. В них исследованы специфичность активов, трансакционные издержки, вертикальная интеграция, отношенческие контракты и распределение рисков. Эти положения применимы для объяснения необходимости координации участников угольно-металлургической цепочки. Но они не получили достаточной отраслевой адаптации к взаимодействию угледобывающего предприятия, комплекса газификации и металлургического предприятия, включая выбор продукта переработки, определение его расчетной цены и распределение экономического эффекта.

Исследования устойчивого развития, справедливого перехода и трансформации угольных регионов представлены работами Н. Хили, Дж. Барри, С. Пая, Дж. Сакса, Ф. Бирманна, Б. Совакула и других авторов. В них рассмотрено влияние структурных изменений на занятость, региональные бюджеты и устойчивость территорий присутствия. Однако региональные последствия трансформации обычно анализируются отдельно от экономики конкретных межотраслевых проектов и не связываются непосредственно с условиями их коммерческой реализуемости.

К достаточно разработанным аспектам угольно-металлургического взаимодействия относятся технологические основы газификации и глубокой переработки бурых углей; способы получения водорода, термококса и других

продуктов; технологические направления декарбонизации металлургии; общие методы оценки инвестиционной эффективности промышленных проектов; теоретические положения межфирменной координации; а также социально-экономические последствия трансформации угольных регионов.

Именно применительно к угольно-металлургической производственной цепочке требуют дальнейшего исследования: экономическое сопоставление технологических продуктов различной физической природы по единому измерителю; разграничение предварительной энерго-стоимостной оценки и последующей инженерно-технологической проверки; определение условий сравнительной эффективности частичной и полной газификации; учет неопределенности исходных параметров; последовательность перехода от сопоставления сценариев к инвестиционной оценке выбранного варианта; формирование расчетной цены промежуточного продукта; распределение экономического эффекта между угольным, газификационным и металлургическим контурами.

Научный пробел состоит в том, что в рассмотренном корпусе работ не обнаружен комплексный организационно-экономический подход, адаптированный ко взаимодействию угледобывающих и металлургических предприятий и объединяющий энерго-стоимостное сопоставление технологических сценариев, проверку границ их применимости, анализ неопределенности, инвестиционную оценку выбранного базового сценария и согласование экономических интересов участников. Для устранения данного пробела в диссертации выполняется операционное сопоставление полной газификации бурых углей с получением водорода и частичной газификации с производством термококса, после чего проводится углубленная инвестиционная оценка выбранного сценария и разрабатывается механизм распределения создаваемого экономического эффекта. Этим определяются цель и задачи настоящего исследования.

Объект исследования – система хозяйственно-экономических отношений между угледобывающими и металлургическими предприятиями.

Предметом исследования выступают организационно-экономические механизмы, методы оценки и условия трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий при переходе к применению топлива, обеспечивающего снижение углеродных выбросов.

Целью исследования является разработка и обоснование организационно-экономической модели трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий и методического инструментария выбора и оценки сценариев глубокой переработки бурых углей для использования продуктов их переработки как субститута коксующихся углей с учетом условий низкоуглеродного перехода и ограничений устойчивого развития.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

– теоретически обосновать модель трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе глубокой переработки бурых углей и определить ее отличия от традиционных форм межфирменной координации в условиях низкоуглеродного перехода и ограничений, необходимых для достижения устойчивого развития;

– разработать методику сопоставления использования коксующегося угля, термококса и водорода в металлургическом переделе с учетом их энергетической ценности, восстановительной способности и условий применения, а также экологического, социального и экономического эффектов;

– определить и эмпирически верифицировать пороговые условия операционной жизнеспособности низкоуглеродных сценариев полной и частичной газификации бурых углей, при которых достижимо снижение углеродных выбросов в логике целей устойчивого развития;

– разработать подход к обоснованию инвестиционного решения, предусматривающий операционное сопоставление термококсового и водородного сценариев с нормированием показателей на единицу энергетической ценности и последующую инвестиционную апробацию только выбранного сценария по показателям финансовой эффективности и сценарную проверку его чувствительности к условной цене углерода;

– обосновать инструментарий согласования интересов участников угольного, газификационного и металлургического контуров на основе экономически обоснованной цены термококса, а также разграничить рассчитанные корпоративные и социально-региональные эффекты и потенциальные отраслевые и национально-экономические эффекты трансформации.

Область исследования диссертации соответствует п. 2.11. «Формирование механизмов устойчивого развития промышленных отраслей, комплексов, предприятий» и п. 2.14. «Проблемы повышения

энергетической эффективности и использования альтернативных источников энергии» Паспорта научной специальности 5.2.3 Региональная и отраслевая экономика: экономика промышленности (экономические науки).

Гипотеза исследования состоит в том, что трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе частичной газификации бурых углей экономически обоснована при одновременном выполнении трех проверяемых условий: достижении операционного паритета между угледобывающими и металлургическими предприятиями по стоимости сопоставимой энергетической ценности, выраженной в условных единицах сопоставимой энергетической ценности (УЕСЭ ≤ 100%) с вероятностью не ниже 90%; превышении внутренней нормы доходности проекта над средневзвешенной стоимостью капитала при заданном диапазоне предпосылок; существовании непустого ценового коридора термококса, приемлемого одновременно для угольного, газификационного и металлургического контуров. Все три условия относятся к сценарию частичной газификации и термококсовому проекту; гипотеза считается опровергнутой при невыполнении любого из них, а результаты проверки сценария полной газификации служат базой сравнения и на ее статус не влияют.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составляют системный подход к анализу промышленных трансформаций, теория трансакционных издержек, ресурсная теория фирмы, теория заинтересованных сторон и подходы к оценке инвестиционной эффективности капиталоемких проектов. Их использование обусловлено тем, что трансформация охватывает технологические, организационно-экономические, инвестиционные и социально-региональные аспекты.

Для решения задач применялась совокупность общенаучных и специальных методов: системный и сравнительный анализ – для выявления ограничений традиционной коксо-доменной модели и сопоставления альтернативных траекторий глубокой переработки бурых углей; теоретический синтез – при разработке концептуальной модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия.

Формализация и моделирование использовались при разработке метрики УЕСЭ – условной единицы сопоставимой энергетической ценности, приводящей стоимость технологических продуктов различной физической природы к единому измерителю. Финансово-экономическая модель проекта, анализ

чувствительности и имитационное моделирование методом Монте-Карло реализованы в MS Excel; оценивалась вероятность достижения операционного паритета по критерию $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$.

Для технологической верификации использовались расчеты термодинамических параметров различных марок угля – один из источников обоснования диапазонов входных параметров финансово-экономической модели.

Эмпирическая часть включает структурированный экспертный опрос представителей металлургических предприятий, угледобывающих компаний и инвестиционно-институционального блока. Экспертные оценки использовались для проверки достижимости пороговых значений УЕСЭ и уточнения параметров модели. Инвестиционная состоятельность выбранного сценария проверялась по показателям чистой приведенной стоимости, внутренней нормы доходности, свободного денежного потока фирмы, прибыли до вычета процентов, налогов и амортизации, а также по сроку окупаемости. Расчет показателей выполнен по стандартной методике оценки эффективности инвестиционных проектов; отдельно описаны процедура экспертного опроса и статистическая обработка взвешенных оценок.

Научная новизна исследования заключается в выявлении условий и механизма экономически обоснованного вовлечения бурых углей в металлургический передел при ограничениях, необходимых для достижения устойчивого развития, а также в разработке методического инструментария для оценки жизнеспособности модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия, основанной на использовании бурых углей. В рамках предлагаемой модели трансформация обеспечивается переходом угледобывающих и металлургических предприятий к глубокой переработке бурых углей методом газификации и последующим использованием продуктов переработки в металлургическом переделе. В отличие от существующих подходов, рассматривающих преимущественно отдельные технологические либо организационные аспекты низкоуглеродной трансформации, предложенная модель объединяет технологический переход, оценку экономической жизнеспособности и распределение эффекта между участниками производственной цепочки с учетом социально-региональных ограничений.

Положения, выносимые на защиту:

1) Разработана теоретическая модель трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий, рассматривающая это взаимодействие не как совокупность договорных поставок сырья, а как согласованную систему технологического, организационно-экономического и инвестиционно-ценового контуров, которая формируется в условиях перехода к низкоуглеродным решениям и достижения целей устойчивого развития. В отличие от ранее известных подходов, анализировавших либо организационные формы координации, либо технологические изменения изолированно, предложенная модель объединяет вопросы межфирменного взаимодействия, специфичности активов, распределения рисков и устойчивости производственной цепочки в единую исследовательскую конструкцию (С. 63; 67-73).

2) Предложена методика сравнительной оценки технологических продуктов, используемых в металлургическом переделе, на основе метрики условной единицы сопоставимой энергетической ценности (УЕСЭ), позволяющая сопоставлять коксующийся уголь, термококс и водород с учетом их энергетических, логистических, углеродных и иных операционных характеристик. Научная новизна методики состоит не в самом переводе стоимости в энергетическую единицу, а в совокупности четырех элементов: отраслевом составе компонентов, компонентной нормировке относительно традиционного коксо-доменного сценария (100 условных единиц), применении к разнородным продуктам угольно-металлургического взаимодействия и использовании УЕСЭ как первого этапа решения, предшествующего инженерной и инвестиционной верификации. Поэтому УЕСЭ не является вариантом общепринятых удельных стоимостных показателей энергетики или простого показателя стоимости единицы тепловой энергии, хотя использует общий принцип удельного сопоставления (С. 87-93; 98).

3) Определены и эмпирически верифицированы пороговые условия операционной жизнеспособности сценариев полной и частичной газификации бурых углей, при выполнении которых эти сценарии обеспечивают снижение углеродоемкости и углеродных рисков взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий. В отличие от ранее известных исследований, в которых реализуемость подобных решений оценивалась преимущественно качественно или в рамках отдельных технологических параметров, в диссертации предложен подход, сочетающий задание и расчет диапазонов пяти ключевых

параметров: ценового, логистического, сырьевого, трансакционного и технологического риска, – экспертную проверку их достижимости и формализованную оценку вероятности операционного паритета в логике целей устойчивого развития (С. 111-112; 131-134; 157-158).

4) Разработан двухэтапный методический подход к обоснованию сценария глубокой переработки бурых углей: на первом этапе термококсовый и водородный сценарии сопоставляются по операционному критерию УЕСЭ, на втором – выбранный термококсовый сценарий проверяется на инвестиционную состоятельность традиционными инструментами инвестиционного анализа. Предложенный подход позволяет оценивать, при каких объемах, ценах, капитальных (Capital Expenditure, CAPEX) и операционных (Operating Expenditure, OPEX) затратах, уровне загрузки, логистических условиях и механизме внутреннего ценообразования реализация выбранного проекта формирует положительный денежный поток и приемлемые показатели эффективности. В отличие от существующих подходов, ориентированных либо на локальную технологическую эффективность, либо на стандартную финансовую оценку без учета операционной сопоставимости альтернатив, предложенное решение объединяет операционную, инвестиционную и риск-аналитическую логику в единой модели принятия решений (С. 144-147; 180-183).

5) Предложен инструментарий согласования интересов участников угольного, газификационного и металлургического контуров, основанный на формировании экономически обоснованного диапазона цены термококса как промежуточного продукта глубокой переработки бурых углей. В отличие от ранее известных подходов, не дающих комплексного решения для распределения создаваемого экономического эффекта и инвестиционных рисков в низкоуглеродных промышленных цепочках, предложенный инструментарий учитывает вклад сторон в создание специфических активов, распределение выгод и рисков и тем самым обеспечивает институциональные условия для практической реализации устойчивой трансформации взаимодействия предприятий. Инструментарий разграничивает рассчитанный корпоративный распределительный эффект и потенциальные отраслевые и национальные эффекты (С. 185; 188-192; 224-225).

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о трансформации угольно-металлургического взаимодействия как об изменении системы хозяйственно-экономических отношений под воздействием

специфичности активов, технологической неопределенности и необходимости более глубокой межфирменной координации. В диссертации предложена логика совместного анализа технологий глубокой переработки бурых углей, низкоуглеродной трансформации металлургии и организационно-экономических форм взаимодействия предприятий.

На основе теории трансакционных издержек, ресурсной теории фирмы и теории заинтересованных сторон обосновано, что рост специфичности активов, капиталоемкости и технологической неопределенности требует более глубокой координации участников производственной цепочки, чем традиционный долгосрочный контракт поставки. Теоретический вклад состоит в установлении причинной связи между ростом специфичности активов, капиталоемкости и технологической неопределенности, с одной стороны, и требуемой глубиной координации участников производственной цепочки – с другой.

Практическая значимость работы состоит в разработке взаимосвязанного набора методик: метрики условной единицы сопоставимой энергетической ценности (УЕСЭ), сопоставляющей коксующийся уголь, термококс и водород не по натуральным или рыночным показателям, а по стоимости сопоставимой энергетической ценности с учетом логистических, технологических и регуляторных факторов; методики проверки пороговых условий жизнеспособности сценариев полной и частичной газификации бурых углей; двухэтапного подхода к обоснованию инвестиционного решения; методики формирования экономически обоснованной цены термококса как промежуточного продукта.

Особенности применения этих методик и выводы для практики сводятся к следующему: они применимы для предварительного отбора низкоуглеродных сценариев и проверки операционного паритета до начала капиталоемких расчетов и позволяют увязать результаты операционного сопоставления с финансовыми показателями при подготовке инвестиционных решений и бизнес-планов.

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования. Достоверность исследования обеспечивается применением общенаучных и специальных методов анализа, использованием трудов отечественных и зарубежных ученых, отраслевых отчетов и экспертных оценок, а также имитационного и сценарного моделирования. Сопоставление расчетов с экспертными оценками подтверждает обоснованность и воспроизводимость

основных выводов; дополнительная прикладная проверка выполнена на параметрах российско-китайского проекта глубокой переработки бурых углей. Результаты внедрены в деятельность Российско-Китайского инвестиционного фонда регионального развития: метрика УЕСЭ применена при сравнительной оценке ресурсной базы, включая месторождение бурых углей в Забайкальском крае, и при обосновании решения о реализации проекта. Материалы диссертации также используются кафедрой стратегического и инновационного развития факультета «Высшая школа управления» при преподавании учебной дисциплины «Инновационная стратегия фирмы: процессы, продукты, бизнес-модели» по направлению подготовки 27.04.05 «Инноватика» (магистерская программа «Разработка и внедрение цифровых решений»).

Теоретические и практические результаты исследования обсуждались и получили положительную оценку на конференциях, круглых столах и семинарах. Основные положения и результаты представлены и одобрены на следующих научных конференциях: на V Международной научно-практической конференции «Операционный и проектный менеджмент: стратегии и тенденции» (Москва, Финансовый университет, 18-19 апреля 2024 г.); на III Всероссийской научно-практической конференции «Финансовый менеджмент и трансформация бизнес-процессов» (Москва, Финансовый университет, 21 мая 2025 г.); на Международной научно-практической конференции «Технологическое предпринимательство в цифровом обществе» (TEDS-2025) (Москва, Финансовый университет, 3-4 декабря 2025 г.).

Материалы диссертации использовались при выполнении научно-исследовательских работ (далее – НИР) по следующим темам:

1. «Цифровизация промышленности как инструмент повышения эффективности производства» (Государственное задание, приказ Финуниверситета от 13.12.2023 № 3057/о) в части подготовки раздела «Анализ темпов цифровой трансформации в период введения санкционных ограничений и проектов поддержки цифровой трансформации в различных отраслях промышленности». Степень участия в НИР составляет 4,9% (1,0 п.л.).

2. «Стимулирование экспортного предпринимательства в условиях санкционных ограничений России» (Государственное задание, приказ Финуниверситета от 13.12.2023 № 3058/о) в части подготовки раздела «Разработка методических рекомендаций по использованию моделей выхода на внешние рынки в целях их развития и повышения показателей основной и

инновационной деятельности средних и малых производственных предприятий в условиях санкционных ограничений». Степень участия в НИР составляет 3,6% (0,62 п.л.).

Материалы диссертации используются в практической деятельности Российско-Китайского Инвестиционного Фонда Регионального Развития. Разработанная метрика УЕСЭ применена при сравнительной оценке ресурсной базы, включая буроугольное месторождение в Забайкальском крае, и при обосновании решения о реализации проекта глубокой переработки бурых углей. Практический эффект внедрения УЕСЭ состоит в повышении обоснованности выбора технологической траектории, снижении риска некорректного сопоставления разнородных продуктов и своевременном выявлении ограничений проекта. Методика формирует единый воспроизводимый подход к подготовке проектов глубокой переработки бурых углей для устойчивого развития угледобывающих и металлургических предприятий.

Материалы диссертации используются Кафедрой стратегического и инновационного развития Факультета «Высшая школа управления» Финансового университета в преподавании учебной дисциплины «Инновационная стратегия фирмы: процессы, продукты, бизнес-модели» по направлению подготовки 27.04.05 «Инноватика», магистерская программа «Разработка и внедрение цифровых решений».

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. Ключевые положения и результаты диссертации отражены в 8 работах общим объемом 10,04 п.л. (авторский объем 9,94 п.л.), опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, три главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, состоящий из 232 наименований, список иллюстративного материала, 10 приложений. Текст диссертации изложен на 294 страницах, включает 90 таблиц и 15 рисунков.

Глава 1
Взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий: трансформация в контексте устойчивого развития

1.1 Взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий: сущность, эволюция и современное состояние

Взаимодействие угледобывающего и металлургического предприятий традиционно описывается двумя способами: как отношения поставщика и потребителя стандартизированного сырья и как звено технологической цепочки с жесткими параметрами качества. Оба описания перестают работать, как только между добычей и переделом появляется стадия глубокой переработки. Ниже разбирается именно этот случай – предпосылки перехода от традиционной линейной производственной цепочки «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс» к более интегрированным формам взаимодействия, основанным на глубокой переработке бурых углей и использовании получаемых продуктов в металлургическом переделе. Такой подход позволяет рассматривать данное взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий не только как совокупность договоров поставки, но и как устойчивую производственно-экономическую систему, изменение которой требует согласования технологических, инвестиционных и организационных решений.

Взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий представляет собой исторически сложившуюся систему технологических, экономических и организационных связей. Это взаимодействие формировалось вокруг цепочки «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс», в которой уголь выполнял функции источника тепловой энергии и углеродистого восстановителя [104; 188; 204]. Углубление теоретических представлений о природе данной взаимосвязи произошло с развитием институциональной теории Д. Норта [59] и теории трансакционных издержек О. Уильямсона [92; 225], которые позволили объяснить формирование устойчивых межфирменных структур стремлением к минимизации затрат на заключение и исполнение

контрактов, особенно при крупных и долгосрочных вложениях в проектно-специализированные активы [128]. Чем выше специфичность активов и уровень неопределенности, тем сильнее стимулы к более тесной координации участников, позволяющей снизить риски оппортунистического поведения и постоянного пересмотра договорных условий [214; 215; 225].

В современном научном дискурсе взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий может рассматриваться как совокупность долгосрочных экономических, технологических и организационных отношений, направленных на согласование производственных планов, обеспечение качества сырья, распределение инвестиционных рисков и формирование устойчивой цепочки создания стоимости. Партнерские формы являются одним из возможных проявлений такого взаимодействия, однако не исчерпывают его содержания [89]. В условиях низкоуглеродной трансформации значение приобретает не столько юридическая форма сотрудничества, сколько глубина технологической и экономической координации между угольным, газификационным и металлургическим контурами. Под контуром участника в диссертации понимается совокупность участников (предприятий), производственных активов и связанных с ними денежных потоков, относящихся к одной производственной стадии цепочки создания стоимости. На уровне участников выделяются три контура: угольный (добыча и подготовка бурых углей), газификационный (глубокая переработка углей с производством термококса и/или водорода) и металлургический (использование термококса или водорода в металлургическом переделе).

Обзор литературы, на котором основаны приведенные в этой главе оценки степени разработанности проблемы, строился по следующим критериям отбора источников. В корпус включались работы, относящиеся как минимум к одному из пяти направлений, образующих предметное поле исследования: технологии глубокой переработки угля и декарбонизации металлургии; инвестиционная оценка капиталоемких промышленных проектов; теория межфирменной координации и организационных форм взаимодействия; устойчивое развитие и трансформация угольных регионов; промышленная политика и модернизация производственной базы. Приоритет отдавался рецензируемым публикациям в российских отраслевых и экономических изданиях и ведущих зарубежных журналах, а также аналитическим материалам международных отраслевых

организаций. В каждой работе фиксировалось, какие из трех линий анализа – технологическая (выбор и сопоставление продуктов переработки), инвестиционная (оценка проекта реализации сценария) и организационная (распределение эффекта и рисков между участниками) – рассматриваются совместно применительно к угольно-металлургической цепочке. В рассмотренном корпусе работ каждая из линий представлена развернуто, однако публикаций, в которых все три линии связаны в единую процедуру для взаимодействия угледобывающего, газификационного и металлургического контуров, не обнаружено. Именно на этом основании сделан вывод о несвязанности технологической, инвестиционной и организационной линий в существующей литературе; этот вывод относится к рассмотренному корпусу, выборка которого не претендует на статус исчерпывающего систематического обзора.

Традиционная схема взаимодействия, лежавшая в основе индустриального развития, представляет собой линейную производственную цепочку «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс» [82; 112; 204], что показано на рисунке 1. Для данной схемы характерна высокая степень технологической автономности отдельных переделов. Процессы коксования и доменной плавки, будучи связанными через качество кокса, остаются физически и управленчески обособленными. Уголь выступает в роли стандартизированного товара с заданными характеристиками: зольностью, содержанием серы, прочностными свойствами, – который может быть предметом договора поставки [47; 121]. Взаимодействие в рамках данной модели сводится к обеспечению надежности, своевременности и соответствия качества поставок требованиям металлургического предприятия. Экономические отношения строятся вокруг трансакции купли-продажи, а технологические риски и задачи повышения эффективности локализованы внутри каждого предприятия.

Иная система связей возникает при переходе к технологической схеме, основанной на глубокой переработке бурых углей методом газификации, что показано на рисунке 2. В этой конфигурации газификационный контур становится промежуточным звеном производственной цепочки между угледобывающим и металлургическим предприятиями, преобразуя сырьевой поток в технологические продукты, используемые в металлургическом переделе. В зависимости от выбранного технологического режима такая схема может быть ориентирована либо

на полную газификацию с получением синтез-газа и водорода, либо на частичную газификацию с производством термококса как углеродистого восстановителя [39]. В зарубежных сценариях декарбонизации такая логика нередко рассматривается наряду с водородной металлургией, электрометаллургией и технологиями улавливания углерода [135; 162; 175], однако в настоящем исследовании основное внимание уделяется экономической сопоставимости водородного и термококсового сценариев на базе глубокой переработки бурых углей.



Источник: составлено автором.
Рисунок 1 – Традиционная схема взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий



Источник: составлено автором.
Рисунок 2 – Трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе глубокой переработки бурых углей

Существенным преимуществом новой технологической схемы является возможность использования альтернативной сырьевой базы. Различные марки угля характеризуются неодинаковым выходом целевых и побочных продуктов при газификации. Исследования свидетельствуют о том, что технологии глубокой переработки позволяют снизить зависимость металлургических предприятий от дорогостоящих коксующихся углей и перейти к использованию более доступных бурых и энергетических углей, традиционно применяемых преимущественно в электроэнергетике [36; 80]. Это может привести к снижению затрат на сырье металлургического передела, в том числе за счет более низкой стоимости добычи бурых углей и особенностей их территориального размещения [35; 57; 95].

Глубокая технологическая взаимозависимость при этом обусловливает необходимость перехода от простой договорной координации к более сложным формам взаимодействия. Традиционных контрактных отношений становится недостаточно, поскольку проекты глубокой переработки бурых углей требуют согласования параметров сырья, графиков поставки, качества промежуточных продуктов, инвестиционных обязательств, механизмов ценообразования на промежуточный продукт внутри производственной цепочки и распределения возникающего экономического эффекта. Следовательно, предметом анализа становится не выбор одной заранее заданной организационной формы, а определение такой модели взаимодействия, которая позволяет согласовать технологические, инвестиционные и экономические интересы участников.

В научной литературе, посвященной взаимодействию угледобывающих и металлургических предприятий, выделяется несколько подходов к классификации организационных форм такого взаимодействия. Каждый из них акцентирует различные аспекты: правовой статус, экономическую функцию, глубину технологической интеграции или степень участия государства и региональных институтов. Систематизация научных публикаций и отраслевых материалов позволила обобщить разные подходы по ключевым параметрам, включая теоретическую основу, выделяемые формы, область применения и ограничения; они представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Подходы к классификации форм межфирменного взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий

Подход	Ключевой критерий	Выделяемые формы	Значение для настоящего исследования
Правовой [131; 160]	Юридический статус и тип договорных отношений	Договоры поставки и подряда; объединения юридических лиц; проектные соглашения; корпоративные организационные формы взаимодействия [151; 160]	Позволяет определить правовые рамки взаимодействия, но не раскрывает технологическое и экономическое содержание модели
Функционально-экономический [114; 225]	Роль в создании стоимости и распределении рисков	Рыночные контракты; долгосрочные договоры; стратегические альянсы; проектные формы; вертикальная интеграция; региональные кластеры [125; 131; 192]	Позволяет оценить, как распределяются инвестиции, риски и экономический эффект между участниками производственной цепочки
По степени технологической интеграции [113; 199]	Глубина технологической связанности переделов	Традиционная линейная модель «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс»; интегрированная производственная цепочка «газификация – получение термококса/водорода – металлургическое применение» [89; 112; 162]	Позволяет сопоставить традиционную и трансформированную модели взаимодействия с точки зрения технологической связанности
Институционально-региональный [140; 154; 172]	Роль государства, институтов развития и регионального контекста	Модели с доминирующим государственным участием; государственно-частные организационные формы взаимодействия; рыночные организационные формы взаимодействия; региональные промышленные системы [70; 154; 187]	Позволяет учитывать социальные последствия, занятость, налоговую базу и ограничения монопрофильных территорий

Источник: составлено автором.

Рассмотренные подходы к классификации форм взаимодействия фирм дополняют друг друга: правовой – рамками координации и ответственности [131; 160], функционально-экономический – распределением инвестиций и рисков [114; 225], технологический – изменением производственной логики [113; 199], институционально-региональный – ролью государства и последствиями для монопрофильных территорий [140; 154; 172]. Анализ синтезирует три последних подхода, связывая организационную форму с технологической трансформацией, рисками и региональными ограничениями.

В современной практике межфирменного взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий сформировался широкий спектр организационных форм. Для предприятий обеих отраслей выбор организационной формы взаимодействия становится важным элементом технологической трансформации, поскольку каждая форма ориентирована на решение определенных задач и сопряжена с характерными ограничениями [31].

В таблице 2 представлена систематизация известных в литературе и отраслевой практике организационных форм по комплексу параметров; она не претендует на статус новой классификации и служит рабочим инструментом для последующего анализа. Формы упорядочены по нарастанию глубины координации участников – от контрактных поставок к формам с общими инвестициями и распределением рисков, – что соответствует росту технологической связанности и специфичности активов по мере перехода от поставок сырья к промышленной эксплуатации глубокой переработки.

Таблица 2 – Классификация организационных форм взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий

Организационная форма	Степень интеграции	Механизм распределения рисков и инвестиций	Потенциал масштабирования	Ключевые ограничения, барьеры и риски
1	2	3	4	5
Контрактные формы [151; 225]	Низкая Договорная координация при сохранении автономии сторон	Риски и инвестиции разделены контрактом; каждая сторона отвечает за свое звено производственной цепочки	Высокий для стандартизированных продуктов с развитой рыночной инфраструктурой	Неспособность финансировать капиталоемкую технологическую трансформацию; риск оппортунизма; сложность долгосрочного согласования качества и цены [151; 225]
Стратегические альянсы [131; 148; 194]	Умеренная Сотрудничество в отдельных сферах при сохранении автономии	Риски и инвестиции по отдельным программам распределяются по соглашению сторон	Умеренный; ограничен рамками программ, НИОКР или пилотных проектов	Сложность коммерциализации; риски утечки компетенций; отсутствие устойчивых механизмов финансирования промышленной эксплуатации [148; 215]
Имущественно-интегрированные формы, включая совместное предприятие как частный случай [147; 155]	Высокая Объединение капитала, активов или управленческого контроля по отдельному проекту либо звену производственной цепочки	Инвестиции и риски распределяются в зависимости от вклада сторон, долей участия или внутренней модели управления	Высокий для проектов с четким кругом участников и значительной специфичностью активов	Сложность согласования стратегий; высокие издержки управления; риск конфликтов участников; необходимость прозрачного механизма внутренних цен [147; 152; 168]
Консорциум / проектная форма [41; 125]	Умеренная или высокая в рамках конкретного проекта	Инвестиции и риски распределяются согласно проектному или консорциальному соглашению	Низкий или умеренный для повторяющихся операций; высокий для разовых капиталоемких проектов	Высокие координационные издержки; проблема «безбилетника»; сложность выхода и перераспределения обязательств [148; 225]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Вертикальная интеграция [24; 147; 225]	Высокая Включение нескольких звеньев цепочки создания стоимости в единый периметр контроля	Риски и инвестиции концентрируются внутри интегрированной структуры	Высокий при наличии достаточного капитала и управленческой компетенции	Высокая капиталоемкость; снижение гибкости; риск неэффективного внутреннего распределения ресурсов [147; 225]
Региональные промышленные кластеры [173; 192]	Многоуровневая Комбинация производственных, инфраструктурных и институциональных связей [43; 173]	Смешанный механизм: риски распределяются между предприятиями, государством, институтами развития и инфраструктурными участниками	Высокий для регионов с развитой институциональной средой и поддержкой проектов модернизации	Риск бюрократизации; зависимость от государственной поддержки; сложность координации интересов множества участников [25; 173]

Источник: составлено автором.

Сопоставление систематизированных в таблице 2 организационных форм – без притязания на новую классификацию – показывает, что рост технологической связанности и специфичности активов повышает требования к организационной координации участников. Для традиционных поставок достаточно контрактной логики, тогда как НИОКР и пилотные испытания могут опираться на альянсовые и проектные формы; промышленная эксплуатация глубокой переработки бурых углей требует более устойчивого механизма согласования инвестиций, рисков, качества продукта и распределения экономического эффекта [158; 225].

Следовательно, выбор организационной конфигурации не должен рассматриваться как самостоятельная цель исследования. Он является производным от технологико-экономической логики конкретного проекта: масштаба, состава участников, характеристик ресурсной базы, логистических ограничений, требований металлургического передела и механизма внутреннего ценообразования.

С позиций ресурсной теории фирмы Дж. Барни [114] глубокая переработка бурых углей может рассматриваться как источник формирования совокупности проектных ресурсов и компетенций, необходимых для выпуска технологического продукта и его использования в металлургическом переделе. Такая совокупность формируется вследствие согласования доступа к буроугольной ресурсной базе, технологических параметров газификации, качества получаемого термококса или

водорода, логистической конфигурации, инвестиционного механизма и ценообразования на промежуточный продукт внутри производственной цепочки. В логике VRIN-анализа (Valuable, Rare, Inimitable, Non-Substitutable – ценность, редкость, неимитируемость, незаменимость) данная совокупность может обладать ценностью, относительной редкостью, трудностью имитации и ограниченной заменимостью в среднесрочной перспективе для углезависимых регионов. Эти свойства проявляются не автоматически, а при условии экономической жизнеспособности технологического сценария и координации участников.

VRIN-рамка исходно разработана для ресурсов отдельной фирмы [114], поэтому ее перенос на межфирменный проект требует обоснования. Ни один участник не владеет полным набором активов – буроугольная база, технология газификации и металлургический передел находятся в разных контурах. С позиций теории трансакционных издержек [92; 225] они образуют проектно-специализированный актив: ценность каждого компонента реализуется только в соединении с остальными, что создает стимулы к долгосрочной координации вместо разовых рыночных трансакций. Это и позволяет считать проектную совокупность единым объектом ресурсного анализа.

Критерии VRIN применимы к ней, поскольку относятся к свойствам ресурса относительно конкурентного окружения, а не к форме владения. Ценность определяется способностью выпускать продукт с заданными параметрами по конкурентной для металлургического потребителя стоимости; редкость – ограниченным числом регионов, где одновременно есть пригодная буроугольная база, логистическая связность и потребитель; неимитируемость – капиталоемкостью воспроизведения всей связки активов и соглашений, а не отдельной технологии; незаменимость – отсутствием в среднесрочной перспективе альтернативного способа вовлечения бурых углей в металлургический передел с сопоставимым экономическим результатом. Носитель этих свойств – согласованная конфигурация активов трех контуров, а не отдельный участник.

У переноса есть ограничения. Рента от такого ресурса распределяется между участниками, и ее устойчивость зависит от механизма распределения. Совокупность не имеет единого собственника и может распасться при выходе любого участника, поэтому ее неимитируемость и незаменимость

поддерживаются договорной конструкцией, а не самими активами. В таблице 3 приведены качественные оценки, которые относятся к среднесрочному горизонту и углезависимым регионам, то есть обосновывают целесообразность координации, а не доказывают конкурентное преимущество.

Таблица 3 – VRIN-характеристика совокупности проектных ресурсов и компетенций, обеспечивающих глубокую переработку бурых углей и использование технологического продукта в металлургическом переделе

Признак VRIN [114]	Содержание признака	Проявление признака в совокупности проектных ресурсов и компетенций
Ценность	Способность совокупности проектных ресурсов и компетенций создавать экономический эффект	Возможность вовлечения бурых углей в металлургическую цепочку создания стоимости и снижения зависимости от коксующихся марок угля [36]
Редкость	Ограниченность сочетания ресурсов и условий	Наличие пригодной буроугольной базы, логистического доступа и металлургического потребления в единой проектной конфигурации встречается не во всех регионах [80]
Трудность имитации	Сложность воспроизведения конкурентами	Имитация затруднена сочетанием сырьевой базы, технологии переработки, требований к качеству продукта, логистики и накопленных компетенций [171]
Незаменимость	Отсутствие равноценной замены в заданных условиях	В среднесрочной перспективе для угольнозависимых регионов термококсовый и водородный сценарии на базе бурых углей могут выступать альтернативой резкому отказу от угольной ресурсной базы [39]

Источник: составлено автором.

Анализ социально-экономических последствий функционирования сложившихся форм взаимодействия свидетельствует об их значении для монопрофильных территорий [63; 70; 187]. Закрытие или резкая реструктуризация одного из звеньев производственной цепочки без подготовленных мер ведет к росту безработицы, сокращению налоговой базы и усилению миграционного оттока [154; 187]. Традиционная модель, обеспечивая текущую стабильность, одновременно формирует экологические, технологические и социальные ограничения долгосрочного характера [70; 154; 187]. Поэтому трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий должна учитывать не только производственную эффективность, но и социально-региональные ограничения.

Рассмотренные формы взаимодействия различаются по глубине координации, распределению рисков и способности поддерживать капиталоемкую технологическую трансформацию. Поэтому их значение для

исследования состоит не в выборе одной универсальной организационной формы, а в выявлении условий, при которых взаимодействие угледобывающих и металлургических предприятий может перейти от поставочной логики к более интегрированному производственно-экономическому взаимодействию.

Потенциал трансформации угольно-металлургического взаимодействия определяется способностью участников согласовать технологический сценарий, инвестиционные обязательства, качество продуктов переработки, логистику и распределение экономического эффекта. Водородный и термококсовый сценарии на первом этапе сопоставляются как технологические альтернативы посредством методики сравнительной оценки технологических продуктов, используемых в металлургическом переделе, на основе метрики условной единицы сопоставимой энергетической ценности (УЕСЭ); на втором этапе выполняется инвестиционная оценка конкретного проекта реализации сценария, выбранного по результатам операционного отбора и обеспеченного проектными исходными данными.

Таким образом, традиционные формы взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий обеспечивали операционную устойчивость в рамках сложившейся коксо-доменной модели, однако оказываются недостаточными для технологической трансформации в рамках низкоуглеродного перехода. Предметом трансформации следует считать не выбор организационной формы, а согласование трех контуров – угольного, газификационного и металлургического – по технологическому сценарию, инвестиционным обязательствам и распределению эффекта; именно эта триада, а не пара «поставщик – потребитель», принимается далее за единицу анализа. Это обусловливает необходимость дальнейшего рассмотрения целей устойчивого развития как теоретической рамки оценки такой трансформации, включая ее экологические, экономические и социально-региональные последствия.

1.2 Цели устойчивого развития как теоретическая рамка трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Исследования современных траекторий трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий учитывают принципы

устойчивого развития [200]. В научной литературе можно выделить несколько условных направлений, фокусирующихся на различных аспектах этой проблемы: технологической модернизации, декарбонизации промышленности, региональных последствиях структурных изменений, инвестиционном обеспечении капиталоемких проектов [178] и организационной координации участников производственных цепочек [217]. Эти направления представлены в таблице А.1. Междисциплинарный характер проблемы отражен в работах [118; 199; 223]. Рассмотренные источники указывают не на исчерпанность угольной ресурсной базы как таковой, а на ограниченность традиционной линейной и углеродоемкой модели «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс» в рамках парадигмы устойчивого развития [127; 183; 210]. При этом в научном сообществе отсутствует единое мнение относительно оптимальной траектории трансформации. Дискуссия ведется вокруг выбора между радикальными и эволюционными технологическими путями, а также вокруг механизмов распределения высоких капитальных затрат и приоритетов в управлении социально-экономическими последствиями перехода для зависимых регионов [187]. На этой основе дальнейшее исследование направлено на синтез технологических, экономических и социально-региональных аспектов в модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия.

Сравнительный анализ международной и отечественной научной литературы выявляет различия стартовых условий и исследовательских акцентов в подходах к трансформации взаимодействия угледобывающей и металлургической отраслей. Эти различия обусловлены технологической базой, структурой энергобаланса [203], ролью угольных регионов в национальной экономике и приоритетами промышленной политики [105].

В международных исследованиях, особенно в работах Международного энергетического агентства и ведущих западных журналов, преобладает вектор на глубокую декарбонизацию металлургии и сокращение роли угля как сырья [116; 119; 136]. Акцент делается на развитии электрометаллургии на основе возобновляемых источников энергии и водородной металлургии с использованием зеленого водорода – одного из ключевых направлений технологической трансформации [135; 143; 146]. В зарубежной литературе

газификация рассматривается как переходный элемент промышленной трансформации [175]; в диссертации основу сопоставляемых сценариев предлагаемой модели образуют полная и частичная газификация бурых углей. Общий знаменатель этих работ – допущение, что коксо-доменный маршрут будет вытеснен, а не переоборудован. Из этого следует и то, какой вопрос в исследованиях не ставится: как быть с уже построенными активами и с регионами, для которых уголь остается основой занятости [149].

В российской научной литературе, публикуемой в таких изданиях, как «Горная промышленность», «Сталь», «Экономика региона», значительное внимание уделяется эволюционно-гибридному подходу [36; 39; 80]. Его суть заключается в трансформации угля из преимущественно топливного ресурса в сырье для глубокой переработки с сохранением и модернизацией существующей промышленной инфраструктуры [10; 74]. В центре внимания находятся технологии газификации бурых углей, позволяющие получать различные технологические продукты для последующего использования в энергетических целях и металлургическом переделе. В рамках такого подхода частичная газификация рассматривается как сценарий, при котором наряду с газообразными продуктами может быть получен термококс – технологический продукт глубокой переработки бурых углей, выполняющий функцию энергоресурса в металлургическом переделе [36; 63; 80]. При этом уголь рассматривается не только как источник климатических рисков, но и как ресурсная база для формирования новых производственных цепочек при условии изменения технологии его использования.

Основные различия в подходах систематизированы в таблице Б.1. Международная литература в большей степени отражает нормативно-целевой подход, задающий ориентир глубокой декарбонизации через сокращение роли углеродного сырья. Российская научная литература демонстрирует прагматично-адаптационный подход, направленный на поиск решений, учитывающих специфику национальной ресурсной базы, экономической структуры и социально-региональной проблематики [65; 172]. Сравнительный анализ подчеркивает, что российские исследования вносят вклад в глобальную дискуссию, предлагая модели трансформации для стран и регионов с высокой

ресурсной зависимостью, для которых немедленный отказ от угольной базы может быть социально и экономически затруднителен.

Несмотря на различие исследовательских фокусов, объединяющим фактором для международных и российских исследований трансформации угольно-металлургического взаимодействия выступает концепция устойчивого развития, предлагающая не готовый набор технологических решений, а систему ценностей и критериев для стратегического планирования [22]. Применительно к угледобывающим и металлургическим предприятиям ее значение состоит в необходимости одновременного учета экологических ограничений, экономической устойчивости и социально-региональных последствий технологической трансформации.

Теоретико-методологический фундамент современной концепции устойчивого развития был сформирован во второй половине XX века в результате осмысления нарастающих глобальных экологических и ресурсных ограничений. В научной литературе отправной точкой ее концептуализации принято считать доклад Римского клуба «Пределы роста» в 1972 г., подготовленный под руководством Д. Медоуза [179]. В этом исследовании на основе моделирования мировой динамики был системно аргументирован тезис о существовании физических границ экономического роста, обусловленных конечностью природных ресурсов и емкости экосистем.

Качественное развитие и консолидация концепции связаны с деятельностью Всемирной комиссии по окружающей среде и развитию. В ее докладе «Наше общее будущее» 1987 г. было представлено нормативное определение, ставшее классическим: «Устойчивое развитие – это развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, не ставя под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» [186, с. 43]. Эта формулировка интегрировала в единую систему три взаимосвязанных компонента: экологическую устойчивость, экономическое развитие и социальную справедливость [133].

Глобальная повестка в области устойчивого развития была конкретизирована в 2015 г. с принятием Генеральной Ассамблеей ООН резолюции «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [218]. Документ устанавливает систему из

17 Целей устойчивого развития (далее – ЦУР), представляющих собой комплекс взаимосвязанных ориентиров. Для тяжелой промышленности ЦУР формируют не абстрактную декларацию, а качественную рамку оценки стратегической трансформации, позволяющую соотнести технологические решения с экологическими, экономическими и социально-региональными последствиями, что показано на рисунке 3.



Источник: составлено автором по материалам [122].
Рисунок 3 – Цели устойчивого развития как рамка оценки трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Применительно к угледобывающим и металлургическим предприятиям релевантными выступают несколько ключевых целей, которые определяют как зоны риска, так и векторы модернизации. Основными для настоящего исследования целями являются ЦУР 7, 8, 9, 12 и 13; ЦУР 11 рассматривается как дополнительная рамка для анализа социально-региональных последствий трансформации в монопрофильных территориях. Эти ЦУР описаны в таблице 4.

Таблица 4 – Релевантные ЦУР для трансформации угледобывающих и металлургических предприятий

Группа ЦУР	Релевантные ЦУР	Роль в трансформации угольно-металлургического взаимодействия
Энергетическая и технологическая рамка	ЦУР 7 «Недорогостоящая и чистая энергия»; ЦУР 9 «Индустриализация, инновации и инфраструктура» [218]	Определяют необходимость технологической модернизации, развития инфраструктуры глубокой переработки бурых углей и поиска новых продуктов для использования в металлургическом переделе [200]
Экономическая и производственная рамка	ЦУР 8 «Достойная работа и экономический рост»; ЦУР 12 «Ответственное потребление и производство» [218]	Задают ориентиры экономической устойчивости, повышения эффективности использования ресурсов, сохранения занятости и формирования более рациональных производственных цепочек [122]
Климатическая рамка	ЦУР 13 «Борьба с изменением климата» [218]	Формирует ограничение, связанное с углеродной уязвимостью традиционной коксо-доменной модели и необходимостью учитывать климатические риски при выборе технологического сценария [5; 189; 207]
Социально-региональная рамка	ЦУР 11 «Устойчивые города и населенные пункты» [218]	Является дополнительной рамкой для монопрофильных территорий, где угледобывающие и металлургические предприятия выполняют градообразующую функцию [70; 79]

Источник: составлено автором.

Организационные формы взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий различаются по способности обеспечивать вклад в релевантные ЦУР. Контрактные формы взаимодействия позволяют закреплять требования к качеству сырья и его углеродной уязвимости, но ограничены при реализации капиталоемких технологических решений. Альянсы и консорциумы целесообразны на стадиях НИОКР и пилотирования, тогда как промышленная эксплуатация глубокой переработки бурых углей требует более устойчивой координации инвестиций, рисков, технологических параметров и распределения экономического эффекта. Интегрированные формы и региональные кластеры обладают более высоким потенциалом при наличии инфраструктурной базы, институциональной поддержки и экономической жизнеспособности выбранного сценария.

Для угледобывающих предприятий ЦУР 13 задает системное ограничение, а ЦУР 7, 8 и 9 – направления диверсификации и технологического обновления [98; 200]. Для металлургических предприятий ЦУР 9 и 12 связаны с модернизацией производственного процесса, а ЦУР 7 и 13 – с изменением энергетической и сырьевой базы. ЦУР 17 рассматривается как вспомогательная рамка координации, но не включается в основной набор целей, поскольку фокус исследования

сосредоточен на технологико-экономической трансформации угольно-металлургического взаимодействия [122].

Применительно к предмету диссертации принцип устойчивого развития приобретает особое значение. Сформированный в докладе Брундтланд [186] и развитый в последующих документах, он опирается на интеграцию трех взаимозависимых компонентов: экологического, экономического и социального. Для угледобывающих и металлургических предприятий стратегия, ориентированная исключительно на экономическую эффективность в ущерб экологическим требованиям, ведет к накоплению регуляторных и климатических рисков, угрожающих долгосрочной жизнеспособности производственной цепочки [159]. В то же время односторонние меры, направленные только на сокращение экологического воздействия, такие как закрытие производств без учета экономических и социальных последствий, могут быть социально неприемлемыми и экономически деструктивными для целых регионов [154]. Социально-экономические последствия технологической трансформации подробнее описаны в таблице В.1.

Следовательно, дальнейший анализ ориентирован на поиск решений, которые одновременно:

- снижают экологическую и углеродную уязвимость производственной цепочки; количественный экологический эффект определяется в заданной проектной границе на основе расчетных показателей [164; 165];

- обеспечивают долгосрочную экономическую целесообразность, инвестиционную реализуемость и создание новой стоимости [16; 94; 193];

- учитывают социально-региональные последствия трансформации, включая занятость, налоговую базу, переподготовку кадров и устойчивость монопрофильных территорий [154].

Названные критерии могут быть операционализированы через систему показателей, позволяющих оценивать степень соответствия предлагаемых стратегий целям устойчивого развития. В диссертационной работе они формируют интегрированную рамку экономической оценки технологических сценариев, в которой экологические, социальные и управленческие факторы задают измеримые условия применения модели.

Из экологических показателей в работе используется один – удельные выбросы CO_2 на единицу продукции в проектной границе [21; 115; 211]. Границы учета выбросов, применяемые в работе, соответствуют нормативному определению: «Углеродный след – общий объем выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, образующихся в ходе производства продукции либо в ходе оказания услуг, который включает в себя прямые выбросы парниковых газов (образуемые в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности), косвенные выбросы парниковых газов (связанные с потреблением электрической, тепловой энергии, иных ресурсов, используемых для обеспечения хозяйственной и иной деятельности и полученных от внешних объектов)…» [14, ст. 2]. Нормативное определение охватывает как прямые, так и косвенные выбросы, поэтому применяемый в работе расчет в проектной границе следует рассматривать как его частичную операционализацию. Полный углеродный баланс производственной цепочки в задачи исследования не входит, и это ограничение принципиальное: без данных промышленной эксплуатации оценка полного жизненного цикла дала бы точность хуже разброса исходных допущений. Экономический блок сведен к чистой приведенной стоимости, внутренней норме доходности и дисконтированному сроку окупаемости; к ним добавляются внутренняя цена технологического продукта для металлургического передела и распределение экономического эффекта между участниками [23; 56]. Социальные показатели – занятость и налоговая база территории – заданы как рамка и раскрываются количественно только при адаптации модели к параметрам конкретного региона [166].

Таким образом, критерии устойчивого развития формируют рамку последующей экономической оценки технологических сценариев. Они позволяют определить, какие экологические, экономические и социально-региональные ограничения должны быть учтены при сопоставлении полной газификации бурых углей с получением водорода и частичной газификации бурых углей с производством термококса.

Адаптация угледобывающей и металлургической промышленности к требованиям устойчивого развития предполагает преодоление ряда противоречий. Эти противоречия формируют взаимосвязанный комплекс проблем, анализ которых целесообразно структурировать по трем ключевым

направлениям, соответствующим компонентам концепции устойчивого развития; они отражены в таблице 5.

Таблица 5 – Структура системных вызовов для угледобывающих и металлургических предприятий в контексте устойчивого развития

Сфера вызова	Содержание и ключевые противоречия	Порождаемые риски и ограничения
Эколого-климатическая	Высокая углеродоемкость технологических циклов в условиях глобальных целей декарбонизации Высокая зависимость от коксующегося угля и углеродоемких технологических процессов [116; 207].	Рост чувствительности к углеродному регулированию; риск обесценения активов, не соответствующих новым требованиям; сокращение потенциала привлечения инвестиций; снижение долгосрочной конкурентоспособности [123; 197; 198]
Экономико-технологическая	Устойчивая технологическая взаимосвязь отраслей, базирующаяся на энерго- и ресурсоемкой модели Зависимость издержек от качества сырья, логистики и ценовой конъюнктуры [82; 204]	Изменчивость финансовых показателей; технологическая инерция; сложность независимой модернизации отдельных звеньев; барьеры перехода к альтернативным технологическим траекториям [89; 130; 199]
Социально-региональная	Градообразующая функция предприятий в монопрофильных территориях Социально-экономическая зависимость локальных сообществ от устойчивости производственного комплекса [70; 154; 187].	Социальные издержки структурных преобразований; риски роста безработицы и миграционного оттока; нарушение принципа справедливого перехода при реализации климатической политики без сопутствующих мер по диверсификации экономики и переподготовке занятых [154; 187; 212]

Источник: составлено автором.

Три группы вызовов сцеплены между собой. Ужесточение углеродного регулирования поднимает стоимость капитала для угольных активов и таким образом сокращает возможности той самой модернизации, которой требует климатическая повестка [107; 108; 123]. Адаптация – технологическая реструктуризация или сокращение деятельности – актуализирует социально-региональные проблемы [154]. Закрытие производства снимает экологическую проблему и немедленно создает социальную. Решение в одной плоскости почти всегда ухудшает положение в другой [212]. Это требует стратегий трансформации, учитывающих экологические, экономические и социальные аспекты. Такие стратегии должны менять технологическую и экономическую взаимозависимость угледобывающих и металлургических предприятий и искать новое устойчивое равновесие для обеих отраслей и регионов [206].

Первоочередным, но недостаточным направлением являются оптимизационные меры в рамках сложившихся технологических процессов [34; 121; 163]. Снижая удельные издержки и повышая ресурсоэффективность, они не

устраняют зависимость производственной цепочки от традиционного технологического ядра и потому не являются исчерпывающим ответом на вызовы устойчивого развития. В таблице 6 представлены общие направления перехода к устойчивому развитию.

Таблица 6 – Общие направления перехода к устойчивому развитию и их ограничения

Направление модернизации	Основное содержание и инструменты	Ожидаемый эффект	Ограничения и недостаточность
Повышение ресурсо-эффективности	Внедрение наилучших доступных технологий, автоматизация процессов, системы энергоменеджмента [34; 87; 121]	Снижение удельного расхода топлива, энергии и воды; рост производительности; сокращение переменных издержек	Не затрагивает фундаментальную углеродоемкость технологического ядра; эффект имеет пределы, определяемые физико-химическими характеристиками процессов
Внедрение принципов циркулярной экономики	Рециклинг техногенных отходов, утилизация вторичных энергетических ресурсов, замкнутые циклы водопользования [230]	Снижение объема отходов, получение дополнительной товарной продукции, сокращение экологического следа	Решает проблемы, сопутствующие основному производству, но не меняет ключевую сырьевую и технологическую базу взаимодействия
Повышение качества сырья и логистической эффективности	Оптимизация поставок, улучшение сортировки и подготовки сырья, снижение транспортных издержек [35]	Снижение себестоимости, повышение стабильности производственного процесса, уменьшение операционных рисков	Сохраняет зависимость от традиционной линейной схемы и не формирует новых технологических продуктов для металлургического передела
Точечная модернизация производствен-ных переделов [99]	Обновление отдельных агрегатов, повышение энергоэффективности, снижение потерь [82; 228]	Улучшение производственных показателей и частичное снижение экологической нагрузки	Не обеспечивает системной трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий
Глубокая переработка бурых углей методом газификации	Формирование новой промежуточной стадии глубокой переработки между добычей угля и металлургическим переделом; получение водорода или термококса в зависимости от выбранного сценария [38; 80]	Создание новых продуктов переработки, снижение сырьевой и инвестиционной уязвимости, расширение возможностей технологической трансформации	Требует капитальных вложений, согласования интересов участников, оценки экономической жизнеспособности сценария и выбора устойчивой модели взаимодействия

Источник: составлено автором.

Сопоставление оптимизационных направлений показывает, что повышение ресурсоэффективности, внедрение элементов циркулярной экономики и точечная модернизация производственных переделов необходимы, но недостаточны для долгосрочной трансформации угольно-металлургического взаимодействия. Они позволяют смягчить отдельные риски, но не меняют самой логики производственной связи между добычей угля и металлургическим переделом. В отличие от них газификация бурых углей формирует новую промежуточную

производственную стадию, на которой уголь перестает быть только объектом поставки и становится сырьевой базой для получения продуктов, потенциально применимых в металлургии.

При этом ЦУР сами по себе не определяют выбор конкретной технологии. Они задают систему критериев, в рамках которой должны оцениваться возможные сценарии [224]. Для настоящего исследования это означает необходимость сопоставления двух технологических альтернатив: полной газификации бурых углей с получением водорода и частичной газификации бурых углей с производством термококса как продукта их глубокой переработки. До проведения специальной оценки данные сценарии рассматриваются как равноправные направления трансформации. ЦУР применимы к угольно-металлургическому взаимодействию не как набор деклараций, а как система проверяемых критериев выбора технологического сценария, и оптимизационные меры внутри коксо-доменной модели не заменяют смены самой производственной связи; именно это разграничение обосновывает переход к анализу технологических решений.

1.3 Технологические решения и организационно-экономические предпосылки трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Традиционная линейная модель «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс» сохраняет операционную значимость, но в рамках низкоуглеродного перехода сталкивается с технологическими, экономическими, инфраструктурными и социально-региональными ограничениями [42; 227]. Поэтому дальнейший анализ сосредоточен на технологических и организационно-экономических траекториях, способных изменить логику взаимодействия между ресурсной базой, переработкой угля и металлургическим потреблением.

Базовая классификация технологических решений представлена в таблице 7, а детализированная систематизация решений по переработке угля и производству металлургической продукции вынесена в приложения Д и Е. Анкета экспертного опроса и технологическая схема базового проекта переработки бурого угля приведены в приложениях Ж и И. В рамках настоящего

параграфа эти решения рассматриваются не как исчерпывающий перечень технологий декарбонизации, а как поле возможных технологических решений, из которого для целей диссертации отбираются сценарии, непосредственно связанные с глубокой переработкой бурых углей методом газификации. Такой выбор обусловлен тем, что бурые угли обладают значительной ресурсной базой, ограниченной пригодностью для традиционного коксования и потенциалом вовлечения в новые производственные цепочки.

Технологические решения различаются тем, где именно они вмешиваются в производственную цепочку [86]. Первая группа не трогает ее структуру вовсе и повышает эффективность традиционных углеродоемких процессов: модернизацией доменных печей, улучшением качества сырья, снижением удельного расхода топлива и внедрением энергоэффективных режимов [82; 93; 228]. Эти меры снижают издержки и частично уменьшают углеродную уязвимость, но не меняют зависимость передела от традиционной сырьевой схемы [72]. Организационно-управленческие аспекты раскрываются в исследованиях управления технологическими инновациями [86] и инновационной активности российских промышленных компаний [48; 61].

Вторая заменяет металлургическое ядро целиком – это водородная металлургия и электрометаллургия [73; 222]. В зарубежных исследованиях эти направления рассматриваются как траектория глубокой декарбонизации промышленности, однако их реализация требует масштабной инфраструктуры производства, транспортировки и использования водорода, а также адаптации металлургического контура [111; 137; 221]. Для настоящего исследования эта группа важна прежде всего как технологический ориентир для сценария полной газификации бурых углей с получением водорода.

Третья группа – рассматриваемая в работе – встраивает новую стадию между добычей и переделом, оставляя оба конца цепочки на месте: газификация, термическая переработка угля и получение новых продуктов. В ряде зарубежных сценариев газификация рассматривается как переходный элемент промышленной декарбонизации [157; 213]. В настоящем исследовании полная и частичная газификация бурых углей составляют основу сопоставляемых сценариев; анализ охватывает их экономические последствия для угольно-

металлургического взаимодействия. Реализация таких решений сопряжена с коммерциализацией технологических инноваций [85], выбором между пионерными и имитационными стратегиями внедрения [215], а также цифровой трансформацией промышленных предприятий [28].

Финансовый показатель на этой стадии бесполезен: ни по одной из технологий нет проектной сметы, а сопоставлять технологии нужно уже сейчас. Поэтому оценка качественная, и ее единственная задача – отсеять заведомо неподходящие варианты до расчетов [169]. В качестве оценочной шкалы используется трехуровневая порядковая качественная шкала: 3 – высокая степень соответствия критерию, 2 – средняя степень соответствия, 1 – низкая степень соответствия.

Оценка производилась по трем группам критериев. Экологический критерий отвечает на один вопрос – снижает ли решение углеродную уязвимость передела; сюда же отнесены ресурсоэффективность и соответствие ЦУР 12 и ЦУР 13. Экономический отсеивает варианты, для которых государственная поддержка служит условием существования; в нем учитываются капиталоемкость, операционная жизнеспособность сценария, инфраструктурные ограничения и соответствие ЦУР 8, ЦУР 9 и ЦУР 12. Социальный критерий – самый грубый из трех: он различает технологии, сохраняющие занятость, и технологии, ее ликвидирующие, а также учитывает потребность в переподготовке кадров и соответствие ЦУР 8 и ЦУР 11 [187]. Приведенная в таблице 7 оценка носит качественный экспертный характер: она отражает авторское обобщение источников, рассмотренных в приложениях Д и Е, а не результат применения формализованных критериев и весов, и не предназначена для воспроизведения в виде расчета. Из этого следуют ограничения: оценки по разным критериям не подлежат суммированию и ранжированию технологий по итоговому баллу; различие в одну ступень шкалы не означает доказанного преимущества; оценки чувствительны к составу рассмотренных источников и к региональному контексту и могут быть пересмотрены по мере накопления промышленных данных. Задача таблицы 7 ограничена предварительным отбором направлений для последующей количественной проверки и не подменяет последующую экономическую проверку технологических сценариев [208].

Таблица 7 – Сводная оценка технологий трансформации в условиях низкоуглеродного перехода по компонентам устойчивого развития

Технология	Эколо-гия	Эконо-мика	Соци-ум	Ключевые ограничения и недостатки
1	2	3	4	5
Переработка угля				
Ультрасверхкритические параметры паросилового цикла	2	3	2	Повышают эффективность использования угля, но остаются в рамках углеродоемкой модели и не меняют логику угольно-металлургического взаимодействия [195]
Технологии снижения углеродной уязвимости угольной генерации	3	1	2	В зарубежной литературе рассматривается как элемент декарбонизации, однако характеризуется высокими капитальными затратами (CAPEX) и операционными затратами (OPEX), энергетическим штрафом и зависимостью от субсидий [144; 175]
Парогазовый цикл с внутрицикловой газификацией угля (IGCC) с улавливанием CO_2	3	2	2	Обладает экологическим потенциалом, но отличается высокой капиталоемкостью, технологической сложностью и ограниченной применимостью для угольно-металлургического взаимодействия [157; 175]
Углехимические технологии переработки угля в жидкое топливо и газообразные продукты (CTL/CTG)	2	2	2	Требует значительных капитальных вложений, ориентируется преимущественно на углехимию и энергетику, не имеет прямой связи с металлургическим переделом [101; 231]
Низкотемпературный пиролиз	2	2	3	Может быть применим как региональное решение, но не обеспечивает системной трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий [38; 46]
Полная газификация бурых углей с получением водорода	3	2	2	Требует создания инфраструктуры получения, транспортировки и использования водорода; характеризуется высокой капиталоемкостью и значительной потребностью в адаптации металлургического контура [157; 171]
Частичная газификация бурых углей с производством термококса	2	3	3	Сохраняет связь с буроугольной ресурсной базой и существующей промышленной инфраструктурой, но требует оценки качества сырья, логистики, внутренней цены и экономической жизнеспособности технологического сценария [36; 39; 80]
Черная металлургия				
Модернизация доменного процесса	3	1	2	Модернизация доменного процесса рассматривается как направление снижения углеродной уязвимости; уровень затрат и промышленная применимость зависят от конкретного варианта модернизации [82; 162]
Доменная печь с рециркуляцией колошникового газа (TGR-BF), кислородное дутье и рециркуляция газов	2	2	3	Может рассматриваться как переходная технология, но не устраняет зависимость от традиционного технологического ядра [188; 196]

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
Повышение энергоэффективности доменного и коксохимического переделов	2	3	3	Дает операционный эффект и снижает удельные издержки, но не обеспечивает глубокой технологической трансформации [82; 228]
Прямое восстановление железа с использованием водорода (H_2-DRI)	3	2	1	Требует развитой водородной инфраструктуры, значительных инвестиций и глубокой перестройки металлургического контура [161; 190; 221]
Электродуговые печи на низкоуглеродной электроэнергии	3	2	2	Применимы при наличии доступной низкоуглеродной электроэнергии и соответствующей сырьевой базы, но не решают напрямую задачу вовлечения бурых углей в новую производственную цепочку [124; 162]

Источник: составлено автором на основе анализа таблиц Д.1 и Е.1 и критериев устойчивого развития, рассмотренных в параграфе 1.2.

Качественное обобщение в таблице 7 дает основания полагать, что большинство технологических решений устраняет лишь отдельные ограничения традиционной угольно-металлургической цепочки [87].

Технологии глубокой декарбонизации экологически результативнее, но капиталоемки и требуют специализированной инфраструктуры [117]. Водородные решения отвечают долгосрочным ориентирам перехода, однако предполагают инфраструктуру производства, очистки, хранения и транспортировки водорода и адаптацию металлургического контура. Экологический результат водорода из продуктов газификации бурых углей определяется энергобалансом комплекса и обращением с CO_2. Выбор сценария должен учитывать экологический потенциал, капиталоемкость, инфраструктурную обеспеченность и промышленную реализуемость.

Поскольку качественная оценка в таблице 7 не может служить самостоятельным основанием для выбора, для перехода от описательного обзора к обоснованному отбору сценариев технологические решения дополнительно сопоставлены по выполняемой функции, стадии зрелости, структуре затрат, углеродному эффекту, инфраструктурным требованиям и соответствию предмету настоящего исследования; они представлены в таблице 8. Числовой уровень технологической готовности (Technology Readiness Level, TRL) не присваивается в тех случаях, когда зрелость зависит от конкретной конфигурации интегрированного комплекса. Межотраслевой характер

рассматриваемых решений соответствует нормативному понятию сквозной технологии: «сквозная технология – перспективная наукоемкая технология (направление) межотраслевого значения, обеспечивающая создание высокотехнологичной продукции и (или) внедрение технологических инноваций, оказывающая существенное влияние на экономическое развитие путем изменения рынков и (или) содействия формированию новых рынков» [13, ст. 3]. Газификация угля отвечает признакам этого понятия, поскольку связывает угледобывающий и металлургический переделы и формирует новый продуктовый сегмент, что дополнительно обосновывает включение технологических решений в единую систематизацию.

Таблица 8 – Систематизация технологических решений трансформации металлургического передела

Технологическое решение	Технологическая база и статус промышленной зрелости	Экономика, выбросы и инфраструктура	Ограничение и роль в исследовании
1	2	3	4
Классическая коксо-доменная схема	Кокс из коксующегося угля Промышленный референс [145; 162; 205]	Действующие активы; база для сопоставления операционных затрат Базовый уровень Сложившаяся угольная, коксохимическая и металлургическая инфраструктура [93; 141]	Зависимость от коксующихся марок угля и высокая углеродная уязвимость Сохраняется как базовый сценарий, нормированный к 100 у.е.
Повышение энергоэффективности действующей коксо-доменной схемы	Кокс и дополнительные энергоносители Промышленно применяемые мероприятия [82]	Преимущественно дополнительный CAPEX действующих предприятий; величина проектно специфична Снижение удельных затрат и выбросов без смены базовой технологической цепочки Действующая инфраструктура [188; 196; 228]	Не меняет принципиальную зависимость металлургического передела от традиционной сырьевой схемы Учитывается как контекст и элемент базового сценария, но не как самостоятельное технологическое решение по вовлечению бурых углей
Коксо-доменная схема с улавливанием и хранением / улавливанием, использованием и хранением углерода (CCS/CCUS)	Кокс; улавливание, транспортировка и хранение CO_2 Зрелость определяется полной цепочкой конкретного проекта	Дополнительные затраты на улавливание, компримирование, транспортировка и хранение CO_2 Потенциальное снижение прямых выбросов; результат зависит от полноты охвата и энергии на улавливание Сеть транспортировки CO_2 и доступное хранилище [144; 175; 196]	Высокая инфраструктурная зависимость и необходимость отдельной оценки полной цепочки [164; 165] Рассматривается как один из вариантов технологии снижения углеродной уязвимости, но не как основной сценарий диссертации

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4
Прямое восстановление железа водородом с последующей плавкой в электродуговой печи (H_2-DRI–EAF) на внешнем низкоуглеродном водороде	Водород; электроэнергия Зависит от доступности промышленного водорода и адаптированного металлургического комплекса [142; 146]	Новый комплекс DRI/EAF; затраты чувствительны к цене водорода и электроэнергии Потенциально существенное снижение при низкоуглеродном происхождении водорода и электроэнергии [126; 162; 221] Производство, хранение и транспортирование водорода; электросетевые мощности	Не вовлекает буроугольную ресурсную базу и требует иной производственной конфигурации Используется как внешний технологический ориентир; не включается в прямое проектное сопоставление
Электродуговая металлургия на ломе	Электроэнергия и металлический лом Промышленная технология	Затраты определяются стоимостью электроэнергии, лома и модернизацией мощностей Зависит от углеродоемкости электроэнергии и качества лома Электросетевые мощности и устойчивый рынок лома [135; 162; 172]	Ограничена доступностью лома и не решает задачу трансформации угольного контура Исключается из дальнейшего анализа как находящаяся вне предмета исследования
Полная газификация бурых углей с получением водорода	Водород из продуктов газификации Интегрированная конфигурация требует проектной инженерной верификации [157; 171; 213]	Новый газификационный комплекс с системами газоочистки и получения H_2 Зависит от энергетической эффективности, очистки газа, отделения CO_2 и способа обращения с ним Кислородное хозяйство, газоочистка, водородная инфраструктура и адаптированный металлургический потребитель [52; 171; 232]	Высокая инфраструктурная и операционная неопределенность; получение водорода из угля само по себе не гарантирует низкоуглеродность Включается в операционное сопоставление и сохраняется как потенциальный технологический элемент долгосрочной низкоуглеродной траектории
Частичная газификация бурых углей с производством термококса	Термококс Зрелость и пригодность подтверждаются для конкретного сырья и металлургического применения [36; 39; 80]	Инвестиционная оценка выполняется для выбранного базового проекта; операционные компоненты раскрываются через УЕСЭ В расчетной границе проекта направление эффекта определяется переделом и логистикой; полная оценка жизненного цикла (LCA) не заявляется [164; 165] Существующая железнодорожная инфраструктура и система контроля качества продукта [35; 96]	Необходимы подтверждение реакционной способности и прочности, а также механизм координации и внутреннего ценообразования Включается как основной кандидат для инвестиционной апробации после операционного отбора

Источник: составлено автором.

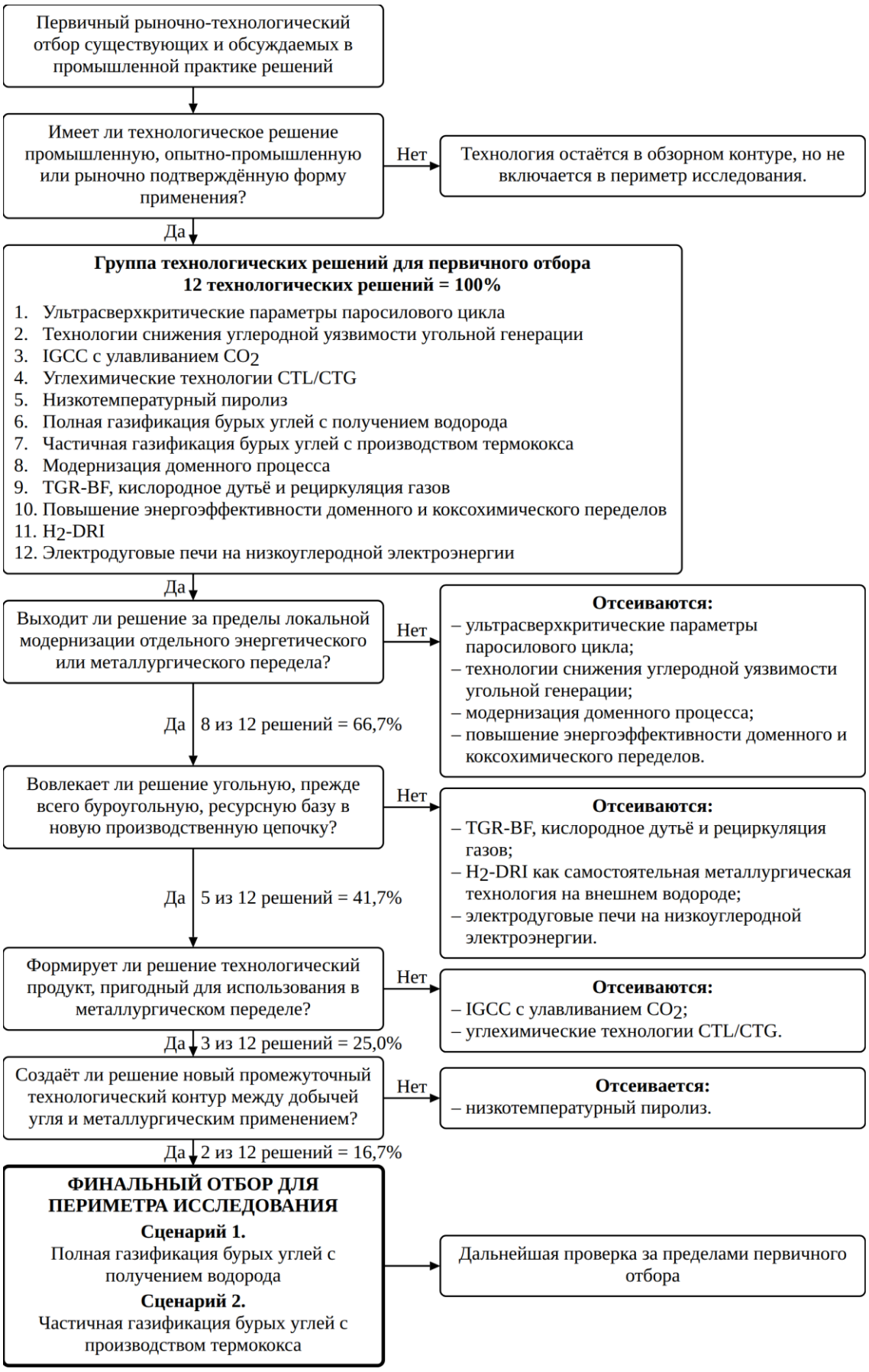
Систематизация не утверждает универсального превосходства одной технологии. Она ограничивает множество альтернатив в соответствии с предметом работы: количественно сопоставляются только два технологических сценария, непосредственно основанных на глубокой переработке бурых углей, – полная газификация с получением водорода и частичная газификация с производством термококса. Водородный сценарий сохраняется как потенциальный

технологический элемент долгосрочной низкоуглеродной траектории и проверяется на операционном уровне; инвестиционная оценка выполняется для конкретного проекта реализации сценария, выбранного по результатам этого сопоставления.

Для перехода от общей технологической систематизации к двум сценариям, непосредственно входящим в периметр настоящего исследования, использован последовательный первичный рыночно-технологический отбор, что показано на рисунке 4. Его задача состояла не в ранжировании всех технологий по степени перспективности, а в отсечении решений, которые не соответствуют предмету настоящего исследования: трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе глубокой переработки бурых углей.

Первичным условием включения технологии в периметр анализа являлось наличие промышленной, опытно-промышленной или рыночно подтвержденной формы применения. Решения, не имеющие такой формы, сохраняются в обзорной части, однако не используются в качестве базовых сценариев дальнейшей расчетной верификации и экспертной валидации достижимости условий. Далее технологии последовательно оценивались по четырем содержательным фильтрам: выход за пределы локальной модернизации отдельного энергетического или металлургического передела; вовлечение угольной, прежде всего буроугольной, ресурсной базы в новую производственную цепочку; формирование технологического продукта, пригодного для использования в металлургическом переделе; создание новой промежуточной производственной стадии глубокой переработки между добычей угля и металлургическим применением.

Представленный алгоритм показывает, что из двенадцати технологических решений, включенных в первичную группу анализа, часть отсеивается уже на этапе проверки соответствия предмету исследования. Ультрасверхкритические параметры паросилового цикла, технологии снижения углеродной уязвимости угольной генерации, модернизация доменного процесса, а также повышение энергоэффективности доменного и коксохимического переделов имеют значение для локальной технологической модернизации, но не формируют новой производственной цепочки между угольным и металлургическим контурами. По этой причине они не включаются в периметр дальнейшего сценарного сопоставления.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4 – Алгоритм первичного рыночно-технологического отбора технологических решений для периметра исследования

Следующая группа решений отсеивается, поскольку не предполагает прямого вовлечения буроугольной ресурсной базы в новую производственную цепочку. К таким решениям относятся доменная печь с рециркуляцией колошникового газа (Top Gas Recycling Blast Furnace, TGR-BF), кислородное дутье и рециркуляция газов, H_2-DRI (Direct Reduced Iron – железо прямого восстановления) как самостоятельная металлургическая технология на внешнем водороде, а также электродуговые печи на низкоуглеродной электроэнергии. Эти направления могут играть значимую роль в долгосрочной трансформации металлургии, однако они не решают исследовательскую задачу вовлечения бурых углей в новую угольно-металлургическую производственную цепочку.

Дополнительный фильтр связан с формированием продукта, пригодного для металлургического применения. Парогазовый цикл с внутрицикловой газификацией угля (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) с улавливанием CO_2 и углехимические технологии переработки угля в жидкое топливо и синтез-газ (Coal-to-Liquids / Coal-to-Gas, CTL/CTG) могут использовать угольную ресурсную базу, но преимущественно ориентированы на энергетический или углехимический результат и не создают прямого технологического продукта для металлургического передела. Низкотемпературный пиролиз, в свою очередь, может представляться как региональное решение переработки угля, однако в рассматриваемой постановке не формирует полноценной промежуточной производственной стадии глубокой переработки между добычей угля и металлургическим применением.

По итогам первичного отбора в периметре исследования остаются два технологических сценария: полная газификация бурых углей с получением водорода и частичная газификация бурых углей с производством термококса. Рисунок 4 формализует переход от широкого перечня технологических решений к двум сценариям, которые далее рассматриваются как равноправные альтернативы до проведения расчетной верификации, экспертной валидации и инвестиционной оценки. Такая последовательность исключает преждевременный выбор технологии только на основании ее общей экологической привлекательности или распространенности в международной повестке и обеспечивает связь технологического отбора с предметом настоящей диссертации – трансформацией угольно-металлургического взаимодействия.

В этом контексте полная газификация бурых углей с получением водорода и частичная газификация бурых углей с производством термококса выделяются как два технологических сценария, непосредственно связанных с предметом настоящего исследования [64]. Первый сценарий ориентирован на более глубокую перестройку производственной цепочки и требует развитой водородной инфраструктуры. Второй сценарий в большей степени связан с вовлечением бурых углей в металлургический передел через производство термококса как технологического продукта, выполняющего функцию энергоресурса. При этом приведенная качественная оценка не является основанием для окончательного выбора сценария, а служит предварительной рамкой для дальнейшего сопоставления полной и частичной газификации.

Исходя из поставленных во введении цели и задач в настоящем исследовании выделяются два альтернативных технологических сценария.

Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода. В данной конфигурации бурый уголь перерабатывается с получением водорода как целевого газообразного продукта, который может быть использован как энергоресурс для последующего применения в промышленности и металлургическом переделе. Такой сценарий предполагает глубокую технологическую перестройку производственной цепочки, высокую капиталоемкость, развитие специализированной инфраструктуры и существенную адаптацию металлургического контура. Его ключевым преимуществом является возможность формирования новой технологической базы, менее зависимой от традиционной коксо-доменной схемы. Вместе с тем его реализация связана с высокой неопределенностью, поскольку требует не только создания газификационного контура, но и решения вопросов транспортировки, хранения, использования водорода и согласования долгосрочных инвестиционных обязательств.

Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса. В такой конфигурации глубокая переработка бурого угля ориентирована на получение термококса как технологического продукта, выполняющего функцию энергоресурса в металлургическом переделе, а также сопутствующих газообразных продуктов, которые могут использоваться для энергетических нужд проекта. Этот сценарий предполагает иную структуру

капитальных затрат, более тесную связь с существующей металлургической инфраструктурой и повышенную значимость логистических условий. Его ключевой особенностью является возможность более постепенной технологической трансформации при сохранении связи с буроугольной ресурсной базой и действующими промышленными компетенциями.

Оба сценария в настоящем параграфе рассматриваются как равноправные альтернативные технологические сценарии. Их преимущества и ограничения не являются основанием для предварительного выбора, а формируют исследовательскую рамку для последующей экономической оценки. До проведения расчетной верификации и экспертной валидации ни один из сценариев не может быть признан предпочтительным исключительно на основании качественного анализа.

Для корректного сопоставления полной и частичной газификации бурых углей необходимо раскрыть не только конечный продукт каждого сценария, но и различие технологической логики, состава переделов, инфраструктурных требований и ограничений промышленного применения. Оба сценария исходят из одной ресурсной предпосылки – вовлечения бурых углей, ограниченно пригодных для традиционного коксования, в производственную цепочку с большей глубиной переработки. Однако степень преобразования угля, характер получаемого продукта и требования к металлургическому потребителю в этих сценариях принципиально различаются.

Полная газификация бурых углей представляет собой технологический сценарий, при котором органическая часть угля максимально переводится в газовую фазу. В общем виде цепочка включает подготовку сырья, сушку и усреднение, подачу угля в газификационный реактор, взаимодействие с кислородом, паром или парокислородной смесью, получение сырого синтез-газа, его охлаждение, очистку от пыли, сернистых соединений, смолистых компонентов и иных примесей, последующую конверсию CO с увеличением доли водорода, выделение водорода, его компримирование, хранение и подачу для промышленного или металлургического применения [102; 157]. Технологический смысл данного сценария состоит в том, что бурый уголь перестает быть твердым углеродистым продуктом и становится исходной базой для газообразного энергоносителя.

Ключевое преимущество полной газификации заключается в возможности использования водородного сценария как потенциального технологического элемента долгосрочной низкоуглеродной траектории металлургии. При наличии развитой инфраструктуры и соответствующей адаптации металлургического процесса водород может использоваться как технологический газ, энергетический ресурс или восстановитель в новых конфигурациях металлургического передела. Реализация этого преимущества определяется глубиной очистки газа, возможностью отделения CO_2-потока, энергоэффективностью газификационного комплекса, наличием кислородного хозяйства, водоподготовки и инфраструктуры обращения с водородом. Совокупный углеродный баланс включается в обязательную проектную оценку экологической результативности полной газификации.

Технологические ограничения полной газификации связаны прежде всего с высокой капиталоемкостью и сложностью интеграции нескольких инженерных подсистем. Газификационный комплекс предъявляет требование стабильности качества топлива, предварительного снижения влажности бурого угля, контроля зольности, надежной подачи кислорода или парокислородной смеси, а также высокоэффективной газоочистки. Высокая влажность бурых углей ухудшает тепловой баланс и повышает расход энергии на сушку; высокая зольность увеличивает нагрузку на золоудаление и может осложнять работу реактора; сернистые и смолистые компоненты требуют усиленной очистки газа. Отдельным ограничением является недостаточная инфраструктурная готовность хранения, транспортировки и промышленного потребления водорода. Даже при успешном получении водорода проект сохраняет зависимость от готовности металлургического контура к использованию газообразного продукта, что требует технологической адаптации агрегатов, систем безопасности и режимов эксплуатации [167].

Применимость водородных сценариев, описанных в зарубежной литературе преимущественно на материале североевропейских и восточноазиатских проектов, в российских условиях требует отдельной критической оценки. Первое ограничение связано с плотностью и зрелостью инфраструктуры. Проекты типа HYBRIT опираются на компактное размещение источника электроэнергии, электролизного производства, хранилища и

металлургического потребителя в пределах одной промышленной площадки или короткого коридора [138; 190]. В угледобывающих регионах России буроугольная база, потенциальный газификационный комплекс и металлургические предприятия разделены значительными расстояниями, а специализированная водородная инфраструктура промышленного масштаба – трубопроводы, хранилища, компрессорные станции, системы безопасности – отсутствует и не включена в действующие инфраструктурные программы в объемах, достаточных для металлургического потребления [10; 52; 64]. Перенос зарубежных показателей стоимости и сроков без учета этих различий систематически занижает оценку затрат на российский водородный проект.

Второе ограничение – капиталоемкость создания такой инфраструктуры и требования к транспортировке и хранению. Водород имеет низкую объемную энергетическую плотность, требует сжатия или ожижения с соответствующими энергетическими потерями, специальных материалов трубопроводов и емкостей и повышенных мер промышленной безопасности [52; 142]. При расстояниях, характерных для российских угольно-металлургических цепочек, логистическая составляющая стоимости водорода становится сопоставимой с производственной [143; 232], тогда как твердый продукт переработки перевозится существующим железнодорожным парком. Капитальные вложения в транспортно-хранилищную часть при этом не создают продукт и не окупаются вне самого водородного проекта, что повышает специфичность активов и риск для всех участников цепочки.

Третье ограничение – зависимость от источника энергии. Зарубежные проекты водородной металлургии рассчитаны на зеленый водород из дешевой возобновляемой электроэнергии, и именно это условие обеспечивает им углеродное преимущество [161; 219]. В российских угледобывающих регионах водород из бурого угля получается газификацией с выбросом CO_2, а его углеродное преимущество возникает лишь при улавливании и хранении углерода, что добавляет еще один капиталоемкий и технологически незрелый контур. Структура региональной энергетики с преобладанием тепловой генерации не позволяет воспроизвести североевропейскую модель электролизного водорода без существенной перестройки энергобаланса [91; 95]. Следовательно, климатический аргумент – центральный для зарубежных

водородных программ – в российском буроугольном контексте существенно ослаблен.

Четвертое ограничение – отсутствие сформированного внутреннего спроса. Зарубежные проекты опираются на углеродное регулирование, готовность потребителей платить премию за низкоуглеродную сталь и долгосрочные контракты на ее поставки [138; 219]. На российском рынке такой премии на наблюдаемом горизонте нет, металлургические агрегаты не адаптированы к потреблению водорода, а экспортные каналы для водорода из внутренних угольных регионов логистически недоступны [21; 69; 72]. Спрос на водород в таких условиях пришлось бы создавать одновременно с предложением, что приносит в проект рыночный риск, который в зарубежных кейсах снят регулятором и рынком. Именно совокупность этих ограничений – инфраструктурных, логистических, энергетических и рыночных – объясняет, почему в настоящем исследовании водородный сценарий рассматривается как база сравнения и долгосрочная альтернатива, а для инвестиционной апробации в главе 3 выбирается сценарий частичной газификации с производством термококса, опирающийся на существующую инфраструктуру и сложившийся спрос металлургического потребителя на твердый углеродистый продукт.

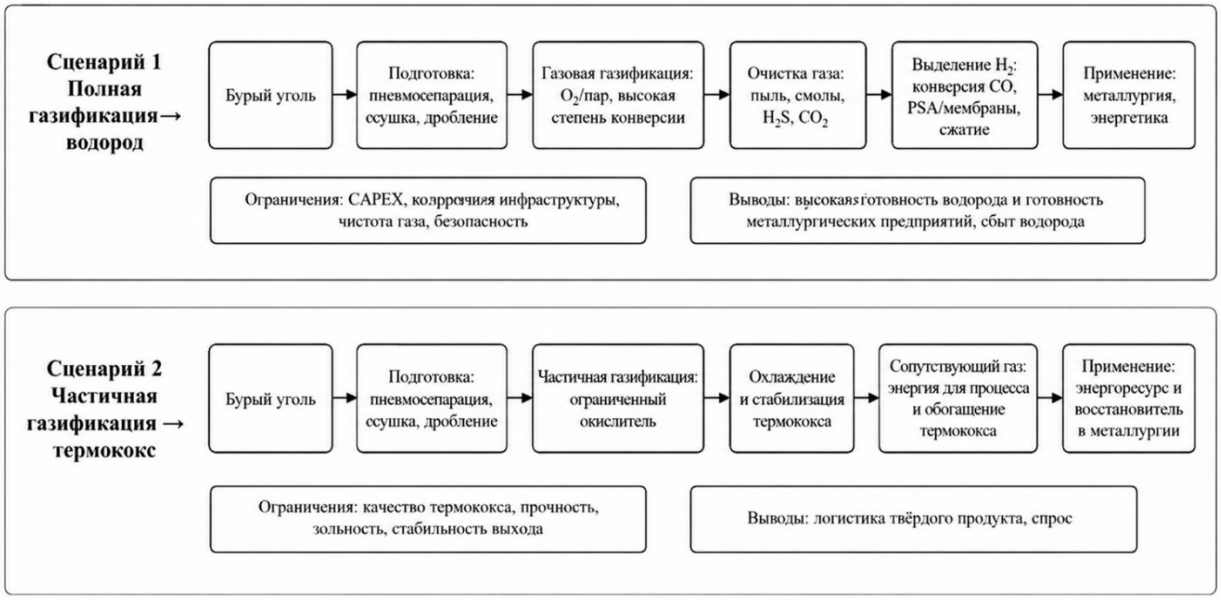
Частичная газификация бурых углей имеет иную технологическую логику. Ее цель состоит не в максимальном переводе углерода в газовую фазу, а в контролируемом термохимическом преобразовании сырья с сохранением значимой части твердого углеродистого продукта. В технологическую цепочку входят подготовка угля, пневмосепарация, осушка, сортировка, частичная газификация при ограниченной подаче окислителя, охлаждение и стабилизация твердого продукта, а также утилизация или использование сопутствующего газа для энергетических нужд проекта. Конечным целевым продуктом выступает термококс – твердый продукт глубокой переработки бурого угля, который может выполнять функцию углеродистого энергоресурса и частично восстановительного компонента в металлургическом переделе при соблюдении требований к качеству [36; 38; 39].

Технологическое преимущество частичной газификации заключается в более высокой совместимости с существующей промышленной и логистической инфраструктурой. В отличие от водородного сценария она не требует немедленного

создания полноценной водородной сети, инфраструктуры сжатия, хранения и транспортировки водорода. Термококс остается твердым продуктом, для которого могут использоваться железнодорожные и терминальные решения, уже применяемые для угольных и металлургических грузов. Кроме того, сопутствующий газ может быть направлен на поддержание теплового режима сушки, собственные энергетические нужды или иные вспомогательные процессы, что повышает внутреннюю технологическую связанность проекта.

Ограничения частичной газификации имеют иной характер. Главным условием ее жизнеспособности является не наличие водородной инфраструктуры, а стабильность качества термококса. Для металлургического потребителя критичны низшая теплота сгорания (НТС), влажность, зольность, содержание серы и фосфора, выход летучих веществ, механическая прочность, гранулометрический состав, истираемость и склонность к пылеобразованию. Термококс не может автоматически рассматриваться как полный функциональный заменитель классического металлургического кокса, поскольку в доменном процессе кокс выполняет не только энергетическую и восстановительную функцию, но и несет механическую нагрузку в шихте, обеспечивая газопроницаемость слоя [47; 82; 201]. Поэтому фактическая область применения термококса должна подтверждаться опытно-промышленными испытаниями, ограничениями по доле замещения, технологическими регламентами и требованиями конкретного металлургического агрегата.

Таким образом, различие между полной и частичной газификацией состоит не только в продукте, но и в профиле ограничений, что показано на рисунке 5 и в таблице 9. Полная газификация ориентирована на более глубокую технологическую перестройку и потенциально более радикальную трансформацию металлургического контура, но требует развитой инфраструктуры водорода, значительного объема доступного инвестиционного финансирования и сложной газоочистки. Частичная газификация является более эволюционным технологическим сценарием: она сохраняет связь с буроугольной ресурсной базой и существующей логистикой, но требует строгого контроля качества твердого продукта, подтверждения металлургической применимости и согласованного механизма внутренней цены на термококс [78].



Источник: составлено автором.

Рисунок 5 – Технологическая логика полной и частичной газификации бурых углей

Таблица 9 – Сравнение технологических ограничений сценариев полной и частичной газификации бурых углей

Группа ограничений	Полная газификация бурых углей с получением водорода	Частичная газификация бурых углей с производством термококса
1	2	3
Сырьевые ограничения	Критичны влажность, зольность, реакционная способность и стабильность состава; высокая влажность ухудшает тепловой баланс и повышает нагрузку на сушку [80; 157]	Критичны те же параметры сырья, но основной акцент переносится на выход и качество твердого продукта: HTC, зольность, влажность, содержание серы, прочность и гранулометрия [36; 39]
Процессные ограничения	Требуются газификатор, кислородное хозяйство, пар, охлаждение и глубокая очистка синтез-газа; сложность возрастает при необходимости выделения H_2 [157; 171]	Требуются подготовка, сушка, частичная газификация, охлаждение и стабилизация термококса; процесс чувствителен к температурному режиму и степени выгорания углерода [36; 38]
Продуктовые ограничения	Водород должен соответствовать требованиям чистоты, давления, безопасности и режима подачи; необходима компрессия, хранение и транспортировка [171; 232]	Термококс должен соответствовать требованиям металлургического потребителя; не является полным заменителем кокса без испытаний и ограничений по доле применения [36; 82]
Инфраструктурные ограничения	Необходима специализированная водородная инфраструктура, включая хранение, транспортировку, безопасность и адаптацию металлургического потребления [52; 142]	Возможна опора на существующую железнодорожную и терминальную инфраструктуру, но сохраняется чувствительность к расстоянию, тарифам и пылеобразованию [35; 95; 96]

Продолжение таблицы 9

1	2	3
Инвестиционные ограничения	CAPEX формируется в газификационном и металлургическом контурах, а также в кислородном, газоочистном и водородном комплексах [162; 171]	CAPEX концентрируется на стадиях подготовки сырья и газификации; потребность в радикальной перестройке металлургической инфраструктуры ниже, но требуется доказать цену и спрос [36; 39]
Экологические ограничения	Потенциальная низкоуглеродная результативность сценария зависит от способа обращения с CO_2 и энергобаланса газификации [144; 175]	Снижает ресурсную и логистическую уязвимость; углеродная результативность определяется в заданной расчетной границе и уточняется на уровне LCA всей производственной цепочки [37; 54]
Организационные ограничения	Требуется длительное согласование добычи, газификации, водородной инфраструктуры и металлургического потребления [52; 225]	Ключевыми становятся внутреннее ценообразование на термококс, долгосрочный спрос, контроль качества и распределение рисков между участниками [151; 225], что показано на рисунке 6

Источник: составлено автором.

Обозначенные на рисунке 5 различия технологической логики целесообразно систематизировать по группам ограничений, непосредственно определяющих практическую реализуемость каждого из сценариев. Такая систематизация позволяет перейти от общего описания последовательности переделов к сопоставлению требований, возникающих на стадиях подготовки сырья, газификации, доведения целевого продукта до требуемых характеристик, его транспортировки и последующего применения в металлургическом контуре. В таблице 9 полная и частичная газификация бурых углей сопоставлены по сырьевым, процессным, продуктовым, инфраструктурным, инвестиционным, экологическим и организационным ограничениям. Это позволяет выявить не только сравнительную сложность внедрения, но и различия в концентрации рисков: для полной газификации они в большей степени связаны с газоочисткой, водородной инфраструктурой и адаптацией металлургического потребления, тогда как для частичной – с качеством термококса, логистикой, устойчивостью спроса и внутренним ценообразованием. Тем самым уточняются условия, при которых частичная газификация может рассматриваться как более эволюционный технологический сценарий трансформации.

Сравнение, представленное в таблице 9, показывает, что частичная газификация бурых углей с производством термококса предъявляет строгие продуктовые и организационные требования, однако заметно меньшие

требования к инфраструктуре и капитальным вложениям и способна опираться на действующую логистику. Определяющим условием ее реализуемости становится подтверждение конкурентной цены и устойчивого спроса на термококс со стороны металлургического потребителя. Различие рассмотренных сценариев отчетливее всего проявляется на уровне технологических цепочек, связывающих сырье, процессинг, продукты и конечное применение, что показано на рисунке 6.



Источник: составлено автором.
Рисунок 6 – Технологические цепочки: сырье → процессинг → продукты → конечное применение

Схематическое представление цепочек на рисунке 6 показывает, что в традиционной модели основные объекты межотраслевого взаимодействия – коксующийся уголь и продукты коксования, тогда как в сценариях глубокой переработки бурых углей предмет взаимодействия смещается к технологическим продуктам газификации. В полной газификации таким продуктом становится водород или водородсодержащий газ после сложной очистки и выделения, в частичной – термококс, связанный с существующей твердотопливной логистикой и требующий подтверждения металлургической применимости. Это различие определяет не только технологическую цепочку, представленную в таблице 10, но и организационно-экономическую составляющую модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия.

Таблица 10 – Технологическая цепочка вариантов использования угля в металлургическом переделе и для энергетических нужд

Вариант	Сырье	Процессинг	Продукты	Конечное применение
Традиционная коксо-доменная цепочка	Коксующиеся угли	Обогащение, коксование, доменный процесс [47; 82]	Кокс, доменный газ, чугун	Производство чугуна и стали
Полная газификация бурых углей	Бурые угли после подготовки	Газификация O_2/пар; очистка синтез-газа; конверсия CO; выделение H_2 [102; 157]	Водород, CO_2-поток, шлак/зола, очищенный газ	H_2-DRI, дутье, энергетическое или химическое применение
Частичная газификация бурых углей	Бурые угли после сушки и сепарации	Термическая обработка и частичная газификация при ограниченной подаче окислителя [36; 80]	Термококс, сопутствующий газ, твердый остаток	Углеродистый энергоресурс / восстановитель в металлургическом переделе
Подготови-тельный энергетический блок	Бурые угли низкой теплотвор-ности	Пневмосепарация, осушка, классификация [38]	Подготов-ленный энергетический уголь	ТЭЦ, собственные энергопотребности, ТЭЦ, собственные энергопотребности и теплоснабжение проекта

Источник: составлено автором.

С учетом изложенного технологический выбор между полной и частичной газификацией бурых углей должен рассматриваться не как сопоставление двух вариантов одного процесса, а как выбор между различными профилями трансформации угольно-металлургического взаимодействия. Они различаются глубиной перестройки производственной цепочки, природой целевого продукта, инфраструктурными требованиями, распределением капитальных вложений и глубиной координации участников.

Полная газификация соответствует более радикальной долгосрочной трансформации. Она предполагает перевод органической части угля в газовую фазу, очистку синтез-газа, конверсию CO, выделение, компримирование, хранение и подачу водорода потребителю [102; 157]. Реализация сценария требует создания газификационного комплекса, кислородного хозяйства, систем газоочистки и водородной инфраструктуры, а также адаптации металлургического контура [52; 171]. При этом получение водорода из угля не гарантирует низкоуглеродной результативности: она зависит от энергоэффективности комплекса, возможности отделения CO_2-потока и способа обращения с ним.

Частичная газификация представляет собой более постепенный сценарий, сохраняющий часть углерода в форме термококса и позволяющий опираться на буроугольную ресурсную базу, промышленные компетенции и традиционную

логистику [36; 39; 80]. Его реализуемость определяется стабильностью теплоты сгорания, влажности, зольности, содержания серы и фосфора, механической прочности и состава продукта. Термококс не является полным заменителем классического металлургического кокса, область его применения должна подтверждаться опытно-промышленными испытаниями и требованиями конкретного агрегата [47; 82; 201]. Дополнительными условиями выступают устойчивость поставок, долгосрочный спрос и экономически обоснованная внутренняя цена промежуточного продукта.

Окончательный выбор не может основываться только на декларируемой низкоуглеродности или общей технологической привлекательности. Необходима последовательная проверка технологической пригодности бурого угля, инженерной допустимости и операционной сопоставимости продуктов, инвестиционной состоятельности проекта, способности участников согласовать качество, объемы и сроки поставок, внутреннюю цену, инвестиционные обязательства и распределение рисков [27]. Подтверждение пригодности сырья является исходным условием экономического и имитационного сопоставления сценариев, последующей инвестиционной оценки и разработки механизма согласования интересов участников. Расширенная сравнительная характеристика сценариев представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Сравнительная характеристика сценариев глубокой переработки бурых углей

Характеристика	Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода [157; 171; 221]	Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса [36; 39; 80]
1	2	3
Технологический принцип	Максимальное преобразование исходного сырья в газообразный продукт с последующим промышленным использованием водорода	Сохранение части продукта в твердой форме при получении термококса и сопутствующих газообразных продуктов
Основной продукт	Водород как технологический продукт глубокой переработки бурых углей	Термококс как технологический продукт глубокой переработки бурых углей
Сырьевая база	Бурые угли, пригодные для глубокой переработки методом газификации	Бурые угли, пригодные для частичной газификации и получения термококса
Связь с существующей моделью взаимодействия	Требует более глубокой перестройки традиционной связи между угледобывающим и металлургическим контурами	В большей степени сохраняет связь с существующей промышленной инфраструктурой, но изменяет продуктовую и экономическую логику взаимодействия
Масштаб адаптации металлургичес-кого контура	Высокий: требуется существенная адаптация инфраструктуры использования водорода и сопряженных производственных процессов	Умеренный: сценарий в большей степени совместим с существующей инфраструктурой металлургического потребления энергоресурсов

Продолжение таблицы 11

1	2	3
Капиталоемкость	Высокая; инвестиционная нагрузка формируется в газификационном и металлургическом контурах, а также в инфраструктуре	Средняя или высокая; инвестиционная нагрузка преимущественно сосредоточена в угольном и газификационном контурах, а также на стадии подготовки сырья при меньшей потребности в радикальной адаптации металлургической инфраструктуры
Инфраструктурная зависимость	Существенная зависимость от наличия водородной инфраструктуры и технологических условий потребления водорода	Существенная зависимость от логистики, качества бурого угля, стабильности поставок и возможности включения термококса в металлургический контур
Логистическая чувствительность	Высокая, поскольку транспортировка и хранение водорода требуют специализированной инфраструктуры [52; 142]	Значимая, но иного характера: ключевыми становятся расстояние между месторождением, газификационным комплексом и металлургическим потребителем, а также стоимость перевозки продукта [35; 95]
Инвестиционные ограничения	Высокая неопределенность горизонта окупаемости, зависимость от инфраструктуры, условий финансирования и готовности металлургического контура к применению водорода	Необходимость доказать экономическую жизнеспособность технологического сценария, предсказуемость формирования и пересмотра внутренней цены, приемлемость логистических условий и возврат инвестиций в газификационный контур
Экологическая уязвимость	Снижается при наличии соответствующей технологической инфраструктуры; совокупный углеродный баланс уточняется на уровне проектной LCA	Снижение углеродной и ресурсной уязвимости оценивается в заданной проектной границе и дополняется LCA конкретной производственной цепочки [37; 54]
Социально-региональная логика	Может требовать более глубокой перестройки занятости и компетенций в угольных регионах [154; 187]	Может обеспечивать более постепенную трансформацию занятости за счет сохранения связи с угольной ресурсной базой и промышленной инфраструктурой [63; 70]
Ключевые риски	Инфраструктурная неопределенность, высокая капиталоемкость, необходимость адаптации металлургического контура, зависимость от долгосрочных условий углеродного регулирования	Зависимость от качества сырья, логистики, предсказуемости формирования и пересмотра внутренней цены, наличия спроса на термококс и согласования интересов участников
Необходимость последующей экономической оценки	Требуется оценка стоимости продукта, инфраструктурных ограничений, инвестиционной реализуемости и условий применения в металлургическом контуре	Требуется оценка стоимости продукта, логистических условий, инвестиционной реализуемости, возврата вложений в газификационный контур и распределения экономического эффекта

Источник: составлено автором.

Капиталоемкость особенно значима при сопоставлении сценариев. Водородный сценарий требует создания газификационного контура, водородной инфраструктуры и адаптации металлургического контура, поэтому инвестиционная нагрузка распределяется по нескольким звеньям цепочки. Частичная газификация с производством термококса также капиталоемка: необходимы подготовка сырья, создание или модернизация газификационного контура, обеспечение стабильного

качества продукта и логистика. Поэтому капиталоемкость – качественная сравнительная характеристика, требующая экономической проверки, а не самостоятельный критерий выбора.

Различия между сценариями связаны не только с конечным продуктом, но и с профилями технологической, инфраструктурной и инвестиционной трансформации. Полная газификация ориентирована на глубокую перестройку цепочки и характеризуется высокой инвестиционной неопределенностью; частичная – предполагает более постепенную трансформацию, но требует проверки качества сырья, логистики, цены промежуточного продукта, окупаемости и распределения эффекта между участниками. Поэтому выбор не может опираться на общую принадлежность к повестке низкоуглеродного перехода и требует методики сравнительной оценки по УЕСЭ, связывающей технологические характеристики продуктов с экономической оценкой их применения в металлургическом контуре.

Организационно-экономическое измерение не менее важно, чем технологическое: проект не может быть реализован за счет модернизации одного предприятия. Полная газификация требует согласования инвестиций в производство, инфраструктуру и потребление водорода, частичная – согласования между добычей бурого угля, газификационным контуром и металлургическим применением термококса. Чем выше капиталоемкость, специфичность активов и зависимость от инфраструктуры, тем глубже координация участников [92; 225]. Поэтому организационно-экономическая составляющая модели определяется технологическим сценарием, а не заранее заданной формой взаимодействия.

Это согласуется с выводами параграфа 1.1: глубокая переработка бурых углей может формировать специфический производственный актив – не вследствие формального объединения участников, а в результате согласования сырьевой базы, технологии, требований металлургического контура, логистики, инвестиций и внутренних экономических механизмов. В терминах VRIN-анализа [114] такой актив может обладать ценностью, редкостью, трудностью имитации и ограниченной заменяемостью, но эти свойства проявляются только при экономической жизнеспособности сценария и устойчивой координации участников.

Международная и отечественная практика свидетельствует о фрагментарности проектов технологической трансформации [53; 110; 138]: одни развивают глубокую переработку угля без связи с металлургическим потреблением, другие ориентированы на водородную металлургию без угольного контура, третьи демонстрируют производство термококса без экономической модели межотраслевого взаимодействия. Отсюда необходимость подхода, связывающего технологический выбор, ресурсную базу, инвестиционную состоятельность и распределение эффекта между участниками.

Типовые траектории трансформации иллюстрируют кейсы глубокой переработки угля, водородной металлургии и производства технологических продуктов, представленные в таблице 12. Критерии отбора: доведение как минимум до демонстрационной стадии; отношение хотя бы к одному из трех контуров модели; наличие публичных сведений о технологии, организационной схеме и экономических результатах [132; 229]. Совокупность подобрана для охвата разных траекторий, а не для репрезентативности, поэтому таблица 12 дает иллюстративные примеры, а не результат множественного кейс-стади с матрицей переменных и триангуляцией; выводы по ней качественные. Рассмотренные в таблице 12 примеры иллюстрируют наличие отдельных технологических заделов, но не воспроизводят предмет настоящего исследования в полном виде: они либо не включают угольный контур, либо не связаны с буроугольной ресурсной базой, либо не раскрывают механизм согласования.

Следовательно, рассмотренные примеры международной и отечественной практики указывают не на наличие готового решения, а на необходимость модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия, в которой технологический сценарий, организационная координация и механизм согласования рассматриваются совместно.

Системный подход позволяет рассматривать трансформацию угольно-металлургического взаимодействия как согласование шести контуров двух уровней – контуров участников (угольного, газификационного и металлургического) и структурных контуров (технологического, организационно-экономического и инвестиционно-ценового), что показано на рисунке 7 [43; 173].

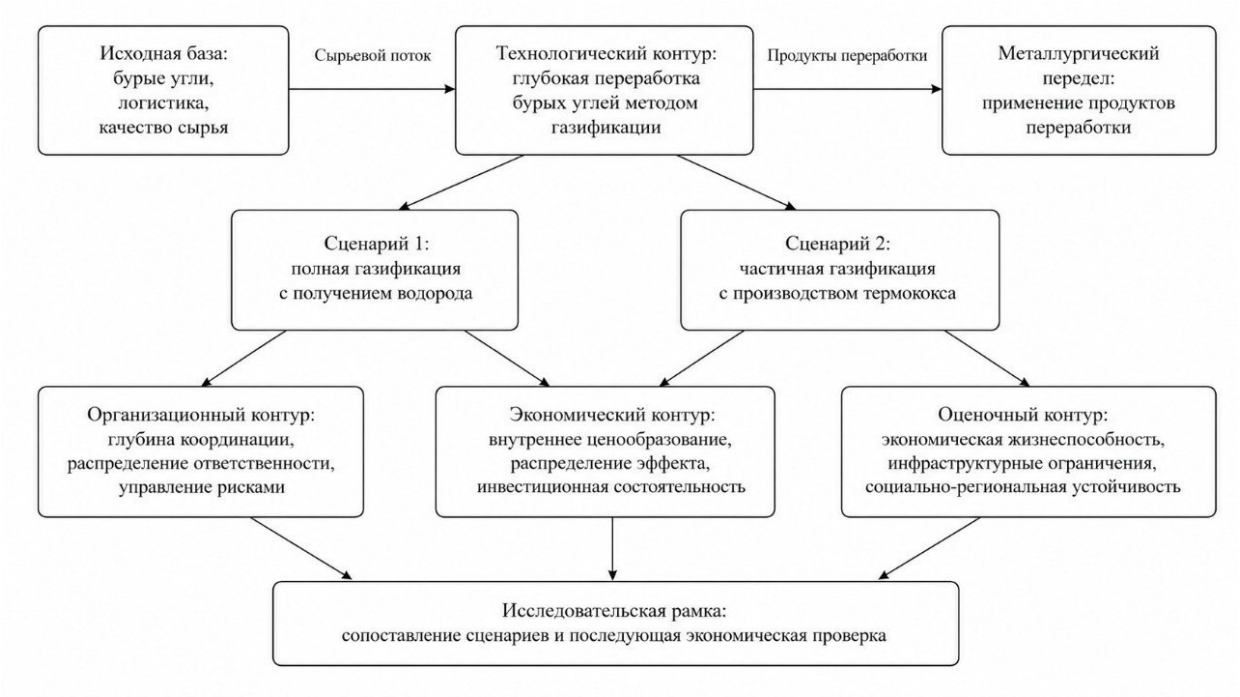
Таблица 12 – Сравнительный анализ кейсов технологической трансформации в угольной и металлургической сферах

Критерий	Shenhua CTL, Китай	Anglo American, Австралия / ЮАР	HYBRIT, Швеция	СУЭК, Россия	Sinopec Ordos, Китай	Вывод для настоящего исследования
1	2	3	4	5	6	7
Технологическая направленность	Глубокая переработка угля и производство жидких продуктов	Водородная повестка и технологические соглашения в промышленности	Водородная металлургия и электрометаллургическое производство	Частичная газификация / термическая переработка с получением термококса	Водородное направление на базе энергетической инфраструктуры	Существующие решения развивают отдельные элементы трансформации, но редко соединяют угольный, газификационный и металлургический контуры
Целевой продукт	Жидкие топлива и продукты углехимии	Низкоуглеродная промышленная продукция в перспективе	Водород и металлургическая продукция нового технологического контура	Термококс	Водород	Для настоящего исследования ключевыми являются водород и термококс как альтернативные продукты глубокой переработки бурых углей
Сырьевая база	Уголь	Железорудная база, энергетическая инфраструктура, ВИЭ	Вода, электроэнергия, железорудная база	Бурый уголь	Вода, электроэнергия, энергетическая инфраструктура	Не все кейсы учитывают буроугольную ресурсную базу как основу экономической трансформации
Вовлечение угольного контура	Высокое	Ограниченное или косвенное	Отсутствует	Высокое	Ограниченное	В ряде проектов отсутствует прямая связь с угледобывающим предприятием
Вовлечение металлургического контура	Ограниченное	Присутствует на уровне стратегических инициатив	Высокое	Ограничено испытаниями и потенциальной возможностью потребления	Ограниченное	В большинстве кейсов отсутствует полная увязка переработки угля с металлургическим применением продукта
Организационная логика	Вертикально организованный промышленный проект	Технологические соглашения и альянсы	Консорциальная / проектная организационная форма взаимодействия	Внутренний проект / опытно-промышленная реализация	Вертикально организованный энергетический проект	Организационные формы различаются, но ни одна из них сама по себе не решает задачу экономического сопоставления сценариев
Статус реализации	Промышленная эксплуатация в смежном направлении	Стадия соглашений и технологических инициатив	Опытно-промышленная стадия	Опытно-промышленная стадия	Строительство / развитие проекта	Практика подтверждает наличие технологических заделов, но не дает готовой модели угольно-металлургического взаимодействия

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4	5	6	7
Ориентировочная капиталоемкость	Высокая; зависит от масштаба углехимического комплекса	Высокая; связана с инфраструктурой водородной повестки и промышленной адаптацией	Высокая; требует новой энергетической и металлургической инфраструктуры	Средняя или высокая; зависит от масштаба газификационного контура	Высокая; определяется энергетической и водородной инфраструктурой	После операционного сопоставления отдельная инвестиционная проверка выполняется только для выбранного сценария; технологического описания для такой проверки недостаточно
Ограничение кейса для настоящего исследования	Нет прямой ориентации на металлургиче-ский передел	Нет буроугольного газификационного контура	Нет угольного контура	Нет полной модели распределения экономического эффекта между участниками угольного, газификационного и металлургического контуров	Нет прямой связи с металлурги-ческим взаимодействием	Необходима методика сравнительной оценки по УЕСЭ для сопоставления сценариев и выявления пороговых условий их жизнеспособности

Источник: составлено автором на основе анализа кейсов Shenhua CTL (Китай) [231], Anglo American (Австралия/ЮАР) [110], HYBRIT (Швеция) [138; 190; 219], СУЭК (Россия) [53] и Sinopec Ordos (Китай) [184].



Источник: составлено автором.
Рисунок 7 – Структура модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия в условиях низкоуглеродного перехода

Контуры участников отражают производственно-функциональную последовательность «угольный контур → газификационный контур → металлургический контур». Структурные контуры раскрывают содержание модели: в технологическом контуре сопоставляются сценарий полной газификации бурых углей с получением водорода и сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса; организационно-экономический контур характеризует глубину координации участников, распределение ответственности и управление рисками; инвестиционно-ценовой контур включает инвестиционную оценку конкретного проекта, формирование расчетной внутренней цены промежуточного продукта и распределение экономического эффекта между участниками. Инфраструктурные условия и социально-региональные эффекты рассматриваются как внешние блоки модели.

Предложенная структура модели не предполагает заранее заданного выбора организационной формы. Технологический сценарий определяет требования к глубине координации, а механизм согласования должен поддерживать экономическую мотивацию сторон к взаимодействию. Модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия должна быть адаптивной: чем выше специфичность активов, капиталоемкость,

инфраструктурная зависимость и неопределенность параметров проекта, тем глубже координация участников.

Ключевой элемент инвестиционно-ценового контура – механизм согласования. При переходе от поставки коксующегося угля к глубокой переработке бурых углей предметом согласования становится не только цена сырья, но и стоимость промежуточных продуктов, распределение капитальных затрат, рисков и синергетического эффекта. Экономическим инструментом такого механизма выступает правило расчета, пересмотра и договорного закрепления расчетной внутренней цены термококса: оно позволяет определить, при каких условиях угольный, газификационный и металлургический контуры сохраняют мотивацию к участию в проекте.

Углеродное регулирование при этом не выбирает сценарий автоматически, а формирует внешнее ограничение и источник неопределенности [55]. В исследовании оно трактуется шире отдельных региональных механизмов [9; 14; 198] – как фактор, повышающий чувствительность традиционных производственных цепочек к углеродной уязвимости и усиливающий необходимость оценки альтернативных технологических решений [69]. Федеральный закон № 296-ФЗ вводит расчетную единицу климатического регулирования: «углеродная единица – верифицированный результат реализации климатического проекта, выраженный в массе парниковых газов, эквивалентной 1 тонне углекислого газа» [14, ст. 2]. Углеродная единица задает измеримую форму климатического эффекта, благодаря которой снижение удельных выбросов в проектной границе может рассматриваться не только как экологический, но и как потенциально монетизируемый результат трансформации. Базовая правовая рамка деятельности угледобывающих предприятий задается Законом РФ «О недрах» [11] и Федеральным законом «Об охране окружающей среды» [15]. Правовое определение объекта недропользования задано в преамбуле Закона РФ «О недрах»: «Недра являются частью земной коры, расположенной ниже почвенного слоя, а при его отсутствии – ниже земной поверхности и дна водоемов и водотоков, простирающейся до глубин, доступных для геологического изучения и освоения» [11, преамбула]. Данное определение фиксирует физические границы объекта недропользования, в пределах которых рассматриваются ресурсная база и технологические решения настоящего исследования. Статья 1.2 того же Закона

закрепляет режим собственности, определяющий рамки распоряжения ресурсной базой проекта: «Недра в границах территории Российской Федерации, включая подземное пространство и содержащиеся в недрах полезные ископаемые, энергетические и иные ресурсы, являются государственной собственностью» [11, ст. 1.2]. Государственная собственность на недра означает, что доступ угледобывающего контура к сырьевой базе опосредован лицензионным механизмом, и это обстоятельство учитывается при оценке регуляторных и инвестиционных рисков проекта. Сравнительный анализ инвестиционной политики стран евразийского пространства в сфере недропользования показывает, что условия доступа к ресурсной базе и стабильность лицензионного режима выступают значимыми факторами инвестиционной привлекательности сырьевых проектов [97]. Среди основных принципов охраны окружающей среды статья 3 Федерального закона № 7-ФЗ называет «обеспечение снижения негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в соответствии с нормативами в области охраны окружающей среды, которого можно достигнуть на основе использования наилучших доступных технологий с учетом экономических и социальных факторов» [15, ст. 3]. Формулировка принципа прямо связывает экологический результат с экономической и социальной допустимостью технологии, что соответствует логике настоящей работы, в которой технологический выбор оценивается одновременно по экологическому и экономическому критериям.

На основании проведенного анализа могут быть сформулированы предпосылки, которые конкретизируют общую гипотезу диссертации и формируют основу для дальнейшей проверки во второй главе; эти гипотезы подробно описаны в таблице 13.

Таблица 13 – Исследовательские предпосылки для формирования концептуальной модели трансформации

Исследовательская предпосылка	Содержание	Значение для дальнейшего исследования
1	2	3
Возрастание требований к координации	Глубина координации участников должна возрастать по мере увеличения специфичности технологических активов, капиталоемкости и инвестиционной неопределенности [148; 225]	Позволяет связать организационно-экономическую составляющую модели не с заранее заданной организационной формой взаимодействия, а с характеристиками технологического сценария

Продолжение таблицы 13

1	2	3
Различие профилей технологических сценариев	Полная и частичная газификация бурых углей имеют различные профили экономических, инфраструктурных и социально-региональных ограничений [36; 58; 157]	Обосновывает необходимость их сопоставления посредством методики сравнительной оценки по УЕСЭ
Необходимость ценообразования на промежуточный продукт внутри производственной цепочки	Для практической реализации выбранного сценария требуется механизм согласования, включающий правило расчета, пересмотра и договорного закрепления расчетной внутренней цены термококса, а также порядок распределения экономического эффекта между участниками трех контуров [89; 151; 181]	Формирует переход от качественного описания модели к ее количественной оценке в последующих главах

Источник: составлено автором.

Технологический сценарий, организационно-экономическая составляющая модели и механизм согласования образуют взаимозависимые элементы единой системы. Выбор между полной и частичной газификацией определяет требования к сырьевой базе, инфраструктуре, качеству продукта, капитальным затратам, логистике и адаптации металлургического контура. Организационно-экономическая составляющая задает глубину координации трех контуров, распределение ответственности и управление рисками: чем выше специфичность активов, капиталоемкость, инфраструктурная зависимость и неопределенность проекта, тем глубже координация участников.

Механизм согласования переводит координацию в экономическую плоскость, определяя принципы расчета и пересмотра внутренней цены промежуточного продукта, распределения затрат, рисков и эффекта. Устойчивость трансформации достигается при согласованности технологических, организационно-экономических и инвестиционно-ценовых решений. В этом авторский вывод параграфа: в отличие от подходов, рассматривающих технологию, инвестиции и организацию по отдельности, для буроугольно-металлургической цепочки три контура должны проверяться совместно, а термококсовый сценарий в российских условиях имеет преимущество по инфраструктурной и рыночной готовности, подлежащее количественной проверке. Эти предпосылки формируют теоретическую основу модели и проверяемых гипотез в параграфе 1.4.

1.4 Принципы и теоретические основания формирования модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Проведенный анализ позволяет перейти к синтезу модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия, в которой ограничения традиционной коксо-доменной цепочки рассматриваются не изолированно, а во взаимосвязи с технологическими, экономическими, инфраструктурными и социально-региональными условиями низкоуглеродного перехода. Такой синтез необходим, поскольку выявленные ограничения – сырьевые, инвестиционные и координационные – проявляются одновременно и не могут быть сняты за счет изменения одного элемента цепочки. Модель обобщает результаты предшествующего анализа и задает рамку, в пределах которой технологический выбор, организационная форма взаимодействия участников и экономические условия реализации проекта рассматриваются как связанные между собой решения.

Цели устойчивого развития выполняют в данной модели роль оценочной рамки: они задают направление трансформации и критерии ее приемлемости, но не определяют конкретный технологический сценарий и не содержат инструменты сопоставления альтернатив по экономическим параметрам. Поэтому выбор между полной газификацией бурых углей с получением водорода и частичной газификацией с производством термококса не следует непосредственно из этой рамки и требует дальнейшей экономической проверки – сопоставления сценариев по стоимости, инфраструктурной обеспеченности и условиям применения продукта в металлургическом контуре.

В настоящем исследовании модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия основана на глубокой переработке бурых углей методом газификации. Под моделью понимается формализованное описание трех контуров: технологического, организационно-экономического и инвестиционно-ценового – и правил их согласования. Юридическая форма сотрудничества здесь не задана намеренно: одна и та же конфигурация контуров реализуема и в проектной, и в вертикально-интегрированной форме, а выбор между ними определяется параметрами конкретного проекта [92; 225]. Ее назначение состоит в том, чтобы связать выбор технологического сценария с

условиями координации участников, оценкой капиталоемкости, механизмом согласования интересов участников внутри производственной цепочки и последующей оценкой операционной жизнеспособности технологического сценария и инвестиционной состоятельности конкретного проекта его реализации [19]. Под операционной жизнеспособностью технологического сценария в настоящем исследовании понимается его способность сохранять стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности продукта не выше, чем в нормированном традиционном коксо-доменном сценарии, при допустимых отклонениях входных параметров и без учета капитальных затрат; под инвестиционной состоятельностью проекта – его способность обеспечивать положительный чистый дисконтированный доход и внутреннюю норму доходности не ниже средневзвешенной стоимости капитала при принятом диапазоне предпосылок и с учетом капитальных затрат. Первое понятие относится к сценарию и оценивается метрикой УЕСЭ, второе – к конкретному проекту и оценивается традиционными инструментами инвестиционного анализа.

Модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия в рамках низкоуглеродного перехода основана на согласовании шести контуров двух уровней. Контуры участников – угольный, газификационный и металлургический; структурные контуры – технологический, организационно-экономический и инвестиционно-ценовой. Понятие технологической инновации, используемое далее в работе, закреплено законодательно: «технологические инновации – новый или усовершенствованный продукт (в частности, устройство, вещество, штамм микроорганизма, культура клеток растений или животных), способ или процесс производства (реализации) товаров, выполнения работ, оказания услуг, создания охраняемых результатов интеллектуальной деятельности, введенные в употребление и способствующие формированию новых рынков, и (или) повышению производительности труда, и (или) повышению технико-экономических показателей производимой продукции» [13, ст. 3]. Технологический контур модели соответствует этому определению в части усовершенствованного процесса производства и повышения технико-экономических показателей продукции, что позволяет трактовать компоненты

модели как инновационные, а не только организационные изменения. Их содержание представлено в таблице 14.

Таблица 14 – Компоненты модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Контур модели	Содержание	Роль в исследовании
Технологический контур	Глубокая переработка бурых углей методом газификации; два технологических сценария – полная газификация бурых углей с получением водорода и частичная газификация бурых углей с производством термококса [36; 80; 157]	Задает технологические сценарии, подлежащие сопоставлению в последующих главах
Организационно-экономический контур	Глубина координации участников, распределение ответственности, управление проектно-специализированными активами, согласование инвестиционных решений [148; 225]	Позволяет определить, какая степень координации требуется при росте капиталоемкости, специфичности активов и технологической неопределенности
Инвестиционно-ценовой контур	Механизм согласования интересов участников, правило расчета внутренней цены промежуточного продукта глубокой переработки, распределение экономического эффекта, инвестиционная состоятельность [3; 32; 134]	Обеспечивает переход от качественной модели к количественной оценке жизнеспособности технологических сценариев

Источник: составлено автором.

Первый вопрос – от чего зависит устойчивость такой конструкции. В системном подходе Г.Б. Клейнера к анализу экономических трансформаций [43; 173] устойчивость экономической системы определяется согласованностью ее структурных элементов; разбалансировка технологической, институциональной или экономической подсистемы способна снизить устойчивость всей системы. Применительно к предмету настоящего исследования это означает, что технологическая переработка бурых углей, организационная координация участников и механизм согласования взаимозависимы и рассматриваются как элементы единой модели.

Второй вопрос – что именно меняется при таком переходе. В терминах технологических парадигм и траекторий Дж. Доси, К. Фримена и К. Перес [130; 139; 191] технологическая трансформация промышленности не сводится к замене одного оборудования другим, а предполагает изменение устойчивой траектории развития отрасли, включая структуру инвестиций, производственные компетенции, инфраструктуру и межфирменные связи [71; 84; 103]. Переход от традиционной коксо-доменной логики к глубокой переработке бурых углей методом газификации может рассматриваться как изменение технологической

траектории угольно-металлургического взаимодействия, однако выбор конкретного технологического сценария – полной или частичной газификации – требует отдельной экономической проверки [49; 50; 182].

Главный вопрос здесь – почему для такого проекта недостаточно договора поставки. Глубина координации участников должна возрастать по мере увеличения специфичности активов, капиталоемкости и неопределенности – это положение теории трансакционных издержек О. Уильямсона [92; 225]. Проекты глубокой переработки бурых углей требуют вложений в проектно-специализированные активы сырьевой базы и газификационного контура; параметры продукта, логистическая конфигурация и межфирменные связи влияют на специфичность этих вложений. В таких условиях договор поставки оказывается недостаточным, поскольку не обеспечивает согласования долгосрочных инвестиций, качества продукта, внутренней цены и распределения рисков. При этом из положений теории трансакционных издержек не следует автоматический выбор одной универсальной организационной формы; речь идет о необходимости более глубокой координации участников. В отдельных прикладных конфигурациях такая координация может быть реализована в проектной, имущественно-интегрированной или вертикально интегрированной организационной форме взаимодействия. Исследования организационных инноваций подчеркивают роль структурной интеграции и экосистемных форм межфирменного взаимодействия в обеспечении устойчивости подобных структур [26; 40].

Следующий вопрос – почему такая конфигурация трудновоспроизводима конкурентами. Глубокая переработка бурых углей формирует совокупность проектных ресурсов и компетенций, которую ресурсная теория фирмы Дж. Барни [114] оценивает по четырем признакам. Как было показано в параграфе 1.1, такая совокупность может обладать признаками ценности, относительной редкости, трудности имитации и ограниченной заменяемости в условиях, когда имеются крупные запасы бурых углей, технологические возможности их переработки, логистический доступ к металлургическому потребителю и механизм согласования. Однако наличие такой совокупности не является само по себе гарантией конкурентного преимущества: оно должно быть подтверждено через экономическую жизнеспособность технологического сценария и поддержание

координации участников. Формирование и удержание таких преимуществ связано с качеством стратегического управления [68] и научно-технологическими факторами конкурентоспособности [60; 83].

Третий вопрос – почему в модель приходится включать социально-региональное измерение, чего требует теория заинтересованных сторон Р.Э. Фримана [140]. Угледобывающие и металлургические предприятия часто выполняют градообразующую функцию, а резкое разрушение традиционной производственной связи может привести к росту безработицы, сокращению налоговой базы и усилению миграционного оттока. Поэтому модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия должна учитывать не только производственную и инвестиционную эффективность, но и социально-региональные ограничения. В настоящем исследовании эти условия включены в рамку устойчивого развития и количественно детализируются в региональном модуле при прикладной адаптации модели. В литературе этот аспект обсуждается также в терминах справедливого перехода, который в работе не операционализируется и выступает элементом контекста.

К вопросу о достаточности договора придется вернуться из-за его неполноты [147; 151; 152]. Именно неполнота контракта обосновывает инвестиционно-ценовой контур модели. В проектах глубокой переработки бурых углей невозможно заранее полностью описать все будущие состояния среды: изменение качества сырья, логистических условий, рыночных цен, инвестиционных обязательств и требований потребителя. При переходе к промежуточному технологическому продукту возникает необходимость формировать внутренний механизм согласования интересов. Именно поэтому правило расчета, пересмотра и договорного закрепления расчетной внутренней цены термококса рассматривается в настоящей модели как экономический инструмент механизма согласования интересов участников и способ распределения экономического эффекта между участниками трех контуров в условиях неполноты контрактов и высокой неопределенности.

Сравнительная характеристика традиционной и целевой моделей представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Сравнительная характеристика традиционной модели и модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Критерий	Традиционная модель	Модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия
Технологический базис	Линейная производственная цепочка: добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс [38; 82; 157; 204]	Глубокая переработка бурых углей методом газификации с возможностью реализации сценария полной или частичной газификации
Основной продукт взаимодействия	Коксующийся уголь и продукты традиционного коксования [36; 47; 80]	Технологические продукты глубокой переработки бурых углей, используемые в металлургическом переделе
Сырьевая база	Преимущественно коксующиеся марки угля [6]	Бурые угли как ресурсная база для глубокой переработки
Характер взаимодействия	Рыночно-контрактные отношения между относительно автономными производственными переделами [225]	Глубокая координация участников угольного, газификационного и металлургического контуров с согласованием технологических, инвестиционных и экономических параметров
Организационная логика	Поставка стандартизированного сырья, контроль качества, раздельное управление рисками [47; 121]	Координация добычи, переработки, логистики и металлургического применения продуктов глубокой переработки
Экономический механизм	Рыночная цена на сырье и отдельные договорные условия поставки [81; 225]	Механизм согласования интересов участников, правило расчета внутренней цены промежуточного продукта, распределение экономического эффекта и последующая инвестиционная оценка
Управление рисками	Риски преимущественно локализованы в отдельных звеньях производственной цепочки и распределяются договором [125; 151]	Риски сырья, технологии, логистики, капитальных затрат и спроса требуют согласованного управления участниками угольного, газификационного и металлургического контуров
Капиталоемкость	Инвестиции преимущественно локализованы внутри отдельных предприятий и производственных переделов	Капиталоемкость возрастает за счет необходимости создания или модернизации газификационного комплекса глубокой переработки и сопряженной инфраструктуры
Экологический профиль	Высокая углеродная уязвимость традиционной коксо-доменной модели [198; 207]	Снижение углеродной уязвимости, оцениваемое в заданной проектной границе с возможностью расширения до полного углеродного баланса
Социально-региональная функция	Сохранение занятости в рамках традиционной промышленной специализации, но с риском будущего обесценения активов [154; 187]	Формирование предпосылок для более плавной технологической трансформации занятости и сохранения промышленной функции угольных регионов

Источник: составлено автором.

Научная новизна предлагаемой концептуальной модели заключается в том, что трансформация угольно-металлургического взаимодействия рассматривается не как замена одного сырьевого продукта другим и не как выбор одной организационной формы, а как согласование технологической траектории, глубины координации участников и экономического механизма распределения эффекта.

Вместо традиционной поставочной логики, модель переносит центр анализа на глубокую переработку бурых углей и использование продуктов переработки в металлургическом переделе.

Во-первых, технологический выбор не задается заранее, а представлен двумя сопоставимыми альтернативами: полной газификацией с получением водорода и частичной газификацией с производством термококса. Это позволяет избежать преждевременного выбора сценария и вынести вопрос о его жизнеспособности в плоскость последующей экономической оценки.

Во-вторых, организационно-экономическая составляющая модели трактуется не как заранее заданная организационная форма взаимодействия, а как необходимая глубина координации участников трех контуров, зависящая от специфичности активов, капиталоемкости, инфраструктурных ограничений и инвестиционной неопределенности.

В-третьих, механизм согласования включает ценообразование на промежуточный продукт внутри производственной цепочки и распределение экономического эффекта, что позволяет перейти от общего описания технологической трансформации к оценке условий ее практической реализуемости.

Теоретическая значимость предлагаемой модели состоит в развитии представления о трансформации угольно-металлургического взаимодействия как о системном процессе, объединяющем технологическую, организационно-экономическую и инвестиционную логику. В противовес фрагментарным подходам, рассматривающим отдельно технологии переработки угля, декарбонизацию металлургии или организационные формы межфирменного взаимодействия, предложенная модель связывает эти элементы в единую исследовательскую рамку.

С позиций системного подхода модель позволяет показать, что устойчивость трансформации зависит от согласования трех структурных контуров. Технологический контур определяет, какие продукты глубокой переработки бурых углей могут быть использованы в металлургическом переделе. Организационно-экономический контур показывает, какая глубина координации требуется для управления проектно-специализированными активами и инвестиционными рисками. Инвестиционно-ценовой контур

переводит взаимодействие участников в плоскость внутренней цены, распределения эффекта и последующей финансовой проверки.

С позиций теории трансакционных издержек модель показывает, что рост капиталоемкости и специфичности активов усиливает потребность в более глубокой координации участников. С позиций ресурсной теории фирмы модель позволяет рассматривать глубокую переработку бурых углей как потенциальный источник совокупности проектных ресурсов и компетенций. С позиций теории заинтересованных сторон она учитывает социально-региональные ограничения и необходимость более плавной трансформации угледобывающих территорий. С позиций теории неполных контрактов модель обосновывает значение ценообразования на промежуточный продукт внутри производственной цепочки как инструмента согласования интересов в рамках неполноты контрактов и ограниченной наблюдаемости внешних рыночных ориентиров.

Теоретическое значение модели заключается не в доказательстве универсальности одной организационной формы или одной технологии, а в формировании исследовательской рамки, позволяющей сопоставлять технологические сценарии по совокупности технологических, инвестиционных, инфраструктурных и организационно-экономических условий.

Область исследования представлена как пересечение технологических, экономических и организационных факторов, что показано на рисунке 8. Схема связывает положения теоретической модели с основной гипотезой и ее последующей проверкой.

На рисунке 8 технологические факторы отражают содержание технологического выбора: использование бурых углей, режим газификации, получение водорода или термококса и требования к качеству продукта. Экономические факторы фиксируют условия операционного сопоставления сценариев (сравнения технологических сценариев, выполняемого до инвестиционного анализа и без учета капитальных затрат, по стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности продукта в металлургическом переделе) и их инвестиционного сопоставления: достижение паритета, оценку капитальных затрат (Capital Expenditure, CAPEX), NPV и IRR, логистические параметры, цену промежуточного продукта и распределение синергетического эффекта. Организационные факторы показывают, что практическая реализация

технологического сценария требует согласования параметров модели взаимодействия, включая качество, объемы, сроки поставки, распределение рисков, ответственность участников и инвестиционные обязательства.



Источник: составлено автором.
Рисунок 8 – Область исследования на пересечении технологических, экономических и организационных факторов трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Центральная область рисунка отражает предметное поле настоящего исследования. Она возникает не внутри одного фактора, а на пересечении технологической применимости, операционной жизнеспособности технологического сценария и реализуемости модели. Поэтому трансформация угольно-металлургического взаимодействия не может быть сведена только к выбору технологии газификации, только к расчету финансовых показателей или только к выбору организационной формы взаимодействия. Реализуемость модели определяется одновременным выполнением технологических, экономических и организационных условий.

Пересечения пар факторов задают логику последующей проверки гипотез. Связка «технологии – экономика» формирует критерий операционного паритета сценария и необходимость сопоставления полной и частичной газификации посредством методики сравнительной оценки по УЕСЭ. Связка «технологии – организация» раскрывает необходимость согласования сырья, технологии переработки и требований металлургического применения. Связка «экономика – организация» определяет правило расчета, пересмотра и договорного закрепления расчетной внутренней цены термококса как экономический инструмент механизма согласования, коридор распределения эффекта и условия закрепления ответственности участников.

Представленная диаграмма конкретизирует исследовательскую рамку настоящего параграфа и показывает, что основная гипотеза диссертации должна проверяться не изолированно по одному из факторов, а через их совместное действие. На основании указанной рамки в исследовании используется основная гипотеза, заявленная во введении.

Основная гипотеза исследования (Н) состоит в том, что трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе частичной газификации бурых углей экономически обоснована при одновременном выполнении трех проверяемых условий:

1) достижении операционного паритета, состояния, при котором стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности продукта сценария не превышает стоимости в нормированном традиционном сценарии, по стоимости сопоставимой энергетической ценности (УЕСЭ $\leq$ 100%) с вероятностью не ниже 90%;

2) превышении внутренней нормы доходности проекта над средневзвешенной стоимостью капитала при заданном диапазоне предпосылок;

3) существовании непустого ценового коридора термококса, приемлемого одновременно для угольного, газификационного и металлургического контуров.

Все три условия относятся к сценарию частичной газификации и термококсовому проекту; гипотеза считается опровергнутой при

невыполнении любого из них. Результаты проверки сценария полной газификации с получением водорода служат базой сравнения при выборе сценария и на статус основной гипотезы не влияют.

Для проверки основной гипотезы Н формулируются три взаимосвязанные частные гипотезы – Н1, Н2 и Н3, последовательно раскрывающие технологический, сравнительно-экономический и организационно-ценовой аспекты предлагаемой модели. Гипотеза Н1 направлена на проверку достижимости пороговых условий операционной жизнеспособности обоих сценариев газификации (задача 3, положение 3), гипотеза Н2 – на сопоставление вероятности достижения ими операционного паритета и обоснование выбора сценария для инвестиционной апробации (задача 4, положение 4), гипотеза Н3 – на оценку механизма внутреннего ценообразования на термококс и распределения экономического эффекта. Такая декомпозиция обеспечивает последовательную проверку основной гипотезы. Поскольку каждая частная гипотеза должна быть проверяемой, в таблице 16 определены соответствующее утверждение, метод проверки, используемые данные и инструментарий, а также критерии подтверждения и опровержения.

Каждая гипотеза имеет собственный метод проверки, эмпирическую или расчетную базу и критерии подтверждения/опровержения. Такая структура позволяет избежать декларативной формулировки гипотез и обеспечивает их связь с последующими разделами диссертации: в главе 2 проверяется достижимость пороговых условий посредством методики сравнительной оценки по УЕСЭ и экспертной валидации, а в главе 3 раскрывается имитационное моделирование методом Монте-Карло, инвестиционная оценка конкретного проекта, механизм согласования и оценка эффектов трансформации.

Предлагаемая модель призвана дать комплексный ответ на вызовы, рассмотренные в параграфе 1.2. Ее вклад в преодоление эколого-климатических, экономико-технологических и социально-региональных ограничений представлен в таблице 17.

Таблица 16 – Гипотезы исследования и способы их проверки

Гипотеза	Проверяемое утверждение	Метод проверки	Данные и инструментарий	Критерий подтверждения	Критерий опровержения
1	2	3	4	5	6
Н – основная гипотеза	Трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе частичной газификации бурых углей экономически обоснована при одновременном выполнении трех проверяемых условий	Теоретическое моделирование; применение методики сравнительной оценки по УЕСЭ; экспертная валидация; имитационное моделирование методом Монте-Карло; инвестиционная оценка; расчет ценового коридора термококса	Научная литература; технологические параметры полной и частичной газификации; экспертный опрос; входные параметры расчетной модели; результаты имитационного моделирования методом Монте-Карло; финансовая модель проекта; расчет цены термококса	Гипотеза подтверждается, если: - термококсовый сценарий достигает операционного паритета по критерию $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ при заданных пороговых условиях; - термококсовый проект подтверждает инвестиционную состоятельность по NPV > 0, IRR > WACC, положительному FCFF и приемлемому сроку окупаемости	Гипотеза опровергается при невыполнении любого из трех условий для термококсового сценария Результаты проверки водородного сценария (Н1 в части полной газификации, Н2) на статус Н не влияют
Н1 – о жизнеспособности двух сценариев газификации	Оба сценария газификации бурых углей обладают необходимым технологическим и экономическим потенциалом для обеспечения жизнеспособного межфирменного взаимодействия при заданных пороговых условиях	Расчет предварительных значений УЕСЭ и КУЕСЭ; определение пороговых параметров; экспертная валидация достижимости пороговых условий; технологическая проверка параметров; сопоставление сценариев по критерию операционного паритета	Параметры операционного сопоставления: индекс углеродного регулирования ($I_{рег}$), L, Q, $К_{т.и.}$, надбавка на технологический риск $R_{тех}$; технологические характеристики бурых углей и продуктов газификации; экспертные оценки 73 специалистов; термодинамические расчеты из расчетных приложений, используемые для обоснования диапазонов входных параметров, но не заменяющие квалификацию продукта; литературные и проектные источники	В главе 2 Н1 расчетно поддерживается в принятой сценарной спецификации, если для обоих сценариев выполняется условие $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$. Документированные ответы описывают достижимость отдельных условий	Гипотеза опровергается, если хотя бы один из сценариев при реалистичных пороговых условиях не может достичь $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ либо экспертная валидация показывает недостижимость ключевых технологических, инфраструктурных или экономических условий Опровержение Н1 в части водородного сценария сужает сравнение в Н2 до одностороннего, но не опровергает основную гипотезу Н, условия которой относятся к термококсовому сценарию

Продолжение таблицы 16

1	2	3	4	5	6
Н2 – о сравнительном преимуществе частичной газификации	При достижении пороговых условий сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса демонстрирует более высокую расчетную вероятность достижения операционного паритета по УЕСЭ, чем сценарий полной газификации с получением водорода на горизонте до 2040 г.	Имитационное сопоставление сценариев методом Монте-Карло; анализ чувствительности параметров сопоставления операционной эффективности; сравнение вероятности достижения операционного паритета; инвестиционная апробация выбранного термококсового сценария как отдельный второй этап, не входящий в критерий Н2 [156]	Сценарно уточненные диапазоны $I_{рег}$, L, Q, $К_{т.и.}$, $R_{тех}$; 100 000 итераций Монте-Карло в MS Excel по каждому сценарию; результаты расчета $К_{УЕСЭ}$. Параметры российско-китайского проекта и показатели NPV, IRR, FCFF, EBITDA, простого (PP) и дисконтированного (DPP) сроков окупаемости используются только на отдельном втором этапе и не входят в критерий Н2	Гипотеза подтверждается, если вероятность достижения $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ у сценария частичной газификации выше, чем у сценария полной газификации После сравнительной проверки Н2 выбранный термококсовый сценарий проходит отдельную инвестиционную апробацию по критериям NPV > 0, IRR выше принятой ставки, положительного FCFF, PP и DPP; этот этап не является симметричной DCF-проверкой водородного сценария	Гипотеза опровергается, если водородный сценарий показывает равную или более высокую вероятность достижения операционного паритета при сопоставимых условиях Отрицательный результат отдельной инвестиционной апробации термококсового проекта ограничивает рекомендацию к его внедрению, но не изменяет результат сравнительной операционной проверки Н2 Отклонение Н2 не влечет отклонения Н: условие 1 основной гипотезы проверяется по абсолютной вероятности паритета термококсового сценария независимо от результата водородного

Продолжение таблицы 16

1	2	3	4	5	6
Н3 – о внутреннем ценообразовании на термококс	Согласованный механизм внутреннего ценообразования на термококс формирует положительный корпоративный распределительный эффект; отрасле-региональные и национально-экономические результаты рассматриваются отдельно как сценарный потенциал масштабирования	Расчет коридора экономически обоснованной цены термококса; определение нижней и верхней границ цены; расчет распределяемой синергии; построение матрицы рисков; разработка KPI мониторинга соглашения участников; оценка эффектов по уровням	Себестоимость термококса; амортизационная составляющая; нормальная доходность угольного/газификационного контура; стоимость альтернативного углеродистого энергоносителя; логистический коэффициент; объем потребления термококса; финансовая модель проекта; расчетные значения УЕСЭ и КУЕСЭ, показатели EBITDA, FCFF, NPV и IRR; экспертные оценки принципов ценообразования	Гипотеза подтверждается, если рассчитанный ценовой коридор обеспечивает одновременно: - покрытие затрат, амортизации и нормальной доходности угольного/газификационного контура; - экономию металлургического контура относительно альтернативной поставки; - наличие распределяемой синергии; - возможность закрепления рисков и KPI мониторинга в соглашении участников; - подтверждение корпоративного распределительного эффекта без двойного счета; более широкие эффекты отражаются отдельно как сценарный потенциал масштабирования	Гипотеза опровергается, если цена термококса не может быть установлена в коридоре, приемлемом для обеих сторон; если отсутствует распределяемая синергия; если механизм цены разрушает инвестиционную мотивацию одного из контуров либо не позволяет закрепить распределение рисков между участниками

Источник: составлено автором.

Таблица 17 – Вклад модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия в решение системных вызовов устойчивого развития

Сфера вызова	Ограничения традиционной модели	Возможности модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия	Характер ожидаемого эффекта
1	2	3	4
Эколого-климатическая	Высокая углеродная уязвимость традиционной коксо-доменной модели; зависимость от углеродоемких технологических процессов [116; 207]	Глубокая переработка бурых углей методом газификации создает предпосылки для изменения структуры сырьевой базы и технологической цепочки [164; 165]	Снижение углеродной уязвимости, оцениваемое в заданной проектной границе с возможностью расширения до полного углеродного баланса
Экономико-технологическая	Зависимость от коксующихся марок угля, технологическая инерция, ограниченная гибкость традиционной линейной цепочки [82; 204]	Формирование новых технологических продуктов глубокой переработки бурых углей, используемых в металлургическом переделе [36; 39; 80]	Повышение экономической устойчивости, диверсификация сырьевой базы, появление условий для инвестиционной проверки альтернативных сценариев
Инвестиционная	Капитальные вложения локализованы внутри отдельных предприятий; отсутствует единая методика оценки жизнеспособности новых технологических сценариев	Модель связывает технологический выбор с капиталоемкостью, внутренней ценой, сопоставлением по УЕСЭ и последующей оценкой NPV/IRR [3; 23; 32]	Переход от качественной идеи трансформации к проверяемой инвестиционной логике
Организационно-экономическая	Взаимодействие преимущественно строится вокруг договора поставки и рыночной цены сырья [225]	Глубокая координация участников угольного, газификационного и металлургического контуров и механизм согласования на основе внутренней цены промежуточного продукта в интегрированной производственной цепочке позволяют распределять риски и экономический эффект [131; 148; 225]	Снижение риска несогласованности интересов участников и формирование условий долгосрочной устойчивости взаимодействия
Социально-региональная	Риск резкого обесценения угольной специализации территорий и потери занятости при односторонней декарбонизации [154; 187]	Вовлечение бурых углей в новые производственные цепочки создает предпосылки для более плавной технологической трансформации [63; 187; 212]	Формирование социально-региональных предпосылок плавной трансформации занятости; количественная оценка требует отдельной региональной модели

Источник: составлено автором.

Как следует из таблицы 17, целевая модель не должна трактоваться как универсальное решение всех экологических, экономических и социальных проблем угледобывающих и металлургических регионов. Ее значение состоит в формировании исследовательской рамки, в которой технологическая трансформация, инвестиционная реализуемость, внутренняя цена

промежуточного продукта, организационная координация и социально-региональные ограничения рассматриваются совместно. Модель не предполагает автоматического достижения экологического или социального эффекта и не заменяет количественной оценки углеродного баланса и региональных последствий. Она связывает технологический выбор с условиями его экономической и организационной реализации.

Такое совместное рассмотрение снижает риск технологического редукционизма, при котором выбор сценария определяется только экологическим потенциалом, и финансового редукционизма, ограничивающего оценку краткосрочными показателями окупаемости. Одновременно учитывается, что перспективный сценарий требует подтверждения операционной сопоставимости, инвестиционной состоятельности и возможности согласования интересов участников.

Для проверки сформулированных гипотез во второй главе применяется методика сравнительной оценки по УЕСЭ, позволяющая перейти от качественного сопоставления полной и частичной газификации к количественной оценке их операционной жизнеспособности. Методика формирует первый уровень оценки сценариев, связывая технологические и операционные характеристики с критерием операционного паритета, но не подменяет последующий инвестиционный анализ проекта.

Таким образом, во второй главе методика сравнительной оценки по УЕСЭ применяется и проходит валидацию, уточняются пороговые условия жизнеспособности сценариев полной и частичной газификации бурых углей и формируется расчетная основа для дальнейшего имитационного сопоставления. Полученные результаты обеспечивают переход к моделированию методом Монте-Карло, выбору базового сценария апробации и последующей инвестиционной оценке конкретного проекта его реализации в третьей главе.

Выводы по главе 1

1) Сравнительный анализ эволюции и организационных форм взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий показал, что сложившаяся модель построена на поставке стандартизированного сырья в коксо-доменную цепочку и ни в одной из традиционных форм – долгосрочных контрактах, вертикальной интеграции, холдингах – не содержит механизма для

появления новой стадии глубокой переработки с высокой специфичностью активов. Отсюда следует, что единицей анализа трансформации должна быть не пара «поставщик – потребитель», а триада угольного, газификационного и металлургического контуров, согласуемая по технологическому сценарию, инвестиционным обязательствам и распределению эффекта; организационная форма вторична по отношению к этой конфигурации.

2) Сопоставление международной и российской научной литературы и декомпозиция целей устойчивого развития до отраслевых критериев выявили два подхода в общей рамке: нормативную декарбонизацию с сокращением роли угля и эволюционный перевод угля из топлива в сырье для глубокой переработки. Эколого-климатические, экономико-технологические и социально-региональные вызовы оказались сцепленными: ужесточение углеродного регулирования удорожает капитал для угольных активов и тем самым сужает возможности модернизации, которой требует климатическая повестка. Поэтому оптимизация внутри коксо-доменной модели необходима, но недостаточна, а цели устойчивого развития следует применять как проверяемые критерии выбора технологического сценария, а не как декларации.

3) Систематизация технологических решений по месту их вмешательства в производственную цепочку и последовательный отбор по применимости к буроугольной базе и металлургическому спросу оставили два равноправных сценария – полную газификацию бурых углей с получением водорода и частичную газификацию с производством термококса. Сценарии различаются прежде всего профилем ограничений: водородный зависит от специализированной инфраструктуры, источника низкоуглеродной энергии и еще не сформированного спроса на низкоуглеродную сталь, термококсовый – от стабильности качества продукта и глубины координации участников при совместимости с существующей логистикой. Анализ практики показал, что реализованные проекты фрагментарны: в них отсутствует либо угольный контур, либо буроугольная база, либо механизм распределения эффекта, – что подтверждает отсутствие готового решения и необходимость авторской модели.

4) На основе синтеза системного подхода, концепции технологических парадигм, теорий трансакционных издержек, ресурсной теории фирмы, заинтересованных сторон и неполных контрактов сформулирована модель

трансформации как согласование шести контуров – трех контуров участников и трех структурных (технологического, организационно-экономического и инвестиционно-ценового). Каждая теория обосновывает один обязательный элемент конструкции: рост глубины координации со специфичностью активов, договорную, а не имущественную природу неимитируемости ресурсов, необходимость правила расчета и пересмотра внутренней цены. Модель не предписывает ни организационную форму, ни технологию и не гарантирует экологического или социального эффекта – она задает условия, при которых технологический выбор экономически и организационно реализуем, и тем самым исключает как технологический, так и финансовый редукционизм.

5) Из модели выведены основная гипотеза и частные гипотезы Н1-Н3 с критериями подтверждения и опровержения: трансформация на основе частичной газификации признается экономически обоснованной, если одновременно достигается операционный паритет с традиционным сценарием с вероятностью не ниже 90%, внутренняя норма доходности проекта превышает барьерную ставку и существует непустой ценовой коридор термококса, приемлемый для всех контуров. Для проверки обоснован двухэтапный подход – операционное сопоставление сценариев по стоимости сопоставимой энергетической ценности и последующая инвестиционная оценка конкретного проекта, – в котором операционный уровень не подменяет ни инженерной верификации продукта, ни инвестиционного анализа. Результаты по водородному сценарию служат базой сравнения и на статус гипотезы не влияют.

Глава 2

Условия жизнеспособности и реализуемости модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия

2.1 Критерии и основные условия реализации модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия, соответствующей целям устойчивого развития

Представленный в главе 1 анализ формирует многоуровневую теоретическую конструкцию, которая требует перехода к эмпирической и расчетной проверке гипотез исследования. В главе 2 проверяется прежде всего гипотеза Н1 о том, что оба сценария газификации бурых углей: полная газификация с получением водорода и частичная газификация с производством термококса – обладают необходимым технологическим и экономическим потенциалом для обеспечения жизнеспособного межфирменного взаимодействия при заданных пороговых условиях. Одновременно глава 2 формирует эмпирическую базу для последующей проверки Н2 о сравнительном преимуществе частичной газификации и Н3 о значении механизма внутреннего ценообразования на термококс.

Долгосрочная реализуемость модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия определяется достижением и поддержанием специфического операционно-экономического равновесия. Равновесие достигается, когда выполняются три условия сразу: экологическое – углеродная уязвимость снижается, а сценарий соответствует ориентирам устойчивого развития; экономическое – достигается операционный паритет и сохраняется операционная жизнеспособность угледобывающих и металлургических предприятий без ухудшения условий использования технологических продуктов в металлургическом переделе; социальное – трансформация занятости удерживается в рамках, приемлемых для регионального развития. Ни одно из трех условий не выводится из двух других.

Сравнительный анализ экономической целесообразности перехода от одной технологической системы к другой требует единой методической основы

оценки затрат. Прямое сопоставление цен на разнородные промежуточные продукты: коксующийся уголь, водород, термококс – некорректно в силу фундаментальных различий в их физико-химических свойствах, энергетической ценности, эффективности использования и структуре сопутствующих издержек. Как отмечается в литературе, ключевой задачей является поиск «общего знаменателя» для затрат, элиминирующего влияние специфики отдельных энергоносителей [195]. LCOE нормирует затраты на единицу выработанной электроэнергии, LCOS – на единицу энергии, прошедшей через накопитель, TCO агрегирует затраты владения конкретным активом за жизненный цикл, а показатель стоимости 1 ГДж отражает стоимость единицы энергии [109; 134; 202]. Ни один из этих подходов сам по себе не задает отраслевой базы для сопоставления коксующегося угля, термококса и водорода как разнородных промежуточных продуктов угольно-металлургической производственной цепочки, не декомпозирует результат на энергетическую, логистическую, сценарную углеродную и прочие операционные компоненты относительно единого базового сценария и не определяет место расчетного значения до инженерной и инвестиционной проверки.

Для преодоления указанных ограничений применяется методика сравнительной оценки по УЕСЭ. УЕСЭ представляет собой абсолютное расчетное значение суммы сопоставимых стоимостных компонент на 1 ГДж в установленной расчетной границе. В расчете каждый продукт приводится к стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности (далее – сопоставимая ЭЦ) с учетом энергетической, логистической, потенциальной углеродной и прочих операционных компонент. Это позволяет сравнивать не цену тонны продукта, а стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности в металлургическом переделе. Расчетная база составляет 1 ГДж, а традиционный сценарий нормируется на 100 у.е.

УЕСЭ не оценивает восстановительную функцию продукта непосредственно и не подменяет технологический анализ металлургического процесса; развернутое обоснование этого ограничения и состава обязательного инженерного допуска раскрывается далее в настоящем параграфе.

Базисом условной единицы принят нормированный традиционный сценарий, основанный на использовании коксующегося угля и применении

наилучших доступных подходов к организации доменного процесса. Расчетное значение УЕСЭ традиционного сценария принимается равным 100 у.е. Это значение служит точкой отсчета для последующего сопоставления технологических сценариев полной и частичной газификации бурых углей. УЕСЭ характеризует не физическую взаимозаменяемость продуктов, а их условную энерго-стоимостную сопоставимость; функциональная пригодность проверяется на инженерном уровне.

Методика сравнительной оценки по УЕСЭ основана на операционной оценке, сознательно отделенной от капитальных затрат. УЕСЭ используется для сравнительной оценки технологических сценариев и не заменяет инвестиционный анализ. Инвестиционная оценка конкретного проекта выполняется отдельно с учетом CAPEX и показателей NPV, IRR и дисконтированного срока окупаемости. Отдельно, на этапе операционного сопоставления, оценивается вероятность выполнения критерия операционного паритета: коэффициент сопоставимой энергетической ценности (КУЕСЭ) $\leq 100\%$. Такой подход позволяет сначала установить операционный паритет и оценить операционную жизнеспособность технологического сценария, а затем проверить его инвестиционную состоятельность.

Сравнительные границы применения УЕСЭ, LCOE, LCOS, TCO, стоимости 1 ГДж и DCF систематизированы в таблице 18.

Сопоставление показывает, что УЕСЭ не является переименованной стоимостью 1 ГДж. Отличие образует сочетание четырех элементов. Во-первых, объект оценки – не отдельный энергоноситель или актив, а сценарий применения технологического продукта в конкретной угольно-металлургической цепочке. Во-вторых, в расчетном значении раздельно фиксируются энергетическая, логистическая, сценарная углеродная и прочие операционные компоненты; при отсутствии действующего или моделируемого углеродного регулирования углеродная компонента равна нулю. В-третьих, применяется компонентная нормировка относительно традиционного сценария, принятого за 100 у.е. В-четвертых, методика занимает определенное место в последовательности решения: после установления принципиальной технологической допустимости сценария, но до детальной инженерной и инвестиционной оценки.

Таблица 18 – Сопоставление УЕСЭ с распространенными стоимостными метриками

Подход	Объект и результат оценки	Граница системы и учитываемые компоненты	Что не учитывается по умолчанию	Ограничение в задаче угольно-металлургического взаимодействия и место УЕСЭ
1	2	3	4	5
LCOE	Генерирующий объект или технология; приведенная стоимость единицы произведенной электроэнергии	Жизненный цикл генерирующего актива: дисконтированные CAPEX, OPEX, топливо и ликвидационные затраты, отнесенные к дисконтированному отпуску электроэнергии [109]	Системная ценность электроэнергии во времени и пространстве, сетевые и внешние эффекты, если они специально не включены; неэнергетические функции материала	Предназначена для электрогенерации и не устанавливает сопоставимость угля, термококса и водорода как продуктов металлургического передела
LCOS	Система хранения в заданном применении; приведенная стоимость отпущенной из накопителя электроэнергии	Инвестиции, замена элементов, OPEX, зарядная энергия, эффективность, деградация, число циклов и остаточная стоимость [202]	Рыночная ценность системных услуг, если она не задана в сценарии; химическая, восстановительная и структурная функции материалов	Решает задачу сопоставления накопителей электроэнергии, а не технологических продуктов с различными функциями в металлургическом процессе
Стоимость 1 ГДж (cost per GJ)	Топливо или энергоноситель; цена единицы содержащейся энергии	Цена продукта, деленная на высшую или низшую теплоту сгорания; доставка и конверсия учитываются только в пределах выбранного ценового базиса [1]	Не имеет стандартного состава дополнительных затрат; обычно не отражает технологическую функцию, углеродную уязвимость, координационные издержки и эффективность применения	Обеспечивает калориметрическую, но не технологическую сопоставимость: одинаковая стоимость 1 ГДж не означает взаимозаменяемости продуктов
TCO	Приобретаемый объект, услуга или отношение с поставщиком; совокупная стоимость для конкретного покупателя	Цена приобретения, поиск и квалификация поставщика, оформление заказа, доставка, владение, эксплуатация, обслуживание и выбытие [134]	Единого функционального знаменателя и универсального состава компонент нет; технологическая эквивалентность определяется отдельно для каждого применения	Может включать логистические и углеродные затраты, но не содержит встроенного алгоритма приведения разнородных металлургических продуктов к общей операционной базе
DCF, NPV, IRR	Инвестиционный проект; стоимость и доходность капитала	Денежные потоки проекта с учетом CAPEX, OPEX, налогов, оборотного капитала и дисконтирования [3; 23; 32]	Не формирует технологическую сопоставимость альтернатив: модель строится для уже выбранного сценария	Применяется на втором этапе – для инвестиционной оценки конкретного проекта, соответствующего сценарию, прошедшему операционный отбор

Продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5
УЕСЭ	Сценарий применения технологически разнородного продукта в угольно-металлургической производственной цепочке; расчетное значение стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности относительно базы 100 у.е.	Стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности, логистика, сценарная углеродная компонента и прочие операционные затраты; в расширенной модели – параметры эффективности сырья, качества и операционного риска	CAPEX, стоимость финансирования, полная LCA, детальная термодинамика и кинетика восстановления, прочность кокса и поведение шихты	Методика сравнительной оценки по УЕСЭ для предварительного операционного отбора, связывающая технологическую допустимость сценария с последующей инвестиционной проверкой [109; 134; 202]

Источник: составлено автором.

Условие $К_{УЕСЭ,i} \leq 100\%$ соответствует критерию операционного паритета и образует первый этап принятия решения, дополняемый инвестиционной оценкой проекта. Новизна методики состоит в прямой отраслевой адаптации стоимостно-энергетического сопоставления к трансформации межфирменного угольно-металлургического взаимодействия, авторском составе компонент, алгоритме их нормирования и включении расчетного значения в двухэтапный подход «операционный отбор сценария – инвестиционная оценка проекта» [75; 77].

При интерпретации УЕСЭ следует разграничивать энергетическую сопоставимость и функциональную взаимозаменяемость продуктов. В коксо-доменном процессе кокс и металлургический уголь служат источником тепла, участвуют в формировании восстановительного газа, обеспечивают проницаемость и механическую устойчивость столба шихты и являются источником углерода для металла [47; 82; 141]. Водород в H_2-DRI выполняет преимущественно функцию восстановителя, но не воспроизводит структурную функцию кокса в доменной печи. Пригодность термококса определяется не только теплотой сгорания, но и реакционной способностью, прочностью до и после реакции, гранулометрическим составом и влиянием на газопроницаемость шихты.

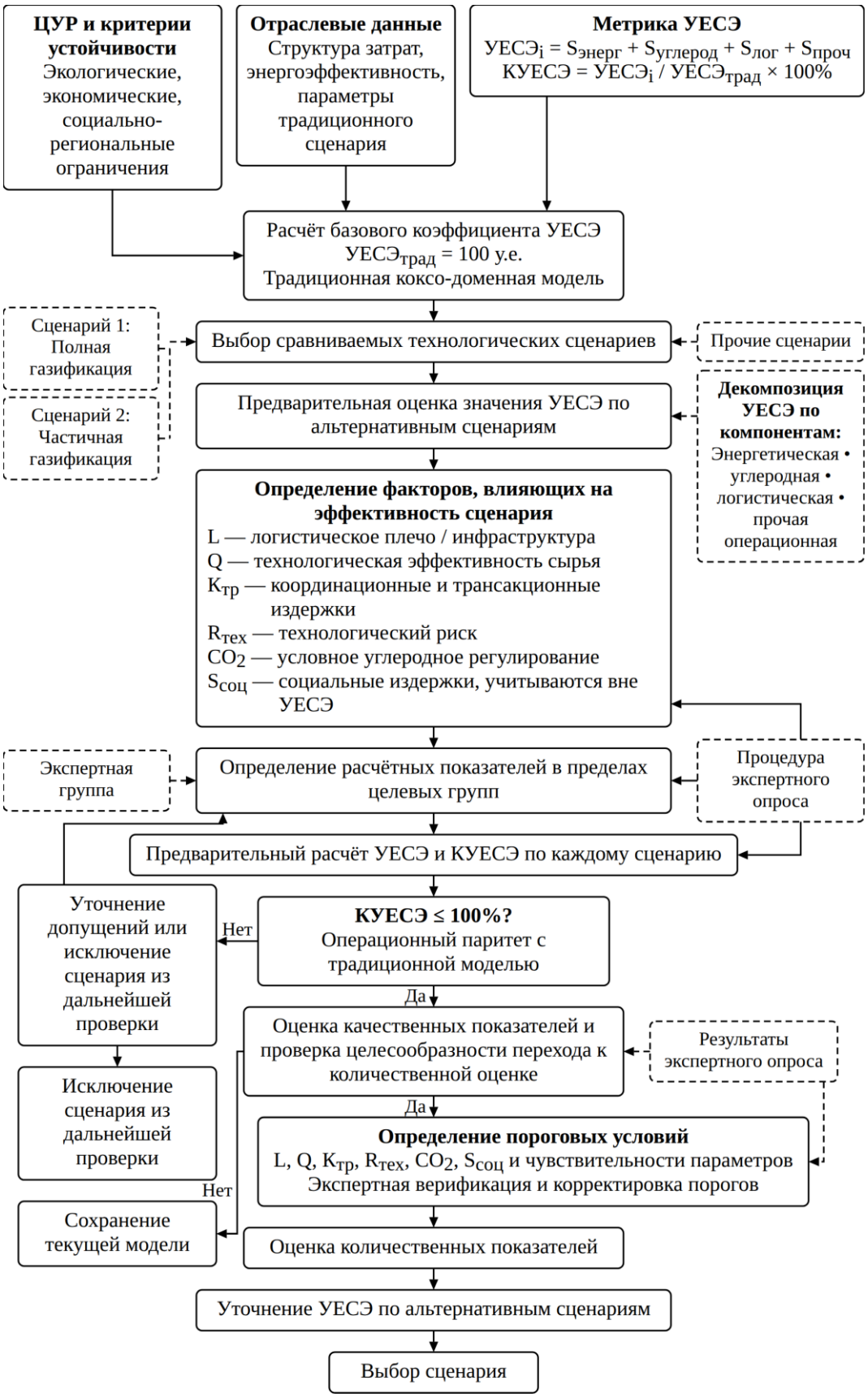
Восстановительная способность в метрику не включается. Единый коэффициент, связывающий степень и скорость восстановления, расход восстановителя, реакционную способность и прочность кокса, газопроницаемость и выход металла со стоимостью 1 ГДж, пришлось бы строить под конкретный агрегат, состав руды и шихты и температурно-газовый режим; универсального не существует. Без него часть параметров учитывалась бы дважды – они уже входят в выход продукта, операционные затраты и технологический риск. Поэтому восстановительная способность работает как условие допуска сценария к расчету, а не как слагаемое внутри него: УЕСЭ дает сравнительную стоимость энергетической функции технологически допустимого сценария и не устанавливает ни замещение кокса 1:1, ни требуемый расход восстановителя, ни параметры агрегата. Инженерная проверка реакционной способности, прочности и поведения шихты

обязательна и выполняется между операционным отбором и инвестиционной оценкой.

Чтобы исключить разрыв между качественной рамкой устойчивого развития и количественной проверкой сценариев, применяется методика сравнительной оценки по УЕСЭ. Она операционализирует критерии устойчивого развития: от ЦУР, отраслевых данных и структуры затрат – к базовому значению традиционного коксо-доменного сценария (100 у.е.), выбору сопоставляемых сценариев, предварительной оценке их УЕСЭ и КУЕСЭ и выявлению факторов операционного паритета. Расчетное значение декомпозируется на энергетическую, углеродную, логистическую и прочие операционные компоненты, что показывает источники преимуществ и ограничений. Условие КУЕСЭ ≤ 100% служит операционным фильтром для перехода к инвестиционной оценке проекта. Логика применения методики сравнительной оценки по УЕСЭ, представленная на рисунке 9, показывает, каким образом качественные критерии устойчивости, отраслевые данные и расчетная формула последовательно переводятся в систему взаимосвязанных параметров, пригодных для последующего моделирования, проверки достижимости пороговых условий, экспертной валидации и обоснованного отбора технологического сценария.

На первом этапе определяются базовые условия сопоставления: критерии устойчивости, отраслевые данные, структура затрат и расчетная формула УЕСЭ. Далее рассчитывается базовое значение УЕСЭ для традиционного коксо-доменного сценария, принимаемое за 100 у.е., после чего из совокупности технологических решений выделяются сопоставляемые сценарии полной и частичной газификации бурых углей.

На следующем этапе для каждого альтернативного сценария проводится предварительная оценка УЕСЭ и коэффициента $К_{УЕСЭ}$. При этом расчетное значение УЕСЭ декомпозируется на энергетическую, углеродную, логистическую и прочие операционные компоненты. Такая декомпозиция необходима для того, чтобы не ограничиваться общей величиной затрат, а определить, за счет каких именно факторов сценарий может достигать или не достигать операционного паритета с традиционным коксо-доменным сценарием.



Источник: составлено автором.

Рисунок 9 – Алгоритм операционализации критериев устойчивого развития посредством методики сравнительной оценки по УЕСЭ и отбора технологического сценария трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Отдельный блок алгоритма связан с определением факторов, влияющих на эффективность сценария: логистического плеча и инфраструктуры L, технологической эффективности сырья Q, коэффициента трансакционных издержек $K_{\text{т.и.}}$, надбавки на технологический риск $R_{\text{тех}}$, индекса углеродного регулирования Iрег, а также социальных издержек $C_{\text{соц}}$. При этом $C_{\text{соц}}$ учитывается вне УЕСЭ и используется как ограничение общей реализуемости проекта, поскольку социально-региональные последствия не должны механически включаться в стоимость 1 ГДж сопоставимой ЭЦ.

Алгоритм показывает и место экспертной процедуры в методике. Экспертная выборка используется не для замены расчетов, а для экспертной валидации достижимости пороговых условий и оценки воспринимаемой реалистичности достижения параметров в пределах целевых групп. Если предварительный расчет показывает невозможность достижения $К_{\text{УЕСЭ}} \leq 100\%$, сценарий либо исключается из дальнейшей проверки, либо требует уточнения допущений. Если условие операционного паритета выполняется, сценарий переходит к оценке качественных показателей и последующей количественной проверке.

Рисунок 9 задает методическую границу между операционной и инвестиционной оценками. На этапе операционной оценки по УЕСЭ проверяется достижение сопоставимости сценариев по стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ в металлургическом переделе. Капитальные затраты, NPV, IRR и срок окупаемости не включаются в УЕСЭ, а рассматриваются на следующем уровне проверки.

Для традиционного сценария (с использованием коксующегося угля в металлургическом переделе) компоненты затрат оценены в условных единицах на основе научной и отраслевой литературы [47; 121; 162]. В качестве исходной базы использована типичная структура операционных затрат и уязвимостей традиционной коксо-доменной производственной цепочки, включающая энергетическую, потенциальную углеродную, логистическую и прочие операционные компоненты. Перевод данных литературы в условные единицы выполнен методом компонентной нормировки: суммарное расчетное значение УЕСЭ традиционного сценария принято равным 100 у.е., а каждой компоненте присвоено значение, соответствующее ее доле в общей структуре базового индекса.

Принятое значение 100 у.е. не является рыночной ценой коксующегося угля, бухгалтерской себестоимостью металлургического передела или

абсолютной оценкой затрат конкретного проекта. Оно представляет собой нормированную расчетную базу, необходимую для сопоставления технологически разнородных продуктов и сценариев. Сумма значений всех компонент традиционного сценария составляет 100 у.е., тогда как соответствующие значения альтернативных сценариев могут находиться как ниже, так и выше данного уровня. Значение ниже базы указывает на потенциальное операционное преимущество альтернативного сценария, равное 100 у.е. – на сопоставимость, а превышающее базу – на необходимость дополнительных компенсирующих факторов. Такой подход обеспечивает сопоставимость структуры операционных компонент без привязки к абсолютным ценовым уровням конкретного периода и не включает капитальные затраты, оцениваемые на последующем этапе инвестиционного анализа. Структура базовой оценки представлена в таблице 19.

Таблица 19 – Структурные компоненты и их оценка в условных единицах для традиционного технологического сценария

В условных единицах

Компонента	Сущность и составляющие	Значение для традиционного сценария	Теоретическое основание оценки
Нормированная энергетическая стоимостная компонента УЕСЭ, $С_{энергетический}$	Затраты на коксующийся уголь как основной энергоноситель традиционной схемы	62	Оценка основана на данных по удельному расходу кокса в передовых доменных печах и долгосрочной стоимости коксующихся марок угля с учетом логистики [47; 121; 162]
Потенциальная стоимость углеродной уязвимости, $С_{углеродный}$	Потенциальная стоимость углеродной уязвимости при наличии углеродного регулирования	22	Оценка отражает не текущие обязательные платежи в рассматриваемом российско-китайском проекте, а сценарный параметр, возникающий при действии или моделировании углеродного регулирования [91; 183; 207]
Затраты на доставку и логистическое обеспечение, $С_{логистический}$	Логистика угля/кокса до металлургического предприятия	11	Компонентная нормировка выполнена с учетом логистических факторов при поставке твердого энергоносителя на значимые расстояния [35; 96; 121]
Прочие операционные затраты использования продукта, $С_{проч.операционный}$	Стандартные операционные издержки металлургического передела, связанные с использованием традиционного энергоносителя	5	Компонентная нормировка вспомогательных операционных затрат по отраслевым материалам [2; 121]
Итого $УЕСЭ_{трад}$	Сумма компонент	100	Нормализованное базовое значение

Источник: составлено автором на основе анализа научной литературы и компонентной нормировки УЕСЭ.

Все альтернативные сценарии сопоставляются с этой базой через коэффициент $К_{УЕСЭ}$.

Значение 100 у.е. сформировано методом компонентной нормировки. Сначала из научной и отраслевой литературы выделены основные группы затрат и уязвимостей традиционного сценария: стоимость коксующегося угля и кокса как базового энергоносителя и восстановителя, потенциальная углеродная уязвимость коксо-доменного сценария, логистические затраты на поставку твердого углеродистого энергоносителя и прочие операционные затраты его применения в металлургическом переделе. Затем каждой группе присвоен нормированный вес; сумма весов принята равной единице, что соответствует 100 у.е. в расчетной шкале УЕСЭ.

В общем виде нормировка традиционного сценария может быть представлена по формуле (1)

$$УЕСЭ_{трад} = C_{энергетический} + C_{углеродный} + C_{логистический} + C_{проч.операционный}, \quad (1)$$

где $C_{энергетический}$ – стоимость энергетической функции коксующегося угля и кокса;

$C_{углеродный}$ – потенциальная стоимость углеродной уязвимости;

$C_{логистический}$ – доставка, перевалка и логистическое обеспечение поставки твердого энергоносителя;

$C_{проч.операционный}$ – прочие операционные расходы, связанные с применением традиционного продукта в металлургическом переделе.

Энергетическая компонента $C_{энергетический}$ принята на уровне 62 у.е., поскольку в традиционном коксо-доменном сценарии коксующийся уголь и произведенный из него кокс формируют основной материально-энергетический элемент процесса. Кокс одновременно выполняет функции источника тепла, углеродистого восстановителя и структурного материала доменной шихты. В связи с этим именно стоимость коксующегося угля и кокса образует наибольшую долю нормированной операционной базы. Источниковая база для этой компоненты включает работы и отраслевые материалы, раскрывающие роль кокса в доменном процессе, удельный расход кокса, технологические требования к коксующимся маркам угля и структуру традиционного металлургического производства [1; 47; 121]. При нормировке указанная компонента определена как

центральное значение интервала 60-65% базового операционного индекса. Значение 62 у.е. выбрано как консервативная оценка, поскольку логистическая составляющая и потенциальная углеродная уязвимость выделены в самостоятельные компоненты, а не включены полностью в цену энергоносителя.

Потенциальная углеродная компонента $C_{\text{углеродный}}$ принята на уровне 22 у.е. Она отражает не текущий обязательный платеж за выбросы CO_2 в рассматриваемом российско-китайском проекте, а модельную стоимость углеродной уязвимости традиционной коксо-доменной схемы при наличии или моделировании углеродного регулирования. Введение этой компоненты необходимо для того, чтобы в базовой метрике учесть чувствительность традиционного коксо-доменного сценария к внешним климатическим и регуляторным ограничениям, которые рассматриваются в литературе по декарбонизации тяжелой промышленности и низкоуглеродной трансформации металлургии [116; 153; 162]. При нормировке углеродная уязвимость задана в диапазоне 20-25% базового индекса; значение 22 у.е. выбрано как умеренная оценка внутри этого диапазона. Оно достаточно велико, чтобы отразить системный характер углеродного риска для традиционного коксо-доменного сценария, но не превышает энергетическую компоненту и не превращает углеродное регулирование в единственный источник сравнительного преимущества альтернативных сценариев.

Логистическая компонента $C_{\text{логистический}}$ принята на уровне 11 у.е. Она отражает затраты на доставку, перевалку, складирование и логистическое обеспечение поставки угля или кокса до металлургического предприятия. Для твердого углеродистого энергоносителя логистика имеет самостоятельное значение: стоимость поставки зависит от расстояния, тарифов, плеча перевозки, необходимости перевалки, стабильности маршрута и потерь качества при хранении и транспортировке. В расчетной модели логистика выделена отдельно, поскольку для альтернативных сценариев она является одним из ключевых факторов различия: водородный сценарий зависит от специализированной инфраструктуры, а термококсовый – от железнодорожного плеча и массы перевозимого продукта. В традиционном сценарии логистическая доля принята как центральное значение интервала 10-12% нормированной базы, поэтому в таблице используется значение 11 у.е. Диапазон 10-12% определен по источникам, раскрывающим

инфраструктурные ограничения, тарифы и логистические факторы поставки сырья [35; 96; 121].

Прочая операционная компонента $C_{\text{проч.операционный}}$ принята на уровне 5 у.е. Она включает остаточные операционные издержки, которые не относятся напрямую к цене энергоносителя, углеродной уязвимости или магистральной логистике, но сопровождают использование традиционного продукта в металлургическом переделе. К ним относятся расходы на складское хозяйство, внутреннюю подачу и подготовку продукта, контроль качества, операционное сопровождение, потери при обращении с материалом и иные вспомогательные процессы. Эта компонента не должна включать капитальные затраты, поскольку УЕСЭ в настоящем исследовании является операционной метрикой. По составу вспомогательных операций данная компонента задана в диапазоне 4-6% и принята на уровне 5 у.е.; состав вспомогательных операций определен с учетом отраслевых материалов [2; 121]. Использование отраслевых справочников как источника нормативных параметров прямо предусмотрено перечнем инструментов технологической политики: «национальные стандарты и информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям с учетом достижения целей технологической политики» [13, ст. 5]. Опора на справочники наилучших доступных технологий обеспечивает сопоставимость принятых расчетных параметров с нормативно признанными ориентирами и снижает субъективность экспертных допущений.

Итоговое значение $\text{УЕСЭ}_{\text{трад}}$ = 100 у.е. получено как сумма указанных компонент. Следовательно, число 100 у.е. является не эмпирически наблюдаемой ценой, а нормированной расчетной базой, необходимой для сопоставления сценариев. Такая база позволяет интерпретировать последующие значения $К_{\text{УЕСЭ}}$: если $К_{\text{УЕСЭ},i}$ меньше 100%, альтернативный сценарий демонстрирует операционное преимущество относительно традиционного коксо-доменного сценария; если показатель равен 100%, сценарии сопоставимы; если он превышает 100%, альтернативный сценарий требует дополнительных компенсирующих факторов.

Предлагаемая структура также обеспечивает методическую непротиворечивость дальнейшего анализа. Во-первых, капиталоемкость не включается в УЕСЭ и оценивается далее через NPV, IRR, FCFF и срок

окупаемости. Во-вторых, углеродная компонента является сценарной и может приниматься равной нулю в прикладных расчетах, если при рассматриваемых регуляторных условиях отсутствуют платежи за выбросы CO_2. В-третьих, логистическая компонента отделена от энергетической, что позволяет корректно сравнивать сценарии с разной инфраструктурной природой и разным физическим характером транспортируемого продукта. Обоснование оценки компонент представлено в таблице 20.

Таблица 20 – Методическое обоснование нормированной оценки традиционного технологического сценария

В условных единицах

Компонента	Источниковая база	Логика нормирования	Принятое значение
$C_{энергетический}$	Роль коксующегося угля и кокса в доменном процессе, удельный расход кокса, требования к качеству коксующихся марок угля и структура традиционного металлургического производства [47; 121; 162]	Основная доля нормированной базы, поскольку кокс является одновременно энергоносителем, восстановителем и структурным элементом доменной шихты; диапазон нормировки – 60-65%	62
$C_{углеродный}$	Литература по углеродной уязвимости тяжелой промышленности, декарбонизации металлургии и сценариям углеродного регулирования [20; 153; 207]	Модельная, а не фактическая платежная компонента; показывает чувствительность традиционного коксо-доменного сценария к возможному углеродному регулированию; диапазон нормировки – 20-25%	22
$C_{логистический}$	Источники по инфраструктурным ограничениям, тарифам и логистике твердого сырья [35; 96; 121]	Логистика выделяется отдельно от энергетической стоимости, поскольку расстояние, тарифы, перевалка и складирование существенно влияют на сопоставимость сценариев; диапазон нормировки – 10-12%	11
$C_{проч.операционный}$	Отраслевые материалы по вспомогательным операциям, обращению с сырьем и контролю качества [2; 121]	Остаточная операционная компонента включает складирование, внутреннюю подачу, контроль качества, потери при обращении с материалом и вспомогательные операции; диапазон нормировки – 4-6%	5
Итого	Компонентная нормировка выполнена на базе указанных научных и отраслевых источников	Сумма компонент образует нормированный базовый индекс традиционного сценария	100

Источник: составлено автором на основе анализа научной литературы и компонентной нормировки УЕСЭ.

Совокупные операционные энергозатраты традиционного сценария принимаются равными 100 у.е., что служит точкой отсчета. Для любого

i-го технологического сценария рассчитывается коэффициент сопоставимой энергетической ценности по формуле (2)

$$К_{УЕСЭ,i} = \frac{УЕСЭ_i}{УЕСЭ_{трад}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $УЕСЭ_{трад}$ = 100 у.е.

Значение $К_{УЕСЭ,i} < 100\%$ указывает на наличие операционного преимущества относительно традиционного сценария; значения $К_{УЕСЭ,i} \leq 100\%$ соответствуют критерию операционного паритета. Значение $К_{УЕСЭ,i} = 100\%$ означает сопоставимость затрат, а значение $К_{УЕСЭ,i} > 100\%$ указывает на рост операционных затрат, требующий дополнительных компенсирующих факторов.

При оценке принято допущение о сопоставимости исходных условий размещения сырьевой базы и металлургического передела. Это допущение позволяет рассматривать различия итоговых значений прежде всего как следствие особенностей технологических сценариев, структуры их операционных затрат и логистических условий, а не как результат несопоставимости исходных территориальных параметров. Значения УЕСЭ по каждому сценарию имеют статус предварительных расчетных значений: они используются как исходная основа для дальнейшего моделирования и экспертной валидации, но сами по себе не являются достаточным основанием для окончательного выбора технологической конфигурации.

Диапазоны оценок по каждой компоненте УЕСЭ сформированы на той же источниковой базе, что и нормировка традиционного коксо-доменного сценария [47; 121; 162]. Минимальные и максимальные значения отражают границы приводимых в этих источниках оценок стоимости энергетической функции продукта, потенциальной углеродной уязвимости, логистических и прочих операционных затрат применительно к водородному и термококсовому направлениям. Для обоих альтернативных сценариев сохранены единые принципы выделения и сопоставления компонент, что обеспечивает сопоставимость результатов.

Нормирование к условным единицам выполнено по аналогии с таблицей 20: каждая компонента выражена как доля базового индекса традиционного сценария, принятого за 100 у.е. Внутри диапазонов применялось консервативное допущение: для альтернативного сценария выбиралось значение, ухудшающее его

сравнительную оценку, что ограничивает риск завышения операционного преимущества, не изменяя границ диапазонов. Сравнительная оценка полной газификации бурых углей с получением водорода и частичной газификации с производством термококса представлена в таблице 21.

Таблица 21 – Структурные компоненты и их оценка в условных единицах для сценариев технологической трансформации

В условных единицах

Компонента	Традиционный сценарий, $УЕСЭ_{трад}$	Сценарий 1: полная газификация бурых углей с получением водорода, $УЕСЭ_1$ [154; 160]	Сценарий 2: частичная газификация бурых углей с производством термококса, $УЕСЭ_2$ [33; 36; 81]
Нормированная энергетическая стоимостная компонента УЕСЭ, $С_{энергетический}$	62	70 у.е. – расчетная стоимость получения и использования водорода как технологического продукта глубокой переработки бурых углей [142; 146; 171]	58 у.е. – расчетная стоимость термококса как технологического продукта глубокой переработки бурых углей [36; 39; 53]
Углеродная компонента, $С_{углеродный}$	22	3 у.е. – предварительная оценка потенциального снижения углеродной нагрузки примерно до 14% базового уровня при наличии соответствующих технологических и регуляторных условий [37; 149; 162; 221]	16 у.е. – предварительная оценка потенциального снижения углеродной нагрузки примерно на 27% относительно традиционного сценария; данный показатель не является полной оценкой совокупного углеродного баланса [54; 80]
Затраты на доставку и логистическое обеспечение, $С_{логистический}$	11	4 у.е. – снижение возможно при наличии специализированной инфраструктуры транспортировки водорода [52; 142; 232]	9 у.е. – снижение связано с изменением массы и характера транспортируемого продукта при сохранении значимости железнодорожной логистики [35; 96]
Прочие операционные затраты использования продукта, $С_{проч.операционный}$	5	2 у.е. – снижение связано с иной структурой операционных расходов при использовании водородного сценария [142; 171]	5 у.е. – прочие операционные затраты оцениваются как сопоставимые с традиционным сценарием [36; 39]
Итого $УЕСЭ_i$	100	79	88
Коэффициент $К_{УЕСЭ,i}$, в процентах	100	79	88

Источник: составлено автором на основе анализа научной литературы и компонентной нормировки УЕСЭ.

Расчетные значения $К_{УЕСЭ,i}$ – 79% для сценария полной газификации и 88% для сценария частичной газификации – показывают предварительную возможность достижения операционного паритета обоими сценариями. В контексте гипотезы Н1 это означает, что оба сценария по результатам предварительного расчета сохраняют технологический и экономический потенциал жизнеспособного межфирменного взаимодействия при заданных

пороговых условиях. Декомпозиция показывает различие источников операционной сопоставимости: в сценарии полной газификации снижение потенциальной углеродной и логистической компонент способно компенсировать рост базовой энергетической компоненты, тогда как в сценарии частичной газификации операционное преимущество формируется за счет более низкой энергетической компоненты и большей совместимости с существующей промышленной инфраструктурой.

При этом предварительные значения $К_{УЕСЭ}$ не являются основанием для окончательного выбора технологического сценария. В главе 2 они используются для проверки Н1 и уточнения пороговых условий жизнеспособности обоих сценариев. Сравнительное преимущество частичной газификации, сформулированное в Н2, требует дополнительной имитационной проверки в главе 3 методом Монте-Карло и последующей инвестиционной оценки конкретного проекта реализации выбранного сценария.

Предварительное операционное преимущество сценария полной газификации обусловлено его потенциальной способностью к более глубокому снижению углеродной уязвимости, однако этот сценарий чувствителен к инфраструктурным условиям, стоимости получения и использования водорода, а также к требованиям металлургического контура. Сценарий частичной газификации демонстрирует операционное преимущество за счет более низкой энергетической компоненты и большей совместимости с существующей промышленной инфраструктурой, однако сохраняет чувствительность к качеству сырья, логистике, наличию спроса на термококс и потенциальной углеродной компоненте.

Дальнейшая проверка Н1 требует учета ограничений и неопределенности условий реализации, на которые влияют шесть групп факторов: локационный и инфраструктурный, регуляторно-рыночный, организационно-институциональный, сырьевой, фактор технологических рисков, социально-экономический. Эти факторы позволяют операционализировать проверку жизнеспособности обоих сценариев через параметры $I_{рег}$, L, Q, $K_{т.и.}$ и $R_{тех}$, а также подготовить основу для последующей проверки Н2 и Н3.

Влияние локационного и инфраструктурного факторов проявляется по-разному. Для сценария полной газификации бурых углей с получением водорода критическим параметром становится наличие готовой или адаптированной инфраструктуры для транспортировки и использования водорода. Инфраструктура позволяет снизить операционную составляющую логистических затрат, в то время как ее отсутствие приводит к росту переменных издержек, способному сделать проект операционно нежизнеспособным в рамках заданной метрики. Для сценария частичной газификации бурых углей с производством термококса ключевым параметром остается расстояние транспортировки L, а влияние фактора выражается в прямой зависимости логистических затрат от заданного расстояния и применяемых тарифов на перевозку твердого продукта.

Регуляторно-рыночный фактор оказывает неодинаковое воздействие на сценарии. Углеродная компонента в настоящем исследовании отражает расчетную стоимость углеродной уязвимости сценария при наличии моделируемого углеродного регулирования. Для сценария полной газификации углеродное регулирование может выступать источником рыночной премии за продукцию с меньшей углеродной уязвимостью, тогда как для сценария частичной газификации оно может непосредственно влиять на величину потенциальной углеродной компоненты затрат. При отсутствии действующего или моделируемого углеродного регулирования компонента $C_{\text{углеродный},i}$ может приниматься равной нулю.

Организационно-институциональный фактор связан с необходимостью координации участников. Формально он описывается коэффициентом роста трансакционных издержек $K_{\text{т.и.}}$, который определяется как отношение фактических затрат на координацию, мониторинг и адаптацию отношений участников к их минимально достижимому уровню в условиях полностью согласованной модели взаимодействия. Значение $K_{\text{т.и.}} = 1$ соответствует условной идеальной координации, а значение $K_{\text{т.и.}} > 1$ – превышению фактических затрат на координацию, мониторинг и адаптацию над минимально достижимым уровнем: чем выше коэффициент, тем менее согласована модель взаимодействия. Его влияние проявляется опосредованно: рост $K_{\text{т.и.}}$ увеличивает логистическую и координационную составляющие

затрат, а также может усиливать прочие операционные издержки вследствие снижения управленческой эффективности.

Сырьевой фактор отражает переход от дорогостоящих коксующихся углей к более доступной буроугольной ресурсной базе. Он объединяет два ключевых параметра: фактическую стоимость угля и его технологическую пригодность для газификации. Второй параметр формализуется через индекс технологической эффективности сырья Q, который отражает реакционную способность, зольность, влажность и выход целевого продукта. В составе Q реакционная способность характеризует поведение исходного бурого угля при газификации и не тождественна восстановительной способности полученного термококса в металлургическом агрегате. Индекс Q используется для минимального предварительного допуска и параметризации операционного расчета, но не заменяет квалификацию конечного продукта. Q влияет на удельный расход сырья, выход водорода или термококса, а следовательно, на базовую энергетическую компоненту $C_{\text{энергетический}}$.

Качественное содержание социально-экономического фактора и фактора технологических рисков является общим для обоих сценариев, однако механизм их влияния различается. Социально-экономический фактор, описываемый через параметр $C_{соц}$, в настоящем исследовании не входит в УЕСЭ, а учитывается как ограничение реализуемости проекта и как предмет последующей экспертной оценки. Фактор технологических рисков, формализуемый как надбавка на технологический риск R_{mex}, представляет собой стоимостную надбавку, связанную с риском недостижения проектных параметров по выходу продукта, качеству, стабильности процесса и эксплуатационным затратам. Надбавка отражает стоимостную оценку технологического риска, а не вероятность технологического отказа. Влияние Rтех носит мультипликативный характер и увеличивает базовую энергетическую и прочие операционные компоненты. Влияние факторов на модель отражено в таблице 22.

Таблица 22 – Сводная характеристика качественного влияния факторов на компоненты расчетной модели

Фактор	Ключевой параметр	Сценарий 1: полная газификация бурых углей с получением водорода	Сценарий 2: частичная газификация бурых углей с производством термококса
Локационный и инфраструктурный	Тип инфраструктуры, расстояние L	Наличие специализированной инфраструктуры критично для низкой $C_{логистический}$; отсутствие инфраструктуры повышает операционные затраты [35; 52; 142]	$C_{логистический}$ зависит от расстояния L и тарифов перевозки твердого продукта [35; 96]
Регуляторно-рыночный	Индекс углеродного регулирования $I_{рег}$	Влияет на потенциальную углеродную компоненту и возможность формирования рыночной премии [21; 123; 198]	Прямо влияет на потенциальную углеродную компоненту при наличии углеродного регулирования
Организационно-институциональный	Коэффициент $K_{т.и.}$	Опосредованно влияет на $C_{логистический}$ и $C_{проч.операционный}$ через рост координационных издержек [148; 194; 225]	Опосредованно влияет на $C_{логистический}$ и $C_{проч.операционный}$ [148; 194; 225]
Сырьевой	Индекс эффективности сырья Q	Влияет на удельный расход угля и выход водорода, определяя $C_{энергетический}$ [58; 157; 171]	Влияет на качество и выход термококса, определяя $C_{энергетический}$ [36; 39; 80]
Социально-экономический	$C_{соц}$	Учитывается вне УЕСЭ как фактор общей реализуемости проекта [154; 187; 212]	Учитывается вне УЕСЭ как фактор общей реализуемости проекта
Технологические риски	$R_{тех}$	Прямое мультипликативное влияние на $C_{энергетический}$ и $C_{проч.операционный}$ [33; 156; 208]	Прямое мультипликативное влияние на $C_{энергетический}$ и $C_{проч.операционный}$

Источник: составлено автором.

Различия в каналах влияния факторов обусловливают необходимость раздельного моделирования сценариев. Характеристики проявления факторов формализуются посредством параметров, встраиваемых в расширенные формулы компонент УЕСЭ; факторы не преобразуются в критерии. Структура факторов, параметров и компонент расчетной модели представлена в таблице 23.

Таблица 23 – Структура факторов, параметров и компонент расчетной модели

Группа факторов	Характеристики проявления фактора	Параметр расчетной модели	Компонента УЕСЭ, на которую влияет параметр
1	2	3	4
Локационный и инфраструктурный	Тип необходимой транспортной инфраструктуры; физическое расстояние между производственными активами [35; 52; 142]	L – расстояние, км; Infra – тип инфраструктуры	$C_{логистический}$
Регуляторно-рыночный	Уровень финансового давления со стороны углеродного регулирования; способность рынка учитывать углеродную уязвимость продукции [69; 123; 198]	$I_{рег}$ – индекс углеродного регулирования	$C_{углеродный}$; $C_{энергетический}$ косвенно

Продолжение таблицы 23

1	2	3	4
Организационно-институциональный	Сложность координации и согласования решений; затраты на мониторинг и адаптацию отношений участников [148; 225]	$K_{т.и.}$ – коэффициент роста трансакционных издержек	$C_{логистический}$; $C_{проч.операционный}$
Сырьевой	Технологическая пригодность угля для газификации; удельный расход угля на единицу целевого продукта [36; 58; 157]	Q – индекс технологической эффективности сырья	$C_{энергетический}$
Технологических рисков	Вероятность недостижения проектных параметров; необходимость создания операционных резервов [33; 156; 208]	$R_{тех}$	$C_{энергетический}$; $C_{проч.операционный}$
Социально-экономический	Затраты на переподготовку и адаптацию персонала; программы поддержки локальной экономики [154; 187; 212]	$C_{соц}$ – удельные затраты на социальную адаптацию	Учитывается отдельно при оценке общей реализуемости проекта

Источник: составлено автором.

Состав параметров в таблице 23 определен четыремя критериями отбора. Во-первых, параметр должен иметь прямой или опосредованный стоимостной канал влияния на одну из четырех компонент УЕСЭ – факторы, не имеющие такого канала на операционном уровне, в метрику не включаются. Во-вторых, параметр должен быть определим на предпроектной стадии по открытым отраслевым данным или экспертной оценкой, без проектной документации конкретного объекта. В-третьих, параметр должен различать сравниваемые сценарии либо по значению, либо по механизму влияния – одинаково действующие на оба сценария величины не меняют результат сопоставления по КУЕСЭ и нормируются в традиционном сценарии. В-четвертых, каждый параметр закреплен за одной группой факторов, чтобы исключить двойной счет одного и того же влияния через разные компоненты. Источником выбора параметров послужили работы, указанные в таблицах 22-23 при соответствующих факторах, а достижимость их пороговых значений проверяется экспертной валидацией в параграфах 2.2 и 2.3.

Связь «фактор – параметр – компонента» в таблице 23 раскрывается следующим образом. Локационный и инфраструктурный фактор входит через расстояние L и тип инфраструктуры, потому что именно они формируют единичные логистические затраты на 1 ГДж и принципиально различаются для газообразного и твердого продукта. Регуляторно-рыночный фактор сведен к индексу углеродного регулирования, поскольку он одновременно задает

расчетную цену углеродной уязвимости и возможность рыночной премии; отдельные параметры цены и охвата регулирования не вводятся, чтобы не дробить один канал влияния. Организационно-институциональный фактор формализован коэффициентом роста трансакционных издержек как единственным измеримым на предпроектной стадии выражением сложности координации, согласующимся с теорией трансакционных издержек, принятой в главе 1 в качестве теоретического основания. Сырьевой фактор представлен индексом Q, объединяющим технологические свойства угля, поскольку именно они, а не цена угля как таковая, различают сценарии по удельному расходу сырья на 1 ГДж продукта; стоимость бурого угля входит в энергетическую компоненту непосредственно и одинакова для обоих сценариев. Фактор технологических рисков введен как мультипликативная надбавка, а не как вероятность отказа, поскольку метрика УЕСЭ стоимостная и требует стоимостного выражения риска; при этом различие в зрелости технологий газификации делает надбавку сценарно зависимой.

Альтернативные параметры исключены по тем же критериям. Капиталоемкость и стоимость капитала не включены, так как метрика намеренно ограничена операционным уровнем, а инвестиционные параметры рассматриваются на втором этапе методического подхода, в параграфе 3.2. Восстановительная способность готового термококса и иные показатели качества конечного продукта не включены, поскольку на предпроектной стадии не измеримы и относятся к инженерной квалификации продукта; их влияние учитывается косвенно через надбавку на технологический риск. Цены конечной металлургической продукции, валютный курс и налоговые условия одинаково воздействуют на оба сценария и на традиционную базу сравнения, поэтому не меняют КУЕСЭ и отнесены к инвестиционной оценке. Социально-экономические затраты вынесены за пределы метрики, так как не формируют стоимость 1 ГДж продукта и относятся к реализуемости проекта в целом. Таким образом, состав параметров отражает не полноту описания проекта, а минимальный набор величин, различающих сценарии на операционном уровне.

Общая структура УЕСЭ для сценария i сохраняет следующий вид по формуле (3)

$$\text{УЕСЭ}_i = C_{\text{энергетический},i} + C_{\text{углеродный},i} + C_{\text{логистический},i} + C_{\text{проч.операционный},i}. \quad (3)$$

Соответственно, коэффициент КУЕСЭ рассчитывается по формуле (4)

$$К_{УЕСЭ,i} = \frac{УЕСЭ_i}{УЕСЭ_{трад}} \times 100\%, \quad (4)$$

где $УЕСЭ_{трад}$ = 100 у.е.

Базовая энергетическая компонента $C_{энергетический,i}$ определяется как приведенная стоимость технологического продукта или энергоносителя, поставляемого в металлургический передел. В общем виде для сценария, основанного на переработке угля, она может быть описана формулой (5)

$$C_{энергетический,i} = \frac{P_{уголь,i} + C_{переработка,i\,(Q)}}{\eta_{process,i\,(Q)}} \times \left(1 + R_{тех,i}\right), \quad (5)$$

где $P_{уголь,i}$ – себестоимость добычи или закупки 1 ГДж угля;

$C_{переработка,i(Q)}$ – операционные затраты на подготовку и газификацию 1 ГДж угля, зависящие от индекса технологической эффективности сырья Q;

$\eta_{process,i(Q)}$ – технологический коэффициент выхода целевого продукта, зависящий от Q;

$R_{тех,i}$ – надбавка на технологический риск.

Если в расчетах используется цена промежуточного продукта, она задается отдельным параметром $P_{внутр,i}$ и применяется как расчетная цена технологического продукта в составе $C_{энергетический,i}$. В настоящем параграфе этот параметр фиксируется только как элемент операционной оценки и не рассматривается как самостоятельный механизм распределения выгод.

Углеродная компонента $C_{углеродный,i}$ учитывается только в сценариях, где действует или моделируется углеродное регулирование. В упрощенном виде она может быть представлена формулой (6)

$$C_{углеродный,i} = E_{CO_2,i} \times P_c, \quad (6)$$

где $E_{CO_2,i}$ – удельная углеродная нагрузка или углеродная уязвимость сценария;

P_c – условная цена углеродного регулирования.

При отсутствии действующего или моделируемого углеродного регулирования компонента $C_{углеродный,i}$ принимается равной нулю. Следовательно, она отражает расчетную стоимость углеродной уязвимости при

возникновении соответствующих регуляторных условий; переменная P_c используется как отдельный сценарный параметр условной цены углерода в принятой проектной границе. Полный углеродный баланс производственной цепочки относится к последующему уровню LCA-оценки проекта.

Логистическая компонента $C_{\text{логистический},i}$ дифференцируется по сценариям. Для сценария полной газификации при наличии специализированной инфраструктуры она рассчитывается по формуле (7)

$$C_{\text{логистический,1}} = C_{infra_{op(L)}} \times (K_{\text{т.и.}}), \quad (7)$$

где $C_{infra_{op(L)}}$ – операционные расходы на транспортировку и инфраструктурное обеспечение, являющиеся функцией расстояния L;

$K_{\text{т.и.}}$ – коэффициент роста трансакционных издержек.

Для сценария частичной газификации бурых углей с производством термококса – по формуле (8)

$$C_{\text{логистический,2}} = (Tariff_{rail} \times L \times M_{volume}) \times (K_{\text{т.и.}}), \quad (8)$$

где $Tariff_{rail}$ – тариф за тонно-километр;

L – расстояние транспортировки;

M_{volume} – объем перевозок в тоннах на 1 ГДж энергетической ценности продукта.

Компонента прочих операционных затрат $C_{\text{проч.операционный},i}$ в общем виде может быть выражена формулой (9)

$$C_{\text{проч.операционный},i} = C_{\text{проч.операционный},base} \times K_{\text{т.и.}}, i \times (1 + R_{\text{тех},i}), \quad (9)$$

где $C_{\text{проч.операционный},base}$ – базовые операционные затраты металлургического передела.

Система уравнений образует расчетную имитационную модель, построенную на основе методики сравнительной оценки по УЕСЭ, и позволяет количественно оценить влияние пяти факторов, включенных в УЕСЭ, на совокупные операционные затраты, приведенные к 1 ГДж сопоставимой ЭЦ; социальные издержки учитываются отдельно как ограничение общей реализуемости. Далее расчетная модель наполняется конкретными данными и

диапазонами параметров для сценарного анализа и определения условий выполнения критерия операционного паритета по формуле (10)

$$К_{УЕСЭ,i} \leq 100\%. \quad (10)$$

Для количественной оценки достижения операционного паритета используется расчетная модель в MS Excel с варьированием ключевых параметров. Технические параметры сопоставлены с опубликованными экспериментальными данными и результатами технологического моделирования [58], однако модель не заменяет инженерно-технологическую верификацию продукта и последующий инженерный допуск.

Предельные значения определяются в ходе расчетов, а диапазоны независимых входных переменных обосновываются научной литературой, отраслевыми базами, технико-экономическими отчетами и прогнозными сценариями. Зависимые переменные формируются как результаты модели.

Ключевые входные переменные, определяющие внешние и внутренние условия реализации технологического сценария, следующие. Технологические параметры включают индекс технологической эффективности сырья Q и надбавку на технологический риск $R_{тех}$. Регуляторная группа переменных представлена условной ценой углеродного регулирования P_c, которая используется только в тех сценариях, где моделируется соответствующая углеродная компонента. Логистические параметры включают расстояние между активами L и тарифы на перевозку. Организационно-институциональный параметр представлен коэффициентом $K_{т.и.}$, отражающим рост трансакционных издержек при усложнении координации участников.

В результате работы расчетной модели определяются ключевые зависимые переменные. К расчетным выходным значениям относятся $УЕСЭ_i$ и $К_{УЕСЭ,i}$. Их расчет позволяет не только констатировать выполнение или невыполнение целевого условия, но и определить предельные значения входных параметров, при которых технологический сценарий сохраняет операционную жизнеспособность. Взаимосвязь параметров, источников данных и их ожидаемого влияния на компоненты УЕСЭ систематизирована в таблице 24.

Таблица 24 – Система параметров имитационной модели УЕСЭ, источники данных и характер влияния

Группа параметров	Конкретный параметр	Источник данных для диапазона значений	Ожидаемое влияние на УЕСЭ
Технологические	Индекс технологической эффективности сырья Q	Данные по реакционной способности, влажности, зольности и пригодности бурых углей для газификации; опубликованные экспериментальные результаты [36; 58; 157]	Определяющее влияние на $C_{энергетический}$ через удельный расход сырья и выход продукта
Технологические	Надбавка на технологический риск $R_{тех}$	Отраслевые данные, экспертные оценки, результаты технологического моделирования [33; 156; 208]	Мультипликативное влияние на $C_{энергетический}$ и $C_{проч.операционный}$
Регуляторные	Условная цена углеродного регулирования P_c	Прогнозные сценарии углеродного регулирования и экспертные оценки [21; 69; 198]	Влияние на $C_{углеродный}$ при наличии или моделировании углеродной компоненты
Логистические	Расстояние L	Геоданные по расположению сырьевой базы и металлургических активов [35; 52]	Линейное или пороговое влияние на $C_{логистический}$
Логистические	Тариф перевозки $Tariff_{rail}$	Тарифные сетки и отраслевые данные по транспортным издержкам [35; 96]	Линейное влияние на $C_{логистический}$ для твердого продукта
Организационно-институциональные	Коэффициент трансакционных издержек $K_{т.и.}$	Оценки на основе анализа проектов с высокой специфичностью активов и экспертных данных [148; 194; 225]	Мультипликативное влияние на $C_{логистический}$ и частично на $C_{проч.операционный}$
Искомые переменные	$УЕСЭ_i$	Результат расчета модели	Стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности
Искомые переменные	$К_{УЕСЭ,i}$	Результат расчета модели	Критерий операционного паритета; позволяет определить предельные значения входных параметров

Источник: составлено автором.

Теоретически обоснованная система параметров расчетной модели используется для количественного анализа сценариев. Наполнение расчетной модели конкретными данными из приведенных источников и последующее варьирование входных переменных дают возможность установить функциональные зависимости и выявить критические комбинации внешних и внутренних условий, необходимых для обеспечения выполнения критерия операционного паритета технологическим сценарием.

Для каждого сценария проводится однофакторный анализ чувствительности на основе системы уравнений УЕСЭ. Ключевые независимые параметры варьируются в заданных диапазонах, в то время как остальные фиксируются на уровне, соответствующем принятым базовым

расчетным значениям. Пороговое значение определяется в точке, где дальнейшее изменение параметра приводит к нарушению условия $К_{УЕСЭ,i} \leq 100\%$. Однофакторный анализ выделяет предельное влияние каждого параметра, а совместное варьирование и компенсационные эффекты проверяются далее в имитационном моделировании главы 3. В частности, рассматриваются связи между $I_{рег}$ и $C_{углеродный}$, а также между L и $C_{логистический}$.

Предварительные расчетные пороги параметров операционного паритета и ограничение общей реализуемости сценариев представлены в таблице 25.

В этом моделировании значения рассматриваются как предварительные расчетные пороги: в параграфе 2.3 они подлежат сценарному уточнению по результатам экспертного опроса. Индекс углеродного регулирования $I_{рег}$ является безразмерным и используется для представления интенсивности регуляторного давления в расчетной модели.

Таблица 25 – Предварительные расчетные пороги параметров операционного паритета и ограничение общей реализуемости сценариев

Группа факторов	Параметр или ограничение	Единица измерения	Сценарий 1: полная газификация бурых углей с получением водорода	Сценарий 2: частичная газификация бурых углей с производством термококса	Обоснование и метод расчета
1	2	3	4	5	6
Локационный	Тип инфра-структуры, Infra	кат.	Только специализи-рованная инфраструктура	Ж/д транспортировка допустима	Для сценария 1 отсутствие инфраструктуры приводит к резкому росту $C_{логистический}$; для сценария 2 железнодорожная логистика остается применимой
Локационный	Расстояние L	км	$L \leq 1000$	$L \leq 3500$	Для сценария 1 рост расстояния усиливает инфраструктурную чувствительность; для сценария 2 допустимый коридор шире за счет перевозки твердого продукта
Регуляторно-рыночный	Индекс углеродного регулирова-ния $I_{рег}$	безр.	$I_{рег} \geq 0,55$	$I_{рег} \geq 0,40$	Порог отражает минимальный уровень регуляторно-рыночного давления, при котором выполняется критерий операционного паритета с учетом потенциальной углеродной компоненты

Продолжение таблицы 25

1	2	3	4	5	6
Организационно-институциональный	Коэффициент $К_{т.и.}$	безр.	≤ 1,10	≤ 1,20	Более высокая технологическая взаимозависимость сценария 1 требует более жесткого контроля координационных издержек
Сырьевой	Индекс Q	безр.	≥ 0,88	≥ 0,94	Отражает требования к технологической пригодности бурого угля, выходу продукта и стабильности параметров переработки
Технологический	$R_{тех}$	доля	≤ 0,10	≤ 0,05	Отражает пороговое значение надбавки на технологический риск по выходу продукта, качеству и эксплуатационным затратам
Социальный	$С_{соц}$	у.е.	≤ 18	≤ 12	–

Источник: составлено автором.

Предварительное моделирование показывает, что операционный паритет $К_{УЕСЭ,i} \leq 100\%$ достижим для обоих сценариев газификации, но в разных коридорах значений. Этот результат является первым расчетным основанием для проверки Н1: оба сценария сохраняют потенциал жизнеспособного межфирменного взаимодействия при выполнении соответствующих пороговых условий. Сценарий полной газификации демонстрирует высокую чувствительность к инфраструктурному параметру, логистическому плечу и уровню внешнего регуляторного стимула. Сценарий частичной газификации сохраняет более широкий логистический коридор, но требует повышенного качества сырья, контроля технологического риска и управляемых трансакционных издержек.

Различия в структуре затрат и управленческих приоритетах раскрывают внутреннюю экономику сценариев и позволяют объяснить, почему близкие итоговые значения КУЕСЭ могут достигаться принципиально разными способами. В сценарии полной газификации снижение потенциальной углеродной компоненты и логистических затрат – за счет перехода к газообразному энергоносителю и сокращения перевозок твердого продукта – может компенсировать высокие энергетическую и инфраструктурную составляющие, обусловленные капиталоемкостью газификационного контура и его привязкой к площадке. Управленческий приоритет здесь смещается в сторону

обеспечения загрузки мощностей и долгосрочной координации участников. В сценарии частичной газификации экономия формируется иначе: за счет более низкой базовой энергетической компоненты и приемлемой логистической составляющей, тогда как углеродная и прочая операционная компоненты сохраняют значимость и остаются основными источниками чувствительности результата. Соответственно различаются и точки управленческого воздействия: в первом случае – параметры инвестиционного контура, во втором – операционные условия и режим применения продукта в металлургическом переделе.

Важным результатом является не набор разрозненных чисел, а теоретическое описание структуры взаимосвязанных ограничений. Однофакторные расчетные пороги $I_{рег}$, L, Q и $K_{т.и.}$ характеризуют отдельные ограничения, а их совместная достижимость, в том числе при расстоянии 3500 км, оценивается совместным анализом параметров.

Система параметров расчетной модели обеспечивает количественную проверку Н1 посредством сопоставления сценариев по УЕСЭ и определения пороговых условий. УЕСЭ сохраняет статус расчетного значения и не подменяет проверку Н2 и Н3: первая выполняется имитационным моделированием, вторая – посредством механизма согласования интересов участников. Инвестиционная оценка проводится отдельно для выбранного проекта. Следующий этап – экспертная валидация достижимости условий.

Результаты исследования относятся к разным уровням применения. Модель трансформации угольно-металлургического взаимодействия из параграфа 1.4 – концептуальный уровень: она задает состав технологического, организационно-экономического и инвестиционно-ценового контуров и логику их взаимосвязи, но не является расчетным инструментом. Метрика УЕСЭ и методика сравнительной оценки на ее основе – измерительный уровень: они приводят разнородные технологические продукты к сопоставимой стоимостной форме и позволяют рассчитать пороговые условия операционного паритета. Двухэтапный подход «операционный отбор сценария – инвестиционная оценка проекта» – уровень принятия решения: он определяет порядок использования УЕСЭ и традиционных инструментов инвестиционного анализа. Инструментарий согласования интересов – уровень распределения эффекта: он

применяется после подтверждения инвестиционной состоятельности и определяет распределение эффекта между угольным/газификационным и металлургическим контурами. Его расчетным ядром выступает механизм внутреннего ценообразования на термококс, а в состав входят также матрица управления рисками и показатели мониторинга соглашения участников. Методика сравнительной оценки по УЕСЭ и инструментарий согласования интересов не дублируют друг друга: они относятся к разным уровням модели и последовательным этапам проверки основной гипотезы.

2.2 Методы проверки жизнеспособности модели: формирование экспертной выборки и процедура сбора данных

Эмпирическая часть исследования построена в соответствии с гипотетико-дедуктивным методом: из теоретической модели выводятся проверяемые следствия, после чего выполняется их эмпирическая и расчетная проверка [67].

Эмпирическая проверка в главе 2 направлена прежде всего на проверку H1: оба сценария газификации бурых углей должны сохранить возможность достижения операционного паритета при заданных пороговых условиях. Кроме того, экспертные данные используются для предварительной оценки H2, поскольку позволяют сопоставить практическую реализуемость полной и частичной газификации, и для подготовки проверки H3, так как выявляют требования к механизму внутреннего ценообразования на термококс и распределению экономического эффекта.

Для получения релевантных данных используется целевой отбор экспертов, обладающих практическим опытом оценки технологических, экономических, организационных и социально-региональных параметров промышленной трансформации.

Прежде чем перейти к описанию методики, необходимо разграничить два разных по природе этапа проверки, которые в работе не смешиваются. Экспертная валидация, выполняемая в главе 2, проверяет достижимость пороговых значений внешних и организационных условий реализации сценариев: логистического плеча, интенсивности углеродного регулирования, уровня трансакционных издержек, приемлемой надбавки на технологический

риск, предпочтительной организационной формы. Она отвечает на вопрос, находятся ли принятые в расчетной модели диапазоны в пределах того, что участники отрасли считают реализуемым, и помогает сузить или сдвинуть эти диапазоны. Она не позволяет сделать вывод о технической пригодности продукта для конкретного металлургического агрегата и не подтверждает физико-химические параметры термококса или водорода – экспертное мнение не заменяет измерения.

Инженерно-технологическая верификация продукта – самостоятельный этап, который не входит в предмет настоящего исследования и выполняется независимо от экспертной выборки лабораторными и опытно-промышленными испытаниями на конкретном агрегате потребителя. Она проверяет реакционную способность, прочность, состав и поведение шихты и дает инженерный допуск продукта; она не позволяет судить об экономической сопоставимости сценариев и не заменяет операционный отбор. Разделение этапов снимает риск методологической цикличности: экспертные оценки уточняют только диапазоны внешних и организационных параметров, тогда как технические параметры сценариев заданы опубликованными экспериментальными данными и результатами технологического моделирования [58], не зависят от опроса и подлежат отдельной верификации. Соответственно, вывод об операционной жизнеспособности в главе 2 означает только то, что при экспертно подтвержденных диапазонах внешних условий и при технических параметрах, взятых из литературы, сценарий сохраняет операционный паритет; он не означает инженерной подтвержденности продукта. Это ограничение закреплено далее в таблице 31 и в заключении.

Фактические результаты опроса, состав выборки и эмпирическая корректировка пороговых значений представлены в параграфе 2.3. Поэтому далее раскрываются схема эмпирического исследования, критерии отбора экспертов, структура анкеты и процедуры обработки данных.

Задачи эмпирического исследования состоят в следующем:

1) сформировать выборку по трем группам участников производственной цепочки;

2) собрать оценки по параметрам модели для проверки H1, H2 и H3, включая условия жизнеспособности водородного и термококсового сценариев, принципы внутреннего ценообразования на термококс и распределение рисков;

3) взвесить и агрегировать ответы, а затем проверить предварительные пороговые значения параметров модели, корректируемые в параграфе 2.3.

Приемлемое логистическое плечо для термококса не публикуется ни в отраслевой статистике, ни в отчетности компаний: его знают только те, кто считал такие маршруты. Ни массовое анкетирование, ни анализ открытой статистики, ни отраслевые отчеты не дают необходимой содержательной глубины для узкоспециализированных параметров модели. Большинство ключевых параметров, включая приемлемость логистических плеч, оценку технологических рисков, восприятие углеродного регулирования, требования к качеству сырья и условия координации участников, не представлены в открытой статистике в форме, пригодной для прямой количественной проверки. Поэтому структурированный экспертный опрос выступает применяемым методом сбора данных на данном этапе исследования.

Для обработки экспертных данных применяются следующие методы:

1) метод квотного группирования – для обеспечения баланса ключевых позиций участников угольно-металлургического взаимодействия;

2) процедура взвешивания индивидуальных оценок – для коррекции вклада экспертов на основе их компетентности и релевантного опыта;

3) методы параметрической статистики – взвешенное среднее, доверительные интервалы и одновыборочный t-тест для агрегированных экспертных оценок;

4) межгрупповой сравнительный анализ – для выявления расхождений в оценках между представителями металлургических предприятий, угледобывающих предприятий и инвестиционно-институциональных организаций.

Для обеспечения представленности ключевых профессиональных позиций и минимизации систематического смещения, которое может возникнуть из-за доминирования представителей одной корпоративной стратегии или одного холдинга, применяется сочетание целевого отбора и квотного группирования. При этом речь идет не о статистической репрезентативности генеральной

совокупности, а о представленности ключевых профессиональных позиций, необходимых для проверки модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия.

Достаточность выборки оценивается не только численно, но и по охвату основных групп экспертов и профилей компетенций. Это означает, что в выборке должны быть представлены основные группы участников, способных оценить технологические, экономические, инвестиционные, сырьевые и организационные условия реализации рассматриваемых сценариев.

Включение экспертов в выборку осуществлялось по следующим критериям:

1) наличие отраслевого опыта не менее 5 лет;

2) участие в проектах технологической модернизации, инвестиционной оценки, сырьевого обеспечения или регулирования промышленных проектов;

3) принадлежность к одной из трех экспертных групп, определенных логикой исследования;

4) способность оценивать параметры расчетной модели, технологические сценарии или условия координации участников.

Выборка подразделяется на три самостоятельные группы респондентов, соответствующие основным категориям участников, чьи интересы и компетенции имеют непосредственное отношение к исследуемой трансформации, ее структура представлена в таблице 26.

Таблица 26 – Целевые группы экспертного опроса

Группа	Состав	Роль в модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия	Значимость мнения / критерий проверки
1	2	3	4
Группа 1	Представители металлургических предприятий	Потенциальные потребители технологических продуктов глубокой переработки бурых углей – водорода и термококса	Их оценки позволяют провести предварительную экспертную оценку реалистичности целевых требований для металлургического передела: цены, качества продукта, требования стабильности поставок, логистики и технологической применимости
Группа 2	Представители угледобывающих предприятий	Потенциальные поставщики сырьевой базы и участники проектов глубокой переработки бурых углей	Их оценки позволяют оценить воспринимаемую экспертами готовность к трансформации бизнес-модели, реалистичность параметров качества сырья Q, логистики L и технологической реализуемости газификации

Продолжение таблицы 26

1	2	3	4
Группа 3	Группа экспертов, представляющая инвестиционно-институциональные организации: инвесторы, институты развития, профильные эксперты и представители органов регулирования	Участники и эксперты, оценивающие инвестиционную привлекательность, регуляторные условия и соответствие проектов институциональным условиям реализации	Их оценки позволяют проверить реалистичность внешних условий реализации модели: доступность капитала, требования к углеродной отчетности, роль институтов развития и параметры государственной поддержки

Источник: составлено автором.

Внутри группы угледобывающих предприятий учитываются специалисты, связанные как с коксующимися, так и с бурыми и энергетическими углями. Такое объединение позволяет сохранить сопоставимость с фактической структурой эмпирической части и одновременно учесть различия в сырьевой специализации респондентов. Первоначально целевой объем выборки определялся на уровне 20-25 экспертов по ключевым группам.

Для учета различий в профессиональной компетентности и релевантном опыте респондентов при агрегировании разнородных экспертных суждений применяется процедура взвешивания индивидуальных оценок. Она корректирует вклад каждого респондента в совокупный результат по формализованным критериям компетентности и глубины релевантного опыта. Процедура основана на принципах структурированных экспертных процедур [51] и предназначена для снижения влияния недостаточно аргументированных или малокомпетентных оценок.

Веса построены на двух признаках: практическом опыте межфирменной координации и реализации капиталоемких технологических проектов и управленческой позиции респондента. Первый признак выбран потому, что барьеры координации знают только те, кто их проходил; сами веса выведены из практики опроса, но не из теории. Дополнительное основание для первого признака дает литература по специфичности активов: он основывается на теории трансакционных издержек О. Уильямсона и концепции специфических активов [92; 225]. Согласно данной теоретической парадигме непосредственное участие в управлении проектами, реализуемыми в проектной, имущественно-интегрированной или вертикально интегрированной организационной форме

взаимодействия, формирует практическое знание о реальных барьерах координации, распределении рисков, издержках согласования решений и условиях устойчивости долгосрочного взаимодействия.

Второй критерий – профессиональная компетентность и позиция респондента – базируется на ресурсной теории фирмы [114] и моделях экспертной компетентности. Этот критерий исходит из предпосылки, что способность к комплексной, стратегически ориентированной оценке технологических трендов, инвестиционных проектов и долгосрочных рыночных рисков коррелирует с глубиной отраслевого опыта, иерархическим статусом и зоной ответственности лица, принимающего решения [51]. Управленческая позиция дает вес не сама по себе, а как индикатор доступа к данным долгосрочного планирования и ответственности за формирование портфеля инновационных проектов [29; 62]. Ограничение здесь очевидно: руководитель может быть хуже осведомлен о технологических деталях, чем главный инженер. Поэтому вес по позиции комбинируется с весом по отраслевому стажу, не заменяя его.

Критерии присвоения весовых коэффициентов представлены в таблице Г.2, структура экспертной выборки – в таблице Г.1.

Коэффициент W_{inst}= 0,8 установлен априорно, до обработки ответов, на основании формального признака наличия у эксперта опыта неудачных или реструктурированных форм взаимодействия; этот признак не зависит от содержания ответов. Коэффициент не означает нерелевантности опыта эксперта. Он отражает меньшую применимость такого опыта для подтверждения реализуемости модели. При интерпретации барьеров такие ответы дополнительно учитываются как источник информации о рисках координации и возможных причинах неустойчивости проектов.

На основании указанных принципов итоговый нормированный вес для *i*-го эксперта рассчитывается как произведение двух частных весов, отнесенное к среднему значению таких произведений по всей выборке, по формуле (11)

$$W_i = \frac{W_{inst_i} \times W_{comp_i}}{\Sigma(\mathrm{W_{inst_j}} \times W_{comp_j}) \times \frac{1}{n}}, \quad (11)$$

где W_i – итоговый нормированный вес *i*-го эксперта;

W_{inst_i} – вес по критерию практического опыта межфирменной координации;

W_{comp_i} – вес по критерию профессиональной компетентности;

n – объем выборки.

Формула нормирования обеспечивает равенство суммы индивидуальных весов числу экспертов: $\Sigma W_i = n$. Для групповых значений таблицы 29 применяется единый нормирующий делитель; общее масштабирование всех весов не изменяет взвешенные средние.

Основным инструментом эмпирического исследования выступает структурированная анкета для онлайн-опроса, разработанная для оценки предварительных пороговых условий, параметров расчетной модели и организационно-экономических предпосылок трансформации. В таблицах Ж.1 и Ж.2 представлена структура инструмента экспертного опроса и связь вопросов с параметрами модели. Документированные вопросы образуют эмпирическую часть исследования, а числовые пороги и дополнительные показатели выделены как параметры принятой сценарной спецификации. Такое разграничение обеспечивает последовательное использование экспертных данных при проверке Н1 и Н2.

Анкета состоит из шести тематических модулей. Каждый модуль направлен на операционализацию конкретных теоретических конструктов и получение измеримых экспертных оценок. Модули описаны в таблице 27.

Вопросы анкеты построены на трех форматах ответа. Первый – семипозиционная шкала семантического дифференциала, в которой 1 соответствует левому, а 7 – правому полюсу оценки; она применяется для суждений о реалистичности условий рассматриваемых сценариев и для их сравнительной стратегической оценки. Второй формат – множественный выбор, используемый там, где эксперт указывает несколько одновременно действующих условий или ограничений; доли отметок по таким вопросам приводятся относительно фактической экспертной выборки. Третий формат – открытый комментарий, предусмотренный для вопросов об опыте участия в проектах и о качестве бурого угля. Разграничение форматов задает границы последующей обработки: шкальные ответы допускают расчет взвешенных средних, ответы с множественным выбором – только расчет долей отметок, открытые ответы – содержательную интерпретацию без агрегирования.

Таблица 27 – Структура анкеты и связь вопросов с параметрами модели

Модуль анкеты	Цель модуля	Ключевые вопросы / показатели	Связь с параметрами модели	Связь с гипотезами исследования
1	2	3	4	5
Модуль 1 Идентификация эксперта и данные для взвешивания	Определение группы респондента, профессиональной позиции, стажа и релевантного опыта	Направление деятельности предприятия; должностная функция; стаж работы; опыт участия в межфирменной координации и капиталоемких технологических проектах	Стратификация выборки; расчет W_{inst} и W_{comp}	Обеспечивает корректность взвешивания экспертных оценок по H, H1, H2 и H3
Модуль 2 Экспертная валидация условий сценария полной газификации бурых углей с получением водорода	Проверка реалистичности ключевых условий водородного сценария	Реалистичность достижения приемлемой цены водорода; реалистичность создания инфраструктуры транспортировки и использования водорода; оценка сроков промышленной реализуемости	Проверка условий $К_{УЕСЭ,1} \leq 100\%$; параметры $I_{рег}$, L, Q, $К_{т.и.}$, $R_{тех}$; инфраструктурные ограничения	H1 – проверка жизнеспособности сценария полной газификации; H2 – предварительная оценка его сравнительной устойчивости относительно термококсового сценария
Модуль 3 Экспертная валидация условий сценария частичной газификации бурых углей с производством термококса	Проверка реалистичности ключевых условий термококсового сценария	Минимальный относительный уровень углеродного регулирования; приемлемое логистическое плечо поставки термококса; оценка рисков качества продукта; предварительная экспертная оценка требований к применению термококса в металлургическом контуре	Проверка условий $К_{УЕСЭ,2} \leq 100\%$; параметры $I_{рег}$, L, Q, $К_{т.и.}$, $R_{тех}$	H1 – проверка жизнеспособности сценария частичной газификации; H2 – предварительная оценка его сравнительного преимущества
Модуль 4 Факторы локации, сырья и технологической реализуемости	Оценка значимости сырьевых, локационных и технологических факторов	Критичность качества угольной базы; значимость реакционной способности, зольности, влажности; оценка технологических рисков; оценка роли доступной инфраструктуры	Параметры Q, L, Infra, $R_{тех}$	H1 – уточнение пороговых условий жизнеспособности обоих сценариев; H2 – выявление различий в профилях технологических и инфраструктурных ограничений

Продолжение таблицы 27

1	2	3	4	5
Модуль 5 Организационно-экономические условия координации участников	Оценка предпочтительных организационных конфигураций и механизмов согласования интересов	Предпочтительная организационная форма взаимодействия; распределение контроля и ответственности; приемлемые принципы расчета цены промежуточного продукта; готовность участников к долгосрочному соглашению	Параметр $К_{т.и.}$; условия межфирменной координации; цена промежуточного продукта; распределение выгод и рисков	Н3 – проверка необходимости согласованного механизма внутреннего ценообразования на термококс; Н – проверка организационно-экономической реализуемости модели
Модуль 6 Сравнительная стратегическая оценка сценариев	Сопоставление восприятия двух технологических сценариев и выявление внешних условий их реализуемости	Семантический дифференциал по двум документированным шкалам «тактическая адаптация – стратегическая трансформация» и «минимизация текущих рисков – формирование долгосрочного преимущества», где 1 соответствует левому, а 7 – правому полюсу	Стратегическая реализуемость сценариев; параметры $I_{рег}$, $С_{соц}$, CAPEX-ограничения, инфраструктурная готовность	Н2 – предварительная проверка сравнительного преимущества частичной газификации; Н – оценка общего потенциала трансформации модели взаимодействия

Источник: составлено автором.

Документированные в таблице Ж.2 вопросы используются в пределах их непосредственного содержания. Для подготовки проверки H1 применяются вопросы о цене и инфраструктуре водородного сценария, практической реализуемости и логистике термококсового сценария, качестве угля и технологических рисках; числовые пороги расчетной модели рассматриваются как сценарные параметры расчетной модели, сформированные с учетом результатов опроса. Для предварительной оценки H2 используются вопросы о водородной инфраструктуре, практической реализуемости термококсового сценария и две шкалы стратегического восприятия; остальные сравнительные показатели относятся к дополнительным авторским данным. Для подготовки проверки H3 используются вопросы о предпочтительном принципе расчета цены промежуточного продукта и распределения контроля и ответственности. Совместное предприятие не используется в анкете как базовая категория модели, однако имущественно интегрированные и вертикально интегрированные организационные формы взаимодействия сохраняются как возможные варианты организационной конфигурации.

В таблице Ж.2 открытый комментарий предусмотрен для вопросов об опыте участия в проектах и качестве бурого угля; соответствующие ответы используются для качественного уточнения этих тем. Иные качественные категории рассматриваются как дополнительные авторские данные.

Доступные средние значения и распределения ответов используются как описательные характеристики фактической экспертной выборки. Основными являются невзвешенные оценки, а ограниченное взвешивание по стажу используется как описательный анализ чувствительности. Для дополнительного массива из трех шкал получены следующие результаты проверки надежности и значимости: α Кронбаха = 0,916 для сценария 1 и 0,952 – для сценария 2; коэффициент конкордации Кендалла (W) равен 0,101 и 0,699 соответственно; для одностороннего парного критерия Уилкоксона $p = 1{,}45\times10^{-13}$, положительная разность отмечена у 72 из 73 экспертов, а взвешенная разность средних 2,216 балла сохраняет направление невзвешенного результата. Показатели подтверждают внутреннюю согласованность шкал и статистическую значимость выявленного предпочтения; низкое значение W для сценария 1 отражает разброс экспертных позиций именно по водородному сценарию.

Для двух шкал семантического дифференциала, документированных в таблице Ж.2, значение 1 соответствует левому, а значение 7 – правому полюсу: «тактическая адаптация – стратегическая трансформация» и «минимизация текущих рисков – формирование долгосрочного преимущества». Для остальных 7-балльных вопросов увеличение балла интерпретируется в соответствии с формулировкой оцениваемого признака.

В рамках обработки данных используется перечень статистических процедур, который представлен в таблице 28.

Таблица 28 – Методы обработки данных и проверяемые условия

Метод обработки	Назначение	Проверяемое условие
Расчет взвешенного среднего M_w [51; 120; 129]	Определение агрегированной экспертной оценки с учетом индивидуальных весов W_i	Средний уровень реалистичности достижения параметров сценариев
Расчет 95% доверительного интервала [129]	Методическая оценка устойчивости по числу валидных ответов, SD и SE; итоговый вывод формируется по совокупности расчетных и экспертных результатов	Критерий предусмотрен методикой, но не используется для итоговой инференциальной интерпретации
Одновыборочный t-тест для взвешенных данных [209; 220]	Предусмотренная проверка превышения нейтрального уровня; самостоятельный вывод не формируется	H_0: $M_w \leq 4{,}0$; H_1: $M_w > 4{,}0$; критерий зафиксирован как дополнительная статистическая проверка в составе комплексной методики исследования
Частотный анализ диапазонных ответов [51; 129; 176]	Анализ распределения ответов по интервалам значений	Достижимость порогов I_{per}, L и иных параметров
Семантический дифференциал, описательная интерпретация [185]	Описательное сопоставление стратегического восприятия сценариев	Две документированные шкалы стратегического восприятия; третья шкала соответствия устойчивому развитию сохраняется как дополнительная авторская
Межгрупповой сравнительный анализ [51; 120; 129]	Выявление различий в позициях металлургических предприятий, угледобывающих предприятий и инвестиционно-институциональных организаций	Сравнение взвешенных средних, распределений ответов и качественная интерпретация расхождений между группами
Качественная интерпретация открытых ответов [174]	Уточнение причин расхождений и выявление барьеров реализации	Содержательное объяснение отклонений экспертных оценок от расчетных предпосылок

Источник: составлено автором.

Для параметров, оцениваемых по 7-балльной шкале, методика предусматривала статистические гипотезы, которые не следует смешивать с содержательными гипотезами исследования H, H1, H2 и H3. Нулевая статистическая гипотеза H_0 сформулирована так: $M_w \leq 4{,}0$. Альтернативная статистическая гипотеза H_1 сформулирована следующим образом: $M_w > 4{,}0$.

Методикой предусмотрен одновыборочный t-тест для взвешенных данных с тестовым значением 4,0 на 7-балльной шкале и уровнем $p < 0{,}05$ в пользу $H1_{stat}$. Средние значения используются как описательная эмпирическая опора, тогда как итоговая проверка H1, H2 и H3 выполняется с помощью совокупности расчетных, имитационных и инвестиционных процедур.

Анализ данных экспертного опроса направлен на описательную оценку документированных вопросов и подготовку сценарных параметров расчетной модели расчетной модели. Для агрегирования используются индивидуальные весовые коэффициенты W_i. Общее нормирование весов не изменяет взвешенные средние.

Описательный анализ водородного сценария в рамках подготовки проверки H1 опирается на документированные вопросы о реалистичности приемлемой цены водорода и инфраструктуры его получения, транспортировки и использования. Доступные средние характеризуют фактическую экспертную выборку. Технологическая применимость, логистическое плечо и числовые пороги расчетной модели относятся к сценарным данным расчетной модели, сформированным по результатам опроса. На уровне главы 2 они подготавливают дальнейшую проверку по критерию $К_{УЕСЭ,1} \leq 100\%$ и включаются в последовательную расчетную проверку H1.

Описательный анализ термококсового сценария в рамках подготовки проверки H1 опирается на документированные вопросы о его практической реализуемости, допустимом логистическом плече, качестве угля и технологических рисках. Соответствующие значения рассматриваются как сценарные данные расчетной модели, сформированные по результатам опроса. На уровне главы 2 они подготавливают дальнейшую проверку условия $К_{УЕСЭ,2} \leq 100\%$ и включаются в последовательную расчетную проверку H1.

Стратегическое восприятие сценариев описывается по двум документированным шкалам семантического дифференциала, отражающим глубину трансформации и ориентацию на долгосрочное преимущество; значение 1 соответствует левому, а значение 7 – правому полюсу каждой шкалы. Третья шкала характеризует соответствие сценариев принципам устойчивого развития. Эти результаты дополняют расчет УЕСЭ и учитываются при проверке H2.

Анализ организационно-экономических условий используется для подготовки проверки Н3 и опирается на документированное распределение предпочтений относительно организационной конфигурации, принципа распределения контроля и ответственности, а также принципа расчета цены промежуточного продукта. Числовая оценка барьера координации получена по результатам опроса и используется как вспомогательная количественная характеристика. В главе 2 фиксируется наличие нескольких предпочтительных принципов цены; ценовой коридор и механизм внутреннего ценообразования раскрываются в параграфе 3.3.

Межгрупповой анализ используется для содержательного сопоставления ответов представителей металлургических предприятий, угледобывающих предприятий и инвестиционно-институциональных организаций. Наблюдаемые расхождения интерпретируются в пределах фактической экспертной панели и дополняют расчетную проверку гипотез.

Интерпретация полученных результатов направлена на установление связи между эмпирическими данными и теоретическим каркасом исследования, сформированным в главе 1. В случае выявления значимых расхождений между экспертными оценками и расчетными пороговыми значениями параметров расчетной модели требуется содержательный анализ причин таких расхождений с учетом факторов российской промышленной практики.

Выявленная в ходе анализа иерархия барьеров, построенная на основе частот выбора, ранжирования и средних экспертных оценок, позволяет перейти от абстрактного перечисления рисков к их операциональному ранжированию. Это дает возможность дифференцировать проблемы, требующие первоочередного решения в рамках корпоративной стратегии или государственной отраслевой политики, от факторов долгосрочного и фонового характера.

Надежность эмпирического исследования обеспечивается целевым отбором, квотным группированием, межгрупповым сопоставлением и обезличиванием ответов. Принадлежность респондентов к группе и компании используется только для стратификации и агрегирования, а вопросы ориентированы на долгосрочные условия и объективные параметры. Инструментарий связывает предварительные пороги параграфа 2.1 с экспертной валидацией и их последующим уточнением в параграфе 2.3.

2.3 Результаты экспертной валидации условий жизнеспособности и ограничения применения модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Эмпирическую базу исследования составили результаты структурированного опроса 73 экспертов, отобранных по критериям, изложенным в параграфе 2.2. Формирование выборки осуществлялось посредством целевого отбора специалистов, способных оценить технологические, экономические, сырьевые, логистические, инвестиционные и организационные условия реализации рассматриваемых сценариев. В состав экспертной панели вошли 24 представителя металлургических предприятий, 31 представитель угледобывающих предприятий и 18 представителей инвестиционно-институционального блока. Такая структура обеспечила содержательное покрытие позиций потенциальных потребителей технологических продуктов, поставщиков сырьевой базы, инвесторов, институтов развития и специалистов в области регулирования промышленных проектов. При агрегировании ответов учитывались профессиональная компетентность экспертов и релевантный опыт межфирменной координации. Перечень представленных организаций, структура экспертной выборки и агрегированные параметры весовых коэффициентов вынесены в таблицы Г.1 и Г.2, что позволяет сохранить компактность основного текста, обеспечить обезличивание персональных ответов и одновременно раскрыть принципы формирования итоговых оценок.

Фактическая структура экспертной выборки представлена в таблице 29.

Таблица 29 – Фактическая структура экспертной выборки и средние весовые коэффициенты

Группа экспертов	Количество экспертов, человек	Доля в выборке, в процентах	Среднее произведение W_{inst} и W_{comp} до нормирования	Роль в эмпирической проверке
1	2	3	4	5
Представители металлургических предприятий	24	32,9	1,08	Предварительная экспертная оценка реалистичности требований к технологическим продуктам глубокой переработки бурых углей для металлургического передела: цены, качества, стабильности поставок, логистики и технологической применимости

Продолжение таблицы 29

1	2	3	4	5
Представители угледобывающих предприятий	31	42,5	1,12	Оценка реалистичности сырьевых, технологических и логистических параметров глубокой переработки бурых углей, включая качество сырья Q и условия поставки продуктов переработки
Представители инвестиционно-институцио-нального блока	18	24,7	0,85	Оценка инвестиционной реализуемости, регуляторных условий, роли институтов развития и применимости внешних механизмов поддержки
Итого	73	100,0	Общий нормирующий делитель: 1,040274	Фактическая экспертная выборка для описательной оценки документированных вопросов и подготовки сценарных параметров расчетной модели
Ограничение выборки	-	-	-	Выводы относятся к экспертной панели из 73 экспертов

Источник: составлено автором.

Фактическая выборка включает 73 респондента трех профессиональных групп. Средний отраслевой стаж 18-22 года для производственных групп и 13-15 лет – для инвестиционно-институционального блока, а также сведения о руководящих или экспертных позициях относятся к дополнительным авторским профильным данным, поскольку интервальный вопрос о стаже и перечень вопросов таблицы Ж.2 не позволяют независимо воспроизвести эти характеристики.

Наиболее высокий вес получили эксперты, совмещающие управленческий статус, отраслевой стаж и опыт участия в капиталоемких технологических проектах; при этом позиции остальных участников сохранялись в общей структуре взвешенной оценки.

При интерпретации результатов разграничиваются документированные вопросы анкеты и дополнительные авторские показатели, сформированные с учетом опроса. Документированные вопросы образуют описательную эмпирическую базу фактической выборки, а дополнительные показатели используются как сценарные и вспомогательные данные. Их совместное рассмотрение подготавливает последующую расчетную проверку.

В фактической экспертной выборке значимость качества угольной базы получила описательное взвешенное значение 6,1 балла из 7. Реакционная способность, влажность, зольность и иные характеристики бурых углей рассматриваются как содержательные факторы качества; отдельные шкалы по каждой из них в анкету, представленную в таблице Ж.2, намеренно не

включались во избежание избыточной детализации опроса. Числовое значение Q используется как интегральный сценарный параметр расчетной модели, объединяющий характеристики качества сырья; его диапазон сформирован на основе научных данных и результатов экспертного опроса.

Дополнительный авторский показатель дефицита опыта глубокой координации имеет взвешенное значение 5,7 балла из 7. Показатель характеризует дефицит опыта глубокой координации и учитывается при интерпретации $К_{т.и.}$.

Период 2031-2040 гг. используется как дополнительная авторская характеристика ожидаемого горизонта реализации, сформированная с учетом результатов опроса.

Результаты эмпирической проверки по шести модулям анкеты представлены далее в последовательности, установленной в параграфе 2.2.

Профиль респондентов и веса задает первый модуль анкеты. В авторской сводке средние значения произведения $W_{inst} \times W_{comp}$ до нормирования составляют 1,08 для представителей металлургических предприятий, 1,12 – для представителей угледобывающих предприятий и 0,85 – для инвестиционно-институциональных организаций. Общий нормирующий делитель равен 1,040274; его применение не меняет взвешенные средние. Причинная интерпретация различий между группами не проводится, а воспроизведение индивидуальных весов требует обезличенного исходного массива.

Водородный сценарий эксперты оценили ниже середины шкалы по обоим ключевым условиям: реалистичность достижения приемлемой цены водорода получила 3,6 балла, реалистичность создания инфраструктуры к 2035 г. – 3,5 балла; оба значения ниже точки 4,0. Полученные оценки включены в принятую сценарную спецификацию водородного сценария и далее проверяются расчетно.

По термококсовому сценарию эксперты оценивали практическую реализуемость, приемлемое логистическое плечо и роль качества сырья. Индекс углеродного регулирования $I_{рег}$ и логистическое плечо L зафиксированы как параметры принятой сценарной спецификации и далее проходят расчетную проверку чувствительности.

Отдельно оценивались значимость качества угля и категории технологических рисков. Вывод об управляемости отдельных рисков при пилотной отработке, техническом контроле и корректировке качества продукта является авторской интерпретацией, сформированной с учетом результатов опроса.

Организационное предпочтение выражено отчетливо. В авторской сводке 62% респондентов выбрали имущественно интегрированную организационную форму взаимодействия. По вопросу цены промежуточного продукта выделены варианты «себестоимость + нормативная доходность», скользящая формула и переговорный коридор; распределение предпочтений показывает применимость нескольких механизмов ценообразования.

В стратегической оценке сценарии расходятся еще сильнее: в дополнительном авторском массиве из трех шкал водородный сценарий получил 3,3-3,5 балла, термококсовый – 5,2-6,1 балла. По двум шкалам, документированным в таблице Ж.2, сценарий частичной газификации получил 6,1 балла по шкале «тактическая адаптация – стратегическая трансформация» и 5,9 балла – по шкале «минимизация текущих рисков – формирование долгосрочного преимущества»; значение 1 соответствует левому, а 7 – правому полюсу. Взвешенная доля отметок условия внешнего углеродного регулирования и требований к углеродной отчетности составила 64%; вопрос допускал множественный выбор. Эти показатели характеризуют стратегическое восприятие сценариев экспертной выборкой.

Доступные взвешенные и невзвешенные средние представлены в таблице 30 как описательные характеристики фактической экспертной выборки. Дополнительные авторские показатели и пороговые значения используются как вспомогательные и сценарные данные.

Таблица 30 – Описательные взвешенные и невзвешенные средние значения по вопросам опроса и дополнительным авторским показателям

Вопрос / параметр	Группа 1, металлургия	Группа 2, угледобыча	Группа 3, инвестиционно-институциональный блок	Общее взвешенное значение	Общее невзвешенное значение
1	2	3	4	5	6
Реалистичность цены водорода	2,8	3,9	4,2	3,6	3,808
Реалистичность инфраструктуры водорода к 2035 г.	2,5	3,1	5,8	3,5	3,589

Продолжение таблицы 30

1	2	3	4	5	6
Сопоставление риска отклонения качества продукта и регуляторной неопределенности	4,8	4,9	4,5	4,8	4,671
Критичность качества угля	6,2	6,4	5,3	6,1	5,589
Влияние дефицита опыта глубокой координации	6,1	5,4	5,6	5,7	5,466
Сценарий 1: тактическая адаптация – стратегическая трансформация	3,2	3,4	4,0	3,5	3,260
Сценарий 1: минимизация рисков – долгосрочное преимущество	2,9	3,3	4,3	3,4	3,137
Сценарий 1: компромисс – соответствие устойчивому развитию	3,2	3,3	3,5	3,3	3,014
Сценарий 2: тактическая адаптация – стратегическая трансформация	5,8	6,3	6,2	6,1	5,671
Сценарий 2: минимизация рисков – долгосрочное преимущество	5,6	6,2	6,0	5,9	5,452
Сценарий 2: компромисс – соответствие устойчивому развитию	4,9	5,4	5,4	5,2	4,753

Источник: составлено автором.

Углубленный анализ распределения ответов позволяет выявить не только средние значения, но и структуру экспертного согласия или поляризации по ключевым вопросам. Для сохранения компактности распределения по значению $I_{\text{рег}}$, организационной конфигурации и условиям преимущества одного из сценариев объединены в таблице 31.

Таблица 31 – Ключевые результаты экспертного опроса и условия их интерпретации

Проверяемый параметр	Основной результат распределения	Интерпретация для модели
1	2	3
Индекс углеродного регулирования $I_{рег}$ для сценария частичной газификации	43% экспертов выбрали диапазон 0,61-1,00; еще 18% – выше 1,00; совокупно 61% экспертов указали необходимость уровня не ниже 0,61	Предварительный порог $I_{рег} \geq 0,40$ сохраняется как предварительный; сценарно уточненное значение принято по совокупной доле 61% экспертов на уровне $I_{рег} \geq 0,61$
Логистическое плечо поставки термококса	Металлурги тяготеют к плечу до 1500 км; угледобывающие предприятия допускают более длинные плечи 1500-3500 км; инвестиционно-институциональный блок фиксирует прагматичный диапазон 1500-2500 км	Порог $L \leq 3500$ км сохраняется как предварительный; сценарно уточненное значение $L \leq 2500$ км соответствует верхней границе прагматичного диапазона 1500-2500 км, зафиксированного инвестиционно-институциональным блоком экспертной выборки

Продолжение таблицы 31

1	2	3
Организационная конфигурация управления технологическими рисками	62% экспертов выбрали имущественно-интегрированную форму координации; среди угледобывающих предприятий поддержка достигла 84%	Результат указывает на запрос на глубокую координацию участников, но не трактуется как доказательство универсальной оптимальности одной юридической формы
Взвешенные доли отметок условий преимущества одного из сценариев с точки зрения практической реализуемости	При множественном выборе в фактической выборке N = 73 авторская сводка содержит взвешенные доли отметок: 64% – внешнее углеродное регулирование и требования к углеродной отчетности; 21% – отсутствие водородной инфраструктуры; 13% – низкая готовность рынка платить премию; 4% – необходимость быстрой модернизации при ограниченном CAPEX; сумма долей может превышать 100%	Сценарий частичной газификации получает преимущество не только из-за технологических параметров, но и из-за сочетания регуляторных, инфраструктурных и инвестиционных ограничений
Принцип цены промежуточного продукта	Эксперты не сформировали единого подхода; выделяются варианты «себестоимость + нормативная доходность», скользящая формула с учетом рыночных индексов и переговорная цена в заранее заданном коридоре	Цена промежуточного продукта должна рассматриваться как предмет отдельной организационно-экономической настройки, а не как фиксированная универсальная величина
Дополнительная авторская статистика объединенных трех шкал и парного сравнения сценариев	α Кронбаха: 0,916 для сценария 1 и 0,952 – для сценария 2	Значения характеризуют дополнительный авторский массив. Они согласуются с результатами двух документированных шкал и учитываются при проверке H2
Чувствительность к весам	Невзвешенная оценка используется как базовая описательная характеристика; ограниченное взвешивание по стажу – как описательный анализ чувствительности	Совпадение направления в обеих спецификациях отмечается описательно и не заменяет инференциальную проверку
Двухступенчатый технологический допуск	До УЕСЭ проверяется принципиальная применимость технологической схемы; после операционного отбора для конкретного продукта и агрегата проверяются реакционная способность, прочность, CSR/CRI, состав и поведение шихты	Сценарные пороговые значения и УЕСЭ не подменяют обязательную инженерно-технологическую верификацию соответствия характеристик продукта требованиям конкретного металлургического агрегата перед инвестиционным решением

Источник: составлено автором.

Результаты таблицы 31 характеризуют позиции фактической экспертной выборки и дополнительные авторские данные, на основе которых уточнены сценарные параметры углеродного регулирования, логистического плеча, качества сырья и организационной координации. Углеродное регулирование и отчетность рассматриваются как один из факторов значимости технологических альтернатив. Описательные межгрупповые различия представлены в таблице 32.

Таблица 32 – Межгрупповые расхождения в оценках ключевых параметров

Параметр	Металлургические предприятия	Угледобывающие предприятия	Инвестиционно-институциональный блок	Значение для модели
Водородная инфраструктура	Выраженный скепсис: инфраструктура малореализуема в среднесрочной перспективе	Умеренный скепсис: скорее вопрос стоимости и сроков	Оптимистичнее, но неоднородно: технологические эксперты оценивают перспективы выше, финансовые – осторожнее	Подтверждает инфраструктурную уязвимость сценария полной газификации
Индекс углеродного регулирования $I_{рег}$	Требуют высокого и предсказуемого уровня в компенсацию рисков и капитальных затрат	Допускают более широкий диапазон при долгосрочном спросе и перспективе нового рынка	Рассматривают углеродное регулирование, отражаемое индексом $I_{рег}$, как и инструмент возможной государственной поддержки	Обосновывает повышение порога $I_{рег}$ по обоим сценариям
Логистическое плечо	Ориентированы на короткое плечо или жесткую привязку к тарифной модели	Допускают более длинные плечи при долгосрочных обязательствах потребителя	Фиксируют компромиссный диапазон 1500-2500 км	Учитывается при сценарном уточнении L для сценария частичной газификации до 2500 км
Организационная конфигурация	Часть экспертов – за гибкие формы на этапе НИОКР, часть – за имущественную интеграцию	Преобладает имущественно-интегрированная форма координации	Предпочтения распределены между проектной координацией, альянсами и интегрированными формами	Подтверждает необходимость глубокой координации без универсальности одной формы
Цена промежуточного продукта	Заинтересованы в предсказуемости и увязке цены с экономией металлургического контура	Заинтересованы в покрытии затрат, возврате инвестиций и участии в эффекте переработки	Требуют прозрачной формулы и возможности внешнего контроля	Подтверждает значимость механизма расчета цены для устойчивости взаимодействия

Источник: составлено автором.

Описательные межгрупповые расхождения в фактической экспертной выборке интерпретируются с учетом различий ролей, ответственности и интересов участников. Такая интерпретация содержательно объясняет наблюдаемые расхождения между профессиональными группами в пределах фактической экспертной панели и используется совместно с расчетной проверкой параметров модели.

Предполагаемые переговорные позиции участников сохраняются как авторская качественная интерпретация, сформированная с учетом результатов опроса и распределения функций между контурами производственной цепочки. Соответствующие положения используются для содержательного объяснения выявленных различий.

На основе документированных ответов и дополнительных авторских данных сформированы консервативные сценарные уточнения предварительных значений расчетной модели. Параметры таблицы 33 зафиксированы в принятой сценарной спецификации, а устойчивость результатов к их изменению проверяется анализом чувствительности и имитационным моделированием, что обеспечивает воспроизводимость расчетов в пределах принятой модели.

Таблица 33 – Сравнение предварительных и сценарно уточненных значений параметров расчетной модели

Параметр	Значение сценария 1		Значение сценария 2		Основание сценарного уточнения
	предва-рительное	сценарно уточнен-ное	предва-рительное	сценарно уточненное	
1	2	3	4	5	6
$I_{рег}$, индекс углерод-ного регу-лирования	≥ 0,55	≥ 0,65	≥ 0,40	≥ 0,61	Значение для сценария 2 опирается на сводные результаты экспертного опроса, в которых внешнее углеродное регулирование отмечено взвешенной долей 64% отметок и задано строже предварительного уровня 0,40 – на уровне $I_{рег}$ не ниже 0,61; для сценария 1 принято более высокое значение, поскольку водородный сценарий сохраняет операционную сопоставимость лишь при более высоком уровне регуляторного давления; в таблице Ж.2 диапазонный вопрос обозначен как P_c и относится к водородному сценарию
L, логисти-ческое плечо	≤ 1000 км	≤ 800 км	≤ 3500 км	≤ 2500 км	Значение 2500 км для сценария 2 принято как нижняя граница документированных диапазонов допустимого логистического плеча термококса и тем самым строже предварительного ограничения 3500 км; значение 800 км для сценария 1 задано расчетно и более строго ввиду специализированного характера водородной транспортной инфраструктуры; отдельный диапазонный вопрос о логистическом плече водородного сценария в анкету не включался
$K_{т.и.}$, коэффи-циент трансакци-онных издержек	≤ 1,10	≤ 1,08	≤ 1,20	≤ 1,15	Значения $K_{т.и.}$ 1,08 и 1,15 обоснованы результатами модуля 5 анкеты об организационной конфигурации взаимодействия и оценкой дефицита опыта глубокой координации (5,7 балла из 7); оба значения приняты строже предварительных уровней 1,10 и 1,20
Q, индекс технологи-ческой эффектив-ности сырья	≥ 0,88	≥ 0,91	≥ 0,94	≥ 0,96	Значения Q 0,91 и 0,96 обоснованы описательной оценкой значимости качества угольной базы по модулю 4 анкеты (6,1 балла из 7) и приняты строже предварительных уровней 0,88 и 0,94

Продолжение таблицы 33

1	2	3	4	5	6
$R_{тех}$	≤ 0,10	≤ 0,12	≤ 0,05	≤ 0,08	Значения $R_{тех}$ 0,12 и 0,08 обоснованы категориальными ответами модуля 4 анкеты о технологических рисках и заданы выше предварительных уровней 0,10 и 0,05, что увеличивает расчетную надбавку за риск и обеспечивает консервативность оценки
$C_{соц}$, социальные издержки	≤ 18 у.е.	≤ 22 у.е.	≤ 12 у.е.	≤ 15 у.е.	Значения 22 у.е. и 15 у.е. заданы как расчетные границы общей реализуемости выше предварительных уровней 18 и 12 у.е., что расширяет допустимый диапазон социальных издержек и не улучшает расчетный результат; $C_{соц}$ не входит в $К_{УЕСЭ}$
Infra, инфраструктурное условие	Специализированная инфраструктура	Специализированная или гибридная инфраструктурная конфигурация	Ж/д транспортировка	Ж/д транспортировка с возможностью использовать терминалы и логистические узлы	Специализированная или гибридная инфраструктурная конфигурация для сценария 1 и использование терминалов и логистических узлов для сценария 2 определены по документированным ответам модуля 2 анкеты об инфраструктуре водорода и модуля 3 о логистике термококса

Источник: составлено автором.

Сценарные уточнения сохраняют структуру расчетной модели и задают консервативную конфигурацию ее параметров. Совместно с результатами опроса они формируют основу последующей расчетной проверки Н1 и Н2. Наиболее существенные изменения связаны с ростом требований к качеству сырья, сокращением допустимого логистического плеча, ужесточением контроля $K_{т.и.}$ и повышением минимального значения индекса углеродного регулирования.

В принятой спецификации $I_{рег}$ используется как сценарный безразмерный индекс, при этом $I_{рег}$ используется как методически отдельный безразмерный показатель регуляторного давления. Денежное влияние в формуле углеродной составляющей УЕСЭ задается через сценарный параметр P_c. Сценарное уточнение L задает консервативную границу логистического плеча в пределах документированных диапазонов и проектной географии; далее влияние параметра проверяется анализом чувствительности и методом Монте-Карло. Сценарное уточнение Q задает повышенное требование к технологической эффективности сырья. В расчетной спецификации параметр используется как интегральный коэффициент, влияющий на удельный расход сырья и выход продукта, устойчивость результата проверяется его варьированием в заданном диапазоне.

Сценарное уточнение $K_{\text{т.и.}}$ задает консервативный уровень трансакционных и координационных издержек с учетом сравнительной сложности сценариев, влияние коэффициента проверяется в анализе чувствительности и имитационном моделировании.

Особого пояснения требует сценарное уточнение параметра $R_{\text{тех}}$. В предварительном расчете надбавка на технологический риск была установлена ниже. В сценарной спецификации значение повышено до 0,12 для сценария полной газификации и до 0,08 – для сценария частичной газификации. Категориальные ответы о технологических рисках использованы для задания консервативной сценарной надбавки; принятое значение $R_{\text{тех}}$ рассматривается как консервативная верхняя оценка надбавки за технологический риск: ее повышение ухудшает расчетные показатели обоих сценариев и не работает в пользу вывода. Одновременно усилены требования к Q, L и $K_{\text{т.и.}}$

Параметр $C_{\text{соц}}$ не входит в $\text{К}_{\text{УЕСЭ}}$ и не используется при расчете операционной стоимости 1 ГДж энергетической ценности. Он применяется как ограничение общей реализуемости сценария, отражающее затраты на переподготовку персонала, социальную адаптацию угледобывающих территорий и смягчение последствий технологической трансформации.

В расчете модели после подстановки принятых сценарных параметров приведены следующие контрольные точечные значения: УЕСЭ_1 = 97,2 у.е., $\text{К}_{\text{УЕСЭ},1}$ = 97,2%, УЕСЭ_2 = 98,8 у.е., $\text{К}_{\text{УЕСЭ},2}$ = 98,8%.

В принятой сценарной спецификации оба расчетных значения находятся в пределах условия $\text{К}_{\text{УЕСЭ},i} \leq 100\%$. Сценарий полной газификации требует более высокого уровня углеродного регулирования, более короткого логистического плеча и более развитой инфраструктуры. Сценарий частичной газификации также требует повышения порогов $I_{\text{рег}}$ и Q, но, согласно принятой спецификации, сохраняет бóльшую совместимость с существующей логистической и промышленной инфраструктурой.

Так, значения таблицы 33, итоговые УЕСЭ и КУЕСЭ формируют принятую сценарную спецификацию для имитационного моделирования. По результатам главы 2 определен промежуточный статус проверки гипотез Н1-Н3, сформулированных в параграфе 1.4; он приведен в таблице 34.

Таблица 34 – Промежуточный статус проверки гипотез исследования в главе 2

Гипотеза	Проверяемое утверждение	Метод проверки в главе 2	Критерий подтверждения / опровержения	Результат главы 2	Интерпретация
1	2	3	4	5	6
H – основная гипотеза	Трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе частичной газификации бурых углей экономически обоснована при одновременном выполнении трех проверяемых условий, закрепленных во введении	Расчет УЕСЭ в принятой сценарной спецификации; описательный анализ документированных вопросов таблицы Ж.2 и дополнительных авторских данных, сформированных с учетом результатов опроса	В главе 2 расчетно оценивается выполнение условия $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ в принятой сценарной спецификации; итоговая проверка выполняется в главе 3	Сформирована расчетная и эмпирическая база; итоговый статус основной гипотезы устанавливается по результатам комплексной проверки в главе 3	Глава 2 расчетно обосновывает операционный потенциал трансформации в принятой сценарной спецификации; итоговая проверка H требует имитационного моделирования, инвестиционной оценки и предлагаемого механизма согласования интересов участников в главе 3
H1 – о жизнеспособности двух сценариев газификации	Оба сценария газификации – полной и частичной – обладают необходимым технологическим и экономическим потенциалом для обеспечения жизнеспособного межфирменного взаимодействия при заданных пороговых условиях	Расчет УЕСЭ; определение предварительных параметров; сценарное уточнение $I_{рег}$, L, Q, $К_{т.и.}$, $R_{тех}$, сформированное с учетом результатов опроса; повторная проверка $К_{УЕСЭ}$ в зафиксированной сценарной спецификации	На уровне главы 2 расчетно поддерживается, если в принятой сценарной спецификации для обоих сценариев выполняется $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$; устойчивость результата проверяется далее имитационным моделированием	Расчетно поддержана в принятой сценарной спецификации; экспертная валидация дополняет проверку достижимости условий	В принятой сценарной спецификации получены $К_{УЕСЭ,1} = 97{,}2\%$, $К_{УЕСЭ,2} = 98{,}8\%$; эти контрольные точечные результаты поддерживают проверку H1

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
Н2 – о сравнительном преимуществе частичной газификации	При достижении пороговых условий сценарий частичной газификации с производством термококса демонстрирует более высокую расчетную вероятность достижения операционного паритета по УЕСЭ, чем сценарий полной газификации с получением водорода на горизонте до 2040 г.	Описательное сопоставление двух документированных шкал семантического дифференциала, где 1 соответствует левому, а 7 – правому полюсу; описательный межгрупповой анализ; учет дополнительной третьей шкалы и иных производных данных	В главе 2 сформирована экспертная оценка различий стратегического восприятия и инфраструктурных условий сценариев; сравнительная проверка Н2 завершается операционным сопоставлением методом Монте-Карло в главе 3; инвестиционная оценка затем выполняется отдельно для выбранного термококсового сценария	Сформирована экспертная индикация в пользу частичной газификации; итоговый статус определяется имитационным сопоставлением в главе 3	Документированные ответы и дополнительные авторские данные дают описательную индикацию в пользу частичной газификации; сравнительный выбор базового сценария проверяется в главе 3 сопоставлением вероятностей выполнения условия $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$; NPV, IRR, FCFF, PP и DPP используются затем только для отдельной инвестиционной оценки выбранного термококсового сценария
Н3 – о механизме внутреннего ценообразования на термококс	Механизм внутреннего ценообразования на термококс предназначен для распределения корпоративного экономического эффекта между участниками; отрасле-региональные и национально-экономические результаты оцениваются отдельно как сценарный потенциал масштабирования	Описательный анализ распределения предпочтений по организационной конфигурации, принципу цены промежуточного продукта и принципу распределения контроля и ответственности	В главе 2 Н3 считается подготовленной к расчетной проверке, если документированные ответы показывают наличие нескольких предпочтительных принципов цены и распределения контроля и ответственности; значимость конкретного механизма и его параметры проверяются отдельно в главе 3	Подготовлена к расчетной проверке; параметры конкретного механизма определяются и апробируются в главе 3	Документированные ответы фиксируют несколько предпочтительных принципов цены, поэтому расчет ценового коридора термококса, распределяемой синергии, матрицы рисков и KPI выполняется в параграфе 3.3

Источник: составлено автором.

В принятой сценарной спецификации значение $К_{УЕСЭ,1}$ для сценария полной газификации составило 97,2%, а значение $К_{УЕСЭ,2}$ для сценария частичной газификации – 98,8%. Эти контрольные точечные результаты соответствуют критерию Н1.

Документированные вопросы характеризуют условия водородной инфраструктуры и стратегическое восприятие сценариев по двум шкалам; оценки капиталоемкости, практической реализуемости и третья шкала включены в принятую сценарную спецификацию. Сравнительная проверка требует имитационного сопоставления сценариев методом Монте-Карло в главе 3, после чего инвестиционная оценка выполняется для конкретного термококсового проекта.

Документированные ответы фиксируют распределение предпочтений по принципам цены промежуточного продукта и распределения контроля и ответственности, поэтому расчет ценового коридора и апробация предлагаемого подхода к согласованию интересов выполняются в параграфе 3.3 на параметрах кейса. В пределах задач главы 2 сформирована расчетная и описательная базы для дальнейшей проверки основной гипотезы. Принятая сценарная спецификация показывает операционный потенциал, а документированные ответы и дополнительные данные характеризуют воспринимаемые условия реализации. Экспертная валидация относится только к достижимости внешних и организационных пороговых условий и не заменяет независимой инженерно-технологической верификации продукта, которая остается за пределами исследования. Разграничение экспертной валидации и инженерно-технологической верификации приведено в параграфе 2.2 в таблице 31. Дальнейшая проверка выполняется в главе 3 посредством имитационного моделирования, инвестиционной оценки и разработки механизма согласования интересов участников.

На основе документированных ответов и авторских интерпретаций сформулированы дополнительные условия практической реализации модели. В таблице 35 они представлены как аналитические выводы для последующей апробации.

Таблица 35 – Дополнительные аналитические выводы, сформированные с учетом результатов опроса, и их значение для апробации двухэтапного методического подхода

Дополнительный вывод	Содержание	Значение для апробации двухэтапного методического подхода
Регионально-ресурсная обусловленность	Экономическая реализуемость проектов глубокой переработки бурых углей зависит от качества локальной сырьевой базы, логистического плеча, доступности инфраструктуры и близости к металлургическому потребителю	Апробация двухэтапного методического подхода должна учитывать конкретную ресурсную базу, транспортную конфигурацию и потребителя продукта
Необходимость институциональ-ной поддержки	Внешнее углеродное регулирование, требования к углеродной отчетности, инфраструктурная поддержка, гарантии и промышленные программы могут существенно влиять на реализуемость технологических сценариев	В главе 3 необходимо учитывать роль институтов развития, инфраструктурных условий и механизмов поддержки
Стадийный характер технологического перехода	Сценарий частичной газификации воспринимается как более практически реализуемый в среднесрочной перспективе, тогда как водородный сценарий требует более развитой инфраструктуры и долгосрочных условий	Выбор термококсового сценария для прикладной проверки рассматривается как среднесрочный этап трансформации, а не как отрицание водородной альтернативы
Координация участников производственной цепочки	Чем выше специфичность активов, капиталоемкость и инфраструктурная зависимость проекта, тем более значимыми становятся механизмы согласования интересов, распределения ответственности и расчета цены промежуточного продукта	Практическая реализация модели требует механизма согласования интересов участников

Источник: составлено автором.

Экспертно-расчетная оценка указывает на среднесрочное преимущество термококсового сценария, тогда как водородный сохраняется как долгосрочная альтернатива. Контрольные значения $К_{УЕСЭ,1}$ = 97,2% и $К_{УЕСЭ,2}$ = 98,8% расчетно поддерживают дальнейшую проверку Н1. Поэтому результаты главы 2 служат исходной базой для имитационного сопоставления, инвестиционной оценки и разработки механизма согласования интересов участников в параграфе 3.3.

Выводы по главе 2

1) Для сопоставления разнородных технологических продуктов металлургического передела – коксующегося угля, водорода и термококса – разработана методика сравнительной оценки по стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности (УЕСЭ), складывающейся из энергетической, углеродной, логистической и прочих операционных компонент. Базисом принят нормированный коксо-доменный сценарий, компоненты которого выделены из отраслевых и научных источников и приведены к 100 у.е.; критерием операционного паритета служит условие КУЕСЭ ≤ 100%. Прямое сравнение цен за тонну для этих

продуктов некорректно, тогда как УЕСЭ дает корректное, но сознательно ограниченное операционным уровнем сравнение: капитальные затраты оцениваются отдельно инвестиционными показателями, а восстановительная способность продукта – на обязательном инженерно-технологическом этапе. Новизна методики состоит в отраслевом составе компонент и использовании УЕСЭ как первого этапа принятия решения, а не в переводе стоимости в энергетическую единицу.

2) Расчет в системе уравнений УЕСЭ и однофакторный анализ чувствительности дали предварительные значения КУЕСЭ 79% для полной и 88% для частичной газификации и пороги пяти параметров: индекса углеродного регулирования, логистического плеча, качества сырья, коэффициента трансакционных издержек и надбавки на технологический риск, – через которые формализованы шесть групп факторов; социальная составляющая вынесена за пределы метрики как ограничение общей реализуемости. Паритет достижим в обоих сценариях, но принципиально разными способами: полная газификация опирается на снижение углеродной компоненты и критична к инфраструктуре, логистическому плечу и внешнему регуляторному стимулу, частичная сохраняет широкий логистический коридор, но требует качества сырья, контроля технологического риска и управляемых трансакционных издержек. Отсюда и различая в рычагах управления: инвестиционный контур в первом случае и операционные условия применения продукта во втором, – а совместная достижимость порогов требует многофакторного анализа.

3) Разграничение функций результатов в проверке гипотез позволило выделить четыре уровня: концептуальный (модель контуров), измерительный (УЕСЭ), уровень принятия решения (двухэтапный подход) и уровень распределения эффекта (инструментарий согласования интересов с ценой термококса в качестве расчетного ядра). Методика УЕСЭ и инструментарий согласования не дублируют друг друга, а отвечают за разные гипотезы и этапы исследования: УЕСЭ обеспечивает проверку Н1 и не подменяет проверку Н2 и Н3.

4) Экспертная валидация пороговых условий, проведенная среди 73 экспертов металлургических, угледобывающих компаний и инвестиционно-институционального блока с квотным отбором, взвешиванием оценок по опыту координации и управленческой позиции и проверкой относительно нейтральной

точки семибалльной шкалы (α Кронбаха 0,916 и 0,952) выявила асимметрию восприятия сценариев. Водородный сценарий оценен ниже нейтральной точки по достижимости приемлемой цены водорода и инфраструктуры к 2035 г., термококсовый – как стратегическая трансформация, формирующая долгосрочное преимущество; ключевыми рисками названы качество угольной базы и дефицит опыта глубокой координации, а условием преимущества низкоуглеродных сценариев – внешнее углеродное регулирование; большинство экспертов предпочли имущественно интегрированную форму и признали применимыми механизмы ценообразования: «себестоимость плюс доходность», скользящую формулу и переговорный коридор. Следовательно, барьер водородного сценария носит инфраструктурный, а не рыночный характер, главный управляемый риск термококсового сценария – координация участников, главный внешний – режим углеродного регулирования; выявленные механизмы ценообразования подготавливают проверку Н3. Валидация относится только к внешним и организационным условиям и отделена от инженерной верификации продукта, остающейся вне исследования.

5) По результатам опроса пороги расчетной модели ужесточены (повышены требования к уровню углеродного регулирования и качеству сырья, сокращено допустимое логистическое плечо, увеличены коэффициент трансакционных издержек и надбавка за технологический риск), и в консервативной спецификации оба сценария сохраняют операционный паритет – КУЕСЭ 97,2% для полной и 98,8% для частичной газификации. Гипотеза Н1 расчетно поддержана, однако сближение значений с порогом относительно предварительных 79 и 88% показывает, что запас преимущества определяется строгостью условий и точечных оценок для выбора сценария недостаточно – требуется учет неопределенности. Термококсовый сценарий имеет среднесрочное преимущество по совместимости с существующей инфраструктурой, водородный является долгосрочной альтернативой. Открытыми остаются устойчивость паритета при совместном изменении параметров, инвестиционная состоятельность конкретного проекта и распределение эффекта между участниками, что составляет содержание главы 3.

Глава 3

Экономическое обоснование и оценка потенциальных эффектов модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия на основе частичной газификации бурых углей

3.1 Имитационное сопоставление сценариев полной и частичной газификации бурых углей и выбор сценария для инвестиционной оценки конкретного проекта

Сценарно уточненные параметры расчетной модели, сформированные по результатам опроса, далее используются для проверки Н2. В главе 2 контрольные точечные значения расчетно поддержали дальнейшую проверку Н1, поэтому в параграфе 3.1 проводится имитационная проверка того, какой из двух сценариев обладает более высоким потенциалом практической реализации на горизонте до 2040 г.

Гипотеза Н2 формулируется следующим образом: на горизонте до 2040 г. сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса имеет более высокую расчетную вероятность достижения операционного паритета по УЕСЭ, чем сценарий полной газификации с получением водорода, и потому может быть выбран для последующей инвестиционной апробации. Н2 подтверждается, если вероятность выполнения условия $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ для термококсового сценария выше соответствующей вероятности для водородного сценария, и опровергается при равенстве или обратном соотношении, а также если термококсовый сценарий не достигает операционного паритета в большинстве итераций. Инвестиционная оценка выполняется только для выбранного сценария и не входит в критерий сравнительной проверки Н2.

Исходные данные, формулы УЕСЭ и контрольные результаты представлены в MS Excel; выполнено имитационное моделирование методом Монте-Карло. Под имитационным моделированием здесь понимается многократный расчет КУЕСЭ при случайном формировании входных параметров в заданных диапазонах и распределениях с оценкой доли итераций, в которых выполняется критерий операционного паритета; эта доля интерпретируется как вероятность достижения

паритета. Оба сценария используют одинаковое число итераций, единый критерий операционного паритета и согласованные правила формирования входных распределений. Капитальные затраты, инвестиционная оценка и инженерно-технологическая верификация соответствия характеристик продукта требованиям конкретного металлургического агрегата не включаются в $К_{УЕСЭ}$ и рассматриваются на последующих этапах анализа. Водородный сценарий на этом этапе представлен операционной спецификацией для сопоставления альтернатив. Данные для проверки включают сценарно уточненные диапазоны параметров $I_{рег}, L, Q, K_{т.и.}$ и $R_{тех}$, полученные в главе 2. Критерии подтверждения и опровержения Н2 на операционном уровне сформулированы выше и применяются к сопоставлению сценариев частичной и полной газификации по доле итераций, в которых выполняется условие $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ для сценария частичной газификации. Для сопоставления используется разработанная во второй главе методика сравнительной оценки по УЕСЭ. Она позволяет привести технологические продукты разной физической природы к единой расчетной базе – стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ.

Общая схема перехода от сценарно уточненных параметров расчетной модели к выбору сценария для инвестиционной оценки представлена на рисунке 10. Она отражает последовательность принятия решения: проверку качественных и количественных предпосылок, сценарное сопоставление, определение порогового значения CAPEX, имитационное моделирование методом Монте-Карло с дополнительными стресс-проверками и выбор сценария для инвестиционной оценки конкретного проекта и последующей апробации двухэтапного подхода.

В схеме используется авторское обозначение УКЕП – уточняющий коэффициент экономической применимости проекта. УКЕП предназначен для обобщающей оценки выполнения пороговых условий перехода от операционной оценки по УЕСЭ к инвестиционной проверке проекта. К таким условиям относятся пороговые значения CAPEX, логистического плеча, железнодорожного тарифа, операционных затрат, ставки дисконтирования и объема грузопотока. УКЕП выполняет роль обобщающей рамки выполнения перечисленных пороговых условий. Операционный паритет по $К_{УЕСЭ}$ выполняет функцию допуска к последующей инвестиционной проверке проекта.



Источник: составлено автором.

Рисунок 10 – Алгоритм сравнительной оценки операционной жизнеспособности и инвестиционной состоятельности сценариев трансформации угольно-металлургического взаимодействия

В схеме используется авторское обозначение УКЕП – уточняющий коэффициент экономической применимости проекта. УКЕП предназначен для обобщающей оценки выполнения пороговых условий перехода от операционной оценки по УЕСЭ к инвестиционной проверке проекта. К таким условиям

относятся пороговые значения CAPEX, логистического плеча, железнодорожного тарифа, операционных затрат, ставки дисконтирования и объема грузопотока. УКЕП выполняет роль обобщающей рамки выполнения перечисленных пороговых условий. Операционный паритет по $К_{УЕСЭ}$ выполняет функцию допуска к последующей инвестиционной проверке проекта.

Представленный алгоритм фиксирует двухэтапную логику проверки [75]. Первый этап связан с операционной сопоставимостью сценариев и основан на методике сравнительной оценки по УЕСЭ [77]. На этапе операционного сопоставления качественные и количественные предпосылки рассматриваемой модели сравниваются с установленными ограничениями; если они соответствуют заданным требованиям, определяется операционная сопоставимость сценария и проводится предварительный сравнительный анализ полученных вариантов. Если же сценарий не соответствует исходным ограничениям, проверяется возможность формирования альтернативной модели взаимодействия при сохранении исследовательских предпосылок. При невозможности такой корректировки сценарий исключается из дальнейшего рассмотрения.

Второй этап связан с инвестиционной состоятельностью выбранного термококсового проекта. Даже если сценарий демонстрирует операционный паритет по $К_{УЕСЭ}$, он должен быть дополнительно проверен через пороговое значение CAPEX и финансово-экономическое моделирование. Поэтому после первичного сценарного сопоставления в алгоритме предусмотрены определение предельных значений капиталоемкости, расчет финансово-экономической модели и инвестиционная оценка. Если сценарий не обеспечивает приемлемого результата, параметры проекта корректируются, а также определяются количественные предпосылки, которые необходимо изменить для достижения инвестиционной состоятельности проекта. К таким параметрам относятся логистическое плечо, железнодорожный тариф, объем CAPEX, операционные затраты, ставка дисконтирования и объем грузопотока.

Блок Монте-Карло на рисунке имеет концептуальный, а не хронологический характер: в фактической расчетной процедуре он одинаково применяется к обоим сценариям до выбора базового варианта, после чего DCF выполняется только для выбранного термококсового сценария. На этапе имитационного моделирования оценивается устойчивость результата при

одновременном варьировании входных параметров расчетной модели [170]. Итоговое решение принимается не по единичному расчетному значению, а по результатам сравнительного анализа распределения сценариев: сценарий, соответствующий установленным условиям, может быть выбран для инвестиционной оценки конкретного проекта и последующей апробации двухэтапного подхода, тогда как неэффективный сценарий подлежит отклонению или возврату к корректировке параметров.

Выбор сценария для инвестиционной оценки и последующей апробации двухэтапного подхода ни на одном шаге не опирается на предпочтение технологии: каждый шаг – проверка с заданным критерием отсева, и любой из них термококсовый сценарий может не пройти. Основанием служит результат последовательной проверки операционной сопоставимости, инвестиционной состоятельности и устойчивости термококсового сценария к изменению ключевых параметров.

Используемая метрика имеет следующий вид по формуле (12)

$$\text{УЕСЭ}_i = C_{\text{энергетический},i} + C_{\text{углеродный},i} + C_{\text{логистический},i} + C_{\text{проч.операционный},i}, \quad (12)$$

где $C_{\text{энергетический},i}$ отражает нормированную энергетическую стоимостную компоненту УЕСЭ;

$C_{\text{углеродный},i}$ – потенциальную стоимость углеродной уязвимости при наличии углеродного регулирования;

$C_{\text{логистический},i}$ – логистические и координационные издержки;

$C_{\text{проч.операционный},i}$ – прочие операционные расходы, связанные с использованием продукта в металлургическом контуре.

Для сопоставления с традиционной схемой используется коэффициент, рассчитываемый по формуле (13)

$$\text{К}_{\text{УЕСЭ},i} = \frac{\text{УЕСЭ}_i}{\text{УЕСЭ}_{\text{трад}}} \times 100\%, \quad (13)$$

где $\text{УЕСЭ}_{\text{трад}} = 100$ у.е.

Выполнение условия $\text{К}_{\text{УЕСЭ},i} \leq 100\%$ означает достижение операционного паритета с традиционным коксо-доменным сценарием. При этом $\text{К}_{\text{УЕСЭ}}$ оценивает только операционную сопоставимость технологических сценариев. Капитальные

вложения не включаются в этот коэффициент и проверяются далее в параграфе 3.2 через NPV, IRR, FCFF, EBITDA и срок окупаемости. Поэтому сравнительная проверка H2 завершается в параграфе 3.1 оценкой вероятности операционного паритета двух сценариев; в параграфе 3.2 отдельно проверяется инвестиционная состоятельность только выбранного термококсового проекта.

Для имитационного моделирования сохранены два технологических сценария.

Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода, – характеризующийся наибольшим потенциалом снижения углеродной уязвимости, но и наибольшей зависимостью от инфраструктуры транспортировки и использования водорода, логистического плеча и уровня углеродного регулирования; он рассматривается как база сравнения и долгосрочная альтернатива.

Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса как технологического продукта глубокой переработки бурых углей; термококс является продуктом выбранного сценария, а двухэтапный методический подход далее апробируется на параметрах конкретного термококсового проекта.

Сравнительная характеристика сценариев, используемых для проверки H2 методом Монте-Карло, представлена в таблице 36.

Таблица 36 – Сценарии имитационного моделирования и ключевые различия

Сопоставляемая характеристика	Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода	Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса
1	2	3
Основной продукт	Водород как технологический продукт глубокой переработки бурых углей	Термококс как технологический продукт глубокой переработки бурых углей
Инфраструктурная зависимость	Высокая; требуется специализированная инфраструктура получения, транспортировки и промышленного использования водорода	Умеренная; возможно использование существующих железнодорожных и терминальных решений
Масштаб адаптации металлургического контура	Высокий; требуется существенная адаптация металлургической инфраструктуры	Ниже относительно водородного сценария; сценарий в большей степени совместим с существующей промышленной инфраструктурой
Капиталоемкость	Высокая; инвестиционная нагрузка формируется в газификационном и металлургическом контурах, а также в инфраструктуре	Ниже относительно водородного сценария, но сохраняется капиталоемкость газификационного контура и логистической инфраструктуры
Логистическое ограничение	Жесткое; сценарий чувствителен к расстоянию и типу инфраструктуры	Более гибкое; допустимое логистическое плечо шире, но зависит от тарифов и выполнения требования стабильности поставок

Продолжение таблицы 36

1	2	3
Ключевые факторы риска	Недостаточная готовность водородной инфраструктуры, высокая стоимость водорода, необходимость адаптации металлургического контура	Качество сырья, логистика, риск снижения спроса на термококс, координационные издержки
Показатель сравнительной проверки Н2	Вероятность выполнения условия $К_{УЕСЭ,1} \leq 100\%$	Вероятность выполнения условия $К_{УЕСЭ,2} \leq 100\%$

Источник: составлено автором.

В параграфе 2.3 сформированы сценарно уточненные значения параметров расчетной модели. Они используются в параграфе 3.1 как входы имитационной проверки Н2. Их повторное представление необходимо, поскольку они задают границы и распределения входных параметров для моделирования методом Монте-Карло. В отличие от главы 2, где приведены контрольные точечные значения для обоих сценариев, в параграфе 3.1 оценивается сравнительная устойчивость полной и частичной газификации при одновременном варьировании ключевых параметров, что отражено в таблице 37. Входы сформированы с учетом результатов опроса, но не являются независимо воспроизводимой статистической калибровкой.

Таблица 37 – Сценарно уточненные параметры для имитационного моделирования

Параметр	Обозначение	Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода	Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса
Индекс углеродного регулирования	$I_{рег}$	≥ 0,65	≥ 0,61
Максимальное логистическое плечо	L	≤ 800 км	≤ 2500 км
Индекс технологической эффективности сырья	Q	≥ 0,91	≥ 0,96
Коэффициент трансакционных издержек	$К_{т.и.}$	≤ 1,08	≤ 1,15
Допустимая надбавка на технологический риск	$R_{тех}$	≤ 0,12	≤ 0,08
Удельные социальные издержки	$С_{соц}$	≤ 22 у.е.	≤ 15 у.е.

Источник: составлено автором по результатам главы 2.

Приведенные параметры показывают, что оба сценария обеспечивают операционный паритет с традиционной схемой, однако делают это в различных коридорах условий.

Сценарий полной газификации зависит от более жестких инфраструктурных предпосылок и более короткого логистического плеча. Сценарий частичной газификации имеет более широкий логистический диапазон, но предъявляет более высокие требования к качеству буроугольной сырьевой базы и стабильности параметров продукта.

Метод Монте-Карло применяется в настоящем параграфе потому, что проверка H2 требует оценки не отдельного порогового параметра, а устойчивости сценариев при одновременном изменении $I_{\text{рег}}$, L, Q, $K_{\text{т.и.}}$ и $R_{\text{тех}}$. Простая проверка каждого порога по отдельности не позволяет определить вероятность сохранения операционного паритета при неблагоприятных сочетаниях технологических, логистических, регуляторных и организационно-экономических факторов. Поэтому имитационное моделирование методом Монте-Карло используется для проверки того, какой сценарий чаще сохраняет $К_{\text{УЕСЭ}} \leq 100\%$ при заданной структуре неопределенности.

При имитационном моделировании использованы генератор PCG64, фиксированное начальное значение генератора 20260728, 100 000 итераций для каждого сценария и гауссовская копула с corr(L, Кт.и.) = +0,25 и corr(Q, Rtex) = −0,25; критерий успеха – КУЕСЭ ≤ 100%. Дополнительно проверены независимость параметров, корреляционный стресс ±0,50, равномерные альтернативы распределений и изменение диапазонов на ±20%; во всех шести спецификациях вероятность паритета термококсового сценария остается выше водородного. На каждой итерации случайным образом генерировался набор входных параметров из заданных распределений, после чего рассчитывались УЕСЭ_i и $К_{\text{УЕСЭ},i}$. Итерация считалась успешной, если выполнялось условие $К_{\text{УЕСЭ},i} \leq 100\%$. Итоговая вероятность операционного паритета определялась как доля успешных итераций в общем числе расчетов. В логике проверки H2 более устойчивым признается сценарий, для которого вероятность успешных итераций выше, среднее и медианное значения $К_{\text{УЕСЭ}}$ ниже, а разброс результатов меньше.

Корреляционная структура модели ограничена двумя связями, для каждой из которых имеется экономическое основание. Положительная связь между логистическим плечом L и коэффициентом трансакционных издержек $К_{\text{т.и.}}$ (+0,25) отражает то, что рост расстояния между газификационным комплексом

и потребителем увеличивает число контрагентов, сложность контроля качества и сроков поставки и требования к договорному обеспечению, что согласуется с положением теории трансакционных издержек о росте издержек координации при пространственном разобщении специфических активов [92; 225] и с экспертными оценками организационных барьеров в главе 2. Отрицательная связь между индексом качества сырья Q и надбавкой на технологический риск Rтех (−0,25) отражает то, что более стабильные свойства бурого угля снижают вероятность отклонений режима газификации и брака продукта, что следует из технологических ограничений сценариев, представленных в таблице 9, и технических параметров переработки [58]. Остальные параметры приняты независимыми: интенсивность углеродного регулирования задается внешней политикой и не связана с проектными параметрами на горизонте моделирования, а введение связей без содержательного обоснования увеличило бы число непроверяемых допущений. Умеренная величина коэффициентов (±0,25) выбрана как консервативная: она фиксирует направление связи, не предопределяя результат. Параметры корреляций приняты экспертно, а не оценены по эмпирическим данным; проверка на независимость и стресс ±0,50 показывает сохранение знака результата, однако полная проверка устойчивости к иным спецификациям корреляционной структуры вынесена в ограничения исследования.

Моделирование в параграфе 3.1 завершает операционный отбор, но не заменяет инженерно-технологическую верификацию или инвестиционный анализ. Инженерно-технологическая верификация соответствия характеристик продукта требованиям конкретного металлургического агрегата и DCF являются самостоятельными последующими проверками; инженерно-технологическая квалификация продукта фиксируется как обязательный проектный этап. Имитационное моделирование проверяет операционный паритет по КУЕСЭ, тогда как инвестиционная состоятельность выбранного термококсового проекта оценивается далее, в параграфе 3.2, через NPV, IRR, FCFF и срок окупаемости.

Входные распределения параметров представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Входные распределения параметров для имитационного моделирования

Параметр	Обозначение	Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода	Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса	Тип распределения
Индекс углеродного регулирования	$I_{рег}$	Треугольное распределение: 0,50; 0,65; 0,85	Треугольное распределение: 0,45; 0,61; 0,80	Треугольное
Логистическое плечо	L	Равномерное распределение: 200-1200 км	Треугольное распределение: 500; 1800; 2500 км	Равномерное / треугольное
Индекс технологической эффективности сырья	Q	Нормальное распределение: $\mu = 0,92$; $\sigma = 0,03$	Нормальное распределение: $\mu = 0,97$; $\sigma = 0,02$	Нормальное, усеченное
Коэффициент трансакционных издержек	$К_{т.и.}$	Треугольное распределение: 1,02; 1,08; 1,15	Треугольное распределение: 1,05; 1,12; 1,20	Треугольное
Надбавка на технологический риск	$R_{тех}$	Равномерное распределение: 0,05-0,15	Равномерное распределение: 0,03-0,10	Равномерное

Источник: составлено автором на основе сценарно уточненных параметров главы 2.

Отдельного пояснения требуют параметры L и $K_{т.и.}$ Для сценария полной газификации распределение L задано в диапазоне 200-1200 км, тогда как сценарно уточненное значение составляет 800 км. Такое распределение позволяет проверить риск выхода за принятую границу логистического ограничения. Часть итераций моделирует неблагоприятные инфраструктурные условия.

Для сценария частичной газификации распределение L задано как треугольное с параметрами 500; 1800; 2500 км. Минимум, мода и максимум заданы по документированным диапазонам допустимого логистического плеча термококса и охватывают весь диапазон вплоть до принятой границы 2500 км. Параметр $K_{т.и.}$ для сценария частичной газификации имеет расчетную моду 1,12, соответствующую среднему значению произведения весов по производственным группам экспертной выборки, при верхней границе 1,15; оба значения используются как входы сценарного распределения, а не как независимо воспроизводимые статистические оценки.

Результаты имитационного моделирования представлены в таблице 39.

Таблица 39 – Результаты имитационного моделирования операционной жизнеспособности сценариев

В процентах

Показатель	Сценарий 1 – полная газификация бурых углей с получением водорода	Сценарий 2 – частичная газификация бурых углей с производством термококса
Число итераций, в единицах	100 000	100 000
Среднее значение $К_{УЕСЭ}$	112,4	85,8
Медиана $К_{УЕСЭ}$	110,8	85,7
Стандартное отклонение, в процентных пунктах	14,2	7,8
Минимальное значение $К_{УЕСЭ}$	80,2	67,5
95-й процентиль	137,3	98,4
Вероятность $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$	21,7	97,4

Источник: расчеты автора.

Результаты моделирования показывают принципиальное различие профилей операционной жизнеспособности двух сценариев и дают расчетное основание для проверки Н2. Для сценария полной газификации бурых углей с получением водорода среднее значение $К_{УЕСЭ}$ составляет 112,4%, а вероятность достижения операционного паритета – 21,7%. Медиана КУЕСЭ водородного сценария составляет 110,8%, стандартное отклонение – 14,2 процентного пункта. Это означает, что при заданных колебаниях входных параметров водородный сценарий в большинстве итераций не достигает операционного паритета с традиционной схемой. При этом дело не в рыночной конъюнктуре: по экспертным оценкам параграфа 2.3, узким местом остается инфраструктурное условие – 3,5 балла за реалистичность создания инфраструктуры к 2035 г., то есть ограничение, которое в среднесрочном горизонте не снимается.

Для сценария частичной газификации бурых углей с производством термококса среднее значение $К_{УЕСЭ}$ составляет 85,8%, а вероятность достижения операционного паритета – 97,4%. Медиана $К_{УЕСЭ}$ равна 85,7%, что свидетельствует о смещении основной массы результатов в зону ниже порогового значения 100%. Кроме того, стандартное отклонение по сценарию частичной газификации ниже, чем по водородному сценарию: 7,8 п.п. против 14,2 п.п. Это указывает на меньший разброс результатов и более устойчивый профиль операционной сопоставимости.

Разрыв между сценариями оказался кратным, а не процентным: 97,4% против 21,7%. На операционном уровне гипотеза Н2 подтверждается: сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса достигает операционного паритета существенно чаще, чем сценарий полной газификации с получением водорода. Соотношение 97,4% против 21,7%, более низкое среднее значение $К_{УЕСЭ}$ и меньшее стандартное отклонение КУЕСЭ показывают, что термококсовый сценарий обладает более устойчивым профилем операционной жизнеспособности на рассматриваемом горизонте. Этот вывод фиксирует преимущество частичной газификации по операционному критерию на рассматриваемом горизонте, сохраняя водородный сценарий как долгосрочную технологическую альтернативу. Его инвестиционная оценка формирует самостоятельный проектный контур после разработки сопоставимой DCF-спецификации.

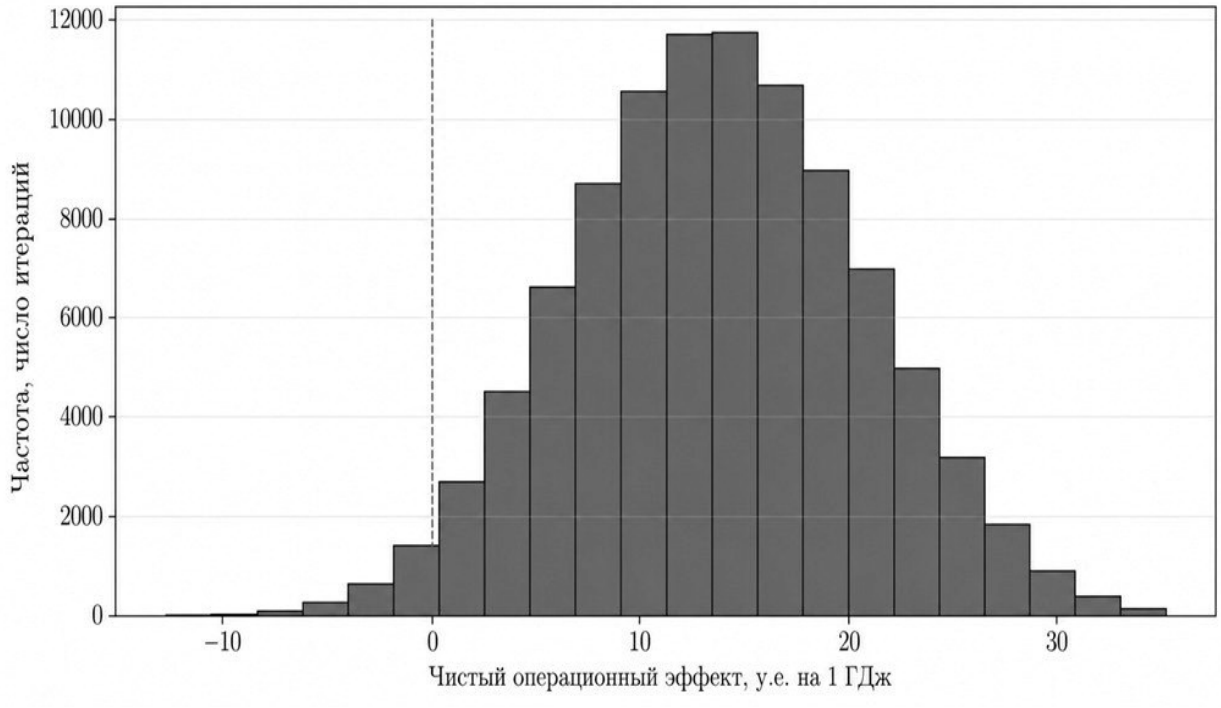
Для дополнительной проверки устойчивости сценария частичной газификации проанализирован чистый операционный эффект. Он рассчитывался как разница между базовым уровнем традиционной схемы и значением $УЕСЭ_2$ на каждой итерации $Э_{опер} = 100 – УЕСЭ_2$, где $Э_{опер}$ – чистый операционный эффект, исчисляемый в у.е. на 1 ГДж.

Положительные значения показателя соответствуют экономии по сравнению с традиционным сценарием, отрицательные – превышению операционных затрат, что показано на рисунке 11.

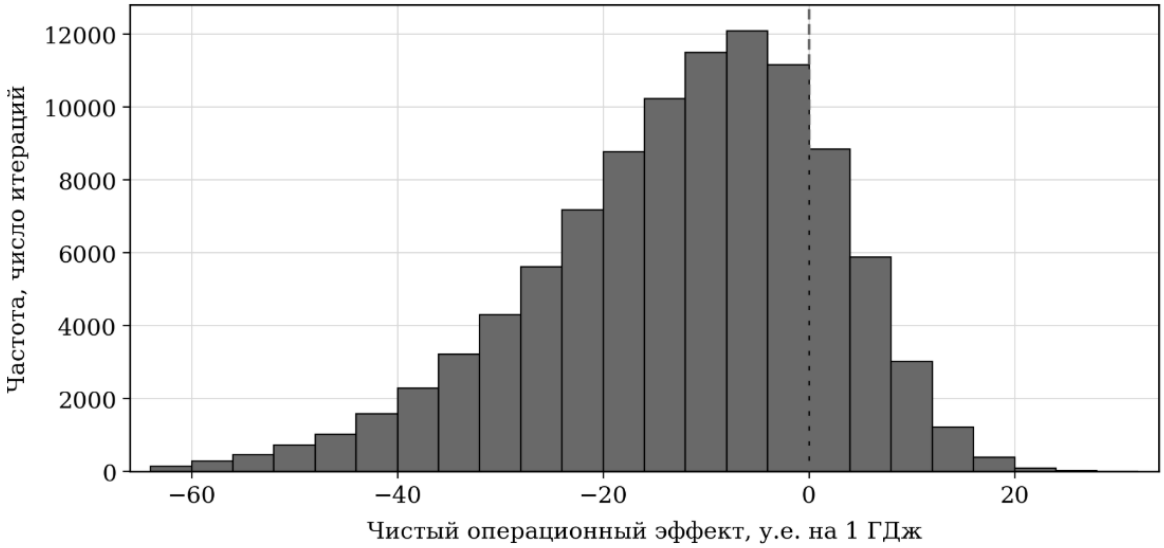
Распределение чистого операционного эффекта показывает, что основная масса значений сосредоточена в положительной зоне. Пик распределения приходится на интервал 13,46-15,64 у.е. экономии на 1 ГДж, а среднее значение экономии составляет около 14,2 у.е./ГДж. Вероятность отрицательного операционного эффекта остается ограниченной и не превышает нескольких процентов.

Аналогичный расчет выполнен для сценария полной газификации бурых углей с получением водорода: чистый операционный эффект определялся как разница между базовым уровнем традиционной схемы (100 у.е.) и значением УЕСЭ этого сценария на каждой итерации той же имитационной модели (100 000 итераций).

Распределение показателя представлено на рисунке 12.



Источник: расчеты автора на основе 100 000 итераций.
Рисунок 11 – Распределение чистого операционного эффекта сценария частичной газификации



Источник: расчеты автора на основе 100 000 итераций.
Рисунок 12 – Распределение чистого операционного эффекта сценария полной газификации

Сопоставление двух распределений показывает различие профилей операционной жизнеспособности. Для сценария частичной газификации основная масса значений чистого операционного эффекта сосредоточена в положительной зоне, тогда как для полной газификации распределение смещено в отрицательную область: вероятность положительного операционного эффекта

составляет 21,7% для водородного и 97,4% для термококсового сценария, а среднее значение КУЕСЭ водородного сценария равно 112,4%. Показатели 97,2% и 98,8% в главе 2 являются контрольными точечными результатами расчетной модели, а не вероятностями. Вероятности 21,7% и 97,4% получены только при моделировании методом Монте-Карло. Проверки альтернативных распределений, диапазонов и корреляций характеризуют устойчивость результата в пределах принятой сценарной спецификации.

Различается и форма распределений: стандартное отклонение по водородному сценарию (14,2 п.п.) почти вдвое превышает показатель термококсового сценария (7,8 п.п.), поэтому распределение сценария полной газификации является более широким и смещенным в неблагоприятную зону, тогда как распределение сценария частичной газификации – более компактным и устойчивым. Это подтверждает, что операционное преимущество частичной газификации носит не точечный, а систематический характер и сохраняется при широком диапазоне рассмотренных комбинаций входных параметров.

Полученные результаты показывают, что сценарий частичной газификации чаще достигает операционного паритета, формирует положительный чистый операционный эффект и характеризуется меньшим стандартным отклонением КУЕСЭ по сравнению с водородным сценарием.

Водородный сценарий, напротив, демонстрирует более высокую чувствительность к неблагоприятным сочетаниям параметров. Его операционная жизнеспособность зависит от одновременного выполнения нескольких жестких условий: достаточного уровня внешнего углеродного регулирования, высокого качества сырья, короткого логистического плеча и наличия инфраструктуры получения, транспортировки и использования водорода. При нарушении одного из этих условий значение $К_{УЕСЭ}$ существенно возрастает, что снижает вероятность достижения операционного паритета.

Сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса лучше адаптирован к условиям, в которых водородная инфраструктура еще не сформирована, а металлургический контур не готов к радикальной перестройке. Он допускает использование существующих логистических решений, не требует немедленного создания специализированной водородной сети и может быть реализован как среднесрочный технологический сценарий. При этом термококс не

рассматривается в настоящем исследовании как автоматически низкоуглеродный продукт. Более корректно говорить, что он является продуктом глубокой переработки бурых углей, позволяющим снизить углеродную уязвимость в принятой проектной границе «передел – логистика – применение» при определенных технологических, логистических и регуляторных условиях; полный углеродный баланс сценария в работе не оценивался.

В авторской сводке экспертного опроса взвешенная доля отметок внешнего углеродного регулирования и требований к углеродной отчетности как условия преимущества сценария составила 64%. Вопрос допускал множественный выбор при N = 73. Доля рассматривается наряду с условиями отсутствия водородной инфраструктуры, ограниченности CAPEX, готовности рынка платить премию и социальной адаптации угледобывающих территорий и учитывается при проверке H2.

Основные результаты имитационного моделирования, используемые для выбора сценария для инвестиционной оценки конкретного проекта и последующей апробации двухэтапного подхода, представлены в таблице 40.

Таблица 40 – Основные параметры сценария, выбранного для инвестиционной оценки конкретного проекта

В процентах

Элемент модели	Характеристика выбранного сценария
1	2
Базовый технологический сценарий	Частичная газификация бурых углей с производством термококса
Основной продукт	Термококс как технологический продукт глубокой переработки бурых углей
Сопутствующие продукты	Газообразные продукты частичной газификации, которые могут использоваться для энергетических нужд проекта; фокус исследования сохраняется на термококсе
Операционный критерий	$К_{УЕСЭ,2} \leq 100\%$
Вероятность достижения операционного паритета	97,4
Среднее значение $К_{УЕСЭ,2}$	85,8
Ключевые условия жизнеспособности	Качество сырья Q, логистическое плечо L, индекс углеродного регулирования $I_{рег}$, контроль $К_{т.и.}$ и $R_{тех}$
Инфраструктурная логика	Использование существующих железнодорожных и терминальных решений без необходимости немедленного создания водородной инфраструктуры
CAPEX-логика	Капиталоемкость сохраняется, но инвестиционная нагрузка ниже относительно водородного сценария; инвестиционная оценка конкретного термококсового проекта проводится в параграфе 3.2

Продолжение таблицы 40

В процентах

1	2
Организационно-экономическая логика	Необходима глубокая координация участников производственной цепочки и механизм распределения экономического эффекта
Роль в главе 3	Сценарий, выбранный для инвестиционной оценки российского-китайского термококсового проекта и последующей апробации двухэтапного методического подхода

Источник: составлено автором.

Имитационное моделирование показывает более высокую вероятность операционного паритета термококсового сценария в рассматриваемом диапазоне параметров, не исключая долгосрочной значимости водородного направления.

По совокупности результатов: вероятности достижения операционного паритета 97,4%, среднего значения $К_{УЕСЭ}$ ниже 100%, положительного операционного эффекта и меньшего стандартного отклонения КУЕСЭ – сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса выбран для инвестиционной оценки конкретного термококсового проекта и последующей апробации двухэтапного подхода. Н2 подтверждается на операционном уровне; этот вывод обосновывает выбор термококсового сценария для инвестиционной оценки конкретного проекта, а сравнительное инвестиционное преимущество относится к предмету инвестиционной оценки параграфа 3.2.

Выбор базового сценария в параграфе 3.1 завершает сравнительную проверку Н2 на операционном уровне и открывает самостоятельный второй этап – инвестиционную оценку конкретного термококсового проекта. Имитационное моделирование показывает операционную устойчивость термококсового сценария, но не отвечает на вопросы об инвестиционной состоятельности конкретного термококсового проекта, структуре его денежных потоков, сроке окупаемости и способности генерировать положительный инвестиционный результат. Эти вопросы проверяются в параграфе 3.2 на параметрах конкретного российско-китайского проекта только для выбранного термококсового сценария; симметричная DCF-оценка водородного сценария в границы исследования не входит.

3.2 Инвестиционная состоятельность термококсового проекта

Инвестиционная состоятельность конкретного российско-китайского термококсового проекта оценивается по его параметрам через расчет УЕСЭ, модель отчета о прибылях и убытках (P&L-модель), модель денежных потоков (CF-модель), FCFF, NPV и IRR [3].

Поскольку двухэтапный методический подход апробируется на параметрах конкретного проекта, инвестиционный вывод не переносится автоматически на технологический сценарий, предлагаемую модель, сопоставимые проекты или отрасль в целом. Согласно исходным материалам проекта, его сопровождает Российско-Китайский Инвестиционный Фонд Регионального Развития, проект был представлен на Восточном экономическом форуме в 2025 г. Российской ресурсной базой является Даурское месторождение в Забайкальском крае; наименование металлургического завода в Китайской Народной Республике не приводится в целях соблюдения условий конфиденциальности. Дуроевское месторождение рассматривается только как сопоставимый контекстный пример: оно не является вторым объектом инвестиционного расчета, не включается в базовый DCF. Информационную базу параграфа составляют исходные материалы проекта – инвестиционная презентация, технологические материалы и расчетная финансовая модель, а также термодинамические расчеты, приведенные в приложениях; неопубликованные материалы не включаются в список литературы и указываются в подписях к таблицам. Исходные параметры сопоставлены по этим материалам.

Рассматриваемый кейс воспроизводит не классическую контрактную поставку угля или термококса, а вертикально интегрированную производственную цепочку: российская часть проекта охватывает добычу, подготовку и глубокую переработку бурого угля, китайская – использование термококса при производстве чугуна. Такая функционально-расчетная конфигурация согласует добычу, переработку, логистику и металлургическое потребление в рамках одного инвестиционного проекта, соответствует теоретическим положениям предыдущих разделов и не устанавливает юридическую форму участников. Кейс служит прикладной базой

инвестиционной оценки конкретного термококсового проекта и апробации двухэтапного подхода; результат не сопоставляется с отсутствующей DCF-моделью водородного проекта. Маршрутный расчет одного рейса иллюстрирует алгоритм и не переносится механически на годовой поток или иные маршруты.

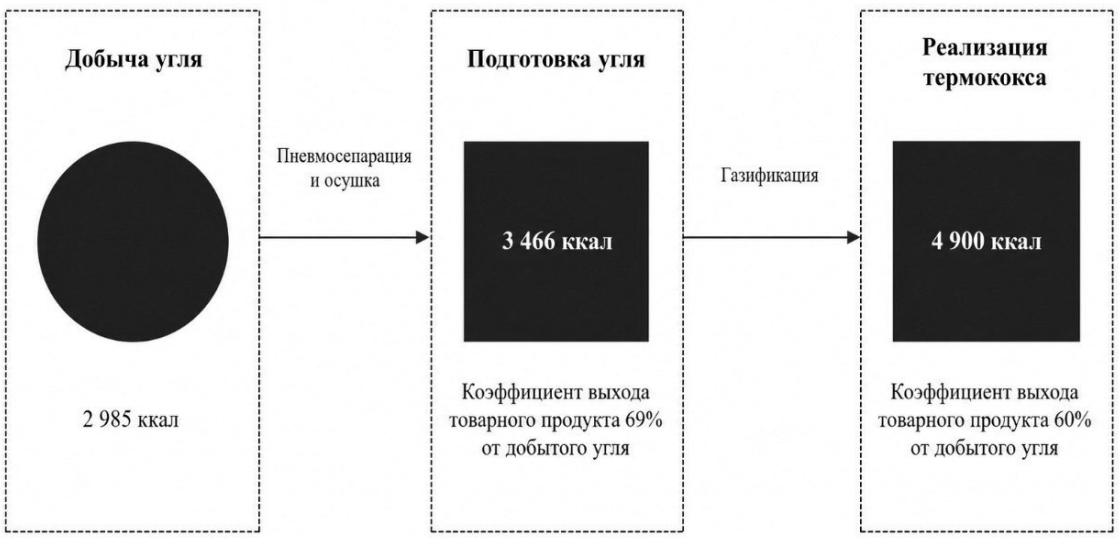
Дополнительное значение имеет пространственная конфигурация проекта. Даурское месторождение, используемое в базовой проектной модели, и Дуроевское месторождение, рассматриваемое как сопоставимый пример, расположены в Забайкальском крае вблизи китайского промышленного рынка. В результате формируется не только технологическое, но и логистическое преимущество: вместо поставки альтернативного углеродистого энергоносителя с существенно более удаленных месторождений металлургический завод получает возможность использовать термококс, произведенный в приграничном российском регионе. Экономический смысл этого преимущества сосредоточен в транспортной составляющей стоимости энергоносителя: именно она задает чувствительность проекта к железнодорожному тарифу, разобранную в таблицах Л.1 и Л.2. Также проект повышает загрузку региональной инфраструктуры и создает дополнительные предпосылки для промышленного развития приграничной территории [45].

Из целей устойчивого развития расчет выполнен только по ЦУР 13 – через углеродную оценку в раскрытой проектной границе. По остальным целям вклад заявлен качественно: в ЦУР 8 – через занятость в добыче, подготовке угля, газификации, логистике и обслуживающей инфраструктуре; в ЦУР 9 – через формирование промышленной инфраструктуры глубокой переработки бурых углей; в ЦУР 12 – через вовлечение в хозяйственный оборот низкокалорийного сырья, ранее имевшего ограниченную сферу применения. Количественные показатели занятости, налоговой базы и регионального эффекта формируют отдельный модуль масштабирования и не смешиваются с показателями инвестиционной состоятельности проекта [30].

Структура проекта соответствует технологической схеме, представленной в инвестиционных материалах проекта и вынесенной в

приложение И. В общем виде технологическая схема включает пять последовательно связанных производственных стадий, это: добыча бурого угля открытым способом, подготовка угля, пневмосепарация и осушка, газификация с получением термококса, использование термококса в металлургическом контуре для производства чугуна. В отличие от сценариев, ориентированных на внешнюю реализацию промежуточного продукта, в данной модели термококс рассматривается как продукт внутреннего потребления в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта. Это обстоятельство имеет принципиальное значение для инвестиционной оценки, поскольку финансовый результат формируется не только на уровне угледобывающей или газификационной производственной стадии, но и на уровне конечного металлургического продукта – чугуна.

Технологический принцип рассматриваемого проекта может быть представлен как последовательный переход от добычи низкокалорийного бурого угля к получению углеродистого продукта, пригодного для использования в металлургическом контуре китайского партнера, что показано на рисунке 13. На первом этапе добывается бурый уголь с низшей теплотой сгорания 2 985 ккал/кг. На втором этапе за счет пневмосепарации и осушки формируется подготовленный энергетический продукт с низшей теплотой сгорания 3 466 ккал/кг и коэффициентом выхода товарного продукта 69% добытого угля. Этот продукт не является металлургическим сырьем и не может рассматриваться как заменитель коксующихся марок угля или термококса; возможное направление его реализации связано преимущественно с использованием на китайском рынке в качестве энергетического угля для ТЭЦ. Следовательно, углубление переработки в проекте обеспечивается не на стадии пневмосепарации и осушки, а на производственной стадии газификации, в результате которой производится термококс с низшей теплотой сгорания 4 900 ккал/кг и коэффициентом выхода 60% массы добытого угля. Именно термококс выступает продуктом, пригодным для включения в металлургический контур производства чугуна.



Источник: составлено автором по исходным материалам проекта освоения Даурского месторождения (инветиционной презентации, технологическим материалам и расчетной финансовой модели).
Рисунок 13 – Технологическая схема переработки бурого угля в термококс

Представленная схема подчеркивает, что инвестиционный и технологический смыслы проекта связаны не с подготовленным энергетическим углем, а со стадией газификации, в результате которой формируется термококс с теплотворной способностью 4 900 ккал/кг для использования в производстве чугуна.

Рассматриваемое в базовом кейсе Даурское буроугольное месторождение в Забайкальском крае располагает ресурсной базой, достаточной для выхода на проектную мощность 5,0 млн т/год. Площадь лицензионного участка составляет 25,4 кв. км, балансовые запасы категорий A + B + C1 оцениваются в 58,365 млн т, забалансовые запасы – в 69,949 млн т. При выходе на целевой уровень 5,0 млн т/год балансовые запасы категорий A + B + C1 обеспечивают около двенадцати лет отработки с учетом периода выхода на проектную мощность, тогда как горизонт расчетной модели составляет 20 проектных лет. Поддержание добычи за пределами этого срока предполагает перевод части забалансовых запасов в балансовые по результатам доразведки; затраты на доразведку и вероятность перевода запасов в расчетной модели не оценивались. Важным фактором реализации проекта является наличие существующей железнодорожной инфраструктуры, поскольку логистическая составляющая для термококсового сценария является одним из ключевых элементов УЕСЭ. Производственная программа предусматривает поэтапное развитие в 2026-2030 гг. с достижением проектного режима добычи

5 млн т угля в год и последующим закреплением этого уровня в установившемся режиме к 2031 г. Разбивка инвестиций на этапы означает, что решение о продолжении принимается после выхода первого этапа на проектный режим, – это логика реальных опционов [33; 177; 180]. Стоимость этого опциона в модели не оценивалась: расчет ведется по детерминированному графику инвестиций, и это ограничение базового сценария.

Основные исходные параметры проекта представлены в таблице 41.

Таблица 41 – Ключевые исходные параметры российско-китайского проекта частичной газификации бурых углей

Показатель	Значение / расчетное допущение
Организационная конфигурация	Российско-китайский проект с вертикально интегрированной производственной цепочкой
Сопровождающая организация (по рабочим материалам проекта)	Российско-Китайский Инвестиционный Фонд Регионального Развития
Статус проекта	Представлен на Восточном экономическом форуме 2025 г.
Раскрытие наименований активов	Раскрывается наименование Даурского месторождения; наименование металлургического завода не раскрывается в целях соблюдения условий конфиденциальности
Ресурсная база	Даурское буроугольное месторождение, Забайкальский край
Балансовые запасы A+B+C1, в миллионах тонн	58,365
Забалансовые запасы, в миллионах тонн	69,949
Целевой объем добычи, в миллионах тонн угля в год	5,0
Целевой объем производства термококса, в миллионах тонн угля в год	2,925
Целевой объем производства чугуна, в миллионах тонн в год	3,9
Денежная единица финансовой модели	Рубль
Индексация рублевых расходов и цен, в процентах в год	2,5
Ставка налога на прибыль, в процентах	25
Принятая ставка дисконтирования (в исходной модели обозначена как WACC), в процентах	20
Платежи за выбросы CO_2	Не включаются в базовый расчет: углеродный налог в РФ и КНР отсутствует, а исходная финансовая модель проекта не содержит идентифицированной стоимости квот для проекта; действующая ETS КНР, расширенная в 2025 г. на сталелитейную отрасль, учитывается отдельно в сценарном анализе [226]
CAPEX без НДС	Расчетная база DCF-модели и инвестиционной оценки
CAPEX с НДС	Справочная бюджетная величина

Источник: составлено автором по данным инвестиционной презентации и расчетной финансовой модели проекта из таблиц К.1-К.11.

Сырьевая специфика проекта обусловлена использованием бурого угля марки 2Б. Исходная теплотворная способность угля в расчетной модели составляет 2 985 ккал/кг, что не позволяет рассматривать его как прямой заменитель коксующихся марок в традиционном доменном процессе. Вместе с тем именно низкая исходная пригодность бурого угля для классического коксования формирует экономический смысл его глубокой переработки: в результате подготовки и последующей газификации уголь переводится из категории низкокалорийного энергетического сырья сначала в подготовленный энергетический продукт, а затем – в специализированный углеродистый продукт, пригодный для использования в металлургическом контуре.

В технологической модели различаются два показателя выхода продукта.

Первый показатель – 69% – характеризует выход подготовленного продукта после предварительной подготовки, включая пневмосепарацию и осушку. Полученный продукт может быть реализован как энергетический уголь, однако не рассматривается как целевой металлургический продукт проекта.

Второй показатель – 60% – отражает выход термококса от исходной массы добытого угля. Именно он используется в финансовой модели при определении объема термококса, доступного для металлургического передела. Такое разграничение принципиально важно, поскольку позволяет корректно связать горно-техническую часть модели с металлургическим потреблением: добыча и подготовка описываются через массу ROM-угля (Run-of-Mine – рядовой уголь без обогащения), тогда как металлургический передел – через объем термококса с заданной теплотворной способностью и функциональным назначением.

Сводная характеристика качества угля и параметров переработки приведена в таблице 42. В приложении И приведена расширенная таблица И.4 с вариантами пневмосепарации, пневмосушки и температурными режимами получения термококса.

Таблица 42 – Технологические параметры переработки бурого угля в термококс

В процентах

Показатель	Исходный бурый уголь	Подготовленный энергетический уголь после пневмосепарации и осушки	Термококс, расчетный режим
Влажность	11,27	5,0	3,0
Зольность	18,36 по рабочей массе	13,3 по рабочей массе	17,0 по сухой массе
Низшая теплота сгорания, в килокалориях на килограмм	2 985	3 466	4 900
Выход от ROM	100	69	60
Энергия с 1 т ROM, в Гигакалориях	2,985	2,391	2,940
Потенциальное направление использования	Ограниченное энергетическое использование	Энергетический уголь для ТЭЦ	Металлургический контур производства чугуна

Источник: составлено автором по данным технологических материалов проекта; подробный расчет приведен в таблицах И.2-И.4, технологическая схема – на рисунке И.1.

Представленные параметры показывают, что подготовка угля посредством пневмосепарации и осушки позволяет повысить его теплотворную способность с 2 985 до 3 466 ккал/кг, однако этот результат не меняет функционального назначения продукта: он остается энергетическим углем и может быть использован преимущественно в электроэнергетике. Переход к металлургическому применению обеспечивается только в процессе газификации, когда формируется термококс с низшей теплотой сгорания 4 900 ккал/кг. Следовательно, именно процесс газификации является критическим элементом трансформации бурого угля из низкокалорийного энергетического сырья в продукт, способный выполнять функцию углеродистого энергоресурса для металлургического передела.

При расчетном выходе термококса 60% массы исходного угля сокращение транспортируемой массы сочетается с сохранением значительной части энергетической ценности. В пересчете на 1 т исходного ROM-угля энергетический выход термококса составляет 0,60 × 4 900 = 2940 тыс. ккал, тогда как энергетическая ценность 1 т исходного угля составляет 2 985 тыс. ккал.

Следовательно, коэффициент сохранения энергетической ценности при переводе исходного угля в термококс рассчитывается как

$\eta_E = \frac{E_{тк,ROM}}{E_{уг}} = 2\,940 / 2\,985 = 0{,}985$, где η_E – коэффициент сохранения энергетической ценности при переработке исходного бурого угля в термококс.

Полученное значение свидетельствует о том, что расчетная энергетическая ценность твердого продукта в пересчете на 1 т ROM-угля сопоставима с энергетической ценностью исходного угля и составляет около 98,5% от нее. Этот результат не следует трактовать как полное отсутствие технологических потерь или как универсальную характеристику любых режимов газификации – он отражает расчетный режим рассматриваемого проекта. Именно сочетание сокращения массы транспортировки, повышения теплотворной способности и соответствия продукта принятому расчетному назначению является необходимым условием последующей оценки экономической жизнеспособности термококсового сценария.

Следующим этапом является применение методики сравнительной оценки по УЕСЭ к параметрам рассматриваемого проекта. В настоящем исследовании УЕСЭ трактуется как условная единица сопоставимой энергетической ценности, позволяющая привести стоимость различных углеродистых энергоносителей к единому измерителю с учетом их энергетической ценности, логистических условий и регуляторных платежей, связанных с выбросами CO_2.

Общая структура расчетного значения УЕСЭ сохраняет ранее предложенный вид по формуле (14)

$$УЕСЭ_i = C_{энергетический} + C_{углеродный} + C_{логистический} + C_{проч.операционный}, \quad (14)$$

где $УЕСЭ_i$ – расчетное значение сопоставимой энергетической ценности i-го энергоносителя;

$C_{энергетический}$ – нормированная энергетическая стоимостная компонента УЕСЭ;

$C_{углеродный}$ – углеродная компонента стоимости;

$C_{логистический}$ – логистическая компонента стоимости;

$C_{проч.операционный}$ – прочая операционная компонента стоимости.

Для рассматриваемого прикладного кейса указанная формула конкретизируется с учетом того, что сопоставление проводится между термококсом, производимым в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта, и альтернативным углеродистым энергоносителем с

сопоставимой энергетической ценностью. В расчетной модели такой альтернативный энергоноситель представлен коксующейся маркой угля с аналогичной теплотой сгорания. При этом расчетная FCA-цена альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью (PaltFCA) используется как расчетное допущение исходной проектной модели и не интерпретируется как рыночная котировка, договорная цена или независимо подтвержденный расчетный результат. Расчет выполняется по формуле (15)

$$\text{КУЕСЭ}_{\text{проект}} = \frac{\left(\frac{C_{FCA}^{\text{тк}} + C_{\text{лог}}^{\text{проект}} + C_{CO_2}^{\text{проект}}}{E_{\text{тк}}}\right)}{\left(\frac{P_{FCA}^{\text{ан}} + k_{\text{лог}} \times C_{\text{лог}}^{\text{проект}} + C_{CO_2}^{\text{ан}}}{E_{\text{тк}}}\right)} \times 100, \quad (15)$$

где $C_{\text{тк}}^{FCA}$ – операционная FCA-себестоимость термококса без амортизации, руб./т;

$C_{\text{лог}}^{\text{проект}}$ – транспортные расходы от рассматриваемого буроугольного месторождения до металлургического завода, руб./т;

$C_{CO_2}^{\text{проект}}$ – платежи за выбросы CO_2 на консолидированном уровне проекта, руб./т;

P_{alt}^{FCA} – расчетная FCA-цена альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью, руб./т;

$k_{\text{лог}}$ – коэффициент превышения транспортных расходов по альтернативной поставке относительно поставки термококса из цепочки проекта;

$C_{CO_2}^{\text{ан}}$ – платежи за выбросы CO_2 для альтернативного энергоносителя, руб./т;

$E_{\text{тк}}$ – энергетическая ценность 1 т термококса или сопоставимого углеродистого энергоносителя, ГДж/т.

Принципиальное отличие данной формулы от базовой расчетной формы состоит в разделении логистической компоненты. В прикладном расчете транспортная компонента для термококса иллюстрируется маршрутом от Даурского месторождения до анонимизированного металлургического завода в КНР; расчет одного рейса служит примером применения формулы и не ограничивает методику одному конкретизированному маршруту. Его результат нельзя механически переносить на годовой поток или иные направления. Для

Дуроевского месторождения и других площадок транспортная компонента должна пересчитываться по фактическому плечу, пограничной инфраструктуре и действующим тарифам. Для альтернативного углеродистого энергоносителя логистическая компонента задается через коэффициент превышения транспортных затрат, поскольку фактическое логистическое плечо поставки такого продукта может существенно отличаться в зависимости от конкретного месторождения, маршрута, пограничной инфраструктуры и железнодорожных тарифов.

Соответственно, транспортные расходы по альтернативной поставке определяются по формуле (16)

$$C_{\text{лог}}^{\text{ан}} = k_{\text{лог}} \times \text{C}_{\text{лог}}^{\text{проект}}, \quad (16)$$

где $C_{\text{лог}}^{\text{ан}}$ – транспортные расходы по доставке альтернативного энергоносителя до металлургического завода, руб./т.

Коэффициент $k_{\text{лог}}$ = 3 принят как расчетный параметр базового сценария, отражающий превышение логистических затрат альтернативной поставки; его значение проверяется через анализ чувствительности. Такой подход позволяет избежать завышения эффекта логистического преимущества проекта. При принятом значении $k_{\text{лог}}$ = 3 расчет показывает снижение стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ термококса в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта.

В базовом проектном расчете цена углерода и углеродная компонента УЕСЭ принимаются равными 0: в РФ и КНР отсутствует углеродный налог, а исходная финансовая модель проекта не содержит идентифицированной стоимости приобретения квот для данного проекта. Это допущение не означает отсутствия выбросов или углеродного регулирования: национальная ETS КНР в 2025 г. была расширена на сталелитейную отрасль [226]. Сценарный показатель CO_2 используется в отдельном анализе возможного стоимостного воздействия. При нулевой базовой цене углерода расчетный результат определяется технологическим повышением качества продукта, логистическим преимуществом приграничного размещения и эффектом вертикальной интеграции, а не предполагаемой экономией на углеродных платежах.

В качестве базового периода для расчета принят шестой проектный год, соответствующий установившемуся режиму после выхода на проектную мощность. Энергетическая ценность 1 т термококса $E_{\text{тк}}$ при теплотворной способности 4 900 ккал/кг определяется как $4\,900 \times 0{,}0041868 = 20{,}52$ ГДж/т, где 0,0041868 – коэффициент перевода ккал/кг в ГДж/т.

Расчет УЕСЭ приведен в таблице 43.

Таблица 43 – Практический расчет УЕСЭ с учетом дифференцированной логистики

В рублях за тонну

Показатель	Значение
Операционная FCA-себестоимость термококса без амортизации (СткFCA)	3 479,6
Транспортировка от месторождения проекта до металлургического завода	485,2
Платежи за выбросы CO_2 на консолидированном уровне проекта	0,0
Полная операционная стоимость термококса на консолидированном уровне проекта	3 964,8
Энергетическая ценность термококса, в ГигаДжоулях на тонну	20,52
Стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности термококса в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта, в рублях за ГигаДжоуль	193,3
Расчетная FCA-цена альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью (PaltFCA)	5 107,7
Коэффициент превышения логистических затрат альтернативной поставки, $k_{лог}$	3,0
Транспортировка альтернативного энергоносителя до металлургического завода	1 455,6
Платежи за выбросы CO_2 для альтернативного энергоносителя	0,0
Полная стоимость альтернативного энергоносителя	6 563,3
Энергетическая ценность альтернативного энергоносителя, в ГигаДжоулях за тонну	20,52
Стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности альтернативного энергоносителя, в рублях за ГигаДжоуль	319,9
КУЕСЭ$_{проект}$, в процентах	60,4

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Полученное значение КУЕСЭ$_{проект}$ на уровне 60,4% означает, что при принятом расчетном допущении о трехкратном превышении логистических затрат по альтернативной поставке вертикально интегрированная производственная цепочка проекта обеспечивает стоимость 1 ГДж сопоставимой ЭЦ термококса примерно на 39,6% ниже, чем закупка альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью. Такой результат обусловлен двумя группами факторов. Первая группа связана с технологической переработкой бурого угля, в результате которой исходное низкокалорийное сырье переводится в термококс с более высокой теплотворной способностью и металлургическим назначением. Вторая группа факторов связана с пространственной конфигурацией проекта: расположение

буроугольной ресурсной базы в Забайкальском крае позволяет использовать приграничное положение региона как источник снижения логистической составляющей.

Коэффициент $k_{лог}$ = 3 используется как расчетное допущение базового сценария и не интерпретируется как подтвержденная минимальная, максимальная или консервативная граница логистического разрыва. Направление влияния $k_{лог}$ на УЕСЭ проверяется далее однофакторным анализом чувствительности при фиксации остальных параметров.

Для иллюстрации чувствительности показателя к логистическому коэффициенту используется таблица 44. Дополнительные расчеты чувствительности вынесены в таблицы Л.1 и Л.2.

Таблица 44 – Чувствительность КУЕСЭ проекта к логистическому коэффициенту

В процентах

Значение $k_{лог}$	Полная стоимость альтернативного энергоносителя, в рублях за тонну	$КУЕСЭ_{проект}$	Снижение относительно альтернативы
1	5 592,9	70,9	29,1
3	6 563,3	60,4	39,6
5	7 533,7	52,6	47,4
10	9 959,7	39,8	60,2

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Данные таблицы показывают, что рост логистического коэффициента усиливает операционное преимущество термококсового сценария: КУЕСЭ проекта снижается с 70,9% при $k_{лог}$ = 1 до 60,4% при базовом $k_{лог}$ = 3 и далее до 52,6-39,8% при более высоких значениях коэффициента. Следовательно, приграничное расположение буроугольной ресурсной базы является структурным фактором операционной сопоставимости и предпосылкой инвестиционной состоятельности проекта.

В базовом расчете цена углерода принята равной нулю, хотя, как уже отмечалось, в КНР действует национальная система торговли квотами, расширенная в 2025 г. на сталелитейную отрасль [226]. Для проверки направления возможного регуляторного эффекта отдельно выполнены стадийный расчет в ограниченной границе «технологический передел – логистика – применение продукта» и сценарный пересчет при условной цене

углерода. Эти значения не являются углеродным налогом, прогнозом его введения либо полной оценкой жизненного цикла.

Границу углеродного расчета необходимо зафиксировать явно. Расчет охватывает три стадии: технологический передел бурого угля в термококс, логистику продукта до потребителя и его применение в металлургическом переделе – и сопоставляет их с аналогичными стадиями для альтернативного углеродистого энергоносителя. В границу не включены добыча и подготовка бурого угля (включая вскрышные работы, дизельное топливо и энергопотребление разреза), выбросы при строительстве газификационного комплекса и инфраструктуры, косвенные выбросы от потребляемой электроэнергии и тепла с учетом регионального энергобаланса, эмиссия метана при добыче и хранении угля, обращение с отходами и сопродуктами газификации, выбросы последующих металлургических переделов за пределами стадии применения продукта. Следовательно, приведенные ниже значения удельной эмиссии и разницы выбросов характеризуют сравнительную углеродную уязвимость сценариев именно в этой границе и не могут трактоваться как абсолютное сокращение выбросов производственной цепочки или как подтверждение низкоуглеродного статуса продукта. Знак и порядок разницы могут измениться при включении исключенных стадий, поскольку буроугольный сценарий предполагает больший удельный расход сырья на единицу продукта; полный баланс требует отдельной LCA-оценки и вынесен в направления дальнейших исследований. Результаты представлены в таблице 45.

Таблица 45 – Сценарная сравнительная оценка выбросов в ограниченной проектной границе и чувствительность КУЕСЭ проекта к условной цене углерода

Блок расчета	Показатель / условная цена углерода	Единица измерения	Сценарий термо-кокса	Традиционный коксовый сценарий	Сравнитель-ный результат
1	2	3	4	5	6
Поэтапная оценка выбросов	Применение продукта в металлургическом переделе	т CO_2/т продукта	2,1546	2,1956	−0,0410
	Передел: частичная газификация / коксование		0,0886	0,2200	−0,1314
	Логистика		0,0414	0,1634	−0,1220
	Итого на 1 т продукта		2,2846	2,5791	−0,2945

Продолжение таблицы 45

1	2	3	4	5	6
Функциональная единица	Итого на 1 т чугуна	т CO_2/т чугуна	1,7134	1,9343	−0,2209, или −11,42%
Расчетное годовое снижение выбросов в ограниченной проектной границе	Сокращение при расчетной мощности 3,9 млн т чугуна	тыс. т CO_2/год	861,42	-	Сценарная оценка в принятой границе
Условная цена углерода	0 руб./т CO_2	полная стоимость, руб./т продукта	3 964,80	6 563,30	КУЕСЭ 60,41%
	500 руб./т CO_2		5 107,08	7 852,83	КУЕСЭ 65,03%
	1 000 руб./т CO_2		6 249,36	9 142,36	КУЕСЭ 68,36%
	2 000 руб./т CO_2		8 533,92	11 721,42	КУЕСЭ 72,81%
	3 000 руб./т CO_2		10 818,48	14 300,48	КУЕСЭ 75,65%
	5 000 руб./т CO_2		15 387,59	19 458,61	КУЕСЭ 79,08%
	8 000 руб./т CO_2		22 241,27	27 195,79	КУЕСЭ 81,78%

Источник: рассчитано автором по данным организации и параметрам расчетной модели; исходные технологические параметры и расчет энергетического выхода термококса приведены в таблицах И.2 и И.3.

Расчет выполнен консервативно: вся разность между энергией входящего бурого угля и энергией произведенного термококса отнесена на технологический передел, а энергетический кредит сопутствующего газа, направляемого на ТЭЦ, не начислялся. Поэтому результат не завышается за счет распределения части технологической нагрузки на сопродукт. Коэффициенты эмиссии продукта, выход кокса и процессная компонента коксования должны интерпретироваться как расчетные параметры сценария: их значения по этапам приведены в таблице 45, а выход и энергетические характеристики термококса – в таблицах И.2 и И.3.

С ростом условной цены углерода абсолютный стоимостный разрыв в пользу термококса увеличивается, поскольку рассчитанная в принятой проектной границе удельная эмиссия его сценария ниже. Одновременно коэффициент КУЕСЭ возрастает с 60,41 до 81,78%: углеродная надбавка увеличивает обе сравниваемые стоимости, а отношение их эмиссий ближе к единице, чем исходное отношение затрат. Условие КУЕСЭ ≤ 100% сохраняется во всем рассмотренном диапазоне. Следовательно, возможное углеродное регулирование

изменяет величину сравнительного преимущества, но не создает экономическую логику проекта заново.

В рассматриваемом кейсе УЕСЭ фиксирует не только технологическую эффективность переработки бурого угля в термококс, но и пространственно-экономическое преимущество приграничного размещения ресурсной базы. Это обстоятельство принципиально важно для обоснования инвестиционной состоятельности проекта, поскольку создает дополнительный источник конкурентоспособности, не зависящий от введения проектно-релевантной цены CO_2. Количественное направление влияния возможного углеродного регулирования раскрыто ранее в таблице 45.

С учетом вышеизложенного значение $КУЕСЭ_{проект}$ = 60,4% подтверждает более низкую стоимость 1 ГДж сопоставимой ЭЦ термококса в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта по сравнению с закупкой внешнего углеродистого энергоносителя. В данном случае трансформация бурого угля в термококс позволяет одновременно решить три задачи: повысить энергетическую плотность продукта, снизить удельную логистическую нагрузку и сформировать цепочку проекта, ориентированную на повышение добавленной стоимости.

Значение КУЕСЭ проекта не подменяет собой полноценную инвестиционную оценку. Оно показывает операционную сопоставимость термококсового сценария как углеродистого энергоресурса для металлургического передела, однако инвестиционная состоятельность проекта должна быть подтверждена через P&L-модель и CF-модель, поскольку проект характеризуется значительными капитальными вложениями, длинным инвестиционным циклом, потребностью в инфраструктуре и межстрановой производственной координации.

Финансовая модель проекта строилась в рублях, несмотря на международный характер проекта. Такое допущение принято в целях сопоставимости денежных потоков, унификации расчетной базы и отражения того обстоятельства, что существенная часть капитальных и операционных затрат формируется на российской стадии добычи и в инфраструктуре проекта. Все показатели CAPEX и OPEX имеют аналитический характер и легли в основу бюджетирования и бизнес-плана проекта. Макроэкономические предпосылки

модели включают равномерную индексацию рублевых расходов и цен на 2,5% в год, ставку налога на прибыль 25% и ставку дисконтирования 20%.

Логика построения P&L-модели включает несколько последовательных этапов.

На первом этапе определяется производственная программа. В расчетной модели добыча угля возрастает от 0,833 млн т во второй проектный год до 5,0 млн т в период выхода на проектную мощность. При выходе термококса 60% от ROM и технологических потерях 2,5% объем производства термококса возрастает до 2,925 млн т/год. При нормативном расходе термококса 0,75 т на 1 т чугуна это обеспечивает производство чугуна на уровне 3,9 млн т/год.

На втором этапе формируется выручка. Поскольку термококс полностью потребляется китайским металлургическим заводом внутри цепочки проекта, основным источником выручки на консолидированном уровне проекта выступает реализация чугуна. Базовая цена чугуна принята на уровне 19 000 руб./т с последующей индексацией на 2,5% в год.

На третьем этапе формируются производственные расходы. Они включают затраты угледобывающего предприятия, расходы на газификацию бурого угля, транспортировку термококса до металлургического завода, а также прямые и косвенные расходы металлургического передела. В состав затрат металлургического контура включены железорудный концентрат, окатыши, флюсы, производственный персонал, общепроизводственные и административные расходы. Отдельно учитываются амортизация, налог на имущество и налог на прибыль.

На четвертом этапе рассчитываются EBITDA, чистая прибыль и денежный поток. EBITDA определяется как разница между выручкой от реализации чугуна и совокупными производственными расходами проекта. Чистая прибыль рассчитывается после вычета амортизации и налога на прибыль. Операционный денежный поток формируется через корректировку чистой прибыли на амортизацию и изменение оборотного капитала. Далее из операционного денежного потока вычитается CAPEX без НДС, что позволяет рассчитать FCFF и провести дисконтирование денежных потоков [32; 44] по принятой в исходной финансовой модели ставке 20%, обозначенной организацией как WACC;

независимый расчет средневзвешенной стоимости капитала в работе не выполнялся.

Прогноз P&L за первые семь проектных лет представлен в таблице 46. Полная P&L/CF-модель на всем горизонте расчета приведена в таблицах К.1-К.11.

Таблица 46 – Прогноз P&L проекта за первые семь проектных лет

В миллионах рублей

Показатель	1-й год, 2026 г.	2-й год, 2027 г.	3-й год, 2028 г.	4-й год, 2029 г.	5-й год, 2030 г.	6-й год, 2031 г.	7-й год, 2032 г.
Выручка	0,0	12 369,0	31 646,9	58 388,5	79 797,6	81 792,5	83 837,3
Производственные затраты	0,0	10 415,3	24 024,5	41 787,0	56 306,3	57 695,8	59 126,4
EBITDA	0,0	1 953,7	7 622,4	16 601,5	23 491,2	24 096,8	24 711,0
Маржинальность EBITDA, в процентах	0,0	15,8	24,1	28,4	29,4	29,5	29,5
Амортизация	0,0	606,0	3 486,0	4 480,5	4 520,5	4 499,1	4 425,4
Налог на прибыль	0,0	336,9	1 034,1	3 030,2	4 742,7	4 899,4	5 071,4
Чистая прибыль	0,0	1 010,8	3 102,3	9 090,7	14 228,1	14 698,3	15 214,2

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Данные таблицы 46 показывают, что в первые годы проекта финансовый результат определяется периодом выхода добычи и металлургического производства на проектную мощность. Во второй проектный год EBITDA составляет 1 953,7 млн руб. при маржинальности 15,8%, что отражает неполную загрузку производственной цепочки проекта и высокую долю постоянных расходов. По мере роста добычи, производства термококса и выпуска чугуна маржинальность повышается: к пятому проектному году EBITDA достигает 23 491,2 млн руб., а маржинальность – 29,4%. В шестой и седьмой проектные годы, соответствующие установившемуся режиму работы проекта после выхода на проектную мощность, EBITDA возрастает до 24 096,8 и 24 711,0 млн руб. соответственно, что обусловлено индексацией цены реализации чугуна при неизменной расчетной производственной мощности.

При анализе P&L принципиально важно, что прибыльность проекта формируется именно на его консолидированном уровне. Если рассматривать отдельно угольный/газификационный контур, его финансовый результат в первые годы является более чувствительным к загрузке мощностей, поскольку значительная часть инфраструктурных и управленческих расходов возникает до достижения проектного объема добычи. Однако интеграция с

металлургическим переделом позволяет распределить эффект по всей цепочке создания стоимости и зафиксировать его в конечной марже производства чугуна. Полученный результат характеризует операционную прибыльность консолидированной проектной конфигурации при долгосрочной координации добывающего, газификационного и металлургического контуров; инвестиционная состоятельность оценивается далее по денежным потокам и показателям NPV и IRR.

Прогноз CF за первые семь проектных лет и за десятый проектный год представлен в таблице 47. Для инвестиционной оценки в качестве расчетной базы используется CAPEX без НДС, тогда как CAPEX с НДС рассматривается как справочная бюджетная величина. Полный отчет о движении денежных средств за весь горизонт моделирования приведен в таблице К.6.

Таблица 47 – Прогноз CF и FCFF проекта

В миллионах рублей

Показатель	1-й год, 2026 г.	2-й год, 2027 г.	3-й год, 2028 г.	4-й год, 2029 г.	5-й год, 2030 г.	6-й год, 2031 г.	7-й год, 2032 г.	10-й год
Операционный денежный поток	0,0	748,9	5 454,2	12 091,0	17 538,6	19 081,6	19 520,4	20 854,0
CAPEX без НДС	19 573,8	34 360,0	9 221,4	2 561,0	72,1	18,5	0,0	2 291,1
FCFF	–19 573,8	–33 611,1	–3 767,2	9 530,0	17 466,5	19 063,1	19 520,4	18 562,9
Дисконтированный FCFF	–16 311,5	–23 341,1	–2 180,1	4 595,9	7 019,4	6 384,2	5 447,8	2 998,0
Накопленный FCFF	–19 573,8	–53 184,9	–56 952,1	–47 422,0	–29 955,5	–10 892,4	8 628,0	63 130,2

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Представленные данные отражают типичную для капиталоемких промышленных проектов структуру денежных потоков. В первые три проектных года формируется отрицательный FCFF, обусловленный высокой инвестиционной нагрузкой: в первый год CAPEX без НДС составляет 19 573,8 млн руб., во второй – 34 360,0 млн руб., в третий – 9 221,4 млн руб. При этом операционный денежный поток становится положительным уже со второго года, однако до достижения существенной загрузки производственных мощностей он не способен полностью компенсировать инвестиционные выплаты.

Перелом в динамике свободного денежного потока происходит в четвертый проектный год, когда FCFF становится положительным и составляет 9 530,0 млн руб. В пятый-седьмой проектные годы, после выхода производственной цепочки на целевой режим, положительный FCFF находится в диапазоне 17,5-19,5 млрд руб. в год. В исходной финансовой модели возврат потребности в финансировании, определяемый как выход накопленного проектного денежного потока с учетом НДС в положительную область, фиксируется в восьмой проектный год. Этот календарный индикатор не является стандартным PP или DPP. Стандартный простой срок окупаемости по недисконтированному FCFF с линейной интерполяцией составляет 6,56 года, а дисконтированный срок окупаемости при ставке 20% – 13,39 года [23].

С позиции дисконтированного анализа проект характеризуется более длинным периодом восстановления инвестиционной стоимости, что объясняется принятой ставкой дисконтирования 20% и значительной концентрацией капитальных вложений в инвестиционной фазе проекта (первый-шестой проектные годы). Однако сумма дисконтированных денежных потоков на полном горизонте моделирования остается положительной, что подтверждает инвестиционную состоятельность проекта. Ключевые показатели инвестиционной оценки представлены в таблице 48.

Таблица 48 – Итоговые показатели инвестиционной состоятельности проекта

В миллионах рублей

Показатель	Значение
CAPEX без НДС	65 806,6
CAPEX с НДС	80 284,1
Принятая ставка дисконтирования, в процентах	20,0
IRR, в процентах	22,59
NPV / сумма дисконтированных FCFF	6 748,2
Простой срок окупаемости (PP), в годах	6,56
EBITDA в год выхода на целевую производственную мощность	23 491,2
EBITDA в установившемся режиме 2031 г.	24 096,8
Маржинальность EBITDA в установившемся режиме, в процентах	29,5
Целевой объем добычи угля, в млн тонн в год	5,0
Целевой объем производства термококса, в млн тонн в год	2,925
Целевой объем производства чугуна, в млн тонн в год	3,9
Дисконтированный срок окупаемости (DPP) при 20%, в годах	13,39

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

В исходной финансово-экономической модели значение 20% обозначено как WACC и в диссертации применяется как проектная барьерная ставка доходности, принятая организацией. Для проверки устойчивости инвестиционного результата выполнен пересчет NPV в диапазоне ставок 15-25%. Расчетный статус и условия применения ставки приведены в таблице 49.

Таблица 49 – Параметры и расчетный статус ставки дисконтирования

В процентах

Параметр	Значение	Контрольный источник	Использование в исследовании	Статус и условия применения
Горизонт модели	20 проектных лет	Ряд FCFF исходной модели	Дисконтируются двадцать годовых потоков	Терминальная стоимость не применяется
Принятая ставка дисконтирования	20,00	Финансово-экономическая модель организации	Базовая барьерная ставка для расчета NPV	Используется как корпоративная барьерная ставка, согласованная с исходной финансово-экономической моделью
NPV при ставке 20%, в миллионах рублей	6 748,19	Контрольный пересчет ряда FCFF	Базовый инвестиционный результат	Первый FCFF считается потоком конца первого года
IRR	22,5876	Контрольный пересчет ряда FCFF	Предельная ставка, при которой NPV равна нулю	Запас к принятой ставке составляет 2,5876 п.п.
Диапазон стресс-проверки	15-25	Сценарный анализ	Проверка устойчивости вывода к стоимости капитала	Формирует диапазон проверки чувствительности к стоимости капитала

Источник: рассчитано автором по финансово-экономической модели, предоставленной организацией.

Такой расчетный статус обеспечивает корректное применение значения 20% в соответствии с исходной финансово-экономической моделью и отделяет проектную барьерную ставку от рыночной оценки структуры капитала. Проект имеет положительный NPV при принятой ставке 20%, а его устойчивость определяется запасом до IRR и результатами стресс-проверки.

Запас между IRR и принятой барьерной ставкой составляет 2,5876 п.п. и дополняется развернутой проверкой чувствительности инвестиционного результата [56; 156]. В таблице 50 приведены результаты пересчета NPV в диапазоне ставок 15-25% и однофакторные пороги, при которых NPV становится равной 0. В каждом пороговом расчете изменяется только названный фактор при неизменности остальных параметров.

Таблица 50 – Чувствительность NPV и пороговые условия инвестиционной состоятельности термококсового проекта

Блок	Фактор / сценарий	Базовое значение	Стрессовое или пороговое значение	Результат	Интерпретация
NPV по ставке	Ставка дисконтирования 15%	20,00%	15,00%	26 992,27 млн руб.	NPV > 0
	Ставка дисконтирования 18%	20,00%	18,00%	13 479,13 млн руб.	NPV > 0
	Базовый случай	20,00%	20,00%	6 748,19 млн руб.	Базовый результат
	Ставка дисконтирования 22%	20,00%	22,00%	1 368,32 млн руб.	Положительный, но малый запас
	Округленная ставка 22,59%	20,00%	22,59%	−5,36 млн руб.	Округленное значение немного выше точной IRR
	Ставка дисконтирования 25%	20,00%	25,00%	−4 787,91 млн руб.	NPV < 0
Порог NPV = 0	Ставка дисконтирования	20,00%	22,5876%	Запас +2,5876 п.п.	Предельная ставка равна IRR
	Цена чугуна	19 000 руб./т	18 335,60 руб./т	Запас −3,4968%	Пропорционально изменяется вся ценовая траектория
	Загрузка / объем	100%	89,0481%	Запас −10,9519%	Одновременно масштабируются выручка и объемно-зависимые расходы
	Совокупный OPEX	100%	104,7887%	Запас +4,7887%	Масштабируется весь ряд операционных расходов
	ЖД-тариф до металлургиче-ского завода	439,60 руб./т	1 308,43 руб./т	Запас +197,6402%	Изменяется только тарифная строка; это не вся логистика
	CAPEX инвестиционной фазы	65 806,64 млн руб.	75 299,65 млн руб.	Запас +14,4256%	Масштабируются только инвестиционные годы 1-6

Источник: рассчитано автором по двадцатилетнему ряду FCFF исходной финансово-экономической модели.

Наиболее узкий запас проект имеет к снижению цены чугуна, росту совокупных операционных затрат и повышению ставки дисконтирования. Запас по загрузке и CAPEX выше, а значительный относительный порог отдельного железнодорожного тарифа не следует переносить на всю логистическую компоненту. Вывод об устойчивости проекта действует при соблюдении раскрытых пороговых условий.

Результаты инвестиционной оценки образуют самостоятельный второй этап исследования и относятся только к конкретному термококсовому проекту. Во-первых, проект имеет положительный NPV в размере 6 748,2 млн руб., что означает превышение приведенной стоимости будущих денежных потоков над инвестиционной нагрузкой даже при ставке дисконтирования 20%. Во-вторых, IRR составляет 22,59%, то есть превышает принятую ставку дисконтирования 20% на 2,59 п.п. Эта ставка обозначена в исходной модели как WACC. Такой запас доходности нельзя считать избыточным, что естественно для капиталоемкого инфраструктурно-промышленного проекта, однако его достаточно для признания проекта инвестиционно состоятельным при условии сохранения базовых предпосылок по цене чугуна, объему производства, CAPEX и логистическим тарифам. В-третьих, EBITDA на проектной мощности превышает 23 млрд руб./год, что подтверждает положительный расчетный операционный финансовый результат проекта после завершения основной инвестиционной фазы. Следовательно, инвестиционный расчет подтверждает состоятельность выбранного термококсового проекта при заданных предпосылках. Приведенные показатели относятся к базовому случаю с нулевой ценой углерода. Сценарный пересчет при условной цене углерода до 8 000 руб./т CO_2, отраженный ранее в таблице 45, показывает рост $КУЕСЭ_{проект}$ с 60,4 до 81,8% при сохранении операционного паритета, то есть углеродное регулирование сужает операционный запас проекта, не устраняя его. Соответствующее снижение NPV и IRR при введении проектно релевантной цены углерода в модели не рассчитано и отнесено к ограничениям исследования. Вывод об инвестиционной состоятельности следует читать с учетом возможного ужесточения углеродного регулирования в Российской Федерации и расширения национальной системы торговли квотами в КНР на сталелитейную отрасль [226].

Отдельного обсуждения требует банкуемость проекта, то есть его способность привлечь долговое финансирование на приемлемых условиях. Дисконтированный срок окупаемости 13,39 года при ставке 20% велик для промышленного проекта: он превышает типичный срок корпоративного кредитования и приближается к горизонту проектного финансирования инфраструктурных объектов. Для кредитора это означает, что значительная часть обслуживания долга приходится на период, когда проект еще не вернул

приведенные вложения, а риски сбыта и цены продукта остаются нераскрытыми. Следствием являются повышенные требования к доле собственного капитала, коэффициенту покрытия долга денежным потоком, обеспечению и договорному закреплению сбыта еще до начала строительства.

Барьерную ставку способны повысить несколько факторов, характерных именно для рассматриваемого проекта. Во-первых, технологическая новизна промышленного производства термококса из бурого угля при отсутствии референтных объектов сопоставимого масштаба в России воспринимается кредиторами как технологический риск и требует премии к ставке. Во-вторых, зависимость от единственного трансграничного потребителя и цены чугуна, к которой проект наиболее чувствителен, создает концентрацию рыночного риска. В-третьих, валютный и страновой риск российско-китайской конфигурации и возможное ужесточение углеродного регулирования добавляют регуляторную составляющую премии. В-четвертых, высокая специфичность активов газификационного комплекса ограничивает их ликвидационную стоимость как обеспечения. Совокупное действие этих факторов способно поднять требуемую доходность выше принятых 20%, что при запасе IRR в 2,59 п.п. делает стоимость капитала критическим параметром реализации.

К проекту такого типа применимы несколько механизмов снижения стоимости капитала. Долгосрочный договор с металлургическим потребителем на условиях «прими или оплати» с ценовым коридором, рассматриваемый в параграфе 3.3, превращает рыночный риск сбыта в контрактный и служит основным инструментом повышения банкуемости. Участие металлургического контура в капитале или авансирование поставок снижает долговую нагрузку и выравнивает интересы сторон. Инструменты государственной поддержки промышленных проектов: специальные инвестиционные контракты, режимы территорий опережающего развития и субсидирование ставки по кредитам на технологическую модернизацию – способны снизить эффективную ставку и удлинить срок долга, хотя эффективность подобных мер государственного регулирования требует отдельной оценки [100]. Фазирование строительства с вводом первой очереди снижает единовременную потребность в финансировании и создает операционную историю до привлечения основного долга. Наконец, углеродное преимущество термококса перед коксом при

появлении проектно релевантной цены углерода может открыть доступ к инструментам целевого финансирования переходных проектов.

Количественная оценка порога банкуемости: предельной ставки и структуры финансирования, при которых коэффициенты покрытия долга сохраняются на приемлемом уровне на всем горизонте, – требует многопараметрического анализа с моделированием графика долга и вынесена в направления дальнейших исследований. В настоящей работе влияние стоимости капитала ограничено однопараметрическим анализом чувствительности к ставке дисконтирования.

Вероятность операционного паритета, установленная в параграфе 3.1 для сценария частичной газификации, не подменяет инвестиционную оценку проекта. Она показывает операционную устойчивость выбранного сценария по критерию операционного паритета $К_{УЕСЭ}$, тогда как расчеты настоящего параграфа подтверждают инвестиционную состоятельность конкретной российско-китайской конфигурации через NPV, IRR, FCFF, EBITDA и срок окупаемости. Параграф 3.2 образует самостоятельный второй этап исследования и относится только к инвестиционной состоятельности выбранного термококсового проекта.

Экономическая состоятельность рассматриваемого термококсового проекта определяется не отсутствием углеродных платежей как таковых, а сочетанием ресурсной базы, технологической глубины переработки и вертикально интегрированной производственной цепочки. По сравнению с прямой продажей энергетического угля глубокая переработка создает дополнительную добавленную стоимость.

Вместе с тем отсутствие платежей за выбросы CO_2 не снижает стратегической значимости проекта с точки зрения устойчивого развития. При этом в КНР действует национальная ETS, с 2025 г. охватывающая сталелитейную отрасль [226]. При появлении проектно-релевантной цены CO_2 изменение сравнительной эффективности определяется произведением цены CO_2 на разность удельных выбросов сопоставляемых сценариев. Следовательно, наличие регулирования само по себе не предрешает результат – необходим расчет удельных выбросов в единых границах.

Применение двухэтапного подхода к рассматриваемому кейсу дает оценку на трех уровнях: операционном – через КУЕСЭ$_{проект}$ = 60,4% при нулевой цене углерода (до 81,8% при условной цене 8 000 руб./т CO_2 из таблицы 45); финансовом – через положительный при нулевой цене углерода NPV, IRR выше принятой ставки дисконтирования 20%, EBITDA более 23 млрд руб., PP – 6,56 года, DPP – 13,39 года при ставке 20% и возврат потребности в финансировании в восьмой проектный год; организационно-экономическом – через эффект координации российского сырьевого и китайского металлургического контуров.

Эти результаты характеризуют конкретный термококсовый проект при принятых расчетных допущениях.

Инвестиционная состоятельность проекта не гарантирует долгосрочной устойчивости взаимодействия участников: положительный эффект цепочки проекта требует определения механизма его распределения между угольным/газификационным и металлургическим контурами.

Для угольного/газификационного контура важны предлагаемое договорное обеспечение минимального объема закупки термококса, возврат инвестиций и участие в синергетическом эффекте; для металлургического контура – выполнение согласованного графика поставок, снижение стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ, управляемость логистики и предсказуемость цены термококса. Поэтому дальнейший анализ сосредоточен на предлагаемом механизме согласования интересов участников, учитывающем вклад сторон в создание проектно-специализированных активов, различие инвестиционных и операционных рисков и необходимость формирования ценового коридора термококса.

Регионально-экономическая значимость проекта связана с приграничным расположением буроугольной ресурсной базы в Забайкальском крае: логистическое преимущество повышает целесообразность переработки угля в более энергетически плотный продукт и формирует предпосылки для технологической модернизации территории.

Таким образом, операционная оценка термококсового сценария и инвестиционная оценка российско-китайского проекта позволяют сделать вывод о его экономической жизнеспособности при соблюдении раскрытых пороговых

условий. Проект характеризуется положительным NPV, превышением IRR над ставкой дисконтирования, положительной EBITDA после выхода на проектную мощность и снижением стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ в базовом случае с нулевой ценой углерода; при условной цене углерода операционный паритет сохраняется, но запас сужается, и возможное ужесточение углеродного регулирования в Российской Федерации и КНР следует рассматривать как фактор риска для инвестиционных показателей проекта.

Полученные результаты позволяют считать гипотезу Н2 подтвержденной на операционном уровне: на горизонте до 2040 г. сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса имеет более высокую вероятность достижения паритета по УЕСЭ, чем сценарий полной газификации с получением водорода. Инвестиционная оценка далее относится только к выбранному термококсовому проекту и не образует сравнительной инвестиционной проверки двух сценариев. Инвестиционная состоятельность не гарантирует долгосрочной устойчивости взаимодействия участников. Для завершения проверки модели необходимо определить, каким образом создаваемый эффект распределяется между угольным/газификационным и металлургическим контурами.

3.3 Инструментарий согласования интересов участников

Положительный эффект вертикально интегрированной производственной цепочки требует механизма его распределения между угольным / газификационным и металлургическим контурами, поскольку они различаются по функциям, рискам и экономическим интересам. Поэтому параграф 3.3 направлен на проверку Н3: согласованный механизм внутреннего ценообразования на термококс обеспечивает корпоративный распределительный эффект (часть экономического эффекта проекта, распределяемую между угольным/газификационным и металлургическим контурами через внутреннюю цену термококса и подтверждаемую расчетом без двойного счета); отрасле-региональные и национально-экономические результаты рассматриваются как отдельный сценарный потенциал масштабирования. Результатом параграфа является инструментарий согласования интересов участников, объединяющий

коридор экономически обоснованной цены термококса, матрицу управления рисками и перечень показателей мониторинга соглашения; механизм внутреннего ценообразования на термококс выступает расчетным ядром этого инструментария, а не его синонимом, и именно через него сформулирована Н3.

Инструментарий согласования интересов представляет собой единую конструкцию из трех взаимосвязанных элементов, каждый из которых отвечает на свой вопрос долгосрочного соглашения. Коридор экономически обоснованной цены термококса – расчетное ядро инструментария – отвечает на вопрос, как распределяется эффект между контурами при заданных параметрах проекта; матрица управления рисками – на вопрос, кто контролирует параметры, способные вывести цену за пределы коридора, и какими мерами; система показателей мониторинга – на вопрос, по каким признакам стороны узнают, что исходная экономическая логика нарушена и коридор подлежит пересмотру. Связь элементов замкнута: границы коридора зависят от параметров (себестоимости, логистики, цены альтернативного энергоносителя), риски отклонения которых расписаны в матрице, а фактические значения отслеживаются показателями мониторинга. При изменении условий проекта элементы срабатывают последовательно: мониторинг фиксирует отклонение, матрица указывает ответственный контур и меру реагирования, а коридор пересчитывается по той же расчетной логике с новыми параметрами. Именно эта связка, а не каждый элемент по отдельности обеспечивает устойчивость соглашения на горизонте проекта. Далее элементы раскрываются в указанном порядке.

Проверка Н3 осуществляется через расчет коридора экономически обоснованной цены термококса, определение распределяемой синергии, построение матрицы рисков и формирование предлагаемого перечня показателей мониторинга соглашения участников. Данные для проверки включают себестоимость термококса, амортизационную составляющую, минимально приемлемую доходность угольного/газификационного контура, стоимость альтернативного углеродистого энергоносителя, логистический коэффициент, объем потребления термококса и финансовые показатели проекта. Н3 подтверждается, если ценовой коридор одновременно обеспечивает возврат инвестиций угольного/газификационного контура, экономию металлургического

контура, наличие распределяемой синергии и возможность закрепления мер управления рисками и показателей мониторинга в предлагаемом соглашении участников. Н3 опровергается, если цена термококса не может быть установлена в диапазоне, приемлемом для обеих сторон, либо если отсутствует распределяемая синергия.

В связи с этим в настоящем параграфе рассматривается механизм внутреннего ценообразования на промежуточный продукт – термококс как технологический продукт глубокой переработки бурых углей [76]. В отличие от рыночной сделки между независимым поставщиком и покупателем цена промежуточного продукта в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта выполняет двойственную функцию. С одной стороны, она отражает стоимость термококса, передаваемого из угольного/газификационного контура в металлургический. С другой стороны, она выступает инструментом распределения экономического эффекта между участниками производственной цепочки.

Цена промежуточного продукта должна задаваться в таком коридоре, который обеспечивает возврат инвестиций в добычу и газификацию, сохраняет экономию металлургического предприятия относительно альтернативной закупки и поддерживает долгосрочную мотивацию сторон. Именно наличие такого коридора выступает первым расчетным критерием подтверждения Н3.

В корпоративно-финансовой литературе такой механизм может рассматриваться как форма внутригруппового ценообразования, однако в настоящем исследовании используется более нейтральное понятие цены промежуточного продукта. Это позволяет избежать смещения фокуса в налогово-корпоративную проблематику и сохранить предмет анализа в плоскости распределения экономического эффекта между участниками производственной цепочки.

Теоретические основания инструментария разобраны в параграфе 1.4; здесь важно только то, что работает в расчете. Теория трансакционных издержек [92; 225] объясняет, почему при специфичности вложений в лицензию на месторождение, мощности газификационного контура, логистическую инфраструктуру и адаптацию металлургического производства к применению термококса обычный долгосрочный контракт является недостаточным

механизмом координации. Предлагаемый инструментарий согласования снижает риск оппортунистического поведения, поскольку замещает постоянный пересмотр рыночных условий заранее согласованным порядком распределения эффекта.

Существенна здесь переговорная схема Дж. Нэша [181]: именно от нее идет коэффициент распределения синергетического эффекта в базовом сценарии. Формальное решение задачи Нэша потребовало бы задать функции полезности и точки отказа обеих сторон, чего материалы проекта не позволяют. Значение $\alpha = 0{,}5$ принято как базовый расчетный вариант равного распределения синергии; оно не является результатом формального решения Нэша и не исключает иных значений при различии вклада сторон, структуры финансирования или распределения рисков. Иными словами, коэффициент α является не фиксированной теоретической константой, а управленческим параметром предлагаемого соглашения участников.

Внутренняя цена термококса работает в этой логике неполных контрактов [150; 151] и управления центрами ответственности – не как самостоятельная рыночная цена, а как инструмент распределения финансового результата внутри цепочки проекта. Поскольку невозможно заранее полностью описать все будущие состояния среды: изменение качества сырья, логистических условий, стоимости альтернативного энергоносителя, требований к качеству термококса и параметров углеродного регулирования, – механизм расчета цены должен быть не разовым, а периодически пересматриваемым.

В рассматриваемой модели термококс является единственным промежуточным продуктом, по которому производится распределение экономического эффекта. Такой выбор обусловлен логикой прикладного кейса, рассмотренного в параграфе 3.2: именно термококс выступает продуктом глубокой переработки бурого угля, пригодным для использования в металлургическом контуре производства чугуна. Подготовленный после пневмосепарации и осушки энергетический уголь не рассматривается как металлургический продукт, а потому не включается в инструментарий согласования. Источники выгод участников проекта представлены в таблице 51.

Таблица 51 – Источники выгод угольного/газификационного и металлургического контуров в модели проекта

Уровень / участник	Основной вклад в проект	Формируемая выгода	Экономический интерес
Угольный и газификационный контур	Лицензия, ресурсная база бурого угля, добыча, подготовка угля, газификация, получение термококса	Монетизация буроугольной ресурсной базы, переход от низкокалорийного сырья к продукту металлургического назначения, загрузка производственной инфраструктуры	Получение цены промежуточного продукта, покрывающей операционные затраты, амортизацию и минимально приемлемую доходность на проектно-специфический актив
Металлургический контур	Прием термококса, использование в производстве чугуна, сбыт конечной металлургической продукции	Снижение стоимости сопоставимого углеродистого энергоресурса, уменьшение зависимости от альтернативной закупки, снижение логистической нагрузки	Получение термококса по цене ниже полной стоимости альтернативной поставки углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью
Вертикально интегрированная производственная цепочка проекта	Координация добычи, переработки, логистики и металлургического потребления	Формирование синергетического эффекта за счет внутренней координации цепочки «бурый уголь – термококс – чугун»	Управляемое распределение центра прибыли между участниками производственной цепочки при сохранении инвестиционной состоятельности проекта
Региональный уровень	Трудовые ресурсы, инфраструктура, налоговая база, сервисные предприятия	Потенциал создания рабочих мест, повышения загрузки инфраструктуры и развития промышленной специализации территории	Региональный уровень не является участником распределения цены термококса, но получает косвенные эффекты через занятость, налоговую базу и инфраструктурное развитие

Источник: составлено автором.

Как следует из таблицы 51, ключевой конфликт распределения связан с ценой термококса. Для угольного/газификационного контура она должна быть достаточной для покрытия операционной FCA-себестоимости термококса без амортизации ($C_{\text{тк}}^{FCA}$), амортизационной нагрузки и минимально приемлемой доходности. Для металлургического контура она должна оставаться ниже полной стоимости альтернативной закупки углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью. Именно пересечение этих двух требований формирует расчетный ценовой коридор термококса.

Нижняя граница коридора определяется интересами угольного/газификационного контура. В отличие от параграфа 3.2, где при расчете УЕСЭ использовалась операционная FCA-себестоимость термококса без амортизации ($C_{\text{тк}}^{FCA}$; Free Carrier, FCA – условия поставки «франко-перевозчик»

по Инкотермс) в размере 3 479,6 руб./т, в настоящем параграфе для определения цены промежуточного продукта необходимо дополнительно учитывать амортизацию основных средств. Это связано с тем, что цена передачи термококса должна обеспечивать не только покрытие текущих затрат, но и возврат инвестиций в проектно-специфические активы.

В расчетном примере амортизационная составляющая угольного/газификационного контура равна 713,3 руб./т, что позволяет определить полную расчетную базу нижней границы на уровне 4 192,9 руб./т.

Расчетная база нижней границы определяется по формуле (17)

$$C_{\text{тк}}^{FCA+DA} = C_{\text{тк}}^{FCA} + A_{\text{тк}}^{DA}, \quad (17)$$

где $C_{\text{тк}}^{FCA+DA}$ – расчетная себестоимость термококса FCA с учетом амортизации, руб./т;

$C_{\text{тк}}^{FCA}$ – операционная FCA-себестоимость термококса без амортизации, руб./т;

$A_{\text{тк}}^{DA}$ – амортизационная составляющая угольного/газификационного контура, руб./т.

Для рассматриваемого кейса это значение, таким образом, составляет $C_{\text{тк}}^{FCA+DA}$= 3 479,6 + 713,3 = 4 192,9 руб./т.

Нижняя граница экономически обоснованной цены рассчитывается как указанная база, увеличенная на минимально приемлемую доходность угольного/газификационного контура. Диапазон r_{min} 12-15% принят как расчетный интервал минимально приемлемой доходности для инвестиционной оценки этого контура и применяется к расчетной базе затрат с учетом амортизации. Значение 15% используется как консервативное значение базового расчета; оно отражает минимально приемлемую доходность проектно-специфического актива и не совпадает с WACC или корпоративной барьерной ставкой доходностью. Соответствующий расчет приведен в формуле (18)

$$P_{\text{тк}}^{min} = C_{\text{тк}}^{FCA+DA} \times (1 + r_{min}), \quad (18)$$

где $P_{\text{тк}}^{min}$ – нижняя граница цены термококса, руб./т;

r_{min} – минимально приемлемая доходность угольного/газификационного контура.

При r_{min}= 15% нижняя границы цены термококса $P_{\text{тк}}^{min}$, таким образом, составляет 4 192,9 × (1 + 0,15) = 4 821,9 руб./т.

Верхняя граница коридора определяется интересами металлургического контура. Поскольку термококс передается на условиях FCA, логистика после точки отгрузки относится к затратам металлургического контура. Поэтому цена промежуточного продукта должна сравниваться не только с FCA-ценой альтернативного энергоносителя, но и с полной стоимостью с доставкой альтернативной поставки по формуле (19)

$$P_{\text{тк}}^{max} = P_{alt}^{delivered} - C_{\text{лог}}^{\text{проект}}, \quad (19)$$

где $P_{\text{тк}}^{max}$ – верхняя граница цены термококса как промежуточного продукта FCA, руб./т;

$P_{alt}^{delivered}$ – полная стоимость с доставкой альтернативного углеродистого энергоносителя, руб./т;

$C_{\text{лог}}^{\text{проект}}$ – логистические расходы от точки отгрузки термококса до металлургического завода, руб./т.

Полная стоимость с доставкой альтернативного энергоносителя определяется с учетом логистического коэффициента по формуле (20)

$$P_{alt}^{delivered} = P_{alt}^{FCA} + k_{\text{лог}} \times C_{\text{лог}}^{\text{проект}}, \quad (20)$$

где P_{alt}^{FCA} – расчетная FCA-цена альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью, руб./т;

$k_{\text{лог}}$ – коэффициент превышения транспортных расходов по альтернативной поставке.

Для базового сценария, рассмотренного в параграфе 3.2, P_{alt}^{FCA} = 5 107,7 руб./т, $C_{\text{лог}}^{\text{проект}}$ = 485,2 руб./т, $k_{\text{лог}}$ = 3. Следовательно, $P_{alt}^{delivered}$ = 5 107,7 + 3 × 485,2 = 6 563,3 руб./т.

Соответственно, верхняя граница цены термококса $P_{\text{тк}}^{max}$ составляет 6 563,3 – 485,2 = 6 078,1 руб./т.

Расчетная внутренняя цена термококса определяется внутри данного коридора с использованием весового коэффициента α, отражающего распределение синергетического эффекта между угольным/газификационным и металлургическим контурами по формуле (21)

$$P_{\text{тк}}^{fair} = P_{\text{тк}}^{\min} + \alpha \times (P_{\text{тк}}^{\max} - P_{\text{тк}}^{\min}), \quad (21)$$

где $P_{\text{тк}}^{fair}$ – расчетная внутренняя цена термококса, руб./т;

α – коэффициент распределения синергетического эффекта.

Для базового сценария при α = 0,5 расчетная внутренняя цена термококса $P_{\text{тк}}^{fair}$ будет равна 4 821,9 + 0,5 × (6 078,1 – 4 821,9) = 5 450,0 руб./т.

Расчет коридора экономически обоснованной цены представлен в таблице 52. Этот расчет является ключевым элементом проверки Н3, поскольку позволяет установить, существует ли диапазон цены термококса, одновременно приемлемый для угольного/газификационного и металлургического контуров.

Таблица 52 – Расчет ценового коридора и внутренней цены термококса

Показатель	Обозначение	Значение, в рублях за тонну	Значение, в рублях за ГигаДжоуль
Операционная FCA-себестоимость термококса без амортизации	$C_{\text{тк}}^{\text{FCA}}$	3 479,6	169,6
Амортизационная составляющая угольного/газификационного контура	$A_{\text{тк}}^{\text{DA}}$	713,3	34,8
Расчетная себестоимость с учетом амортизации	$C_{\text{тк}}^{\text{FCA+DA}}$	4 192,9	204,3
Нижняя граница при доходности 12%	$P_{\text{тк}}^{\min 12\%}$	4 696,1	228,9
Нижняя граница при доходности 15%	$P_{\text{тк}}^{\min 15\%}$	4 821,9	235,0
Расчетная FCA-цена альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью ($P_{\text{alt}}^{\text{FCA}}$)	$P_{\text{alt}}^{\text{FCA}}$	5 107,7	248,9
Полная стоимость с доставкой альтернативного энергоносителя при $k_{\text{лог}}$ = 3	$P_{\text{alt}}^{\text{delivered}}$	6 563,3	319,9
Верхняя граница цены термококса как промежуточного продукта FCA	$P_{\text{тк}}^{\max}$	6 078,1	296,2
Расчетная внутренняя цена термококса при α = 0,5	$P_{\text{тк}}^{\text{fair}}$	5 450,0	265,6

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Полученный расчетный ценовой коридор при принятых P_{alt}^{FCA}, СткFCA и иных допущениях показывает, что цена термококса должна находиться между 4 821,9 и 6 078,1 руб./т при использовании 15% минимально приемлемой доходности угольного/газификационного контура. Цена ниже нижней границы не обеспечивает достаточного покрытия амортизации и минимально приемлемой доходности на проектно-специфический актив, что создает риск снижения экономической заинтересованности угольного участника. Цена выше верхней границы делает участие металлургического контура экономически менее

привлекательным относительно альтернативной закупки. Расчетная внутренняя цена термококса 5 450,0 руб./т отражает равное распределение синергии между участниками при базовом допущении α = 0,5.

Таким образом, выполнен первый расчетный критерий проверки Н3: получен непустой ценовой коридор, совместимый с расчетным ограничением по минимально приемлемой доходности угольного/газификационного контура и расчетной экономией металлургического контура относительно альтернативной поставки.

Вместе с тем P_{alt}^{FCA} не должна механически подменять цену промежуточного продукта. Внешняя цена используется как расчетный ориентир верхней границы ценового коридора и проверочный параметр, тогда как внутренняя цена выполняет функцию распределения финансового результата внутри цепочки проекта. Если стороны стремятся сохранить центр прибыли преимущественно в металлургическом контуре, значение α может быть снижено. Если приоритетом является ускоренный возврат инвестиций в добычу, подготовку и газификационный контур, значение α может быть увеличено.

Для определения значения α, при котором внутренняя цена не превышает внешний FCA-ориентир, может использоваться формула (22)

$$\alpha_{market} = \frac{P_{alt}^{FCA} - P_{\text{тк}}^{\min}}{P_{\text{тк}}^{\max} - P_{\text{тк}}^{\min}}. \quad (22)$$

Для рассматриваемого кейса, таким образом, α_{market} составит (5 107,7 – 4 821,9) / (6 078,1 – 4 821,9) = 0,23.

Следовательно, если участники принимают решение ограничить внутреннюю цену уровнем внешнего FCA-ориентира, коэффициент распределения синергии должен составлять не более 0,23. Это значение является дополнительным ограничением, а не обязательным правилом расчета цены. Если сравнение осуществляется по полной стоимости с доставкой, то есть с учетом более высокого логистического плеча альтернативной поставки, паритетная цена 5 450,0 руб./т остается экономически допустимой, поскольку полная стоимость термококса для металлургического контура с учетом логистики составляет 5 935,2 руб./т, что ниже полной стоимости альтернативного энергоносителя с доставкой 6 563,3 руб./т.

Выбор базы сравнения – FCA или delivered – существенно влияет на распределение синергии. Поэтому в соглашении участников должна быть заранее закреплена база ценового сравнения. Если стороны используют delivered-базу, логистическое преимущество проекта может быть распределено между участниками. Если используется FCA-ограничение, большая часть логистического эффекта остается в металлургическом контуре.

Особое значение имеет не только цена на единицу продукции, но и годовой масштаб распределяемого эффекта. Расчетный полный технологико-логистический эффект, рассчитанный относительно операционной стоимости термококса, использованной в параграфе 3.2, определяется как разница между стоимостью с доставкой альтернативного энергоносителя и полной операционной стоимостью термококса на консолидированном уровне проекта с учетом логистики по формуле (23)

$$S_{full} = (P_{alt}^{delivered} - (C_{\text{тк}}^{FCA} + C_{\text{лог}}^{\text{проект}})) \times Q_{\text{тк}}, \quad (23)$$

где S_{full} – расчетный полный технологико-логистический эффект относительно операционной стоимости проекта, руб./год;

$Q_{\text{тк}}$ – годовой объем потребления термококса, т.

Для базового сценария S_{full} будет равняться, таким образом, (6 563,3 – (3 479,6 + 485,2)) × 2 925 000 = 7 600 612 500 руб. То есть расчетный полный технологико-логистический эффект составляет около 7,6 млрд руб./год.

После включения амортизационной составляющей и минимально приемлемой доходности угольного/газификационного контура формируется более узкая величина распределяемой синергии по формуле (24)

$$S_{dist} = (P_{\text{тк}}^{\max} - P_{\text{тк}}^{\min}) \times Q_{\text{тк}}, \quad (24)$$

где S_{dist} – расчетная синергия, доступная для распределения после покрытия полной базы и минимально приемлемой доходности угольного/газификационного контура.

Для базового сценария S_{dist}= (6 078,1 – 4 821,9) × 2 925 000 ≈ 3,7 млрд руб. Следовательно, расчетная распределяемая синергия после обеспечения минимально приемлемой доходности угольного/газификационного контура составляет около 3,7 млрд руб./год. Именно эта величина является предметом переговорного

распределения между участниками через коэффициент α. При α = 0,5 синергия сверх нижней границы распределяется поровну согласно базовому расчетному допущению; при изменении α центр прибыли смещается в сторону либо угольного/газификационного, либо металлургического контура.

Чувствительность экономически обоснованной цены к логистическому коэффициенту представлена в таблице 53.

Таблица 53 – Чувствительность экономически обоснованной цены к логистическому коэффициенту

В рублях за тонну

Коэффициент превышения логистических затрат альтернативной поставки $k_{лог}$	Полная стоимость с доставкой альтернативного энергоносителя	Верхняя граница внутренней цены	Расчетная внутренняя цена термококса при α = 0,5	Распределяемая синергия, в миллиардах рублей в год
1	5 592,9	5 107,7	4 964,8	0,8
3	6 563,3	6 078,1	5 450,0	3,7
5	7 533,7	7 048,5	5 935,2	6,5
10	9 959,7	9 474,5	7 148,2	13,6

Источник: рассчитано автором.

Данные таблицы 53 показывают, что логистический коэффициент влияет не только на УЕСЭ, но и на распределение выгод между участниками проекта. Чем выше логистическое плечо альтернативной поставки, тем шире становится пространство для внутреннего распределения синергии. При этом рост $k_{лог}$ не должен автоматически вести к завышению внутренней цены: соглашение участников может предусматривать правило пересмотра ценового коридора, позволяющее сохранять баланс интересов и предотвращать необоснованное смещение центра прибыли в пользу одного из контуров.

При высоком $k_{лог}$ рост внутренней цены допустим только при сравнении на delivered-базе; если участники фиксируют ограничение по внешнему FCA-ориентиру, цена должна ограничиваться дополнительным условием. Это особенно важно для сценариев, в которых логистическое преимущество проекта является ключевым источником синергии.

Реализация проекта наряду с ценовым механизмом требует согласованного управления рисками. Первичный контроль закрепляется за контуром, способным воздействовать на источник риска, а системные и внешние риски контролируются совместно. Типовая матрица управления рисками,

представленная в таблице 54, может применяться за пределами российско-китайского кейса при ее адаптации к юрисдикции, логистике, структуре владения и технологической конфигурации конкретного проекта.

Таблица 54 – Типовая матрица управления рисками в проекте производства термококса из бурых углей

Вид риска	Содержание риска	Основная зона контроля	Меры управления риском
Сырьевой	Отклонение качества бурого угля по влажности, зольности, теплотворной способности; нестабильность характеристик ROM-угля	Угольный контур	Геологическая верификация, регулярный контроль качества, корректировка производственного плана
Технологический	Недостижение выхода термококса 60%, отклонение низшей теплоты сгорания (НТС) от 4 900 ккал/кг, превышение влажности или зольности термококса	Газификационный контур проекта	Технические KPI, испытания партий, предлагаемое договорное правило корректировки цены термококса при отклонении качества
Инвестиционный (CAPEX)	Превышение бюджета строительства, подготовки разреза, газификационного комплекса или сопутствующей инфраструктуры	Совместная зона контроля	Распределение превышения капитальных затрат в зависимости от причины отклонения и зоны контроля
Операционный (OPEX)	Рост операционных затрат добычи, подготовки, газификации, персонала, энергии, ремонта	Контур, в котором возникло отклонение	Ежегодный пересчет нижней границы коридора, операционный аудит, лимиты отклонений
Логистический после FCA	Изменение тарифов, пропускной способности, пограничных процедур после точки отгрузки	Металлургический контур	Логистика учитывается отдельной строкой в затратах металлургического контура; при существенном изменении маршрута пересчитывается верхняя граница коридора
Объемный	Недозагрузка газификационного комплекса вследствие снижения потребления термококса металлургическим контуром	Металлургический контур при согласованном объеме потребления	Предлагаемый механизм договорного обеспечения минимального объема закупки термококса «прими или оплати»
Рыночный	Снижение цены чугуна, изменение спроса на металлургическую продукцию, изменение стоимости альтернативного углеродистого энергоносителя	Преимущественно металлургический контур	Пересмотр верхней границы коридора, учет цены чугуна и альтернативного энергоносителя в ежегодном пересчете
Регуляторный	Внешнее углеродное регулирование, экспортно-импортные ограничения, требования к углеродной отчетности	Совместная зона контроля	Регуляторная оговорка, включение углеродной компоненты в ценовой коридор при изменении регулирования
Социально-кадровый	Дефицит квалифицированного персонала, необходимость переподготовки, социальные обязательства в регионе	Угольный и газификационный контур при участии проекта	Программы подготовки кадров, мониторинг занятости, включение социальных обязательств в KPI
Институциональный	Ценовые споры, конфликт участников, нарушение процедур согласования, задержка управленческих решений	Совместная зона контроля	Совет участников, ценовой комитет, независимая экспертиза, процедура урегулирования тупиковых ситуаций

Источник: составлено автором.

Представленная матрица показывает, что зоны контроля и меры управления рисками должны определяться не по формальному признаку принадлежности участника к угольной или металлургической отрасли, а по принципу управляемости риска. Сырьевой риск контролируется преимущественно угольным контуром, технологический риск – газификационным контуром, логистический риск после FCA – металлургическим контуром. При этом CAPEX-риск, регуляторный риск и институциональный риск должны рассматриваться как совместные, поскольку их последствия затрагивают реализуемость всей цепочки проекта.

Особого внимания требует логистический риск. Поскольку цена термококса устанавливается на условиях FCA, логистика после точки отгрузки относится к металлургическому контуру. Это означает, что рост транспортных расходов после FCA не должен автоматически снижать доходность угольного/газификационного контура. При существенном изменении логистического плеча альтернативной поставки или маршрута доставки термококса верхняя граница ценового коридора должна пересматриваться, поскольку именно она отражает предельную экономическую выгоду металлургического участника от участия в проекте.

Для снижения риска недозагрузки газификационного комплекса в соглашении участников целесообразно предусматривать механизм «прими или оплати». Его содержание состоит в закреплении минимального объема термококса, который металлургический контур обязан принять или оплатить независимо от фактического потребления. Минимальный объем должен быть связан не с максимальной проектной мощностью, а с уровнем, необходимым для обслуживания инвестиционной нагрузки и поддержания загрузки газификационного контура. Такой подход особенно важен в первые годы эксплуатации, когда проект еще несет инвестиционную нагрузку, а формирование положительного FCFF является контролируемым условием инвестиционной состоятельности.

Соглашением участников может быть предусмотрено договорное правило корректировки цены термококса при отклонении качества. Поскольку экономическая ценность термококса для металлургического контура зависит от его технологической пригодности и согласованных параметров качества, включая

низшую теплоту сгорания, влажность и зольность, цена должна корректироваться при отклонении качества от базовых параметров. При снижении НТС ниже 4 900 ккал/кг, превышении влажности или ухудшении зольности цена может снижаться; при превышении базовых качественных параметров допускается премия. Такое договорное правило направлено на предотвращение ситуации, при которой металлургический контур вынужден оплачивать продукт, не соответствующий параметрам расчетной и финансовой моделей.

Механизм распределения превышения капитальных затрат должен учитывать причину отклонения капитальных затрат от бюджета. Превышение CAPEX по причинам, связанным с изменением требований металлургического контура, относится на металлургический контур; превышение из-за добывающей инфраструктуры – на угольный/газификационный; внешние изменения – совместно. Такой подход связывает распределение превышения CAPEX с установленной причиной отклонения и зоной контроля и снижает риск конфликтов при росте инвестиционной нагрузки.

В базовой модели платежи за выбросы CO_2 отсутствуют, поэтому углеродная компонента не влияет на цену термококса. При изменении регулирования она может повысить верхнюю границу ценового коридора, если сильнее удорожает альтернативный энергоноситель, либо нижнюю – если платежи несет проект. Итог зависит от распределения нагрузки между проектом, альтернативной поставкой и металлургическим контуром.

Вертикально интегрированная цепочка объединяет добычу, подготовку, газификацию, логистику и потребление, поэтому управление должно обеспечивать корпоративный контроль и координацию производственных, ценовых и инвестиционных параметров, что отражает таблица 55.

Таблица 55 – Органы, эксперты и процедуры управления проектом

Орган, эксперт или процедура	Основные функции	Значение для устойчивости проекта
1	2	3
Совет участников	Утверждение стратегии, бюджета, крупных сделок, изменений инвестиционной программы и принципов распределения эффекта	Обеспечивает контроль проектно-специфических активов и предотвращает одностороннее изменение условий проекта [147; 152; 225]
Технический комитет	Контроль качества бурого угля и термококса, выход продукта, НТС, влажность, зольность, технологические отклонения	Обеспечивает основу для применения предлагаемого договорного правила корректировки цены термококса при отклонении качества и снижает риск технологических споров [151; 225]

Продолжение таблицы 55

1	2	3
Ценовой комитет	Ежегодный пересчет коридора цены термококса, проверка индексов, подготовка предложений по изменению α	Поддерживает баланс интересов между угольным/газификационным и металлургическим контурами [134; 181; 225]
Инвестиционный / бюджетный комитет	Контроль CAPEX, анализ отклонений от бюджета, применение механизма распределения превышения капитальных затрат	Снижает риск неконтролируемого роста инвестиционной нагрузки [32; 33; 156]
Операционный комитет	Контроль объемов поставки, графиков, загрузки газификационного и металлургического контуров	Обеспечивает контроль исполнения обязательств, предусмотренных предлагаемым механизмом «прими или оплати»; фактическая загрузка производственной цепочки оценивается отдельно [41; 125; 151]
Независимый технический или ценовой эксперт	Экспертиза при ценовых, технических или качественных разногласиях	Позволяет разрешать споры без разрушения долгосрочного соглашения участников [151; 160]
Процедура разрешения тупиковых ситуаций (deadlock)	Урегулирование тупиковых ситуаций при невозможности принять решение внутри органов управления	Снижает институциональный риск и предотвращает блокировку проекта [151; 160; 225]

Источник: составлено автором.

Индексация цены термококса должна осуществляться не через механическое ежегодное увеличение на инфляцию, а через пересчет всего коридора экономически обоснованных цен. Такой подход позволяет сохранить связь с УЕСЭ и одновременно учесть изменение операционных затрат, логистики, альтернативной стоимости углеродистого энергоносителя и возможной углеродной компоненты.

Для каждого расчетного периода нижняя граница может пересчитываться по формуле (25)

$$P_{\text{тк},t}^{\min} = C_{\text{тк},t}^{FCA+DA} \times (1 + r_{\min}). \quad (25)$$

Верхняя граница определяется по формуле (26)

$$P_{\text{тк},t}^{\max} = P_{alt,t}^{delivered} - C_{\text{лог},t}^{\text{проект}} \quad (26)$$

Экономически обоснованная цена определяется по формуле (27)

$$P_{\text{тк},t}^{fair} = P_{\text{тк},t}^{\min} + \alpha_t \times (P_{\text{тк},t}^{\max} - P_{\text{тк},t}^{\min}), \quad (27)$$

где t – расчетный год;

α_t – коэффициент распределения синергии в соответствующем году.

После договорного закрепления предлагаемого инструментария для мониторинга его реализации может использоваться перечень показателей [90]. Перечень охватывает финансовые, технологические, ценовые, логистические и социально-региональные параметры и представлен в таблице 56. Целевые и пороговые значения, периодичность контроля, источники данных и ответственные определяются на этапе договорного закрепления инструментария.

Таблица 56 – Показатели мониторинга исполнения соглашения участников проекта

Группа показателей	Показатель	Экономический смысл
1	2	3
Ценовой блок	Цена термококса как промежуточного продукта	Контроль распределения центра прибыли между угольным/газификационным и металлургическим контурами
	Положение цены внутри коридора	Проверка соблюдения нижней и верхней границ экономически обоснованной цены
	Коэффициент α	Оценка фактического распределения синергии между участниками
	$КУЕСЭ_{проект}$ по выбранному сценарию	Проверка сохранения преимущества по стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности
Технологический блок	Выход термококса от ROM	Контроль достижения расчетного выхода 60%
	НТС термококса	Контроль соответствия базовому уровню 4 900 ккал/кг
	Влажность и зольность термококса	Основание для применения предлагаемого договорного правила корректировки цены термококса при отклонении качества
Производственно-логистический блок	Объем поставки термококса	Контроль исполнения обязательств по предлагаемому механизму «прими или оплати»
	Загрузка металлургического контура	Контроль фактического потребления термококса и соблюдения целевого уровня загрузки производственной цепочки
	Логистический коэффициент $k_{лог}$	Контроль изменения сравнительного преимущества относительно альтернативной поставки
Финансовый блок	EBITDA проекта	Мониторинг операционного финансового результата проекта
	FCFF проекта	Контроль способности проекта генерировать свободный денежный поток
	Отклонение CAPEX от бюджета	Основание для применения механизма распределения превышения капитальных затрат
Регуляторный и социальный блок	Наличие/отсутствие платежей за выбросы CO_2	Основание для активации углеродной компоненты в ценовом коридоре
	Рабочие места и подготовка персонала	Проверка вклада проекта в региональную занятость и сохранение производственных компетенций
Институциональный блок	Соблюдение регламента пересмотра цены и параметров соглашения	Мониторинг соблюдения соглашения участников и процедур координации
	Своевременность утверждения бюджета, производственного плана и инвестиционных решений	Контроль способности органов управления предотвращать блокировку проекта

Источник: составлено автором.

Распределение выгод и рисков в проекте производства термококса из бурых углей опирается на три взаимосвязанных элемента: коридор экономически обоснованных цен, матрицу управления рисками и систему мониторинга исполнения соглашения. Коридор согласует интересы угольного/газификационного и металлургического контуров без утраты инвестиционной мотивации; матрица закрепляет зоны контроля и меры управления, не определяя распределение денежных последствий рисков; система показателей контролирует сохранение исходной экономической логики проекта. В совокупности они подтверждают расчетную возможность согласования интересов и выполнение критериев Н3.

Апробация на параметрах кейса параграфа 3.2 показывает: при операционной FCA-себестоимости 3 479,6 руб./т, амортизационной составляющей 713,3 руб./т, минимально приемлемой доходности 15% и $k_{лог} = 3$ коридор составляет 4 821,9-6 078,1 руб./т. При $\alpha = 0,5$ внутренняя цена равна 5 450,0 руб./т, полный технологико-логистический эффект – около 7,6 млрд руб./год, распределяемая синергия – около 3,7 млрд руб./год.

Устойчивость инструментария зависит не только от положительного NPV, но и от соблюдения коридора, управления рисками и регулярного пересмотра соглашения. В принятой корпоративной границе подтверждена расчетная достижимость согласования интересов; отрасле-региональные и национально-экономические эффекты оцениваются в параграфе 3.4 и в критерий Н3 не входят.

Три элемента образуют один инструментарий. Коридор задает расчетную основу соглашения, но без матрицы рисков не отвечает, кто удерживает параметры в границах, а без мониторинга – когда его пересматривать; матрица и мониторинг вне коридора не имеют самостоятельного экономического содержания, поскольку их пороги производны от формирующих его величин. Поэтому инструментарий внедряется и пересматривается как целое. Он составляет пятый результат исследования и участвует в параграфе 3.4 как основа для оценки эффектов на более высоких уровнях.

3.4 Экономический эффект трансформации: оценка на уровне компании, отрасли и национальной экономики

Корпоративный эффект посчитан. Остается вопрос, что из этого масштабируется на отрасль и на национальный уровень, и здесь сразу нужна оговорка: расчетного статуса такие оценки не имеют. Вместе с ними дальше проверяется и основная гипотеза Н. В параграфе 3.3 обоснован расчетный потенциал механизма внутреннего ценообразования для согласования интересов участников проекта на корпоративном уровне; в параграфе 3.4 оценивается проявление результатов модели на проектном, отрасле-региональном и национально-экономическом уровнях.

Экономический эффект рассматривается на трех уровнях: проектно-корпоративном, отрасле-региональном и национально-экономическом. Гипотеза Н3 относится к корпоративному распределительному механизму. Отрасле-региональный и национально-экономический уровни далее оцениваются отдельно как линейные сценарии масштабирования, а не как доказанные причинные последствия внутреннего ценообразования.

На уровне проекта и компании экономический эффект трансформации проявляется прежде всего в изменении способа формирования стоимости углеродистого энергоресурса для металлургического передела. В традиционной модели металлургическое предприятие зависит от внешней закупки углеродистого энергоносителя с требуемой энергетической ценностью, а стоимость такого энергоносителя определяется сочетанием рыночной цены, качества, логистики и доступности поставок. В предлагаемой модели часть этой зависимости замещается производством термококса из бурого угля внутри цепочки проекта.

По результатам расчетов, приведенных в параграфе 3.2, стоимость 1 ГДж сопоставимой ЭЦ термококса в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта составляет 193,3 руб./ГДж, тогда как стоимость 1 ГДж альтернативного углеродистого энергоносителя с сопоставимой энергетической ценностью и с учетом логистики достигает 319,9 руб./ГДж. Соответственно, снижение стоимости сопоставимой энергетической ценности составляет 39,6%, что отражается в значении $КУЕСЭ_{проект} = 60,4\%$

Расчет снижения удельных затрат может быть представлен по формуле (28)

$$\Delta C_{\text{ГДж}} = C_{\text{ГДж}}^{alt} - C_{\text{ГДж}}^{\text{тк}}, \quad (28)$$

где $\Delta C_{\text{ГДж}}$ – снижение стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности, руб./ГДж;

$C_{\text{ГДж}}^{alt}$ – стоимость 1 ГДж альтернативного энергоносителя, руб./ГДж;

$C_{\text{ГДж}}^{\text{тк}}$ – стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности термококса в вертикально интегрированной производственной цепочке проекта, руб./ГДж.

Для рассматриваемого кейса $\Delta C_{\text{ГДж}}$ = 319,9 − 193,3 = 126,6 руб./ГДж.

Относительное снижение определяется по формуле (29)

$$\Delta C_{\%} = \left(1 - \frac{C_{\text{ГДж}}^{\text{тк}}}{C_{\text{ГДж}}^{alt}}\right) \times 100\%. \quad (29)$$

Для рассматриваемого кейса $\Delta C_{\%}$ = (1 − 193,3 / 319,9) × 100 = 39,6%. Относительное снижение на 39,6% относится именно к стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ, а не к полной себестоимости чугуна. Его значение состоит в том, что оно фиксирует изменение одного из ключевых элементов затрат металлургического контура – стоимости углеродистого энергоресурса, используемого в металлургическом переделе. Поэтому УЕСЭ не заменяет финансовую модель проекта, но показывает операционную основу экономического эффекта.

Расчетный годовой эффект проекта при принятых P_{alt}^{FCA}, $C_{\text{тк}}^{FCA}$ и иных допущениях может быть рассчитан как полный технологико-логистический эффект относительно альтернативной поставки углеродистого энергоносителя по формуле (30)

$$\text{Э}_{\text{год}} = \Delta C_{\text{т}} \times Q_{\text{тк}}, \quad (30)$$

где $\text{Э}_{\text{год}}$ – годовой экономический эффект, руб./год;

$\Delta C_{\text{т}}$ – разница между полной стоимостью альтернативного энергоносителя и полной стоимостью термококса в рассматриваемой модели, руб./т;

$Q_{\text{тк}}$ – годовой объем потребления термококса, т.

Для рассматриваемого кейса $\text{Э}_{\text{год}}$, рассчитанный по формуле (30), составит (6 563,3 − 3 964,8) × 2 925 000 = 7 600 612 500 руб.

Следовательно, расчетный полный технологико-логистический эффект при принятых параметрах кейса составляет около 7,6 млрд руб./год. Этот показатель не следует трактовать как экономию только металлургического или только угольного участника. Он возникает на уровне всей производственной цепочки «добыча бурого угля – переработка – термококс – металлургическое применение» и далее подлежит распределению между участниками через механизм, рассмотренный в параграфе 3.3.

Именно цепной характер эффекта является ключевым для понимания результатов исследования. Экономический результат не возникает изолированно в добыче, газификации или металлургии. Он формируется последовательно на стадиях цепочки создания стоимости: бурый уголь получает новое промышленное применение; газификационный контур превращает низкокалорийное сырье в термококс; металлургический контур получает углеродистый энергоресурс с более низкой стоимостью сопоставимой ЭЦ; вертикально интегрированная производственная цепочка проекта фиксирует эффект в виде положительного расчетного денежного потока.

Сводная характеристика экономического эффекта на уровне проекта и компании представлена в таблице 57.

Таблица 57 – Матрица экономического эффекта трансформации на уровне проекта и компании

Элемент эффекта	Расчетная база / источник	Результат	Экономическая интерпретация
1	2	3	4
Операционная сопоставимость	Расчет $КУЕСЭ_{проект}$	60,4%	Стоимость 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности термококса ниже альтернативы
Снижение стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности	Разность: 319,9 −193,3 руб./ГДж	126,6 руб./ГДж	Снижение затрат на технологический продукт для металлургического передела
Относительное снижение стоимости	Формула (47): (1 − 193,3/319,9) × × 100%	39,6%	Операционное преимущество термококса как продукта глубокой переработки бурого угля
Годовой технологико-логистический эффект	(6 563,3 – 3 964,8) × × 2 925 000	около 7,6 млрд руб./год	Совокупный эффект всей производственной цепочки относительно альтернативной поставки
Инвестиционная состоятельность	DCF-модель проекта	NPV – 6 748,2 млн руб.; IRR – 22,59%	Расчетный вывод об инвестиционной состоятельности проекта при заданных предпосылках

Продолжение таблицы 57

1	2	3	4
Операционный денежный поток	P&L/CF-модель	EBITDA в установившемся режиме – 24 096,8 млн руб.	Положительное расчетное значение EBITDA проекта в установившемся режиме
Срок возврата вложений	Накопленный FCFF	PP 6,56 года; DPP 13,39 года (20%)	Выход накопленного FCFF в положительную область
Углеродная уязвимость	Отсутствие платежей CO_2 в базовом расчете; возможное усиление внешних требований	Сценарная количественная оценка в ограниченной проектной границе	Снижение будущей уязвимости к углеродному регулированию и требованиям отчетности

Источник: составлено автором.

Экономический эффект на уровне проекта подтверждается совокупностью показателей: УЕСЭ фиксирует операционное преимущество, NPV и IRR – инвестиционную состоятельность, EBITDA и FCFF – способность генерировать денежный поток, а годовой эффект 7,6 млрд руб. – масштаб полного технологико-логистического эффекта, тогда как распределяемая синергия составляет около 3,7 млрд руб./год. Все показатели приведены для базового случая с нулевой ценой углерода; при условной цене углерода операционное преимущество сохраняется (КУЕСЭ до 81,8%, приведенное в таблице 45), однако величина инвестиционного и распределяемого эффекта будет ниже при ужесточении углеродного регулирования в Российской Федерации и КНР.

Экономический эффект для угольного/газификационного контура заключается в изменении способа монетизации буроугольной ресурсной базы. При традиционном подходе бурый уголь с относительно низкой теплотворной способностью и высокой чувствительностью к логистике имеет ограниченную сферу применения, связанную преимущественно с энергетическим использованием. Глубокая переработка позволяет перевести его в термококс – технологический продукт для металлургического передела. Формируются предпосылки корпоративного экономического эффекта: переход от сырья к продукту более высокой степени переработки, создание проектно-специфического перерабатывающего актива, снижение зависимости от рынка энергетического угля и наличие потенциального спроса со стороны металлургического контура.

Для металлургического контура эффект проявляется в снижении стоимости сопоставимого энергоресурса, возможности повышения

предсказуемости поставок, меньшей зависимости от удаленных маршрутов закупки, возможности управлять качеством и ценой через соглашение участников, а также в снижении будущей углеродной уязвимости, оцененном только в принятой проектной границе в таблице 45. При этом данный эффект не означает автоматического выигрыша одной стороны за счет другой. Если механизм согласования не определен, положительная синергия может стать источником конфликта, поскольку каждая сторона будет стремиться закрепить за собой бóльшую долю создаваемой стоимости.

Поэтому результаты параграфа 3.4 должны рассматриваться во взаимосвязи с параграфом 3.3: экономический эффект возникает на уровне всей цепочки создания стоимости, но распределяется между участниками производственной цепочки не автоматически. Устойчивость модели зависит от того, насколько участники способны удерживать расчетную внутреннюю цену термококса в пределах ценового коридора, управлять рисками и регулярно пересматривать параметры соглашения.

Распределение экономического эффекта по уровням и участникам представлено в таблице 58.

Таблица 58 – Распределение экономического эффекта по уровням и участникам

Уровень / участник	Получаемый эффект	Способ фиксации эффекта	Потенциальное ограничение
1	2	3	4
Угольный/ газификационный контур	Монетизация буроугольной ресурсной базы; переход к продукту более высокой степени переработки; загрузка газификационного контура	Цена промежуточного продукта; предлагаемый механизм «прими или оплати»; участие в распределяемой синергии	Риск занижения цены термококса и недополучения минимально приемлемой доходности на проектно-специфический актив
Металлургический контур	Снижение стоимости сопоставимого энергоресурса; возможность повышения предсказуемости поставок; снижение зависимости от альтернативной закупки	Верхняя граница цены термококса; возможность применения предлагаемого договорного правила корректировки цены термококса при отклонении качества; контроль логистической составляющей	Риск завышения цены промежуточного продукта и потери операционного преимущества

Продолжение таблицы 58

1	2	3	4
Вертикально интегрированная производственная цепочка проекта	Положительный NPV, положительное расчетное значение EBITDA, технологико-логистический эффект всей цепочки	Консолидированная финансовая модель; механизм согласования интересов участников	Риск конфликта интересов при отсутствии прозрачных правил внутреннего ценообразования
Региональный уровень	Занятость, инфраструктурная загрузка, налоговая база, развитие сервисных компетенций	Локализация добычи, подготовки, переработки и обслуживания	Занятость, налоговые поступления и развитие региональной инфраструктуры количественно оцениваются в модуле регионального масштабирования
Национально-отраслевой уровень	Диверсификация способов использования угля; развитие компетенций глубокой переработки	Масштабирование модели при наличии подходящих условий	Эффект не возникает автоматически от одного проекта и требует портфеля сопоставимых инициатив

Источник: составлено автором.

Создаваемый эффект имеет многоуровневый характер: для угольного/газификационного контура важна минимально приемлемая доходность на проектно-специфический актив, для металлургического – сохранение операционного преимущества, для интегрированного проекта – положительный денежный поток, для регионального и национального уровней – закрепление проекта в более широкой промышленной и институциональной среде.

На отрасле-региональном уровне результат анализа состоит в установлении условий, выполнение которых определяет применимость модели к другим территориям. Такие условия задают границы сценарного масштабирования параметров рассмотренного кейса.

Сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса может быть применен не в любом угольном регионе, а только там, где одновременно выполняется ряд условий: наличие пригодной сырьевой базы, технологическая возможность получения термококса требуемого качества, логистическая связность с металлургическим потребителем, наличие потенциального спроса, возможность глубокой координации участников,

социально-экономическая значимость сохранения и трансформации угольной занятости.

В этой логике регионы следует рассматривать не как простые географические примеры, а как типы региональных условий [7]. Первый тип – приграничный регион с доступом к внешнему металлургическому спросу; именно такую функцию в рассматриваемом кейсе выполняет Забайкальский край. Второй тип – крупный угледобывающий регион с задачей диверсификации и справедливого перехода; здесь в качестве осторожного примера может рассматриваться Кузбасс, но не как прямой аналог по буроугольной базе, а как территория, где значимы занятость, угольная специализация и необходимость технологической диверсификации. Третий тип – удаленный ресурсный регион с крупной сырьевой базой и инфраструктурными ограничениями; к такому типу может относиться Якутия, но применимость модели требует отдельной логистической и технологической проверки.

Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 г., утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р [6], задает рамку долгосрочного развития отрасли и включает задачи модернизации и развития угольной промышленности [105]. В этой связи глубокая переработка бурых углей может рассматриваться как одно из направлений технологической трансформации отрасли, поскольку она предполагает не только добычу сырья, но и изменение его места в цепочке создания стоимости.

Условия применимости модели к различным типам региональных условий описаны в таблице 59.

Таблица 59 – Условия применимости модели к типам угледобывающих регионов

Условие применимости	Содержание критерия	Тип региональных условий	Пример интерпретации
1	2	3	4
Ресурсная база	Наличие бурых или иных пригодных для глубокой переработки углей; достаточность запасов; качество сырья	Приграничный ресурсный регион; удаленный ресурсный регион	Забайкальский край – апробационный пример; Якутия – потенциальное направление при отдельной проверке
Технологическая пригодность	Возможность получения термококса с требуемыми параметрами энергетической ценности, влажности, зольности и выполнения требования стабильности параметров качества	Регион с доступом к технологической инфраструктуре и компетенциям переработки	Требуется отдельная технологическая проверка для каждого месторождения

Продолжение таблицы 59

1	2	3	4
Логистическая связность	Ж/д доступность, терминалы, пограничная инфраструктура, расстояние до металлургического потребителя	Приграничный регион или регион с устойчивым транспортным коридором	Для Забайкальского края логистика выступает источником преимущества; для удаленных регионов – ограничением
Наличие потребителя	Доступ к металлургическому контуру, способному использовать термококс как технологический продукт глубокой переработки бурых углей	Регион, ориентированный на внешний или внутренний металлургический спрос	Восточное направление усиливает значение российско-китайской производственной конфигурации
Организационная координация	Возможность долгосрочного соглашения участников, распределения выгод и рисков, расчета цены промежуточного продукта	Регион с наличием крупной промышленности и предсказуемой институциональной средой	Без глубокой координации эффект может не закрепиться в проектной экономике
Социально-региональная значимость	Зависимость территории от угольной занятости, необходимость диверсификации и переподготовки	Крупный угледобывающий регион с задачей справедливого перехода	Кузбасс может рассматриваться не как прямой сырьевой аналог, а как регион, где важна диверсификация угольной специализации
Институциональная поддержка	Доступ к инфраструктурной, финансовой и регуляторной поддержке; участие институтов развития	Капиталоемкие проекты с межрегиональной или трансграничной конфигурацией	Требуется для снижения риска начальной стадии и координации участников

Источник: составлено автором.

Таблица 59 показывает, что масштабирование модели должно основываться не на географическом сходстве регионов, а на совпадении набора условий. Забайкальский край является наиболее подходящим примером за счет приграничного положения и доступа к китайскому промышленному спросу. Кузбасс требует иной интерпретации: его значение связано не с прямым повторением буроугольного кейса, а с возможностью использования подходов глубокой переработки как элемента диверсификации угольной специализации и занятости. Якутия рассматривается как направление применения модели при подтверждении ресурсных и логистических предпосылок; перенос осуществляется по разработанному алгоритму проверки качества сырья, логистики, спроса и готовности участников к координации. Таблица 59 представляет собой перечень условий применимости, выведенный из логики модели и одного рассмотренного кейса, а не эмпирическое доказательство тиражируемости. Апробация на единственном кейсе не позволяет

распространять полученные количественные выводы – значения КУЕСЭ, NPV, IRR, границы ценового коридора – на другие регионы: совпадение набора качественных условий означает лишь, что к такому региону применима процедура проверки, а не то, что ее результат будет положительным. Количественная оценка для каждого нового региона требует повторения всей последовательности глав 2-3 на местных данных о сырье, логистике и потребителе; тиражируемость модели в настоящей работе обоснована качественно и подлежит эмпирической проверке на последующих кейсах.

Отраслевой эффект для угольной промышленности заключается в переходе от модели, основанной на добыче и транспортировке сырья, к созданию специализированного технологического продукта – термококса. Речь идет не об отказе от угледобычи, а об изменении функциональной роли бурого угля: из энергетического сырья он превращается в ресурсную основу глубокой переработки и металлургического применения. Это повышает степень переработки сырья и переносит часть создания стоимости на стадии подготовки угля, газификации, стабилизации и контроля качества продукта, а также организации поставки металлургическому потребителю. Одновременно возникает потребность в новых компетенциях: эксплуатации газификационного оборудования, обеспечении стабильности характеристик термококса, координации трех контуров. В условиях трансформации промышленности и изменения спроса на традиционные угольные продукты такая модернизация может выступать одной из траекторий диверсификации угольной специализации и сохранения промышленной функции угледобывающих регионов [106]. Цели промышленной политики сформулированы в статье 4 Федерального закона № 488-ФЗ: «Целями промышленной политики являются: 1) формирование высокотехнологичной, конкурентоспособной промышленности, обеспечивающей переход экономики государства от экспортно-сырьевого типа развития к инновационному типу развития; 2) обеспечение обороны страны и безопасности государства; 3) обеспечение занятости населения и повышение уровня жизни граждан Российской Федерации» [12, ст. 4]. Рассматриваемая трансформация соотносится с первой и третьей из перечисленных целей: она переводит бурый уголь из экспортно-сырьевого использования в

технологический продукт и одновременно сохраняет промышленную занятость в угледобывающих регионах.

В контексте справедливого перехода особое значение приобретает социально-экономическая функция такой трансформации. Снижение углеродной уязвимости угледобывающих регионов не должно сводиться исключительно к закрытию предприятий, сокращению добычи или обесценению действующих угольных активов, поскольку подобный подход способен усилить риски потери занятости и производственных компетенций. Более устойчивой является траектория, при которой существующая ресурсная, инфраструктурная и кадровая базы последовательно адаптируются к новым видам деятельности. К ним относятся подготовка и сортировка угля, газификация, производство термококса, лабораторный и производственный контроль качества, промышленная логистика, эксплуатация и обслуживание технологического оборудования [187]. Это создает предпосылки для переподготовки работников, сохранения части промышленной занятости и формирования новых квалификаций без одномоментного разрыва сложившихся социально-экономических связей. Вместе с тем рассматриваемая модель не обеспечивает справедливый переход автоматически: фактический эффект зависит от экономической жизнеспособности проекта, устойчивого спроса на термококс, инфраструктурной обеспеченности, программ переподготовки и согласованности действий участников. Поэтому ее значение состоит в формировании предпосылок для более плавной технологической трансформации занятости и диверсификации угледобывающих территорий.

Связь с ЦУР в этом параграфе рассматривается не как повтор теоретической рамки главы 1, а как прикладная интерпретация результатов. Как уже отмечалось в параграфе 3.2, модель соотносится с ЦУР 8, 9, 12 и 13; при переходе на уровень отрасли и регионов к ним добавляется ЦУР 11 – через повышение устойчивости угольных территорий.

Для металлургической отрасли эффект масштабирования заключается в появлении альтернативного источника углеродистого энергоресурса для металлургического передела. Это может снизить зависимость от отдельных маршрутов поставки коксующихся марок угля и повысить устойчивость сырьевого обеспечения. Однако этот вывод должен сопровождаться важной

оговоркой: предложенная модель не означает одномоментного отказа от коксующихся углей и не предполагает автоматического вытеснения предприятий, специализирующихся на их добыче.

Возможное влияние модели на компании, добывающие коксующиеся марки угля, является самостоятельной темой. С одной стороны, развитие термококсового сценария может создать конкурентное давление на часть традиционного спроса на углеродистые энергоносители. С другой стороны, в среднесрочной перспективе сценарий частичной газификации скорее формирует дополнительный сегмент глубокой переработки бурых углей, чем полностью замещает коксующуюся сырьевую базу металлургии. Для компаний, специализирующихся на коксующихся углях, это означает необходимость оценки собственных стратегий адаптации: повышения качества продукта, участия в проектах глубокой переработки, диверсификации сырьевого портфеля или включения в новые производственные цепочки [68; 192]. Этот вопрос выходит за рамки целей настоящего исследования, поскольку предмет работы связан с вовлечением бурых углей в металлургическую цепочку, а не с полной переоценкой структуры спроса на коксующиеся марки угля.

На уровне национальной экономики экономический эффект трансформации распространяется через несколько каналов. Их важно рассматривать не как прямое арифметическое продолжение одного проекта, а как возможные направления эффекта при переходе от единичного кейса к портфелю проектов глубокой переработки угольного сырья.

Первый канал – ресурсный. Он связан с вовлечением бурых углей в более сложную производственную цепочку. Бурые угли в традиционной модели часто имеют ограниченную сферу применения из-за низкой теплотворной способности, высокой чувствительности к логистике и слабой пригодности для прямого металлургического использования. Производство термококса меняет их функциональную роль: бурый уголь становится не только энергетическим сырьем, но и основой для продукта металлургического назначения.

Второй канал – технологический. Он связан с формированием компетенций глубокой переработки угольного сырья, газификации, контроля качества термококса, интеграции трех контуров. Федеральный закон от 28.12.2024 № 523-ФЗ «О технологической политике в

Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [13] регулирует отношения в сфере формирования технологической политики и содействия развитию технологий. Закон определяет ключевое для настоящего параграфа понятие следующим образом: «…технологическое лидерство Российской Федерации – технологическая независимость Российской Федерации, выражающаяся в разработке отечественных технологий и создании продукции с использованием таких технологий с сохранением национального контроля над критическими и сквозными технологиями на основе собственных линий разработки технологий в целях экспорта конкурентоспособной высокотехнологичной продукции и (или) замещения ею на внутреннем рынке продукции, создаваемой на базе устаревших и (или) иностранных технологий, а также превосходство таких технологий и продукции над зарубежными аналогами» [13, ст. 3]. Формирование компетенций глубокой переработки угольного сырья соответствует этому определению в части собственной линии разработки технологий и экспорта высокотехнологичной продукции, что позволяет рассматривать технологический канал эффекта как вклад в достижение технологического лидерства. В контексте настоящего исследования это позволяет рассматривать проекты глубокой переработки угольного сырья как элемент формирования технологических компетенций, а не только как отдельные инвестиционные инициативы [17].

Третий канал – кооперационный. Российско-китайская производственная конфигурация «добыча и переработка в России – металлургическое применение в Китае» демонстрирует возможность формирования промышленной кооперации, в которой российская ресурсная база используется не только как источник сырья, но и как основа для более сложного продукта, включаемого в трансграничную металлургическую цепочку [216]. Такой подход особенно значим для восточного направления развития промышленной кооперации.

Четвертый канал – регуляторно-стратегический. По мере перехода внешних углеродных механизмов от отчетного к финансовому режиму способность цепочек документировать сырьевые и технологические параметры, управлять удельными затратами и снижать углеродную уязвимость становится фактором экспортной устойчивости [66]. Сравнительная оценка выполнена в

ограниченной проектной границе: снижение составляет 0,2209 т CO_2/т чугуна, или 861,42 тыс. т CO_2/год для базового проекта, что было отмечено в таблице 45. Расчет не является полной LCA; отраслевой и национально-экономический эффект сохраняет статус сценарного потенциала масштабирования.

Пятый канал – структурный. Он связан с перераспределением инвестиционных и технологических приоритетов между сегментами угольной отрасли: глубокая переработка бурых углей может усилить значение активов, ранее считавшихся менее привлекательными по сравнению с коксующимися марками. Сам по себе этот процесс не негативен и не позитивен – он создает возможности для одних сегментов и вызовы для других. Для национальной экономики важно не замещение одного сегмента другим, а более диверсифицированная структура промышленного использования угольной ресурсной базы. Национальная цель «Экологическое благополучие» конкретизирована задачей: «…формирование экономики замкнутого цикла, обеспечивающей к 2030 году сортировку 100 процентов объема ежегодно образуемых твердых коммунальных отходов, захоронение не более чем 50 процентов таких отходов и вовлечение в хозяйственный оборот не менее чем 25 процентов отходов производства и потребления в качестве вторичных ресурсов и сырья» [4, п. 5]. Логика вовлечения в хозяйственный оборот ранее слабо востребованных материальных потоков применима и к бурым углям низкого качества, что дополняет структурный канал эффекта ресурсно-экологическим измерением. Сводная характеристика каналов национально-экономического эффекта представлена в таблице 60.

Национально-экономический эффект имеет потенциальный характер и возникает не от одного проекта, а при масштабировании портфеля сопоставимых инициатив по ресурсному, технологическому, кооперационному, регуляторному, структурному и региональному каналам.

Для количественной иллюстрации возможного перехода от единичного проекта к портфелю применена линейная сценарная иллюстрация масштабирования $X_n = N \times X_1$, где X_1 – расчетный показатель одного проекта, а N – условное число сопоставимых проектов. Сценарии одного, трех и шести проектов не являются прогнозом фактического ввода мощностей и не учитывают портфельные синергии, различия месторождений или ограничения спроса.

Таблица 60 – Направления национально-экономического эффекта трансформации

Канал эффекта	Содержание	Возможный результат	Ограничение интерпретации
Ресурсный	Вовлечение бурых углей в производство термококса вместо ограниченного энергетического использования	Диверсификация способов промышленного использования угольной ресурсной базы	Эффект зависит от качества сырья и технологической пригодности конкретного месторождения
Технологический	Развитие компетенций газификации, контроля качества термококса и интеграции угольного, газификационного и металлургического контуров	Формирование компетенций глубокой переработки угольного сырья как элемента технологической самостоятельности промышленности [18]	Необходимы инженерная отработка, обучение персонала и накопление эксплуатационного опыта
Кооперационный	Связка российской ресурсной базы с металлургическим спросом КНР	Развитие международной промышленной кооперации на восточном направлении	Эффект зависит от логистики, межстрановой координации и наличия потенциального спроса
Регуляторно-стратегический	Снижение будущей уязвимости к внешним углеродным требованиям и отчетности	Повышение устойчивости производственных цепочек при изменении требований внешних рынков	Полная количественная оценка углеродного эффекта требует расчета по всей производственной цепочке; в работе выполнена только сценарная оценка отдельных показателей
Структурный	Возможное изменение роли бурых и коксующихся углей в промышленной системе	Появление нового сегмента глубокой переработки бурых углей	Влияние на добытчиков коксующихся марок требует отдельного анализа
Региональный	Формирование новых компетенций и занятости в угледобывающих территориях	Предпосылки для более плавной технологической трансформации занятости	Количественная оценка занятости, налоговой базы и регионального мультипликатора выполняется в модуле регионального масштабирования

Источник: составлено автором.

Линейная иллюстрация опирается на предпосылку постоянной отдачи: каждый последующий проект требует того же CAPEX и генерирует ту же EBITDA, что и первый. Эта предпосылка в работе не доказана и при тиражировании нарушается по нескольким причинам. Со стороны CAPEX противоположно действуют два фактора: эффект обучения и серийности оборудования снижает удельные вложения для последующих объектов, однако каждый новый объект размещается на менее благоприятном месторождении и в менее обеспеченной инфраструктурой точке, что увеличивает затраты на подготовку сырья и логистическую инфраструктуру. Со стороны EBITDA отдача убывает по трем каналам: рост предложения термококса при ограниченном числе металлургических потребителей смещает цену к нижней границе коридора; увеличение логистического плеча для удаленных месторождений повышает КУЕСЭ и сужает операционный запас, что отражают таблицы Л.1 и Л.2; конкуренция за качественный бурый уголь и квалифицированный персонал повышает операционные затраты. Кроме того, совокупный спрос на термококс ограничен долей замещения кокса в шихте доступных потребителей, поэтому за некоторым числом проектов отдача не убывает, а обрывается.

Альтернативный сценарий с убывающей отдачей, реализация которого вынесена в направления дальнейших исследований, должен включать четыре элемента. Во-первых, ранжирование потенциальных площадок по убыванию качества сырья и логистической доступности, чтобы каждому N-му проекту соответствовали собственные значения Q и L, а не параметры первого. Во-вторых, задание CAPEX как функции порядкового номера проекта с двумя составляющими: кривой обучения для технологической части и надбавкой за инфраструктурную необеспеченность площадки. В-третьих, задание EBITDA через пересчет КУЕСЭ и ценового коридора для каждой площадки с учетом совокупного предложения портфеля и кривой спроса потребителей. В-четвертых, введение ограничения по спросу, определяющего предельное число проектов, за которым масштабирование теряет смысл. В таком сценарии суммарные показатели портфеля растут медленнее, чем пропорционально числу проектов, а линейные значения таблицы 61 следует рассматривать как верхнюю оценку потенциала, а не как ожидаемый результат.

Таблица 61 – Сценарная иллюстрация масштабирования расчетных проектных показателей

Показатель	Единица измерения	Один проект	Три проекта	Шесть проектов	Статус показателя
Производство термококса	млн т/год	2,925	8,775	17,55	Линейное масштабирование проектной мощности
Связанный объем производства чугуна	млн т/год	3,9	11,7	23,4	Линейное масштабирование проектной мощности
CAPEX инвестиционной фазы без НДС	млн руб.	65 806,64	197 419,92	394 839,85	Без учета различий площадок и эффекта масштаба
EBITDA в установившемся режиме	млн руб./год	24 096,76	72 290,29	144 580,59	Механическое тиражирование показателя одного проекта
Налог на прибыль	млн руб./год	4 899,42	14 698,26	29 396,51	Расчет по неокругленному базовому значению
Фонд оплаты труда (далее – ФОТ) производственного персонала, установившийся режим 2031 г.	млн руб./год	1 050,17	3 150,52	6 301,04	Расчет по неокругленному базовому значению
Расчетное сокращение выбросов в принятой границе	млн т CO_2/год	0,86142	2,58426	5,16852	Сценарная оценка, не являющаяся полной LCA

Источник: рассчитано автором по данным организации и расчетной модели.

Таблица 61 представляет сценарный масштаб национально-экономического эффекта при портфельном воспроизведении параметров базового проекта. CAPEX характеризует накопленный объем инвестиций инвестиционной фазы, а EBITDA, налог на прибыль и фонд оплаты труда (далее – ФОТ) – взаимосвязанные годовые показатели финансовой модели, поэтому они приводятся раздельно. Выпуск термококса и связанный выпуск чугуна относятся к одной производственной цепочке. Портфельные значения рассчитаны линейным масштабированием и используются для оценки масштаба при выполнении проектных условий по ресурсной базе, качеству сырья, логистике, металлургическому спросу и доступности капитала. Эффект занятости отражен через ФОТ и развитие компетенций, а точная численность рабочих мест определяется на стадии разработки штатной модели проектов.

Таким образом, на уровне национальной экономики значение модели заключается не в импортозамещении как таковом, поскольку Российская Федерация обладает значительной угольной ресурсной базой, а в диверсификации способов ее промышленного использования [8]. Количественный ориентир, к которому относится рассматриваемый эффект,

задан Указом № 309: «…снижение доли импорта товаров и услуг в структуре валового внутреннего продукта до 17 процентов к 2030 году» [4, п. 6]. Вклад модели в этот ориентир носит косвенный характер: он реализуется через замещение импортируемых технологических решений и продуктов металлургического назначения, а не через сокращение импорта угольного сырья. Глубокая переработка бурых углей позволяет рассматривать уголь не только как экспортируемое или энергетическое сырье, но и как основу для формирования специализированного продукта металлургического назначения. Именно это обстоятельство создает предпосылки для развития новых производственных цепочек, повышения технологической самостоятельности промышленности и снижения зависимости промышленной политики от традиционной структуры угольного спроса [4; 12]. Законодательное определение промышленной политики: «…промышленная политика – комплекс правовых, экономических, организационных и иных мер, направленных на развитие промышленного потенциала Российской Федерации, обеспечение производства конкурентоспособной промышленной продукции» [12, ст. 3]. Рассматриваемая модель встраивается в этот комплекс мер как частный инструмент развития промышленного потенциала угледобывающих регионов через создание конкурентоспособного продукта металлургического назначения. Национальная цель «Технологическое лидерство» раскрыта в Указе Президента РФ № 309 через следующую задачу: «…обеспечение технологической независимости и формирование новых рынков по таким направлениям, как биоэкономика, сбережение здоровья граждан, продовольственная безопасность, беспилотные авиационные системы, средства производства и автоматизации, транспортная мобильность (включая автономные транспортные средства), экономика данных и цифровая трансформация, искусственный интеллект, новые материалы и химия, перспективные космические технологии и сервисы, новые энергетические технологии (в том числе атомные)» [4, п. 7]. Глубокая переработка бурых углей относится к направлениям новых материалов и химии и новых энергетических технологий, что позволяет соотнести технологическую самостоятельность рассматриваемой производственной цепочки с приоритетами национальной цели.

Предложенная модель применима к проектам, где одновременно выполняются несколько условий: наличие пригодной буроугольной ресурсной базы достаточного качества и объема; логистическая связность с металлургическим потребителем при приемлемом плече доставки; технологическая возможность получения термококса с требуемыми параметрами реакционной способности и прочности; наличие металлургического контура, заинтересованного в применении продукта; способность участников к глубокой и долгосрочной координации; наличие институциональной среды, позволяющей управлять инвестиционными и регуляторными рисками. Невыполнение любого из этих условий не означает автоматической нереализуемости проекта, но требует отдельной проверки и, как правило, изменения параметров сценария или организационной схемы взаимодействия. Границы применимости модели и направления дальнейшей проработки представлены в таблице 62.

Таблица 62 – Границы применимости модели и направления дальнейшей проработки

Граница применимости	Содержание	Направление дальнейшей проработки
1	2	3
Статус исходных проектных данных	Расчеты основаны на параметрах бизнес-плана и аналитической модели; данные промышленной эксплуатации используются для последующей калибровки по мере ввода проекта	Актуализация модели по мере накопления фактических данных по добыче, выходу термококса, качеству продукта и денежным потокам
CAPEX и OPEX	Капитальные и операционные затраты использованы как расчетные параметры	Сопоставление расчетных и фактических затрат после выхода проекта на проектную мощность
Углеродный эффект	В принятой проектной границе рассчитывается углеродная уязвимость; полный баланс добычи, переработки, логистики и металлургического применения формируется в LCA-модуле	Проведение отдельной углеродной оценки по всей производственной цепочке
Социальный эффект	Справедливый переход входит в расчет через социальную компоненту как ограничение допустимости сценария; занятость и квалификационная структура оценены качественно	Разработка модели рабочих мест, квалификаций, налоговой базы и регионального мультипликатора
Масштабирование	Перенос модели на другие регионы осуществляется после проверки качества сырья, логистики, спроса, инвестиционных условий и готовности участников к долгосрочной координации	Геологическая, логистическая, технологическая и рыночная оценки для регионов потенциального применения

Продолжение таблицы 62

1	2	3
Рынок коксующихся марок угля	Влияние модели на предприятия, добывающие коксующиеся марки угля, не является предметом настоящего исследования	Отдельный анализ возможного перераспределения спроса между угольными сегментами
Рыночная конъюнктура чугуна и стали	Долгосрочные рынки чугуна и стали не моделируются подробно	Сценарное моделирование спроса и цен на металлургическую продукцию
Валютные и налоговые режимы	Финансовая модель номинирована в рублях для сопоставимости расчетов	Дополнительная модель с учетом валютных, налоговых и межстрановых режимов

Источник: составлено автором.

Модель не является универсальным шаблоном для всех угледобывающих регионов и металлургических предприятий – ее значение состоит в оценке проектов глубокой переработки бурых углей с учетом операционной эффективности, инвестиционной состоятельности, распределения выгод и рисков, региональной применимости и потенциального национально-экономического эффекта.

Сводная оценка экономического эффекта по уровням представлена в таблице 63. Она связывает расчеты параграфов 3.1-3.3 с проверкой Н2, Н3 и основной гипотезы и разграничивает расчетные эффекты базового проекта и сценарные эффекты масштабирования.

Таблица 63 – Сводная оценка экономического эффекта трансформации по уровням

Уровень оценки	Основной эффект	Подтверждающий показатель / результат	Характер результата
1	2	3	4
Операционный	Снижение стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ термококса	$КУЕСЭ_{проект}$ = 60,4%; снижение стоимости 1 ГДж – 39,6%	Количественно подтвержден на параметрах кейса
Имитационный	Более высокая вероятность операционного паритета сценария частичной газификации	Вероятность достижения $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$: термококс – 97,4%; водород – 21,7%	Количественно подтвержден имитационным моделированием методом Монте-Карло
Инвестиционный	Инвестиционная состоятельность проекта	NPV – 6 748,2 млн руб.; IRR – 22,59%; EBITDA в установившемся режиме – 24 096,8 млн руб.	Количественно подтвержден финансовой моделью

Продолжение таблицы 63

1	2	3	4
Региональный	Предпосылки для более плавной трансформации угольной занятости	Формирование новых компетенций добычи, подготовки, газификации, логистики и контроля качества; ФОТ производственного персонала базового проекта в установившемся режиме 2031 г. – 1 050,17 млн руб./год, налог на прибыль – 4 899,42 млн руб./год; численность новых рабочих мест определяется на стадии разработки штатной модели проекта; в диссертации социально-экономический результат отражен через ФОТ и налоговые поступления	Социально-региональный эффект; количественная детализация выполняется в региональном модуле
Отраслевой	Диверсификация способов использования угольной ресурсной базы	Переход от бурого угля как низкокалорийного сырья к термококсу как продукту металлургического назначения; в сценариях 3 и 6 проектов выпуск термококса составляет соответственно 8,775 и 17,550 млн т/год	Обоснован как масштабируемый отраслевой эффект на основе логики модели и параметров кейса; проверяется при портфельной адаптации
Национально-экономический	Формирование новых производственных цепочек и компетенций глубокой переработки	Каналы: ресурсный, технологический, кооперационный, регуляторный, структурный; полный расчет сценариев 1/3/6 проектов приведен в таблице 61; на национально-экономическом уровне он иллюстрируется налогом на прибыль 4,899/14,698/29,397 млрд руб./год и сокращением выбросов в принятой границе 0,861/2,584/5,169 млн т CO_2/год; показатели не суммируются; это линейная иллюстрация потенциала без учета различий площадок и эффекта масштаба	Масштабируемый эффект портфеля проектов
Распределитель-ный	Возможность согласования интересов участников через цену промежуточного продукта	Коридор цены термококса 4 821,9-6 078,1 руб./т; распределяемая синергия – около 3,7 млрд руб./год	Количественно и методически обоснован

Источник: составлено автором.

Практическая значимость модели подтверждается совокупностью взаимодополняющих результатов: операционная устойчивость сценария – через вероятность сохранения операционного паритета при имитационном моделировании, инвестиционная состоятельность конкретного проекта – через NPV, IRR, EBITDA и FCFF, расчетная возможность распределения эффекта – через коридор цены термококса и предложенный механизм распределения рисков. Приведенные CAPEX, EBITDA, налог на прибыль, ФОТ, выпуск

продукции и сокращение выбросов имеют различную экономическую природу и поэтому представлены раздельно; портфельные значения являются линейной сценарной проекцией параметров базового кейса. Отрасле-региональный и национально-экономический эффекты оцениваются через условия масштабирования модели и приведены в таблице 64.

Таблица 64 – Сводное подтверждение практической значимости модели

Основание практической значимости	Что было проверено	Результат	Значение для диссертации
Операционная жизнеспособность	Может ли сценарий частичной газификации сохранять операционный паритет с традиционным коксо-доменным сценарием	Вероятность $К_{УЕСЭ} \leq 100\%$ составляет 97,4%	Обоснован выбор термококсового сценария для инвестиционной оценки конкретного проекта и последующей апробации двухэтапного методического подхода
Инвестицион-ная состоя-тельность	Способен ли конкретный проект генерировать положительный инвестиционный результат	NPV > 0; IRR выше принятой ставки дисконтирования 20%; EBITDA более 23 млрд руб. в установившемся режиме	Показано, что конкретный проект реализации выбранного по критерию операционного паритета сценария имеет положительный расчетный денежный поток
Распредели-тельная устойчивость	Может ли созданный эффект быть распределен без разрушения мотивации участников	Определен коридор цены термококса и распределяемая синергия	Показано, что положительный эффект требует механизма согласования интересов
Региональная применимость	Может ли модель применяться для оценки направлений трансформации угольных территорий	Сформулированы условия применимости модели по сырью, логистике, потребителю и координации	Переход от единичного кейса к условиям применимости модели
Национально-экономическая значимость	Может ли модель иметь значение за пределами проекта	Выделены ресурсный, технологический, кооперационный, регуляторный и структурный каналы	Показано место модели в более широкой повестке промышленной трансформации

Источник: составлено автором.

Таким образом, экономический эффект трансформации угольно-металлургического взаимодействия на основе частичной газификации бурых углей с производством термококса проявляется на нескольких уровнях. На консолидированном уровне проекта он выражается в снижении стоимости 1 ГДж сопоставимой ЭЦ, повышении управляемости сырьевого обеспечения, формировании положительного расчетного денежного потока и наличии положительного инвестиционного результата. На уровне отрасли и угледобывающих регионов он заключается в возможности диверсификации

угольной специализации, вовлечения бурых углей в продукт более высокой степени переработки и формирования предпосылок для более плавной технологической трансформации занятости. На уровне национальной экономики масштабируемый эффект связан с развитием новых производственных цепочек, снижением будущей уязвимости металлургии к внешним углеродным и логистическим ограничениям, а также с формированием компетенций глубокой переработки угольного сырья как элемента технологической самостоятельности промышленности.

Полученные результаты позволяют оценить условия основной гипотезы по каждому из трех проверяемых уровней – операционному, инвестиционному и распределительному. Экономически обоснованный потенциал трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий зависит от выбора технологического сценария, качества сырьевой базы, логистики, инвестиционной состоятельности конкретного проекта и предлагаемого механизма согласования интересов участников. Н2 подтверждена на операционном уровне результатами имитационного моделирования: сценарий частичной газификации бурых углей с производством термококса демонстрирует более высокую вероятность паритета по КУЕСЭ. Отдельная инвестиционная оценка выбранного термококсового проекта дала положительный NPV, IRR выше принятой ставки дисконтирования, PP 6,56 года и DPP 13,39 года при ставке дисконтирования 20%. Водород сохраняется как долгосрочная технологическая альтернатива. По результатам проверки Н3 подтверждена расчетная достижимость согласования интересов через ценовой коридор термококса, распределяемую синергию, матрицу управления рисками и перечень показателей мониторинга. При этом отрасле-региональные и национально-экономические эффекты модели оценены на горизонте масштабирования на портфель сопоставимых проектов.

Выводы по главе 3

1) Имитационное моделирование при одновременном варьировании регуляторных, логистических, сырьевых, организационных и технологических параметров с экономически обоснованной корреляционной структурой выявило кратное, а не процентное различие операционной жизнеспособности сценариев:

вероятность операционного паритета составила 97,4% для частичной газификации и лишь 21,7% для полной, при этом термококсовый сценарий имеет вдвое меньший разброс КУЕСЭ и устойчиво положительный чистый операционный эффект. Узким местом водородного сценария является не рыночная конъюнктура, а инфраструктурное условие, не снимаемое в среднесрочном горизонте. Гипотеза H2 подтверждена на операционном уровне с запасом относительно критерия 90%, и термококсовый сценарий выбран для инвестиционной оценки по заданному критерию отсева, а не по предпочтению технологии; поскольку симметричная инвестиционная оценка водородного сценария не выполнялась, его сравнительное инвестиционное отставание не утверждается.

2) Инвестиционная оценка российско-китайского термококсового проекта на базе Даурского месторождения, выполненная на 20-летней финансовой модели с анализом чувствительности к цене чугуна, операционным затратам, ставке дисконтирования, логистическому коэффициенту и условной цене углерода, подтвердила его состоятельность: КУЕСЭ проекта 60,4%, положительный NPV при барьерной ставке 20%, IRR 22,59%, простой срок окупаемости 6,56 года и дисконтированный 13,39 года. Состоятельность обеспечена сочетанием дешевой ресурсной базы, глубины переработки и приграничного размещения, а не отсутствием углеродных платежей: при введении условной цены углерода операционный паритет сохраняется, но запас сужается, поэтому ужесточение углеродного регулирования в Российской Федерации и КНР следует рассматривать как фактор инвестиционного риска. Наименьший запас прочности проект имеет к цене чугуна, операционным затратам и ставке; длительный дисконтированный срок окупаемости ставит вопрос банкуемости, частично решаемый договорным закреплением сбыта и участием институтов развития. Инвестиционный вывод относится к конкретному проекту и не переносится автоматически на технологический сценарий в целом.

3) Разработан инструментарий согласования интересов участников, три элемента которого – коридор экономически обоснованной цены термококса, матрица распределения рисков по принципу управляемости и система показателей мониторинга и пересмотра соглашения – внедряются

как целое. Нижняя граница коридора определена себестоимостью термококса с амортизацией и минимально приемлемой доходностью угольного и газификационного контуров, верхняя – стоимостью альтернативной закупки для металлургического контура; на параметрах проекта коридор 4 821,9-6 078,1 руб./т не пуст, полный технологико-логистический эффект составляет около 7,6 млрд руб./год, распределяемая между участниками синергия – около 3,7 млрд руб./год. Доля синергии распределяется управленческим параметром соглашения, а не формальным решением переговорной задачи; при ограничении цены внешним рыночным ориентиром пространство согласования резко сужается, поэтому база ценового сравнения должна закрепляться в соглашении заранее. Риски закреплены за контуром, способным ими управлять: сырьевой – за угольным, технологический – за газификационным, логистический после точки передачи – за металлургическим, капитальный, регуляторный и институциональный признаны совместными. Расчетная достижимость согласования интересов в принятой корпоративной границе подтверждает гипотезу Н3.

4) Цепное разложение эффекта по стадиям добычи, газификации, логистики и металлургического применения позволило разграничить экономический эффект трансформации по статусу. На уровне проекта он имеет расчетный статус – снижение стоимости 1 ГДж сопоставимой энергетической ценности на 39,6%, положительный инвестиционный результат, налоговые поступления и занятость; на отрасле-региональном и национальном уровнях – статус сценарного потенциала, реализуемого по ресурсному, технологическому, кооперационному, регуляторно-стратегическому и структурному каналам. Масштабируемость модели определяется не географическим сходством регионов, а совпадением набора условий: сырьевой базы, логистической связности, качества продукта, металлургического спроса, способности к координации и институциональной среды, – что показано на трех типах регионов: приграничном (Забайкальский край), крупном угледобывающем с задачей диверсификации (Кузбасс) и удаленном ресурсном (Якутия). Портфельные оценки для нескольких проектов являются линейной иллюстрацией, а не прогнозом: предпосылка постоянной отдачи при тиражировании нарушается и требует сценария с убывающей отдачей.

5) Последовательное прохождение операционного, инвестиционного и распределительного уровней проверки, заданных в главе 1, подтвердило основную гипотезу по всем трем условиям на материале одного проекта: операционный паритет достигается с вероятностью 97,4% при требуемых 90%, IRR превышает барьерную ставку, ценовой коридор термококса не пуст. Экономически обоснованный потенциал трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий определяется выбором технологического сценария, качеством сырьевой базы, логистикой, инвестиционной состоятельностью конкретного проекта и механизмом согласования интересов участников; водородный сценарий сохраняется как долгосрочная альтернатива, требующая сопоставимой проектной спецификации. Границы доказанного результата зафиксированы явно: углеродный расчет выполнен в проектной границе без стадии добычи и косвенных выбросов, социально-региональные эффекты заданы рамочными показателями, тиражируемость проверена на единственном кейсе.

Заключение

В диссертации решена научная задача разработки теоретических положений и методических инструментов формирования модели трансформации взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе глубокой переработки бурых углей методом газификации. Проведенное исследование показало, что традиционная линейная схема «добыча коксующегося угля – коксование – доменный процесс» сохраняет операционную значимость, однако в условиях низкоуглеродного перехода, роста инвестиционной неопределенности и требований к устойчивости производственных цепочек оказывается недостаточной как долгосрочная модель развития угольно-металлургического комплекса.

По первой задаче обосновано, что трансформация угольно-металлургического взаимодействия должна рассматриваться не как простая замена одного сырьевого продукта другим или выбор одной организационной формы, а как согласование технологического, организационно-экономического и инвестиционно-ценового контура. При переходе к глубокой переработке бурых углей предметом координации становятся качество сырья, параметры переработки, логистика, инвестиционные обязательства, внутренняя цена промежуточного продукта и распределение экономического эффекта между участниками производственной цепочки.

По второй задаче разработана метрика УЕСЭ – условная единица сопоставимой энергетической ценности. Метрика переводит расчет от прямого сопоставления цен на тонну коксующегося угля, водорода и термококса к оценке стоимости 1 ГДж энергетической ценности, используемой в металлургическом переделе. УЕСЭ использована как первый уровень проверки операционной жизнеспособности технологических сценариев; при этом капитальные затраты и инвестиционная состоятельность проекта оценивались отдельно через NPV, IRR, FCFF, EBITDA и срок окупаемости. УЕСЭ включает четыре компоненты: энергетическую, логистическую, сценарную углеродную и прочую операционную. Восстановительная способность в метрику не входит и проверяется инженерно: это заданное ограничение УЕСЭ, разобранное в параграфе 2.1, оно требует отдельного обязательного этапа инженерно-

технологической верификации между операционным отбором и DCF. Экологические и социально-региональные эффекты также оцениваются отдельно.

По третьей задаче определены и экспертно уточнены пороговые условия жизнеспособности сценариев полной и частичной газификации бурых углей. Экспертный опрос 73 специалистов из металлургических предприятий, угледобывающих компаний и инвестиционно-институционального блока показал, что оба сценария достигают операционного паритета при соблюдении пороговых условий, но обладают различными профилями ограничений. Внутренняя согласованность использованных шкал подтверждена значениями α Кронбаха 0,916 и 0,952, а расхождение профилей ограничений разбирается ниже. Полная газификация с получением водорода сильнее зависит от специализированной инфраструктуры, короткого логистического плеча и высокого уровня внешнего регуляторного стимула. Частичная газификация с производством термококса предъявляет повышенные требования к качеству сырья и координации участников, но в большей степени совместима с существующей промышленной и логистической инфраструктурой.

По четвертой задаче проведено имитационное и инвестиционное моделирование выбранного сценария. Моделирование методом Монте-Карло в MS Excel показало, что вероятность достижения операционного паритета по критерию КУЕСЭ ≤ 100% составляет 21,7% для сценария полной газификации и 97,4% для сценария частичной газификации. Это стало основанием для выбора частичной газификации бурых углей с производством термококса в качестве базового сценария для прикладной апробации на среднесрочном горизонте. На параметрах российско-китайского проекта получено значение $КУЕСЭ_{проект}$ = 60,4%, NPV = 6 748,2 млн руб., IRR = 22,59%, EBITDA в устойчивом режиме = 24 096,8 млн руб., PP = 6,56 года, DPP при 20% = 13,39 года; накопленный проектный денежный поток с учетом НДС становится положительным в восьмой проектный год. Указанные показатели относятся к базовому случаю с нулевой ценой углерода; при условной цене углерода до 8 000 руб./т CO_2 КУЕСЭпроект возрастает до 81,8% при сохранении операционного паритета, а инвестиционные показатели при ненулевой цене углерода в работе не пересчитывались. Следовательно, операционное

преимущество термококсового сценария служит основанием для его выбора, а положительные инвестиционные показатели подтверждают состоятельность выбранного проекта при заданных предпосылках с оговоркой о возможном ужесточении углеродного регулирования в Российской Федерации и КНР как факторе снижения запаса доходности.

По пятой задаче предложен механизм распределения выгод и рисков между угольным/газификационным и металлургическим контурами. Установлено, что положительный интегральный эффект проекта сам по себе не обеспечивает долгосрочную устойчивость взаимодействия участников. Для этого необходим экономически обоснованный коридор цены промежуточного продукта – термококса. В рассматриваемом кейсе такой коридор составляет 4 821,9-6 078,1 руб./т, а паритетная цена при $\alpha = 0,5$ равно 5 450,0 руб./т. Полный технологико-логистический эффект оценивается примерно в 7,6 млрд руб./год, а распределяемая синергия после обеспечения минимальной доходности угольно-газификационного контура – около 3,7 млрд руб./год. Устойчивость этого коридора ограничена: за границей, рассчитанной в таблицах Л.1 и Л.2, нижняя оценка уходит под себестоимость угольного контура, и механизм требует пересмотра базы расчета. Паритетная цена – результат допущения о равном вкладе сторон, а не расчетного оптимума.

Основная гипотеза исследования подтверждена по принятой двухэтапной схеме проверки в границах заданных предпосылок и на материале одного проекта. Установлено, что трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе газификации бурых углей экономически возможна при достижении операционного паритета, инвестиционной состоятельности выбранного сценария и наличии механизма внутреннего ценообразования, согласующего интересы участников. На рассматриваемом среднесрочном горизонте частичная газификация бурых углей с производством термококса является более реализуемой траекторией по операционному критерию, при этом водородное направление сохраняется как самостоятельный долгосрочный инвестиционный контур, требующий сопоставимой проектной DCF-спецификации.

Отличие авторского подхода от ранее известных решений состоит в том, что технологическая переработка бурых углей, операционная сопоставимость продуктов, инвестиционная состоятельность и межфирменное распределение

эффекта рассматриваются совместно. В литературе декарбонизация металлургии, газификация угля, межфирменная координация и устойчивое развитие угольных территорий чаще анализируются как самостоятельные направления. В диссертации предложена модель, связывающая эти элементы в единую исследовательскую логику и позволяющая определить, при каких условиях глубокая переработка бурых углей может стать экономически обоснованной формой угольно-металлургического взаимодействия.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности применения разработанного подхода при оценке проектов глубокой переработки бурых углей, выборе технологической траектории, расчете операционного паритета, проверке инвестиционной состоятельности и согласовании цены промежуточного продукта. Методика УЕСЭ позволяет предварительно сопоставлять разнородные технологические продукты, финансовая модель – оценивать инвестиционный результат, механизм ценового коридора – распределять выгоды и риски между участниками производственной цепочки. Исследование дает не только теоретическое обоснование трансформации, но и прикладной инструментарий для подготовки капиталоемких промышленных проектов.

Полученные результаты обосновывают потенциальный вклад рассматриваемого подхода в реализацию низкоуглеродных сценариев угольно-металлургического взаимодействия и достижение целей устойчивого развития ООН; этот вклад подтвержден расчетно в части операционного и инвестиционного контуров и обоснован качественно в части экологического и социально-регионального результата. Модель трансформации и метрика УЕСЭ формируют инструмент выбора сценариев; экологический результат представлен расчетной оценкой сравнительной углеродной уязвимости в заданной проектной границе «передел – логистика – применение», не включающей стадию добычи, косвенные выбросы и последующие переделы, и не является полной оценкой жизненного цикла, а социально-региональный блок задает показатели занятости, налоговой базы и диверсификации для количественной адаптации к конкретному региону.

Границы доказанного результата следует зафиксировать явно. Расчетами и экспертной валидацией в работе подтверждены: операционная жизнеспособность

сценариев полной и частичной газификации бурых углей по метрике УЕСЭ и более высокая вероятность операционного паритета термококсового сценария; инвестиционная состоятельность конкретного термококсового проекта при заданных предпосылках; работоспособность коридора внутренней цены термококса как расчетного ядра инструментария согласования интересов. Качественно обоснованы и вынесены в направления дальнейших исследований: полный углеродный баланс сценария, оцененный в работе только в заданной проектной границе; количественная оценка социально-региональных эффектов, представленная рамочными показателями; тиражируемость результатов на другие регионы и проекты, проверенная только на одном конкретном кейсе; устойчивость результатов имитационного моделирования к альтернативным спецификациям корреляционной структуры, параметры которой приняты экспертно и проверены только стрессом ±0,50. Выводы о вкладе трансформации в достижение устойчивого развития следует рассматривать в этих границах.

Дальнейшая апробация разработанного инструментария предусматривает калибровку расчетной модели по данным промышленной эксплуатации, расширение углеродного расчета до полной LCA цепочки «добыча – переработка – логистика – металлургическое применение» развитие регионального модуля занятости, налоговой базы и мультипликативного эффекта, а также количественную оценку порога банкуемости проекта при различных структурах и стоимости финансирования. При переносе модели на другие регионы последовательно проверяются качество сырья, логистическая связность, наличие металлургического потребителя, инвестиционные условия и готовность участников к долгосрочной координации. Такая последовательность задает практический алгоритм тиражирования результатов исследования.

Перспективы дальнейших исследований включают четыре направления. Первое – построение полного углеродного баланса термококсового сценария с учетом добычи, подготовки сырья, газификации, логистики и металлургического применения. Дальше по значимости стоит региональная модель социально-экономических эффектов: занятость, переподготовка кадров, налоговая база и инфраструктурный мультипликатор заданы сейчас рамочно, а именно они определяют политическую реализуемость проекта. Сравнение термококсового сценария с водородной металлургией, электрометаллургией и технологиями

улавливания углерода – задача следующего цикла: она требует отдельной проектной спецификации. Открытым остается и вопрос отраслевого уровня – анализ влияния глубокой переработки бурых углей на структуру спроса на коксующиеся марки угля и стратегии адаптации угольных компаний.

Бурый уголь становится экономически осмысленным сырьем для металлургии не тогда, когда появляется технология его переработки – она уже есть, – а тогда, когда стороны договариваются о цене промежуточного продукта. Технологическая задача решена раньше экономической. Именно поэтому центр тяжести исследования пришелся на инструментарий согласования интересов, а не на выбор технологии.

Список сокращений и условных обозначений

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения и обозначения

ВАК – Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации;

КНР – Китайская Народная Республика;

КУЕСЭ – Коэффициент сопоставимой энергетической ценности;

НДС – Налог на добавленную стоимость;

НИОКР – Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;

НТС – Низшая теплота сгорания;

ОДДС – Отчет о движении денежных средств;

ООН – Организация Объединенных Наций;

ОФ – Обогатительная фабрика;

РФ – Российская Федерация;

СУЭК – Сибирская угольная энергетическая компания;

ТЭЦ – Теплоэлектроцентраль;

УЕСЭ – Условные единицы сопоставимой энергетической ценности;

УКЕП – Уточняющий коэффициент экономической применимости проекта;

ФЗ – Федеральный закон;

ЦУР – Цели устойчивого развития;

ЮАР – Южно-Африканская Республика;

CAPEX – Капитальные затраты (Capital Expenditure);

CF – Модель денежных потоков (Cash Flow);

CTG – Переработка угля в газообразные продукты (Coal-to-Gas);

CTL – Переработка угля в жидкое топливо (Coal-to-Liquids);

DCF – Метод дисконтированных денежных потоков (Discounted Cash Flow);

DPP – Дисконтированный срок окупаемости (Discounted Payback Period);

DRI – Железо прямого восстановления (Direct Reduced Iron);

EAF – Электродуговая печь (Electric Arc Furnace);

EBITDA – Прибыль до вычета процентов, налогов и амортизации;

ETS – Система торговли квотами на выбросы (Emissions Trading System);

FCA – Условия поставки «франко-перевозчик» по Инкотермс (Free Carrier);

FCFF – Свободный денежный поток фирмы (Free Cash Flow to Firm);

HYBRIT – Шведский проект бескоксового производства стали с использованием водорода (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology);

IGCC – Парогазовый цикл с внутрицикловой газификацией угля (Integrated Gasification Combined Cycle);

IRR – Внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return);

KPI – Ключевые показатели эффективности (Key Performance Indicators);

LCA – Оценка жизненного цикла (Life Cycle Assessment);

LCOE – Приведенные затраты на единицу выработанной электроэнергии (Levelized Cost of Electricity);

LCOS – Приведенные затраты на единицу энергии, прошедшей через накопитель (Levelized Cost of Storage);

NPV – Чистая приведенная стоимость (Net Present Value);

OPEX – Операционные затраты (Operating Expenditure);

P&L – Отчет о прибылях и убытках (Profit and Loss);

PP – Простой срок окупаемости (Payback Period);

ROM – Рядовой уголь без обогащения (Run-of-Mine);

TCO – Затраты владения активом за жизненный цикл;

TGR-BF – Доменная печь с рециркуляцией колошникового газа (Top Gas Recycling Blast Furnace);

VRIN – Ценность, редкость, неимитируемость, незаменимость (Valuable, Rare, Inimitable, Non-substitutable);

WACC – Средневзвешенная стоимость капитала (Weighted Average Cost of Capital).

Список литературы

Нормативные правовые акты, стратегические и методические документы, стандарты

1. ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 45 с. – ISBN отсутствует.

2. ИТС 26-2020. Производство чугуна, стали и ферросплавов : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям / Бюро наилучших доступных технологий. – Москва : Бюро НДТ, 2020. – Текст : электронный. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=795&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 13.07.2026).

3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов : утверждены Минэкономики России, Минфином России, Госстроем России 21 июня 1999 г. № ВК 477 : вторая редакция. – Москва : Экономика, 2000. – 421 с. – ISBN отсутствует.

4. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года [Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309]. – Информационно-правовой портал «Гарант.ру». – Текст : электронный. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408892634/ (дата обращения: 13.07.2026).

5. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации [Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812]. – Официальный интернет-портал правовой информации. – Текст : электронный. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260012 (дата обращения: 13.07.2026).

6. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р в ред. от 21 октября 2024 г.]. – Справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355241/ (дата обращения: 13.07.2026).

7. Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р]. – Официальный сайт Правительства Российской Федерации. – Текст : электронный. – URL: https://government.ru/docs/all/157308/ (дата обращения: 13.07.2026).

8. Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 июля 2024 г. № 1838-р]. – Официальный интернет-портал правовой информации. – Текст : электронный. – URL: https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202407290031 (дата обращения: 05.08.2026).

9. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р]. – Справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/ (дата обращения: 13.07.2026).

10. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р]. – Официальный сайт Правительства Российской Федерации. – Текст : электронный. – URL: http://government.ru/docs/54754/ (дата обращения: 13.07.2026).

11. Российская Федерация. Законы. О недрах : Закон Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1. – Справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/ (дата обращения: 13.07.2026).

12. Российская Федерация. Законы. О промышленной политике в Российской Федерации : Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ. – Справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173119/ (дата обращения: 13.07.2026).

13. Российская Федерация. Законы. О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные

акты Российской Федерации : Федеральный закон от 28 декабря 2024 г. № 523-ФЗ. – Официальный интернет-портал правовой информации. – Текст : электронный. – URL: https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202412280025 (дата обращения: 13.07.2026).

14. Российская Федерация. Законы. Об ограничении выбросов парниковых газов : Федеральный закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ. – Справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/ (дата обращения: 13.07.2026).

15. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ. – Справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 13.07.2026).

16. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений : утверждена Постановлением Госплана СССР № 40, Госстроя СССР № 100, Президиума АН СССР № 33 от 8 сентября 1969 г. – Москва : Экономика, 1969. – 14 с. – ISBN отсутствует.

Русскоязычные книги и статьи

17. Абдикеев, Н.М. Развитие высокотехнологичных отраслей промышленности как локомотива экономического роста России / Н.М. Абдикеев, О.М. Абросимова // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. – 2023. – № 3. Том 12. – С. 46-53. – ISSN 2225-8264. – Текст : электронный. – DOI 10.24412/2225-8264-2023-3-46-53. – URL: https://sano.elpub.ru/jour/article/view/582 (дата обращения: 05.08.2026).

18. Абдикеев, Н.М. Экономика, основанная на знаниях, и инновационное развитие / Н.М. Абдикеев // Вестник Финансового университета. – 2014. – № 5 (83). – С. 16-26. – ISSN 2619-1482. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://financetp.fa.ru/jour/article/view/446 (дата обращения: 05.08.2026).

19. Бармашов, К.С. Формирование экономического механизма инновационно-инвестиционного процесса в условиях устойчивого развития предприятия / К.С. Бармашов, Л.В. Бармашова, Т.С. Викторова. – Вязьма : Филиал МГИУ, 2013. – 120 с. – ISBN 978-5-906253-11-8.

20. Башмаков, И.А. Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в черной металлургии / И.А. Башмаков, Д.О. Скобелев, К.Б. Борисов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – № 9. Том 77. – С. 1071-1086. – ISSN 0135-5910.

21. Башмаков, И.А. Углеродное регулирование в ЕС и российский сырьевой экспорт / И.А. Башмаков // Вопросы экономики. – 2022. – № 1. – С. 90-109. – ISSN 0042-8736.

22. Бобылев, С.Н. Устойчивое развитие: парадигма для будущего / С.Н. Бобылев // Мировая экономика и международные отношения. – 2017. – № 3. Том 61. – С. 107-113. – ISSN 0131-2227.

23. Виленский, П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика : учебное пособие / П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. – 5-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Поли Принт Сервис, 2015. – 1294 с. – ISBN 978-5-904466-17-6.

24. Винслав, Ю.Б. Интеграционное взаимодействие компаний горно-металлургического комплекса / Ю.Б. Винслав, Д.А. Лунькин // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2010. – № 3. – С. 25-36. – ISSN 2075-1826.

25. Гилева, Т.А. Оценка уровня зрелости инновационной экосистемы территории: методические основы и инструменты / Т.А. Гилева // π-Economy. – 2024. – № 4. Том 17. – С. 53-67. – ISSN 2782-6015. – Текст : электронный. – DOI 10.18721/JE.17403. – URL: https://economy.spbstu.ru/article/2024.108.3/ (дата обращения: 05.08.2026).

26. Гилева, Т.А. Разработка стратегии цифровой трансформации предприятия с учетом возможностей бизнес-экосистем / Т.А. Гилева, А.В. Бабкин, Г.А. Гилев // Экономика и управление. – 2020. – № 6. Том 26. – С. 629-642. – ISSN 1998-1627.

27. Гилева, Т.А. Стратегические аспекты выбора проекта развития предприятия: модели и инструменты / Т.А. Гилева, М.П. Галимова // π-Economy. – 2016. – № 4 (246). – С. 135-146. – ISSN 2782-6015. – Текст : электронный. – DOI 10.5862/JE.246.12. – URL: https://economy.spbstu.ru/article/2016.60.12/ (дата обращения: 05.08.2026).

28. Гилева, Т.А. Фреймворк разработки цифровой стратегии промышленного предприятия: принципы, методы и инструменты / Т.А. Гилева // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2023. – № 4. Том 14. – С. 340-351. – ISSN 2618-947X.

29. Гумерова, Г.И. Анализ управления технологическими инновациями на промышленных российских предприятиях: источники финансирования, инновационная стратегия / Г.И. Гумерова, Э.Ш. Шаймиева // Актуальные проблемы экономики и права. – 2012. – № 3 (23). – С. 93-103. – ISSN 2410-0390. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://www.rusjel.ru/jour/article/view/1845 (дата обращения: 05.08.2026).

30. Гумерова, Г.И. Экономические основы инновационного развития нефтехимического комплекса региона : специальность 08.00.05. Экономика и управление народным хозяйством (региональная экономика) : диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / Гумерова Гюзель Исаевна ; Нижегородский институт менеджмента и бизнеса. – Нижний Новгород, 2006. – 338 с. – Библиогр. с. 322-338.

31. Гурков, И.Б. Воздействие интегрированных структур управления на инновационное развитие промышленных предприятий / И.Б. Гурков // Российский журнал менеджмента. – 2017. – № 2. Том 15. – С. 193-216. – ISSN 1729-7427.

32. Дамодаран, А. Инвестиционная оценка: инструменты и методы оценки любых активов / А. Дамодаран ; перевод с английского. – Москва : Альпина Паблишер, 2022. – 1320 с. – ISBN 978-5-9614-6650-8.

33. Диксит, А. Инвестиции в условиях неопределенности / А. Диксит, Р. Пиндайк ; перевод с английского. – Москва : Дело, 2004. – 632 с. – ISBN 5-7749-0397-X.

34. Доброхотова, М.В. Особенности перехода российской угольной промышленности к наилучшим доступным технологиям / М.В. Доброхотова // Уголь. – 2022. – № 9. – С. 34-40. – ISSN 0041-5790.

35. Железнодорожный транспорт России : итоги 2025 года / Институт проблем естественных монополий : сайт. – 2025. – Текст : электронный. – URL: https://ipem.ru/content/zheleznodorozhnyy-transport-rossii-itogi-2025-goda/ (дата обращения: 05.08.2026).

36. Исламов, С.Р. Перспективы термического обогащения бурых углей методом частичной газификации / С.Р. Исламов // Уголь. – 2015. – № 4. – С. 62-66. – ISSN 0041-5790.

37. Исламов, С.Р. Экологические аспекты современных технологий энерготехнологической переработки угля / С.Р. Исламов, С.Г. Баякин, И.О. Михалев // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности. – 2009. – № 6. Том 14. – С. 185-188. – ISSN 1605-4369.

38. Исламов, С.Р. Энерготехнологическая переработка углей : монография / С.Р. Исламов. – Красноярск : Поликор, 2010. – 224 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-91502-016-9.

39. Исламов, С.Р. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «Термококс» : специальность 05.14.04. Промышленная теплоэнергетика : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Исламов Сергей Романович ; Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2010. – 366 с. – Библиогр. с. 355-366.

40. Исмагилова, Л.А. Структурная интеграция как методология организационных инноваций / Л.А. Исмагилова, Т.А. Гилева, Л.В. Ситникова // π-Economy. – 2012. – № 4 (151). – С. 21-26. – ISSN 2782-6015. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://economy.spbstu.ru/article/2012.34.3/ (дата обращения: 05.08.2026).

41. Йескомб, Э.Р. Принципы проектного финансирования / Э.Р. Йескомб ; перевод с английского И.В. Васильевской. – Москва : Альпина Паблишер, 2015. – 417 с. – ISBN 978-5-9614-1721-0.

42. Катунин, В.В. Основные показатели работы черной металлургии России в 2018 г. / В.В. Катунин, Н.Г. Зиновьева, Т.М. Петракова [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 3. Том 75. – С. 293-315. – ISSN 0135-5910.

43. Клейнер, Г.Б. Системная экономика. Шаги развития : монография / Г.Б. Клейнер. – Москва : Научная библиотека, 2021. – 746 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-907242-87-6.

44. Кузнецов, Н.В. Развитие методологии управления финансовым обеспечением электроэнергетических компаний : специальность 08.00.10. Финансы, денежное обращение и кредит : диссертация на соискание ученой

степени доктора экономических наук / Кузнецов Николай Владимирович ; Финансовый университет. – Москва, 2016. – 189 с. – Библиогр. с. 170-189.

45. Кузьмина, О.Ю. Оценка инвестиционной привлекательности горнодобывающей компании (на примере ПАО «Распадская») / О.Ю. Кузьмина, М.Е. Коновалова, С.А. Жиронкин [и др.] // Уголь. – 2024. – № 9. – С. 42-46. – ISSN 0041-5790.

46. Куликова, М.П. Развитие малотоннажной углехимии на основе инноваций в Республике Тыва / М.П. Куликова, Г.Ф. Балакина // Уголь. – 2021. – № 6. – С. 40-43. – ISSN 0041-5790.

47. Куликова, М.П. Состояние технологий коксования углей / М.П. Куликова // Природные ресурсы, среда и общество. – 2020. – № 2 (6). – С. 70-76. – ISSN 2658-4441. – Текст : электронный. – DOI 10.24411/2658-4441-2020-10018. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-tehnologiy-koksovaniya-ugley (дата обращения: 05.08.2026).

48. Курносова, Е.А. Анализ основных показателей инновационного развития промышленного комплекса Российской Федерации / Е.А. Курносова // Экономика и управление : проблемы, решения. – 2020. – № 1 (97). Том 1. – С. 91-95. – ISSN 3033-7984. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://s-lib.com/issues/eiu_2020_01_t1/ (дата обращения: 05.08.2026).

49. Линдер, Н.В. Трансформация инновационного поведения российских промышленных предприятий в условиях четвертой промышленной революции : специальность 08.00.05. Экономика и управление народным хозяйством : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора экономических наук / Линдер Наталия Вячеславовна ; Финансовый университет. – Москва, 2021. – 52 с. – Библиогр. с. 50-52. – Место защиты: Финансовый университет.

50. Линдер, Н.В. Формирование инновационных режимов в промышленности / Н.В. Линдер // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2020. – № 3. Том 11. – С. 272-285. – ISSN 2618-947X.

51. Литвак, Б.Г. Экспертные технологии в управлении : учебное пособие / Б.Г. Литвак. – Москва : Дело, 2004. – 400 с. – ISBN 5-7749-0347-8.

52. Литвиненко, В.С. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко,

П.С. Цветков, М.В. Двойников, Г.В. Буслаев // Записки Горного института. – 2020. – Том 244. – С. 428-438. – ISSN 2411-3336.

53. Логинов, Д.А. Повышение эффективности процесса автотермической переработки угля в кипящем слое / Д.А. Логинов, С.В. Деменчук, С.Р. Исламов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2021. – № 4. Том 14. – С. 408-415. – ISSN 2313-6057. – Текст : электронный. – DOI 10.17516/1999-494X-0321. – URL: https://journal.sfu-kras.ru/en/article/141365 (дата обращения: 05.08.2026).

54. Логинов, Д.А. Экологическая безопасность технологий серии «Термококс» / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, С.Г. Степанов [и др.] // Уголь. – 2024. – № 8. – С. 76-81. – ISSN 0041-5790.

55. Макаров, И.А. Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России / И.А. Макаров, Х. Чен, С.В. Пальцев // Вопросы экономики. – 2018. – № 4. – С. 76-94. – ISSN 0042-8736.

56. Марголин, А.М. Экономическая оценка инвестиционных проектов : учебник / А.М. Марголин. – Москва : Экономика, 2007. – 367 с. – ISBN 978-5-282-02743-3.

57. Мешков, Г.Б. Итоги работы угольной промышленности России за январь – июнь 2024 года / Г.Б. Мешков, И.Е. Петренко, Д.А. Губанов // Уголь. – 2024. – № 9. – С. 5-16. – ISSN 0041-5790.

58. Михалев, И.О. Экспериментальное исследование обращенного процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном и кислородном дутье / И.О. Михалев, С.Р. Исламов, С.Г. Баякин // Химия твердого топлива. – 2009. – № 6. – С. 44-52. – ISSN 0023-1177.

59. Норт, Д. Институты, институциональные изменения и функционирование экономики / Д. Норт ; перевод с английского. – Москва : Фонд экономической книги «Начала», 1997. – 180 с. – ISBN 5-88581-006-0.

60. Оболенская, Л.В. Научно-технологические конкурентные преимущества и факторы их формирования / Л.В. Оболенская, Н.М. Абдикеев // Друкеровский вестник. – 2019. – № 4 (30). – С. 57-69. – ISSN 2312-6469. – Текст : электронный. – DOI 10.17213/2312-6469-2019-4-57-69. – URL: https://drucker.npi-tu.ru/ru/archive/2019/vyipusk-4-2019/naczionalnyie-innovaczionnyie-sistemy/nauchno-

tekhnologicheskiye-konkurentnyye-preimushchestva-i-faktory-ikh-formirovaniya (дата обращения: 05.08.2026).

61. Паштова, Л.Г. Инновационная деятельность российских компаний: проблемы и перспективы / Л.Г. Паштова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Том 20. – С. 2196-2200. – ISSN 2304-120X. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: http://e-koncept.ru/2014/54703.htm (дата обращения: 13.07.2026).

62. Паштова, Л.Г. О влиянии корпоративного венчурного капитала на инновационное развитие экономики России / Л.Г. Паштова // Финансы: теория и практика. – 2021. – № 3. Том 25. – С. 53-65. – ISSN 2221-1632. – Текст : электронный. – DOI 10.26794/2587-5671-2021-25-3-53-65. – URL: https://financetp.fa.ru/jour/article/view/1232 (дата обращения: 05.08.2026).

63. Петров, И.В. Предложения по декарбонизации угольной промышленности и устойчивому развитию обособленных регионов на основе подземной газификации угля / И.В. Петров, И.И. Уткин, В.Б. Джайянт // Уголь. – 2022. – № 9. – С. 41-46. – ISSN 0041-5790.

64. 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. – ISSN 0017-2278.

65. Плакиткин, Ю.А. Парижское соглашение как фактор ускорения энергетического перехода: меры по адаптации угольной отрасли к новым вызовам / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина // Уголь. – 2021. – № 10. – С. 19-23. – ISSN 0041-5790.

66. Плакиткин, Ю.А. Прогноз развития мирового и отечественного рынка угля под воздействием тенденций «зеленой» энергетики и санкционных ограничений / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина, К.И. Дьяченко // Уголь. – 2023. – № 8. – С. 66-72. – ISSN 0041-5790.

67. Поппер, К.Р. Логика научного исследования / К.Р. Поппер ; перевод с английского под общей редакцией В.Н. Садовского. – Москва : Республика, 2004. – 447 с. – ISBN 5-250-01903-X.

68. Портер, М.Е. Конкурентная стратегия: методика анализа отраслей и конкурентов / М.Е. Портер ; перевод с английского. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 453 с. – ISBN 978-5-9614-5752-0.

69. Порфирьев, Б.Н. Возможности и риски политики климатического регулирования в России / Б.Н. Порфирьев, А.А. Широв, А.Ю. Колпаков [и др.] // Вопросы экономики. – 2022. – № 1. – С. 72-89. – ISSN 0042-8736.

70. Пыжева, Ю.И. Социально-экономическое разнообразие моногородов Сибири и Дальнего Востока : статистический анализ / Ю.И. Пыжева, Е.В. Зандер // Проблемы развития территории. – 2019. – № 3 (101). – С. 49-61. – ISSN 2076-8915.

71. Реальный сектор экономики в условиях новой промышленной революции : монография / Н.В. Линдер, А.В. Трачук, Г.Г. Налбандян [и др.] ; под редакцией М.А. Эскиндарова, Н.М. Абдикеева. – Москва : Когито-Центр, 2019. – 428 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-89353-551-8.

72. Рогинко, С.А. Парижское соглашение и российская металлургия: время снижать риски и стимулировать энергосбережение / С.А. Рогинко, Л.Н. Шевелев // Сталь. – 2018. – № 12. – С. 61-66. – ISSN 0038-920X.

73. Свадковский, В.А. Водородная металлургия: трансформация взаимодействия угольных шахт и сталелитейных заводов в контексте устойчивого развития / В.А. Свадковский // Экономика строительства. – 2025. – № 4. – С. 283-287. – ISSN 0131-7768.

74. Свадковский, В.А. Гибридные модели энергоперехода: совмещение традиционного угля и водородных технологий в металлургии / В.А. Свадковский // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 4. – С. 360-365. – ISSN 2307-180X.

75. Свадковский, В.А. Двухэтапный методический подход к обоснованию сценария глубокой переработки бурых углей / В.А. Свадковский // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2026. – № 7А. Том 16. – С. 47-72. – ISSN 2222-9167.

76. Свадковский, В.А. Механизм согласования интересов участников низкоуглеродной промышленной цепочки: ценовой коридор промежуточного продукта глубокой переработки бурых углей / В.А. Свадковский // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2026. – № 7А. Том 16. – С. 15-46. – ISSN 2222-9167.

77. Свадковский, В.А. Сравнительная оценка технологий глубокой переработки углей в энергетических целях: метрика сопоставимой энергетической ценности и вероятностная оценка операционного паритета / В.А. Свадковский // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2026. – № 6А. Том 16. – С. 720-746. – ISSN 2222-9167. – Текст : электронный. – DOI 10.34670/AR.2026.40.35.106/ – URL: http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2026-6/b65-svadkovskii.pdf (дата обращения: 10.09.2026).

78. Свадковский, В.А. Термококс или водород: сравнительный анализ технологий декарбонизации металлургического производства / В.А. Свадковский // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 4. – С. 366-370. – ISSN 2307-180X.

79. Свадковский, В.А. Экономическая целесообразность перепрофилирования заброшенных угольных шахт в интересах устойчивого развития / В.А. Свадковский // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2023. – № 8. – С. 230-233. – ISSN 2221-1373. – Текст : электронный. – DOI 10.23672/SAE.2023.52.64.026. – URL: https://online-science.ru/userfiles/file/svadkovskij_v_a__ehkonomicheskaya_celesoobraznost_pereprofilirovaniya_zabroshennyh_ugolnyh_shaht_v_interesah_ustojchivogo_razvitiya_xl88agj0xx.pdf (дата обращения: 10.09.2026).

80. Степанов, С.Г. Газификация бурых углей как направление технологической трансформации угледобывающих регионов / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов // Уголь. – 2021. – № 11. – С. 50-55. – ISSN 0041-5790.

81. Тироль, Ж. Рынки и рыночная власть: теория организации промышленности / Ж. Тироль ; перевод с английского языка – Санкт-Петербург : Экономическая школа, 1996. – 745 с. – ISBN 5-900428-28-1.

82. Товаровский, И.Г. Перспективы снижения расхода кокса в доменных печах путем совершенствования дутьевых параметров / И.Г. Товаровский, А.П. Пухов, Ю.С. Юсфин // Сталь. – 1989. – № 8. – С. 8-15. – ISSN 0038-920X.

83. Томпсон, А.А. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации : учебник для вузов / А.А. Томпсон, А.Дж. Стрикленд ; перевод с английского. – Москва : Инфра-М, 2001. – 412 с. – ISBN 5-16-000166-2.

84. Трансформация промышленности в условиях четвертой промышленной революции : монография / А.В. Трачук, Н.В. Линдер,

И.В. Тарасов [и др.] ; под редакцией А.В. Трачука. – Санкт-Петербург : Реальная экономика, 2018. – 148 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-9216-2287-6.

85. Трачук, А.В. Влияние финансового капитала на трансформацию инновационного поведения промышленных компаний / А.В. Трачук, Н.В. Линдер // Финансы : теория и практика. – 2021. – № 1. Том 25. – С. 51-69. – ISSN 2221-1632.

86. Трачук, А.В. Инновации и их классификации в промышленности: подход к построению новой типологии / А.В. Трачук, Н.В. Линдер // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2019. – № 4. Том 10. – С. 296-305. – ISSN 2618-947X.

87. Трачук, А.В. Инновации и производительность: эмпирическое исследование факторов, препятствующих росту методом продольного анализа / А.В. Трачук, Н.В. Линдер // Управленческие науки. – 2017. – № 3. Том 7. – С. 43-58. – ISSN 2304-022X.

88. Трачук, А.В. Инновационная деятельность промышленных компаний: измерение и оценка эффективности / А.В. Трачук, Н.В. Линдер // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2019. – № 2. Том 10. – С. 108-121. – ISSN 2618-947X.

89. Трачук, А.В. Интеграция угледобывающего и металлургического секторов: трансформация партнерских моделей в целях устойчивого развития / А.В. Трачук, В.А. Свадковский // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2025. – № 1. Том 16. – С. 20-34. – ISSN 2618-947X.

90. Трачук, А.В. Четвертая промышленная революция: как влияет интернет вещей на взаимодействие промышленных компаний с партнерами? / А.В. Трачук, Н.В. Линдер // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 3 (108). – С. 16-29. – ISSN 2618-947X.

91. Углеродная нейтральность в России: траектории до 2060 года / ЦЭНЭФ-XXI : сайт. – Москва, 2022. – Текст : электронный. – URL: https://cenef-xxi.ru/articles/uglerodnaya-nejtralnost-v-rossii%3A-traektorii-do-2060-goda (дата обращения: 05.08.2026).

92. Уильямсон, О.И. Экономические институты капитализма: фирмы, рынки, отношенческая контрактация / О.И. Уильямсон ; перевод с английского. – Санкт-Петербург : Лениздат, 1996. – 702 с. – ISBN 5-289-01816-6.

93. Филатов, С.В. Доменное производство НЛМК: традиции, инновации, развитие / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, С.Н. Грачев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2014. – № 10. – С. 30-34. – ISSN 0135-5910.

94. Хачатуров, Т.С. Эффективность капитальных вложений / Т.С. Хачатуров. – Москва : Экономика, 1979. – 336 с. – ISBN отсутствует.

95. Хохлов, А. Угольная генерация: новые вызовы и возможности / А. Хохлов, Ю. Мельников ; Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2019. – 88 с. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/980d8636-d0a8-4989-a51f-3dec2c3264f7/SKOLKOVO_EneC_Coal_generation_2019.01.01_Rus.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

96. Хусаинов, Ф.И. Перевозки угля: низкие тарифы как скрытая субсидия / Ф.И. Хусаинов, М.В. Ожерельева // Мир транспорта. – 2016. – № 5. Том 14. – С. 84-95. – ISSN 1992-3252.

97. Череповицын, А.Е. Сравнительный анализ ключевых аспектов инвестиционной политики стран евразийского пространства в сфере недропользования / А.Е. Череповицын, А.Г. Воробьев, Ф.Д. Ларичкин // Горный журнал. – 2017. – № 10. – С. 4-9. – ISSN 0017-2278.

98. Черских, О.И. Подход к устойчивому развитию предприятия открытой угледобычи / О.И. Черских // Уголь. – 2024. – № 9. – С. 61-66. – ISSN 0041-5790.

99. Шаркова, А.В. Инструменты стимулирования модернизации производственной базы предприятий машиностроения для пищевой промышленности / А.В. Шаркова, Н.М. Абдикеев, Ю.П. Калмыков // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2019. – № 10 (50). – С. 84-89. – ISSN 2077-3595. – Текст : электронный. – DOI 10.33938/1910-84. – URL: https://xn----8sberiayke3ai0ax4i.xn--p1ai/article/338 (дата обращения: 05.08.2026).

100. Шаркова, А.В. Совершенствование оценки эффективности государственного регулирования инновационного предпринимательства / А.В. Шаркова // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 297-305. – ISSN 1815-4972.

101. Шелдон, Р.А. Химические продукты на основе синтез-газа / Р.А. Шелдон ; перевод с английского С.М. Локтева. – Москва : Химия, 1987. – 248 с. – ISBN отсутствует.

102. Шиллинг, Г.Д. Газификация угля / Г.Д. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус ; перевод с немецкого С.Р. Исламова. – Москва : Недра, 1986. – 175 с. – ISBN отсутствует.

103. Шумпетер, Й.А. Капитализм, социализм и демократия / Й.А. Шумпетер ; перевод с английского. – Москва : Экономика, 1995. – 540 с. – ISBN 5-282-01415-7.

104. Юзов, О.В. Тенденции изменения экономических показателей развития черной металлургии России / О.В. Юзов, А.М. Седых, С.З. Афонин // Экономика в промышленности. – 2009. – № 1. – С. 2-8. – ISSN 2072-1633.

105. Яновский, А.Б. Результаты структурной перестройки и технологического перевооружения угольной промышленности Российской Федерации и задачи по перспективному развитию / А.Б. Яновский // Уголь. – 2019. – № 8. – С. 8-16. – ISSN 0041-5790.

106. Яновский, А.Б. Уголь: битва за будущее / А.Б. Яновский // Уголь. – 2020. – № 8. – С. 9-14. – ISSN 0041-5790.

107. Яшалова, Н.Н. Декарбонизация черной металлурги: цели и инструменты регулирования / Н.Н. Яшалова, В.С. Васильцов, И.М. Потравный // Черные металлы. – 2020. – № 8. – С. 70-75. – ISSN 2414-0104. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://www.rudmet.ru/journal/1943/article/32849 (дата обращения: 05.08.2026).

Книги и статьи на иностранном языке

108. Åhman, M. Industry and policy making for the Paris Agreement / M. Åhman, L.J. Nilsson, B. Johansson // Energy Policy. – 2017. – Volume 105. – P. 633-641. – ISSN 0301-4215.

109. Aldersey-Williams, J. Levelised cost of energy – A theoretical justification and critical assessment / J. Aldersey-Williams, T. Rubert // Energy Policy. – 2019. – Volume 124. – P. 169-179. – ISSN 1873-6777. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.enpol.2018.10.004. – URL: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.004 (дата обращения: 28.07.2026).

110. Anglo American unveils a prototype of the world’s largest hydrogen-powered mine haul truck / Anglo American plc : сайт. – 2022. – Текст : электронный. – URL: https://www.angloamerican.com/media/press-releases/2022/06-05-2022 (дата обращения: 13.07.2026).

111. Arens, M. Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term: The case of Germany / M. Arens, E. Worrell, W. Eichhammer [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Volume 163. – P. 84-98. – ISSN 0959-6526.

112. Babich, A. Coal use in iron and steel metallurgy / A. Babich, D. Senk // The Coal Handbook: Towards Cleaner Production. Volume 2: Coal Utilisation / edited by D. Osborne. – Oxford : Woodhead Publishing, 2013. – 576 p. – P. 267-311. – ISBN 978-1-78242-117-7.

113. Bailera, M. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO_2 / M. Bailera, P. Lisbona, L.M. Romeo [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Volume 69. – P. 292-312. – ISSN 1364-0321.

114. Barney, J. Firm resources and sustained competitive advantage / J. Barney // Journal of Management. – 1991. – № 1. Volume 17. – P. 99-120. – ISSN 0149-2063.

115. Bashmakov, I.A. Industry / I.A. Bashmakov, L.J. Nilsson, A. Acquaye [et al.] // Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade [et al.]. – Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2022. – P. 1161-1243. – ISBN 978-1-009-15792-6. – Текст : электронный. – DOI 10.1017/9781009157926.013. – URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter11.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

116. 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, H. Waisman, M. Colombier [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Volume 187. – P. 960-973. – ISSN 0959-6526.

117. Bataille, C. Low and zero emissions in the steel and cement industries: barriers, technologies and policies / C. Bataille. – Paris : OECD Publishing, 2020. – 42 p. – Текст : электронный. – DOI 10.1787/5ccf8e33-en. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/low-and-zero-emissions-in-the-steel-and-cement-industries_5ccf8e33-en.html (дата обращения: 05.08.2026).

118. Bauer, F. Industry without fossil fuel : Techno-economic challenges and policy implications / F. Bauer, C. Bataille, G. Åhman [et al.] // Energy Policy. – 2022. – Volume 168. – Article 113114. – ISSN 0301-4215.

119. Bauer, N. Coal-exit alliance must confront freeriding sectors to propel Paris-aligned momentum / N. Bauer, S. Bi, J. Jewell // Nature Climate Change. – 2023. – Volume 13. – P. 130-139. – ISSN 1758-678X.

120. Belton, V. Multiple Criteria Decision Analysis: An integrated approach / V. Belton, T.J. Stewart. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. – 372 p. – ISBN 9780792375050.

121. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production / European Commission : сайт. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. – Текст : электронный. – URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/iron-and-steel-production (дата обращения: 13.07.2026).

122. Biermann, F. Global goal setting for improving national governance and policy / F. Biermann, N. Kanie, R.E. Kim // Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2017. – Volume 26-27. – P. 1-8. – ISSN 1877-3435.

123. Böhringer, C. Carbon border adjustment mechanisms: Welfare and competitiveness effects / C. Böhringer, J.C. Carbone, T.F. Rutherford // Journal of Policy Modeling. – 2021. – № 6. Volume 43. – P. 1281-1302. – ISSN 0161-8938.

124. Boldrini, A. The impact of decarbonising the iron and steel industry on European energy demand / A. Boldrini, D. Koolen, W. Crijns-Graus [et al.] // Applied Energy. – 2024. – Volume 362. – Article 122943. – ISSN 0306-2619.

125. Calatayud, A. Integrated value chain risk management / A. Calatayud, J.A. Ketterer. – Washington, DC : Inter-American Development Bank, 2016. – 52 p. – Текст : электронный. – DOI 10.18235/0010631. – URL: https://publications.iadb.org/en/integrated-value-chain-risk-management (дата обращения: 05.08.2026).

126. Clean Steel: An Environmental and Technoeconomic Outlook of a Disruptive Technology : Report 2024-02 / IEAGHG. – Cheltenham : IEAGHG, 2024. – Текст : электронный. – DOI 10.62849/2024-02. – URL: https://doi.org/10.62849/2024-02 (дата обращения: 28.07.2026).

127. Coal 2024: Analysis and forecast to 2027 / International Energy Agency : сайт. – Paris : IEA, 2024. – Текст : электронный. – URL: https://www.iea.org/reports/coal-2024 (дата обращения: 13.07.2026).

128. Coase, R.H. The nature of the firm / R.H. Coase // Economica. – 1937. – № 16. Volume 4. – P. 386-405. – ISSN 0013-0427.

129. Cochran, W.G. Sampling Techniques / W.G. Cochran. – 3rd edition. – New York : John Wiley & Sons, 1977. – 428 p. – ISBN 0-471-16240-X.

130. Dosi, G. Technological paradigms and technological trajectories / G. Dosi // Research Policy. – 1982. – № 3. Volume 11. – P. 147-162. – ISSN 0048-7333.

131. Dyer, J.H. The relational view: Cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage / J.H. Dyer, H. Singh // Academy of Management Review. – 1998. – № 4. Volume 23. – P. 660-679. – ISSN 0363-7425.

132. Eisenhardt, K.M. Building theories from case study research / K.M. Eisenhardt // Academy of Management Review. – 1989. – № 4. Volume 14. – P. 532-550. – ISSN 0363-7425.

133. Elkington, J. Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business / J. Elkington. – Gabriola Island : New Society Publishers, 1997. – 402 p. – ISBN 9780865713925.

134. Ellram, L.M. Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing / L.M. Ellram // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. – 1995. – № 8. Volume 25. – P. 4-23. – ISSN 1758-664X. – Текст : электронный. – DOI 10.1108/09600039510099928. – URL: https://doi.org/10.1108/09600039510099928 (дата обращения: 28.07.2026).

135. Fan, Z. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy / Z. Fan, S.J. Friedmann // Joule. – 2021. – № 4. Volume 5. – P. 829-862. – ISSN 2542-4785.

136. Fischedick, M. Industry / M. Fischedick, J. Roy, A. Abdel-Aziz [et al.] // Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. – Cambridge : Cambridge University Press, 2014. – 1435 p. – P. 739-810. – ISBN 978-1-107-05821-7.

137. Fischedick, M.A. A techno-economic comparison of climate protection options for the iron and steel industry in Germany / M. Fischedick, J. Marzinkowski, P. Winzer [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Volume 84. – P. 563-580. – ISSN 0959-6526.

138. Fossil-free steel production ready for industrialization / HYBRIT : сайт. – August 2024. – Текст : электронный. – URL: https://www.hybritdevelopment.se/wp-content/uploads/2024/08/hybrit-fossil-free-steel-production-ready-for-industrialisation.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

139. Freeman, C. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour / C. Freeman, C. Perez // Technical Change and Economic Theory / edited by G. Dosi. – London : Pinter, 1988. – 646 p. – P. 38-66. – ISBN 0-86187-949-X.

140. Freeman, R.E. Strategic Management : A Stakeholder Approach / R.E. Freeman. – Boston : Pitman, 1984. – 276 p. – ISBN 0-273-01913-9.

141. Gavel, D.J. A review on nut coke utilisation in the ironmaking blast furnaces / D.J. Gavel // Materials Science and Technology. – 2017. – № 4. Volume 33. – P. 381-387. – ISSN 1743-2847. – Текст : электронный. – DOI 10.1080/02670836.2016.1183073. – URL: https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1183073 (дата обращения: 28.07.2026).

142. Global Hydrogen Review 2023 / International Energy Agency : сайт. – Paris : IEA, 2023. – Текст : электронный. – URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023 (дата обращения: 13.07.2026).

143. Global Hydrogen Review 2024 / International Energy Agency : сайт. – Paris : IEA, 2024. – Текст : электронный. – URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024 (дата обращения: 13.07.2026).

144. Global Status of CCS 2023 / Global CCS Institute : сайт. – Melbourne, 2023. – Текст : электронный. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/publications/global-status-of-ccs-2023/ (дата обращения: 05.08.2026).

145. Global Steel Plant Tracker / Global Energy Monitor : сайт. – 2025. – Текст : электронный. – URL: https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/ (дата обращения: 13.07.2026).

146. Green Hydrogen Cost Reduction : Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal / International Renewable Energy Agency : сайт. – Abu Dhabi : IRENA, 2020. – Текст : электронный. – URL: https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction (дата обращения: 13.07.2026).

147. 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. – № 4. Volume 94. – P. 691-719. – ISSN 0022-3808.

148. Gulati, R. The architecture of cooperation: Managing coordination costs and appropriation concerns in strategic alliances / R. Gulati, H. Singh // Administrative Science Quarterly. – 1998. – № 4. Volume 43. – P. 781-814. – ISSN 0001-8392.

149. Harpprecht, C. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study / C. Harpprecht, M. Naegler, S. Simon [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Volume 380. – Article 134846. – ISSN 0959-6526.

150. Hart, O. Firms, Contracts, and Financial Structure / O. Hart. – Oxford : Clarendon Press, 1995. – 228 p. – ISBN 0-19-828881-6.

151. Hart, O.D. Incomplete contracts and renegotiation / O.D. Hart, J. Moore // Econometrica. – 1988. – № 4. Volume 56. – P. 755-785. – ISSN 0012-9682.

152. Hart, O.D. Property rights and the nature of the firm / O.D. Hart, J. Moore // Journal of Political Economy. – 1990. – № 6. Volume 98. – P. 1119-1158. – ISSN 0022-3808.

153. Hasanbeigi, A. Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States / A. Hasanbeigi, M. Arens, J.C. Rojas Cardenas [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 2016. – Volume 113. – P. 127-139. – ISSN 0921-3449.

154. Healy, N. Politicizing energy justice and energy system transitions: Fossil fuel divestment and a just transition / N. Healy, J. Barry // Energy Policy. – 2017. – Volume 108. – P. 451-459. – ISSN 0301-4215.

155. Hennart, J.-F. A transaction costs theory of equity joint ventures / J.-F. Hennart // Strategic Management Journal. – 1988. – № 4. Volume 9. – P. 361-374. – ISSN 0143-2095.

156. Hertz, D.B. Risk Analysis in Capital Investment / D.B. Hertz // Harvard Business Review. – 1964. – № 1. Volume 42. – P. 95-106. – ISSN 0017-8012.

157. Higman, C. Gasification / C. Higman, M. van der Burgt. – 2nd edition. – Burlington : Gulf Professional Publishing, 2008. – 456 p. – ISBN 0-7506-8528-X.

158. Hitt, M.A. International strategy and institutional environments / M.A. Hitt, H. Li, W.J. Xu // Asia Pacific Journal of Management. – 2016. – Volume 33. – P. 1-26. – ISSN 0149-2063.

159. Hoffmann, C. Decarbonization challenge for steel / C. Hoffmann, M. Van Hoey, B. Zeumer // McKinsey & Company : сайт. – 2020. – Текст :

электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel (дата обращения: 05.08.2026).

160. Hopt, K.J. Comparative corporate governance: The state of the art and international regulation / K.J. Hopt // American Journal of Comparative Law. – 2011. – № 1. Volume 59. – P. 1-73. – ISSN 0002-919X.

161. Hydrogen in steel: Addressing emissions and dealing with overcapacity : OECD Science, Technology and Industry Policy Papers № 174 / OECD : сайт. – Paris : OECD Publishing, 2025. – 47 p. – Текст : электронный. – DOI 10.1787/7e2edc69-en. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/hydrogen-in-steel_7e2edc69-en.html (дата обращения: 05.08.2026).

162. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking / International Energy Agency : сайт. – Paris : IEA, 2020. – Текст : электронный. – URL: https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap (дата обращения: 13.07.2026).

163. ISO 14001:2015. Environmental management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva : ISO, 2015. – Текст : электронный. – URL: https://www.iso.org/standard/60857.html (дата обращения: 13.07.2026).

164. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. – 2nd ed. – Geneva : ISO, 2006. – Текст : электронный. – URL: https://www.iso.org/standard/37456.html (дата обращения: 30.07.2026).

165. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. – Geneva : ISO, 2006. – Текст : электронный. – URL: https://www.iso.org/standard/38498.html (дата обращения: 30.07.2026).

166. ISO 26000:2010. Guidance on social responsibility. – Geneva : ISO, 2010. – Текст : электронный. – URL: https://www.iso.org/standard/42546.html (дата обращения: 13.07.2026).

167. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva : ISO, 2018. – Текст : электронный. – URL: https://www.iso.org/standard/63787.html (дата обращения: 13.07.2026).

168. Jensen, M.C. Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure / M.C. Jensen, W.H. Meckling // Journal of Financial Economics. – 1976. – № 4. Volume 3. – P. 305-360. – ISSN 0304-405X.

169. Kaldellis, J.K. Sustainable energy technologies: Multi-criteria decision analysis and application in industrial transition / J.K. Kaldellis, C. Chrysikos, P. Triantafyllou [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Volume 135. – Article 110376. – ISSN 1364-0321.

170. 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, S. Brynolf, T. Olsson [et al.] // Applied Energy. – 2023. – Volume 350. – Article 121773. – ISSN 0306-2619.

171. Kelsall, G. Hydrogen production from coal : Report ICSC/313 / G. Kelsall. – London : International Centre for Sustainable Carbon, 2021. – 109 p. – ISBN 978-92-9029-636-2. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://www.sustainable-carbon.org/report/hydrogen-production-from-coal-icsc-313/ (дата обращения: 05.08.2026).

172. Kim, J. Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options / J. Kim, B.K. Sovacool, M. Bazilian [et al.] // Energy Research & Social Science. – 2022. – Volume 89. – Article 102565. – ISSN 2214-6296.

173. Kleiner, G.B. New theory of economic systems and its applications / G.B. Kleiner // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2011. – № 9. Volume 81. – P. 794-808. – ISSN 1019-3316.

174. Krippendorff, K. Content Analysis: An Introduction to Its Methodology / K. Krippendorff. – 4th edition. – Thousand Oaks : SAGE Publications, 2018. – 472 p. – ISBN 978-1-5063-9566-1.

175. Leeson, D.A. A techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries / D.A. Leeson, N.J. Mac Dowell, N. Shah [et al.] // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2017. – Volume 61. – P. 71-84. – ISSN 1750-5836.

176. Likert, R. A Technique for the Measurement of Attitudes / R. Likert // Archives of Psychology. – 1932. – № 140. Volume 22. – P. 1-55. – ISSN 2573-7899.

177. Luehrman, T.A. Investment opportunities as real options: Getting started on the numbers / T.A. Luehrman // Harvard Business Review. – 1998. – № 4. Volume 76. – P. 51-67. – ISSN 0017-8012.

178. Mazzucato, M. Financing renewable energy: Who is financing what and why it matters / M. Mazzucato, G. Semieniuk // Technological Forecasting and Social Change. – 2018. – Volume 127. – P. 8-22. – ISSN 0040-1625.

179. Meadows, D.H. The Limits to Growth / D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers [et al.]. – New York : Universe Books, 1972. – 205 p. – ISBN 0-87663-165-0.

180. Myers, S.C. Determinants of corporate borrowing / S.C. Myers // Journal of Financial Economics. – 1977. – № 2. Volume 5. – P. 147-175. – ISSN 0304-405X.

181. Nash, J.F. The Bargaining Problem / J.F. Nash // Econometrica. – 1950. – № 2. Volume 18. – P. 155-162. – ISSN 0012-9682.

182. Nelson, R.R. An Evolutionary Theory of Economic Change / R.R. Nelson, S.G. Winter. – Cambridge : Harvard University Press, 1982. – 437 p. – ISBN 0-674-27228-5.

183. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector / International Energy Agency : сайт. – Paris : IEA, 2021. – Текст : электронный. – URL: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050 (дата обращения: 13.07.2026).

184. New Energy Development and Utilization: information on the Ordos 30,000-tonne/year wind-solar green hydrogen integration project / Sinopec : сайт. – 2024. – Текст : электронный. – URL: https://www.sinopecgroup.com/group/en/000/000/041/41560.shtml (дата обращения: 05.08.2026).

185. Osgood, C.E. The Measurement of Meaning / C.E. Osgood, G.J. Suci, P.H. Tannenbaum. – Urbana : University of Illinois Press, 1957. – 342 p. – ISBN 0-252-74539-6.

186. Our Common Future / World Commission on Environment and Development. – Oxford : Oxford University Press, 1987. – 400 p. – ISBN 978-0-19-282080-8.

187. Pai, S. A systematic review of the key elements of a just transition for fossil fuel workers / S. Pai, H. Zerriffi, J. Jewell [et al.] // Environmental Research Letters. – 2021. – № 2. Volume 16. – Article 023003. – ISSN 1748-9326.

188. Pardo, N. Prospective scenarios on energy efficiency and CO_2 emissions in the European iron and steel industry / N. Pardo, J.A. Moya, K. Vatopoulos // Energy. – 2013. – Volume 54. – P. 113-128. – ISSN 0360-5442.

189. Paris Agreement : adopted 12 December 2015 / United Nations : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement (дата обращения: 13.07.2026).

190. Pei, M. Toward a fossil free future with HYBRIT: Development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland / M. Pei, M. Petäjäniemi, A. Regnell [et al.] // Metals. – 2020. – № 7. Volume 10. – Article 972. – ISSN 2075-4701.

191. Perez, C. Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages / C. Perez. – Cheltenham : Edward Elgar, 2002. – 198 p. – ISBN 978-1-84376-331-4.

192. Porter, M.E. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance / M.E. Porter. – New York : Free Press, 1985. – 557 p. – ISBN 0-684-84146-0.

193. Porter, M.E. Creating shared value / M.E. Porter, M.R. Kramer // Harvard Business Review. – 2011. – № 1/2. Volume 89. – P. 62-77. – ISSN 0017-8012.

194. Powell, W.W. Neither market nor hierarchy: Network forms of organization / W.W. Powell // Research in Organizational Behavior. – 1990. – Volume 12. – P. 295-336. – ISSN 0191-3085.

195. Projected Costs of Generating Electricity 2020 / International Energy Agency ; OECD Nuclear Energy Agency. – Paris : OECD Publishing, 2020. – Текст : электронный. – URL: https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020 (дата обращения: 13.07.2026).

196. Quader, M.A. A comprehensive review on energy efficient CO_2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing / M.A. Quader, S. Ahmed, S.H. Shamsuddin [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Volume 50. – P. 594-614. – ISSN 1364-0321.

197. Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment // Official Journal of the European Union. – 2020. – № L 198/13. – ISSN 1977-0677. – Текст : электронный. – URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0852 (дата обращения: 13.07.2026).

198. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism / European Union :

сайт. – Текст : электронный. – URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj (дата обращения: 13.07.2026).

199. Rissman, J. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070 / J. Rissman, C. Bataille, E. Masanet [et al.] // Applied Energy. – 2020. – Volume 266. – Article 114848. – ISSN 0306-2619.

200. Sachs, J.D. Six transformations to achieve the sustainable development goals / J.D. Sachs, G. Schmidt-Traub, M. Mazzucato [et al.] // Nature Sustainability. – 2019. – Volume 2. – P. 805-814. – ISSN 2398-9629.

201. Safarian, J. Use of biomass and biochar as a partial replacement of fossil coal and coke in iron and steelmaking / J. Safarian // Fuel. – 2023. – Volume 339. – Article 127532. – ISSN 0016-2361.

202. Schmidt, O. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies / O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes [et al.] // Joule. – 2019. – № 1. Volume 3. – P. 81-100. – ISSN 2542-4351. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.joule.2018.12.008. – URL: https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008 (дата обращения: 28.07.2026).

203. Shao, S. Energy structure, directed technical change and carbon emissions: Evidence from China’s industrial sectors / S. Shao, H. Yang, M. Zhang // Energy Economics. – 2022. – Volume 105. – Article 105719. – ISSN 0140-9883.

204. Smil, V. Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World / V. Smil. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2016. – 280 p. – ISBN 978-0-12-804233-5.

205. Steel Statistical Yearbook 2023 / World Steel Association : сайт. – Brussels, 2023. – 120 p. – URL: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2023.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

206. Steffen, W. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet / W. Steffen, K. Richardson, J. Rockström [et al.] // Science. – 2015. – № 6223. Volume 347. – Article 1259855. – ISSN 0036-8075.

207. Stern, N. The Economics of Climate Change : The Stern Review / N. Stern. – Cambridge : Cambridge University Press, 2007. – 712 p. – ISBN 978-0-521-70080-1.

208. 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. – 1380 p. – P. 467-496. – ISBN 978-1-4939-3093-7.

209. Student. The probable error of a mean / Student // Biometrika. – 1908. – № 1. Volume 6. – P. 1-25. – ISSN 0006-3444.

210. Sunsetting coal in steel production / SteelWatch : сайт. – 2023. – Текст : электронный. – URL: https://steelwatch.org/reports/sunset-coal-in-steel/ (дата обращения: 05.08.2026).

211. Sustainability Indicators 2023 report: Sustainability performance of the steel industry 2004-2022 / World Steel Association : сайт. – Brussels, 2023. – 9 p. – Текст : электронный. – URL: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-indicators-report-2023.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

212. Swilling, M. Just Transitions: Explorations of Sustainability in an Unfair World / M. Swilling, E. Annecke. – Cape Town : UCT Press, 2012. – 392 p. – ISBN 978-1-920538-34-7.

213. Takyi, S.A. Current status and technology development in implementing low carbon emission energy on underground coal gasification / S.A. Takyi, Z. Qin, M. Shahbaz [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Volume 10. – Article 1051417. – ISSN 2296-598X.

214. Teece, D.J. Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of sustainable enterprise performance / D.J. Teece // Strategic Management Journal. – 2007. – № 13. Volume 28. – P. 1319-1350. – ISSN 0143-2095.

215. Teece, D.J. Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy / D.J. Teece // Research Policy. – 1986. – № 6. Volume 15. – P. 285-305. – ISSN 0048-7333.

216. Trachuk, A.V. Learning-by-exporting effects on innovative performance: Empiric study results / A.V. Trachuk, N.V. Linder // Knowledge Management Research & Practice. – 2018. – № 2. Volume 16. – P. 220-234. – ISSN 1477-8238.

217. Tracking the trends 2022: Redefining mining / Deloitte : сайт. – 2022. – Текст : электронный. – URL: https://www.deloitte.com/an/en/Industries/mining-metals/analysis/tracking-the-trends-mining-industry.html (дата обращения: 05.08.2026).

218. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development : Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, A/RES/70/1 / United Nations : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://sdgs.un.org/2030agenda (дата обращения: 13.07.2026).

219. Unlocking the global green transition: Executive Global Insight / Business Sweden : сайт. – October 2023. – Текст : электронный. – URL: https://www.business-sweden.com/4aa61d/contentassets/c09536e6be9145afb2770eb6c759394b/swedens-role-in-the-global-green-shift-for-energy-and-transport.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

220. Van Leeuwen, J. Forget binning and get SMART: Getting more out of the time-course of response data / J. Van Leeuwen, J.B.J. Smeets, A.V. Belopolsky // Attention, Perception, & Psychophysics. – 2019. – Volume 81. – P. 2956-2967. – ISSN 1943-3921.

221. Vogl, V. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking / V. Vogl, M. Åhman, L.J. Nilsson // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Volume 203. – P. 736-745. – ISSN 0959-6526.

222. Voigt, N. Transforming the Steel Industry May Be the Ultimate Climate Challenge / N. Voigt, J. Burchardt, T. Figures [et al.] // Boston Consulting Group : сайт. – 2022. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://www.bcg.com/publications/2022/steel-industry-carbon-emissions-challenge-solutions (дата обращения: 05.08.2026).

223. Vrontis, D. Sustainable business model innovation and dynamic capabilities: A systematic literature review / D. Vrontis, A. Thrassou, M. Weber [et al.] // Journal of Business Research. – 2022. – Volume 145. – P. 1-15. – ISSN 0148-2963.

224. Wang, J.J. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making / J.J. Wang, Y.Y. Jing, C.F. Zhang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – № 9. Volume 13. – P. 2263-2278. – ISSN 1364-0321.

225. Williamson, O.E. The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting / O.E. Williamson. – New York : Free Press, 1985. – 450 p. – ISBN 0-02-934821-8.

226. Work Plan for Including the Steel, Cement and Aluminum Smelting Sectors into the National Carbon Emissions Trading System : Document Huan Qi Hou [2025]

№ 23 / Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China : сайт. – Beijing : MEE, 2025. – Текст : электронный. – URL: https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202503/t20250326_1104736.html (дата обращения: 28.07.2026).

227. World Steel in Figures 2025 / World Steel Association : сайт. – Brussels, 2025. – Текст : электронный. – URL: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf (дата обращения: 28.07.2026).

228. Worrell, E. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. iron and steel sector / E. Worrell, L. Price, N. Martin // Energy. – 2001. – № 5. Volume 26. – P. 513-536. – ISSN 0360-5442.

229. Yin, R.K. Case Study Research and Applications: Design and Methods / R.K. Yin. – 6th edition. – Thousand Oaks : SAGE Publications, 2018. – 352 p. – ISBN 978-1-5063-3616-9.

230. Yuan, Z. Investigation on co-combustion of coal gasification fine ash and raw coal blends: Thermal conversion, gas pollutant emission and kinetic analyses / Z. Yuan, J. Li, S. Fan [et al.] // Energy. – 2022. – Volume 246. – Article 123368. – ISSN 0360-5442.

231. Zhang, Y. Shenhua Group Corporation Ltd. Shenhua Coal Conversion Technology and Industry Development / Y. Zhang. – 2005. – 51 p. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2021-03/16_china_zhangyuzhuo.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

232. Zhu, Q. The hydrogen economy and the role for coal / Q. Zhu ; International Centre for Sustainable Carbon ; IEA Coal Industry Advisory Board. – London, 2023. – 106 p. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/cd1eac26-6a3e-415a-94fd-3afda4d4ac42/IEA-Hydrogen-economy-and-the-role-of-coal-March2023.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

Список иллюстративного материала

1 Список таблиц

Таблица 1 Подходы к классификации форм межфирменного взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий 22
Таблица 2 Классификация организационных форм взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий 23
Таблица 3 VRIN-характеристика совокупности проектных ресурсов и компетенций, обеспечивающих глубокую переработку бурых углей и использование технологического продукта в металлургическом переделе 26
Таблица 4 Релевантные ЦУР для трансформации угледобывающих и металлургических предприятий 32
Таблица 5 Структура системных вызовов для угледобывающих и металлургических предприятий в контексте устойчивого развития 35
Таблица 6 Общие направления перехода к устойчивому развитию и их ограничения 36
Таблица 7 Сводная оценка технологий трансформации в условиях низкоуглеродного перехода по компонентам устойчивого развития 40
Таблица 8 Систематизация технологических решений трансформации металлургического передела 42
Таблица 9 Сравнение технологических ограничений сценариев полной и частичной газификации бурых углей 53
Таблица 10 Технологическая цепочка вариантов использования угля в металлургическом переделе и для энергетических нужд 56
Таблица 11 Сравнительная характеристика сценариев глубокой переработки бурых углей 57
Таблица 12 Сравнительный анализ кейсов технологической трансформации в угольной и металлургической сферах 61
Таблица 13 Исследовательские предпосылки для формирования концептуальной модели трансформации 65

Таблица 14 Компоненты модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия 69
Таблица 15 Сравнительная характеристика традиционной модели и модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия 72
Таблица 16 Гипотезы исследования и способы их проверки 78
Таблица 17 Вклад модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия в решение системных вызовов устойчивого развития 81
Таблица 18 Сопоставление УЕСЭ с распространенными стоимостными метриками 88
Таблица 19 Структурные компоненты и их оценка в условных единицах для традиционного технологического сценария 94
Таблица 20 Методическое обоснование нормированной оценки традиционного технологического сценария 98
Таблица 21 Структурные компоненты и их оценка в условных единицах для сценариев технологической трансформации 100
Таблица 22 Сводная характеристика качественного влияния факторов на компоненты расчетной модели 104
Таблица 23 Структура факторов, параметров и компонент расчетной модели 104
Таблица 24 Система параметров имитационной модели УЕСЭ, источники данных и характер влияния 110
Таблица 25 Предварительные расчетные пороги параметров операционного паритета и ограничение общей реализуемости сценариев 111
Таблица 26 Целевые группы экспертного опроса 117
Таблица 27 Структура анкеты и связь вопросов с параметрами модели 121
Таблица 28 Методы обработки данных и проверяемые условия 124
Таблица 29 Фактическая структура экспертной выборки и средние весовые коэффициенты 127
Таблица 30 Описательные взвешенные и невзвешенные средние значения по вопросам опроса и дополнительным авторским показателям 130
Таблица 31 Ключевые результаты экспертного опроса и условия их интерпретации 131

Таблица 32 Межгрупповые расхождения в оценках ключевых параметров 133
Таблица 33 Сравнение предварительных и сценарно уточненных значений параметров расчетной модели 134
Таблица 34 Промежуточный статус проверки гипотез исследования в главе 2 137
Таблица 35 Дополнительные аналитические выводы, сформированные с учетом результатов опроса, и их значение для апробации двухэтапного методического подхода 140
Таблица 36 Сценарии имитационного моделирования и ключевые различия 148
Таблица 37 Сценарно уточненные параметры для имитационного моделирования 149
Таблица 38 Входные распределения параметров для имитационного моделирования 152
Таблица 39 Результаты имитационного моделирования операционной жизнеспособности сценариев 153
Таблица 40 Основные параметры сценария, выбранного для инвестиционной оценки конкретного проекта 157
Таблица 41 Ключевые исходные параметры российско-китайского проекта частичной газификации бурых углей 163
Таблица 42 Технологические параметры переработки бурого угля в термококс 165
Таблица 43 Практический расчет УЕСЭ с учетом дифференцированной логистики 169
Таблица 44 Чувствительность КУЕСЭ проекта к логистическому коэффициенту 170
Таблица 45 Сценарная сравнительная оценка выбросов в ограниченной проектной границе и чувствительность КУЕСЭ проекта к условной цене углерода 171
Таблица 46 Прогноз P&L проекта за первые семь проектных лет 175
Таблица 47 Прогноз CF и FCFF проекта 176

Таблица 48 Итоговые показатели инвестиционной состоятельности проекта 177
Таблица 49 Параметры и расчетный статус ставки дисконтирования 178
Таблица 50 Чувствительность NPV и пороговые условия инвестиционной состоятельности термококсового проекта 179
Таблица 51 Источники выгод угольного/газификационного и металлургического контуров в модели проекта 188
Таблица 52 Расчет ценового коридора и внутренней цены термококса 191
Таблица 53 Чувствительность экономически обоснованной цены к логистическому коэффициенту 194
Таблица 54 Типовая матрица управления рисками в проекте производства термококса из бурых углей 195
Таблица 55 Органы, эксперты и процедуры управления проектом 197
Таблица 56 Показатели мониторинга исполнения соглашения участников проекта 199
Таблица 57 Матрица экономического эффекта трансформации на уровне проекта и компании 203
Таблица 58 Распределение экономического эффекта по уровням и участникам 205
Таблица 59 Условия применимости модели к типам угледобывающих регионов 207
Таблица 60 Направления национально-экономического эффекта трансформации 214
Таблица 61 Сценарная иллюстрация масштабирования расчетных проектных показателей 216
Таблица 62 Границы применимости модели и направления дальнейшей проработки 218
Таблица 63 Сводная оценка экономического эффекта трансформации по уровням 219
Таблица 64 Сводное подтверждение практической значимости модели 221

2 Список рисунков

Рисунок 1 Традиционная схема взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий 20

Рисунок 2 Трансформация взаимодействия угледобывающих и металлургических предприятий на основе глубокой переработки бурых углей..... 20

Рисунок 3 Цели устойчивого развития как рамка оценки трансформации угольно-металлургического взаимодействия 31

Рисунок 4 Алгоритм первичного рыночно-технологического отбора технологических решений для периметра исследования..... 45

Рисунок 5 Технологическая логика полной и частичной газификации бурых углей..... 53

Рисунок 6 Технологические цепочки: сырье → процессинг → продукты → конечное применение..... 55

Рисунок 7 Структура модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия в условиях низкоуглеродного перехода 63

Рисунок 8 Область исследования на пересечении технологических, экономических и организационных факторов трансформации угольно-металлургического взаимодействия 75

Рисунок 9 Алгоритм операционализации критериев устойчивого развития посредством методики сравнительной оценки по УЕСЭ и отбора технологического сценария трансформации угольно-металлургического взаимодействия..... 92

Рисунок 10 Алгоритм сравнительной оценки операционной жизнеспособности и инвестиционной состоятельности сценариев трансформации угольно-металлургического взаимодействия 145

Рисунок 11 Распределение чистого операционного эффекта сценария частичной газификации 155

Рисунок 12 Распределение чистого операционного эффекта сценария полной газификации..... 155

Рисунок 13 Технологическая схема переработки бурого угля в термококс 162

Приложение А

(информационное)

Основные научные подходы к трансформации взаимодействия угледобывающей и металлургической отраслей

Таблица А.1 – Основные научные подходы к трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Научный подход	Ключевой фокус	Основные тезисы	Значение для настоящего исследования	Ограничения подхода
1	2	3	4	5
Технико-экономическая модернизация традиционной модели [82; 228]	Повышение эффективности действующих коксо-доменных и угледобывающих переделов	Основной акцент делается на энерго-эффективности, улучшении качества сырья, снижении удельных издержек и модернизации отдельных агрегатов	Позволяет показать, что оптимизация традиционной схемы необходима, но недостаточна для системной трансформации взаимодействия	Не меняет базовую зависимость металлургического передела от традиционной сырьевой и технологической цепочки
Низко-углеродная металлургия и водородные технологичес-кие траектории [135; 162; 221]	Радикальная перестройка металлургии через водород, электрометал-лургию и новые энергетические решения	В зарубежной литературе такие решения рассматриваются как долгосрочная траектория глубокой декарбонизации тяжелой промышленности	Формирует рамку для анализа сценария полной газификации бурых углей с получением водорода	Высокая капиталоемкость, инфраструктурная зависимость и значительная потребность в адаптации металлургического контура
Глубокая переработка угля и газификация [36; 38; 80]	Перевод угля из топлива в сырье для получения новых технологических продуктов	Российские исследования подчеркивают потенциал газификации бурых углей, получения термококса, синтез-газа и иных продуктов глубокой переработки	Обосновывает выбор бурых углей как ресурсной базы и выделение сценария частичной газификации с производством термококса	Часто фокусируется на технологических параметрах и недостаточно раскрывает инвестиционную и организационно-экономическую сторону проектов
Устойчивое развитие и справедливый переход [154; 187]	Экологические, экономические и социально-региональные последствия технологи-ческой трансформации	Трансформация ресурсоемких отраслей должна учитывать занятость, налоговую базу, переподготовку кадров и устойчивость угольных территорий	Позволяет рассматривать ЦУР как рамку оценки, а не как готовый технологический выбор	Требует отдельной количественной оценки региональных и социальных эффектов, не сводимой к операционным расчетам
Межфирменная координация и специфичность активов [131; 225]	Глубина координации участников производствен-ных цепочек	При высокой специфичности активов, капиталоемкости и неопределенности простые контракты становятся недостаточными	Обосновывает необходимость анализа глубины координации угольного, газификационного и металлургичес-кого контуров	Не определяет автоматически конкретный технологический сценарий или универсальную организационную форму

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
Инвестицион-ный анализ капиталоемких промышлен-ных проектов [32; 56]	Оценка NPV, IRR, FCFF, окупаемости и вероятности достижения операционного паритета	Экономическая состоятельность технологической трансформации должна проверяться через сочетание операционной и инвестиционной оценки	Служит основой для связи УЕСЭ, имитационного моделирования и DCF-оценки в главах 2 и 3	Требует достоверных исходных данных и отдельного учета неопределенности ключевых параметров

Источник: составлено автором.

Приложение Б

(информационное)

Сравнительная характеристика подходов международной и российской научной литературы к трансформации взаимодействия отраслей

Таблица Б.1 – Сравнительная характеристика подходов международной и российской научной литературы

Критерий сравнения	Международная научная литература	Российская научная литература	Значение для настоящего исследования
Доминирующий технологический вектор	Глубокая декарбонизация металлургии, развитие водородной металлургии, электрометаллургии и иных решений, снижающих зависимость от углеродного сырья [116; 199; 221]	Прагматично-адаптационный подход: модернизация действующей промышленной базы, газификация и глубокая переработка угля, вовлечение бурых углей в новые производственные цепочки [36; 80]	Обосновывает необходимость равноправного рассмотрения водородного и термококсового сценариев до их экономической проверки
Интерпретация роли угля	Уголь часто рассматривается как источник углеродной уязвимости и объект постепенного вывода из промышленных цепочек [119; 183]	Уголь рассматривается также как ресурсная база для глубокой переработки и создания новых технологических продуктов [38; 80]	Позволяет сформулировать предмет исследования не как отказ от угля, а как изменение способа его использования.
Экономический акцент	Внимание уделяется стоимости перехода к новым технологическим системам, рискам обесценения активов и необходимости масштабных инвестиций [178; 207]	Акцент делается на сохранении промышленной функции регионов, экономической реализуемости проектов и использовании существующей инфраструктуры [63; 105]	Подчеркивает необходимость расчета операционной жизнеспособности технологических сценариев и инвестиционной состоятельности проектов
Социально-региональный аспект	Справедливый переход рассматривается через переподготовку кадров и поддержку территорий, затронутых отказом от углеродных технологий [154; 187]	Справедливый переход тесно связан с устойчивостью монопрофильных и угледобывающих территорий, сохранением занятости и налоговой базы [63; 70]	Определяет необходимость включения социально-региональных ограничений в рамку оценки модели
Организационно-экономическая логика	Часто рассматриваются крупные технологические программы, консорциумы и стратегические инициативы по декарбонизации [138; 199]	Больше внимания уделяется конкретным промышленным конфигурациям, инвестиционной реализуемости и координации участников [24; 89]	Обосновывает анализ глубины координации, внутренних цен и распределения эффекта между участниками производственной цепочки
Исследовательский пробел	Недостаточно учитываются страны и регионы с высокой зависимостью от угольной ресурсной базы	Недостаточно связаны технологические параметры глубокой переработки с экономической сопоставимостью продуктов и инвестиционной моделью	Формирует основание для разработки УЕСЭ, экспертной верификации и прикладной апробации проекта

Источник: составлено автором.

Приложение В

(информационное)

Социально-экономические последствия технологической трансформации угледобывающих и металлургических предприятий в контексте устойчивого развития

Таблица В.1 – Социально-экономические последствия технологической трансформации и их учет в модели исследования

Сфера последствий	Риск при резкой технологической трансформации	Возможность модели глубокой переработки бурых углей	Показатели для дальнейшей оценки
Занятость	Сокращение рабочих мест в угледобыче и смежных сервисных видах деятельности [154; 187]	Формирование новых рабочих мест в подготовке сырья, газификации, контроле качества и промышленной логистике	Численность занятых; доля работников, прошедших переподготовку; динамика занятости в муниципалитете
Квалификации и человеческий капитал	Несоответствие традиционных компетенций требованиям новых технологий [187]	Постепенная трансформация компетенций без одномоментного отказа от угольной специализации	Программы переподготовки; структура профессий; доля технологического персонала
Налоговая база территории	Снижение налоговых поступлений при закрытии или сокращении угольных и металлургических активов [70]	Сохранение промышленной функции территории через вовлечение бурых углей в более высокую стадию переработки	Налоговые поступления; валовая добавленная стоимость; вклад проекта в региональную экономику
Инфраструктура	Недозагрузка ж/д, энергетической и промышленной инфраструктуры [35; 95]	Использование существующей инфраструктуры в новой производственной цепочке	Загрузка инфраструктуры; инвестиции в модернизацию; пропускная способность логистических узлов
Миграционные процессы	Отток населения при снижении занятости и закрытии производственных активов [70]	Формирование более плавной траектории технологической адаптации угольных территорий	Миграционный баланс; уровень безработицы; показатели качества жизни
Социальная приемлемость перехода	Рост сопротивления трансформации при восприятии ее как угрозы занятости и локальной экономике [154; 166; 167; 212]	Согласование технологических решений с задачами региональной устойчивости и справедливого перехода	Оценка стейкхолдеров; уровень поддержки проекта; наличие социальных программ
Региональное развитие	Закрепление статуса сырьевой периферии либо обесценение старой специализации [63; 70; 79]	Переход от добычи сырья к промышленному узлу глубокой переработки	Диверсификация экономики; число смежных сервисных предприятий; инвестиции в проминфраструктуру

Источник: составлено автором.

Приложение Г

(информационное)

Структура экспертной выборки и система присвоения весовых коэффициентов

Приложение содержит агрегированные сведения о структуре экспертной выборки и правилах взвешивания оценок.

Таблица Г.1 – Фактическая структура экспертной выборки

Группа экспертов	Количество экспертов, человек	Доля в выборке, в процентах	Средний нормированный вес	Роль в эмпирической проверке
Представители металлургических предприятий	24	32,9	1,08	Оценка приемлемости технологических продуктов для металлургического передела: цена, качество, стабильность поставок, логистика и технологическая применимость
Представители угледобывающих предприятий	31	42,5	1,12	Оценка реалистичности сырьевых, технологических и логистических параметров глубокой переработки бурых углей
Представители инвестиционно-институционального блока	18	24,7	0,85	Оценка инвестиционной реализуемости, регуляторных условий, роли институтов развития и механизмов поддержки
Итого	73	100,0	-	Совокупная экспертная база для проверки условий жизнеспособности модели

Источник: составлено автором.

Таблица Г.2 – Критерии присвоения весовых коэффициентов W_{inst} и W_{comp}

Коэффициент	Градация	Содержание критерия
W_{inst}	1,5	Прямой управленческий опыт в проектной, имущественно интегрированной или вертикально интегрированной структуре
	1,2	Опыт координации альянсов, консорциумов, НИОКР или капиталоемких технологических проектов
	1,0	Опыт долгосрочных контрактов, цепочек поставок или взаимодействия с промышленными партнерами
	0,8	Опыт анализа неудачных или реструктурированных форм взаимодействия; используется для интерпретации барьеров
W_{comp}	1,5	Эксперт обладает профильным управленческим или технологическим опытом более 15 лет и участвует в принятии стратегических решений
	1,2	Эксперт имеет значимый отраслевой опыт 10-15 лет и участвует в оценке проектов или технологических решений
	1,0	Эксперт имеет отраслевой опыт 5-10 лет и способен оценивать параметры модели
	0,8	Эксперт имеет ограниченный, но релевантный опыт по отдельным параметрам модели

Источник: составлено автором.

Приложение Д

(информационное)

Систематизация технологических решений в области переработки угля

Таблица Д.1 – Технологические решения в области переработки угля

Технология	Принцип действия	Потенциальный эффект	Ограничения	Связь с настоящим исследованием
Ультрасверхкритические параметры паросилового цикла [195]	Повышение КПД угольной генерации за счет более высоких параметров пара	Снижение удельного расхода топлива и операционных затрат	Сохраняет углеродоемкую модель и не меняет связь с металлургией	Рассматривается как оптимизационное, но недостаточное направление
Технологии снижения углеродной уязвимости угольной генерации [144; 175]	Улавливание или ограничение выбросов на энергетическом объекте	Потенциальное снижение углеродной уязвимости	Высокие CAPEX/OPEX, энергетический штраф, зависимость от регулирования	Учитывается как элемент международного технологического контекста
IGCC [157; 175]	Газификация угля с последующим использованием газа в комбинированном цикле	Более эффективное использование угля и возможность получения газообразных продуктов	Высокая капиталоемкость и ориентация преимущественно на энергетику	Не формирует прямую модель угольно-металлургического взаимодействия
CTL/CTG [101; 231]	Преобразование угля в жидкие топлива или газообразные продукты углехимии	Диверсификация продуктовой линейки угольной промышленности	Высокие инвестиции, конкуренция с нефтегазохимией, слабая связь с металлургией	Иллюстрирует потенциал глубокой переработки, но не является базовым сценарием
Низкотемпературный пиролиз [38; 46]	Термическое разложение угля с получением твердых и газообразных продуктов	Может быть региональным решением для частичной переработки угля	Не обеспечивает системной трансформации всей производственной цепочки	Используется как сравнительное направление
Полная газификация бурых углей с получением водорода [157; 171]	Максимальное преобразование угля в газообразный продукт с последующим выделением водорода	Формирование долгосрочной технологической альтернативы для промышленности	Требует водородной инфраструктуры, высокой инвестиционной готовности и адаптации металлургии	Сценарий 1, сопоставляемый через УЕСЭ и Монте-Карло
Частичная газификация бурых углей с производством термококса [36; 39; 80]	Получение термококса как твердого продукта глубокой переработки бурых углей	Сохранение связи с буроугольной базой и существующей промышленной инфраструктурой	Требует проверки качества сырья, логистики, цены и инвестиционной состоятельности	Сценарий 2, выбранный для прикладной апробации после имитационного моделирования

Источник: составлено автором.

Приложение Е

(информационное)

Систематизация технологических решений в области производства металлургической продукции

Таблица Е.1 – Технологические решения в области металлургического производства

Технология	Принцип действия	Потенциальный эффект	Ограничения	Связь с настоящим исследованием
Модернизация доменного процесса [82; 228]	Повышение эффективности действующих доменных агрегатов, улучшение дутьевых параметров и энергоэффективности	Снижение удельных издержек и частичное снижение углеродной уязвимости	Не меняет базовую зависимость от традиционного технологического ядра	Рассматривается как оптимизационная мера
TGR-BF, кислородное дутье и рециркуляция газов [188; 196]	Рециркуляция доменных газов и изменение газового режима доменного процесса	Потенциальное снижение потребления топлива и выбросов	Переходная технология; требует модернизации и не устраняет зависимость от коксо-доменной модели	Используется как сравнительный переходный вариант
Доменный процесс с улавливанием выбросов [144; 175]	Сочетание традиционного доменного процесса с технологиями снижения углеродной уязвимости	Может снизить чувствительность к внешнему углеродному регулированию	Высокая капиталоемкость, сложность и ограниченная промышленная распространенность	Учитывается как международный контекст, но не входит в предлагаемую модель
H_2-DRI [161; 190; 221]	Прямое восстановление железа с использованием водорода	Долгосрочная траектория глубокой трансформации металлургии	Требует развитой водородной инфраструктуры и значительной перестройки металлургического передела	Связана со сценарием полной газификации с получением водорода
Электродуговые печи на низкоуглеродной электроэнергии [124; 162]	Производство стали в EAF при наличии доступной низкоуглеродной электроэнергии и сырья	Снижение углеродной уязвимости при соответствующей энергосистеме	Зависит от доступности электроэнергии, лома или DRI; не решает напрямую задачу вовлечения бурых углей	Сравнительная технология, не являющаяся предметом предлагаемой модели
Использование термококса как углеродистого энергоресурса [36; 39; 80]	Включение продукта частичной газификации бурых углей в металлургический передел	Снижение стоимости сопоставимой энергетической ценности и формирование новой связи угольного и металлургического контуров	Требует проверки качества продукта, логистики, внутренней цены и инвестиционной состоятельности	Ключевое направление прикладной апробации в главе 3

Источник: составлено автором.

Приложение Ж

(информационное)

Анкета экспертного опроса по оценке условий жизнеспособности модели трансформации угольно-металлургического взаимодействия

Анкета предназначена для структурированного экспертного опроса представителей металлургических предприятий, угледобывающих предприятий и инвестиционно-институционального блока. При обработке все шкальные значения кодируются таким образом, чтобы увеличение балла соответствовало усилению оцениваемого признака: реалистичности, значимости, приемлемости или практической поддержки условия.

Таблица Ж.1 – Структура анкеты экспертного опроса

Модуль	Содержание	Тип вопросов	Связь с параметрами модели	Связь с гипотезами
1) Идентификация эксперта и данные для взвешивания	Группа эксперта, стаж, должностной уровень, опыт технологических и инвестиционных проектов	Закрытые вопросы и шкалы	W_{comp}, W_{inst}	H1
2) Условия сценария полной газификации с получением водорода	Цена водорода, инфраструктура, логистика, технологические риски, регуляторные условия	Шкалы Лайкерта, диапазонные вопросы	P_c, L, Q, $R_{тех}$, Infra	H2
3) Условия сценария частичной газификации с производством термококса	Цена и качество термококса, логистическое плечо, сырьевая база, применимость в металлургическом переделе	Шкалы Лайкерта, диапазонные вопросы	P_c, L, Q, $K_{т.и.}$, $R_{тех}$	H2
4) Факторы локации, сырья и технологической реализуемости	Критичность качества бурого угля, инфраструктуры и технологических отклонений	Шкалы значимости, открытые комментарии	Q, L, $R_{тех}$	H1, H2
5) Организационно-экономические условия координации участников	Организационная конфигурация, распределение контроля, цена промежуточного продукта	Выбор вариантов, ранжирование, комментарии	$K_{т.и.}$, $P_{внутр}$	H1, H3
6) Сравнительная стратегическая оценка сценариев	Сравнение полной и частичной газификации, условия преимущества сценариев, горизонт реализации	Семантический дифференциал, шкалы, открытые вопросы	Итоговая экспертная оценка	H2, H3

Источник: составлено автором.

Таблица Ж.2 – Вопросы анкеты по модулям

Модуль	Вопрос / формулировка	Шкала / варианты ответа
1	Укажите группу, к которой относится ваша профессиональная позиция	1 – металлургия; 2 – угледобыча; 3 – инвестиционно-институциональный блок
	Укажите стаж работы в отрасли или смежной сфере	Менее 5 лет; 5-10 лет; 10-15 лет; более 15 лет
	Имеете ли вы опыт участия в проектах технологической модернизации, инвестиционной оценки, сырьевого обеспечения или регулирования?	Да / нет / частично; открытый комментарий
2	Оцените реалистичность достижения приемлемой цены водорода, полученного при полной газификации бурых углей	Шкала 1-7, где 1 – нереалистично, 7 – полностью реалистично
	Оцените реалистичность создания необходимой инфраструктуры получения, транспортировки и использования водорода к 2035 г.	Шкала 1-7
	Какой уровень внешнего углеродного регулирования необходим для повышения привлекательности водородного сценария?	Диапазоны P_c: до 0,40; 0,41-0,60; 0,61-1,00; выше 1,00 у.е.
3	Оцените практическую реализуемость сценария частичной газификации бурых углей с производством термококса	Шкала 1-7
	Какое логистическое плечо поставки термококса может считаться приемлемым для проекта?	До 800 км; 800-1500 км; 1500-2500 км; 2500-3500 км; свыше 3500 км
	Какой уровень качества бурого угля является критически необходимым для устойчивого получения термококса?	Шкала значимости 1-7; открытый комментарий
4	Оцените значимость качества угля для жизнеспособности обоих сценариев	Шкала 1-7
	Какие технологические риски являются наиболее значимыми?	Выход продукта; качество; стабильность процесса; эксплуатационные затраты; иное
5	Какая организационная конфигурация представляется наиболее эффективной для управления технологическими рисками в капиталоемких проектах глубокой переработки бурых углей?	Стратегический альянс на этапе НИОКР; проектная форма / консорциум; имущественно-интегрированная структура; вертикально интегрированная модель; долгосрочный контракт с гарантиями поставщика технологии
	Какой принцип распределения контроля и ответственности является наиболее устойчивым?	Паритетная модель; лидирующая роль одного участника; распределение по вкладу активов и технологий; независимый оператор; иное
	Какой принцип расчета цены промежуточного продукта представляется наиболее приемлемым?	Себестоимость + нормативная доходность; привязка к эффекту конечного продукта; скользящая формула; переговорная цена в коридоре; иное
6	Оцените сценарии по шкале «тактическая адаптация – стратегическая трансформация»	Семантический дифференциал 1-7
	Оцените сценарии по шкале «минимизация текущих рисков – формирование долгосрочного преимущества»	Семантический дифференциал 1-7
	При каких условиях один из сценариев получает преимущество с точки зрения практической реализуемости?	Углеродное регулирование; отсутствие водородной инфраструктуры; ограниченный CAPEX; социальная адаптация; иное

Источник: составлено автором.

Приложение И

(информационное)

Технологическая схема проекта и параметры переработки бурого угля в термококс



Источник: составлено автором по материалам инвестиционного проекта.

Рисунок И.1 – Детализированная технологическая схема переработки бурого угля в термококс

Основные параметры качества углей приведены в таблице 2.

наименование пласта	A^c,% от-до среднее	W^a,% от-до среднее	W^p, % от-до среднее	V^r, % от-до среднее	S^cоб,% от-до среднее	P^c, % от-до среднее	$O^r_б$, ккал/кг от-до среднее	$O^P_н$, ккал/кг среднее
1 (основной)	18,46- 23,14 20,69	6,9-14,4 11,27	30,39- 36,0 33,2	50,08 – 52,92 51,6	0,95- 3,22 2,03	0,0105- 0,032 0,0191	6022 – 6293 6168	2985
1(ниж. пачка)	23,3- 31,2 27,04	6,01- 13,0 9,21	-	-	-	-	-	-
II	23,5- 32,9 29,64	5,32- 15,0 9,1	-	-	-	-	-	-
III	19,44- 34,47 24,79	5,7- 13,45 8,5	-	50,02- 52,45 52,23	1,08- 2,28 1,68	0,011- 0,039 0,025	6129- 6296 6212	2733

Источник: материалы инвестиционного проекта.

Рисунок И.2 – Химический состав исходного бурого угля, взятый за основу в параграфе 3.2

Таблица И.1 – Последовательность технологических стадий проекта

Стадия	Содержание	Роль в проекте
1) Добыча бурого угля	Открытая добыча ROM-угля на буроугольном месторождении	Формирует сырьевую базу проекта
2) Первичная подготовка	Сортировка, подготовка и подача угля на последующие технологические операции	Обеспечивает стабильность входного сырья
3) Пневмосепарация и осушка	Снижение влажности и повышение теплотворной способности подготовленного продукта	Формирует энергетический уголь, но не является целевой металлургической стадией проекта
4) Частичная газификация	Термическая переработка подготовленного бурого угля с получением термококса	Критическая стадия трансформации бурого угля в продукт металлургического назначения
5) Использование термококса	Поставка термококса в металлургический контур производства чугуна	Формирует связь с металлургическим переделом и основу экономического эффекта

Источник: составлено автором.

Таблица И.2 – Технологические параметры переработки бурого угля в термококс

В процентах

Показатель	Исходный бурый уголь	Подготовленный энергетический уголь после пневмосепарации и осушки	Термококс, расчетный режим
Влажность	11,27	5,0	3,0
Зольность	18,36 по рабочей массе	13,3 по рабочей массе	17,0 по сухой массе
Низшая теплота сгорания, в килокалориях на 1 кг	2 985	3 466	4 900
Выход от ROM	100	69	60
Энергия с 1 т ROM, в Гигакалориях	2,985	2,391	2,940
Потенциальное направление использования	Ограниченное энергетическое использование	Энергетический уголь для ТЭЦ	Металлургический контур производства чугуна

Источник: составлено автором.

Таблица И.3 – Расчет энергетического выхода термококса в пересчете на 1 т ROM-угля

Показатель	Формула / исходные данные	Значение
Энергетическая ценность исходного угля	$E_{уг}$ = 2 985 тыс. ккал/т	2,985 Гкал/т ROM
Энергетическая ценность термококса	$E_{тк,ROM}$ = 0,60 × 4 900 тыс. ккал/т	2,940 Гкал/т ROM
Коэффициент сопоставимости энергетической ценности	η_E = 2 940 / 2 985	0,985
Интерпретация	Расчетная энергетическая ценность твердого продукта в пересчете на 1 т ROM-угля сопоставима с энергетической ценностью исходного угля	Около 98,5%

Источник: составлено автором.

Таблица И.4 – Расчет объема выхода товарного продукта после применения различных способов глубокой переработки угля по данным термодинамических расчетов

Показатель	Зольность на сухую массу Ad (d), в процентах	Влажность Wr, в процентах	Зольность на рабочую массу Ad (r), в процентах	Доля горючей массы f	Qi,net,ar, в килокалориях на 1кг	Выход, в процентах от ROM	Энергия на 1 т ROM, в Гигакалориях
1	2	3	4	5	6	7	8
Без обогащения	20,69	11,27	18,36	0,703718	2985	100	2,985

Продолжение таблицы И.4

1	2	3	4	5	6	7	8
Пневмо-сепарация	10	11,27	8,87	0,79857	3387	50	1,694
	11	11,27	9,76	0,789697	3350	57,5	1,926
	12	11,27	10,65	0,780824	3312	65	2,153
	13	11,27	11,53	0,771951	3274	69,3	2,27
	14	11,27	12,42	0,763078	3237	73,7	2,384
	15	11,27	13,31	0,754205	3199	78	2,495
	16	11,27	14,2	0,745332	3162	81,3	2,571
	17	11,27	15,08	0,736459	3124	84,7	2,645
	18	11,27	15,97	0,727586	3086	88	2,716
	19	11,27	16,86	0,718713	3049	92	2,805
	20	11,27	17,75	0,70984	3011	96	2,891
	21	11,27	18,63	0,700967	2973	100	2,973
Пневмо + сушка	10	5	9,5	0,855	3627	46,9	1,7
	11	5	10,45	0,8455	3586	53,9	1,933
	12	5	11,4	0,836	3546	60,9	2,16
	13	5	12,35	0,8265	3506	65	2,278
	14	5	13,3	0,817	3466	69	2,393
	15	5	14,25	0,8075	3425	73,1	2,504
	16	5	15,2	0,798	3385	76,2	2,58
	17	5	16,15	0,7885	3345	79,4	2,654
	18	5	17,1	0,779	3304	82,5	2,725
	19	5	18,05	0,7695	3264	86,2	2,815
	20	5	19	0,76	3224	90	2,901
	21	5	19,95	0,7505	3183	93,7	2,984
Фабрика (мокрая)	10	10	9	0,81	3436	55	1,89
	11	10	9,9	0,801	3398	60	2,039
	12	10	10,8	0,792	3359	65	2,184
	13	10	11,7	0,783	3321	67	2,225
	14	10	12,6	0,774	3283	70	2,298

Продолжение таблицы И.4

1	2	3	4	5	6	7	8
Сухая фабрика	10	11,27	8,87	0,79857	3387	58	1,965
	11	11,27	9,76	0,789697	3350	64	2,144
	12	11,27	10,65	0,780824	3312	70	2,318
	13	11,27	11,53	0,771951	3274	74	2,423
	14	11,27	12,42	0,763078	3237	78	2,525
	15	11,27	13,31	0,754205	3199	82	2,623
	16	11,27	14,2	0,745332	3162	84,7	2,677
	17	11,27	15,08	0,736459	3124	87,3	2,728
	18	11,27	15,97	0,727586	3086	90	2,778
	19	11,27	16,86	0,718713	3049	93,3	2,845
	20	11,27	17,75	0,70984	3011	96,7	2,911
	21	11,27	18,63	0,700967	2973	100	2,973
Термококс:	–	–	–	–			
Режим	Wr, в процентах	Ad (d),% (сухая масса)	Qi,net,ar, в килокалориях на 1 кг	Выход, в процентах от ROM			
Мягкий (≈450°C)	3	16	4600	65			
Средний (≈520-550°C)	3	17	4900	60			
Жесткий (≈580-600°C)	3	18	5200	55			

Источник: составлено автором по материалам инвестиционного проекта и термодинамическим расчетам, приведенным в расчетных приложениях К и Л.

Приложение К

(информационное)

Финансовая модель проекта: P&L, CF и FCFF за расчетный горизонт

В связи с шириной исходной модели прогнозные таблицы разбиты на несколько горизонтов: основные финансовые показатели – по пятилетним блокам 2026-2045 гг., CAPEX и амортизация – по шестилетним блокам 2024-2053 гг.

Таблица К.1 – Исходные параметры ресурсной базы и технологические коэффициенты

Показатель	Единица измерения	Значение
Марка угля (добыча) 2Б	ккал	2 985,0
Килокалории после осушки	ккал	4 900,0
Запасы A, B, C1	тыс. т	58 365,0
Забалансовые запасы C1+C2	тыс. т	69 949,0
Плотность угля	т/м³	1,30
Плотность вскрыши	т/м³	2,40
Базовый коэффициент вскрыши	м³/т	5,74
Рост сложности вскрыши	% в год	0
Целевой годовой объем добычи	тыс. т	5 000,0
КТГ спецтехники	%	88,0
Исходная влажность угля	%	26,0
Целевая влажность угля	%	15,0
Коэффициент выхода ОФ	%	60,0
Снижение угольной массы за счет первичной осушки на разрезе	%	15,0
Сырье / ресурс, удельный расход		
Железорудный концентрат (65% Fe)	т/т	1,60
Окатыши	т/т	0,150
Флюс (известняк, 52% CaO)	т/т	0,280
Термококс (4900 ккал/кг)	т/т	0,750
Природный газ (отопление)	нм³/т	50,0
Кислород технический	нм³/т	45,0
Сжатый воздух (КИП и дутье)	нм³/т	70,0
Электроэнергия	кВт·ч/т	60,0

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.2 – Производственная программа и материальные потоки (2026-2030 гг.)

Показатель	Единица измерения	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.
Добыча угля						
Объем добычи	тыс. т	-	833,3	2 083,3	3 750,0	5 000,0
Объем получаемого термококса	тыс. т	-	500,0	1 250,0	2 250,0	3 000,0
Объем угля на нужды ТЭЦ	тыс. т	-	12,5	31,2	56,2	75,0
Объем реализации угля	тыс. т	-	487,5	1 218,7	2 193,7	2 925,0
Коэффициент вскрыши	м³/т	-	5,77	5,86	5,98	6,10
Объем вскрыши	тыс. м³	-	4 811,3	12 210,1	22 421,7	30 499,1
Объем горной массы	тыс. м³	-	5 186,3	13 147,6	24 109,2	32 749,1
Производство термококса						
Объем получаемого термококса	тыс. т	-	487,5	1 218,7	2 193,7	2 925,0
Производство чугуна						
Объем производства чугуна	тыс. т	-	651,0	1 625,0	2 925,0	3 900,0
Железорудный концентрат (65% Fe)	тыс. т	-	1 041,6	2 600,0	4 680,0	6 240,0
Окатыши	тыс. т	-	97,6	243,8	438,8	585,0
Флюс (известняк, 52% CaO)	тыс. т	-	182,3	455,0	819,0	1 092,0
Термококс (4900 ккал/кг)	тыс. т	-	488,2	1 218,8	2 193,8	2 925,0

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.3 – Расчет потребности в спецтехнике, логистике и производственной мощности (2026-2030 гг.)

Показатель	Единица измерения	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.
1	2	3	4	5	6	7
Расчет спецтехники угольного месторождения						
Экскавация добычи	тыс. м³	-	641,0	1 602,6	2 884,6	3 846,2
Справочно: месячная потребность	тыс. м³	-	106,8	160,3	320,5	320,5
Количество экскаваторов 7 м³ (добыча)	шт.	-	1	1	1	1
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	171,3	171,3	171,3	171,3
Количество экскаваторов 12 м³ (добыча)	шт.	-	-	1	1	1
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	0,0	293,0	293,0	293,0
Справочно: мощность парка техники	тыс. м³	-	171,3	464,3	464,3	464,3
Справочно: дефицит/профицит	тыс. м³	-	64,5	304,1	143,8	143,8

Продолжение таблицы К.3

1	2	3	4	5	6	7
Экскавация вскрыши	тыс. м³	-	4 811,3	12 222,3	22 459,1	30 499,1
Справочно: месячная потребность	тыс. м³	-	801,9	1 235,2	2 508,0	2 575,2
Количество экскаваторов 7 м³ (вскрыша)	шт.	-	1	1	1	1
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	171,3	171,3	171,3	171,3
Количество экскаваторов 12 м³ (вскрыша)	шт.	-	3	3	3	3
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	879,1	879,1	879,1	879,1
Количество экскаваторов 22 м³ (вскрыша)	шт.	-	-	1	3	3
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	0,0	532,4	1 597,2	1 597,2
Справочно: мощность парка техники	тыс. м³	-	1 050,4	1 582,8	2 647,6	2 647,6
Справочно: дефицит/профицит	тыс. м³	-	248,5	347,7	139,6	72,5
Количество самосвалов 90 т (добыча)	шт.	-	3	7	7	7
Количество самосвалов 90 т (вскрыша)	шт.	-	16	16	16	16
Количество самосвалов 130 т (вскрыша)	шт.	-	0	5	13	13
Количество карьерных погрузчиков 7 м³	шт.	-	2	2	4	4
Объем погрузки на осушку	тыс. м³	-	106,8	160,3	320,5	320,5
Объем погрузки на отправку до ОФ	тыс. м³	-	90,8	136,2	272,4	272,4
Бульдозеры	тыс. м³	-	5 452,3	13 824,8	25 343,7	34 345,2
Справочно: месячная потребность	тыс. м³	-	908,7	1 395,4	2 828,5	2 895,7
Количество бульдозеров 50 т	шт.	-	1	1	2	2
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	366,7	366,7	733,3	733,3
Количество бульдозеров 70 т	шт.	-	1	2	4	4
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	572,0	1 144,0	2 288,0	2 288,0
Справочно: мощность парка техники	тыс. м³	-	938,7	1 510,7	3 021,3	3 021,3
Справочно: дефицит/профицит	тыс. м³	-	29,9	115,3	192,8	125,7
Количество углевозов до ж/д станции	шт.	-	4	5	7	9
Месячный объем перевозок	тыс. м³	-	90,8	136,2	272,4	272,4
Площадка осушки/обогатительная фабрика – отгрузка на экспорт						
Количество углевозов от ж/д Даурия до осушки/фабрики	шт.	-	3	3	4	6
Месячный объем перевозок	тыс. м³	-	90,8	136,2	272,4	272,4
Количество карьерных погрузчиков 7 м³	шт.	-	2	2	4	4
На осушку (разгрузка)	тыс. м³	-	0,000	0,000	0,000	0,000

Продолжение таблицы К.3

1	2	3	4	5	6	7
8На отправку до ОФ с Дуроевского месторождения	тыс. м³	-	0,000	0,000	0,000	0,000
Погрузка на осушку	тыс. м³	-	90,8	136,2	272,4	272,4
Погрузка после осушки	тыс. м³	-	64,1	96,2	192,3	192,3
Погрузка на экспорт	тыс. м³	-	64,1	96,2	192,3	192,3
Справочно: месячная потребность	тыс. м³	-	154,9	232,4	464,7	464,7
Количество бульдозеров 50 т	шт.	-	1	1	2	2
Месячная производительность парка	тыс. м³	-	366,7	366,7	733,3	733,3
Мощность парка техники, справочно	тыс. м³	-	366,7	366,7	733,3	733,3
Справочно: дефицит/профицит	тыс. м³	-	211,8	134,3	268,6	268,60

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.4 – Макроэкономические предпосылки, объемы, цены и операционные расходы (2026-2030 гг.)

Показатель	Единица измерения	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.
1	2	3	4	5	6	7
Макроэкономический прогноз						
Ключевая ставка (юань) (в среднем за период)	%	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Инфляция (рублевые расходы) (на конец периода)	%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Индексация	%	100,0	102,5	105,1	107,7	110,4
Объемы						
Объем вскрыши	тыс. м³	-	4 811,0	12 222,0	22 459,0	30 499,0
Объем добычи	тыс. т	-	833,0	2 083,0	3 750,0	5 000,0
Объем горной массы	тыс. м³	-	5 452,0	13 825,0	25 344,0	34 345,0
Объем потребления угля на собственые нужды	тыс. т	-	13,0	31,0	56,0	75,0
Коэффициент вскрыши	м³/т	-	5,80	5,90	6,00	6,10
Объем производства термококса	тыс. т	-	488,0	1 219,0	2 194,0	2 925,0
Объем производства чугуна	тыс. т	-	651,0	1 625,0	2 925,0	3 900,0
Железорудный концентрат (65% Fe)	тыс. т	-	1 041,6	2 600,0	4 680,0	6 240,0

Продолжение таблицы К.4

1	2	3	4	5	6	7
Окатыши	тыс. т	-	97,6	243,8	438,8	585,0
Флюс (известняк, 52% CaO)	тыс. т	-	182,3	455,0	819,0	1 092,0
Термококс (4900 ккал/кг)	тыс. т	-	488,2	1 218,8	2 193,8	2 925,0
Цены реализации						
Термококс, FCA	руб./т	-	4 627,4	4 743,1	4 861,6	4 983,2
Бурый уголь, FCA	руб./т	-	3 442,5	3 528,6	3 616,8	3 707,2
Транспортировка до металлургического завода	руб./т	-	439,6	450,6	461,9	473,4
Чугун, FCA	руб./т	-	19 000,0	19 475,0	19 961,9	20 460,9
- Реализация чугуна	млн руб.	-	12 369,0	31 646,9	58 388,5	79 797,6
Прямые переменные расходы	млн руб.	-	1 303,8	3 076,6	5 196,5	7 186,2
- БВР	млн руб.	-	399,6	1 038,5	1 951,4	2 710,6
- Вскрыша	млн руб.	-	554,5	1 227,2	1 849,2	2 574,0
- Добыча	млн руб.	-	48,3	99,1	175,7	240,2
- НДПИ	млн руб.	-	30,8	79,0	145,8	199,3
- Склад угля, дробление и отгрузка на разрезе	млн руб.	-	34,3	70,3	103,8	141,9
- Содержание вахтового городка	млн руб.	-	34,8	71,0	104,3	141,9
- Пневмосепарация и осушка (разрезы)	млн руб.	-	12,8	32,8	60,6	82,8
- Перевозка продукции на склад ж/д станции	млн руб.	-	188,7	458,6	805,6	1 095,6
Косвенные переменные расходы	млн руб.	-	111,5	261,8	439,1	609,1
- Прочие расходы (подача, уборка вагонов и т.д.)	млн руб.	-	111,5	261,8	439,1	609,1
Косвенные постоянные расходы	млн руб.	-	961,8	1 220,2	1 460,7	1 710,6
Общие производственные расходы	млн руб.	-	472,2	720,8	951,3	1 191,0
- Налог на имущество	млн руб.	-	69,8	173,7	207,2	178,9
- Общепроизводственные	млн руб.	-	402,3	547,2	744,2	1 012,1
Административные, управленческие расходы	млн руб.	-	489,6	499,4	509,4	519,6
Итого расходы в рамках угледобычи	млн руб.	-	2 377,1	4 558,7	7 096,3	9 505,8

Продолжение таблицы К.4

1	2	3	4	5	6	7
Себестоимость добытого бурого угля, FCA	руб./т	-	2 853,6	2 188,5	1 892,4	1 901,2
- Газификация бурого угля	млн руб.	-	56,4	144,4	266,5	364,3
Операционные расходы по газификации	-	-	56,4	144,4	266,5	364,3
Налог на имущество газификации	-	-	27,7	55,4	83,1	74,3
Себестоимость термококса, FCA	руб./т	-	4 986,5	3 858,2	3 355,9	3 374,4
- Ж/д перевозка угля	млн руб.	-	214,5	549,3	1 013,3	1 384,7
Прямые переменные расходы	млн руб.	-	5 950,8	15 225,4	28 090,9	38 390,8
- Железорудный концентрат (65% Fe)	млн руб.	-	5 124,7	13 111,8	24 191,3	33 061,4
- Окатыши	млн руб.	-	620,6	1 587,8	2 929,4	4 003,5
- Флюс (известняк, 52% CaO)	млн руб.	-	205,5	525,8	970,2	1 325,9
Косвенные переменные расходы	млн руб.	-	753,9	1 928,9	3 558,8	4 863,6
- Прочие расходы (подача, уборка вагонов и т.д.)	млн руб.	-	595,1	1 522,5	2 809,1	3 839,1
- ФОТ производственного персонала	млн руб.	-	158,8	406,3	749,7	1 024,6
Косвенные постоянные расходы	млн руб.	-	1 062,7	1 617,8	1 761,2	1 797,1
Общие производственные расходы	млн руб.	-	519,2	1 063,5	1 195,8	1 220,4
- Налог на имущество	млн руб.	-	474,4	948,8	984,1	931,1
- Общепроизводственные	млн руб.	-	44,8	114,7	211,7	289,3
Административные, управленческие расходы	млн руб.	-	543,5	554,3	565,4	576,7
Итого расходы в рамках производства чугуна, без учета расходов на энергоресурсы	млн руб.	-	7 767,3	18 772,1	33 410,8	45 051,6
Итого расходы в рамках производства чугуна, с учетом расходов на энергоресурсы	млн руб.	-	10 415,3	24 024,5	41 787,0	56 306,3
Себестоимость чугуна, FCA	руб./т	-	11 931,4	11 552,0	11 422,5	11 551,7
EBITDA, вертикально-интегрированная компания	млн руб.	-	1 953,7	7 622,4	16 601,5	23 491,2
Справочно: маржинальность	%	-	15,8	24,1	28,4	29,4
Справочно: EBITDA, угледобыча + термококс	млн руб.	-	-175,3	1 078,7	3 303,6	4 705,7

Продолжение таблицы К.4

1	2	3	4	5	6	7
Промежуточный расчет: выручка, если бы шла реализация термококса	-	-	2 258,2	5 781,8	10 666,4	14 575,8
Справочно: маржинальность	%	-	-7,8	18,7	31,0	32,3
Справочно: EBITDA, чугун	млн руб.	-	2 129,0	6 543,7	13 297,9	18 785,6
Промежуточный расчет: если бы закупался термококс	-	-	-10 240,0	-25 103,1	-45 090,6	-61 012,0
Справочно: маржинальность	%	-	17,2	20,7	22,8	23,5

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.5 – P&L-модель и показатели операционного результата (2026-2030 гг.)

Показатель	Единица измерения	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.
EBITDA, вертикально интегрированная компания	млн руб.	-	1 953,7	7 622,4	16 601,5	23 491,2
Справочно: маржинальность	%	-	15,8	24,1	28,4	29,4
Справочно: EBITDA, угледобыча + термококс	млн руб.	-	-175,3	1 078,7	3 303,6	4 705,7
Промежуточный расчет: выручка, если бы шла реализация термококса	-	-	2 258,2	5 781,8	10 666,4	14 575,8
Справочно: маржинальность	%	-	-7,8	18,7	31,0	32,3
Справочно: EBITDA, чугун	млн руб.	-	2 129,0	6 543,7	13 297,9	18 785,6
Промежуточный расчет: если бы закупался термококс	-	-	-10 240,0	-25 103,1	-45 090,6	-61 012,0
Справочно: маржинальность	%	-	17,2	20,7	22,8	23,5
Амортизация	млн руб.	-	606,0	3 486,0	4 480,5	4 520,5
Налог на прибыль	млн руб.	-	336,9	1 034,1	3 030,2	4 742,7
Чистая прибыль	млн руб.	-	1 010,8	3 102,3	9 090,7	14 228,1

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.6 – CF-модель, FCFF и инвестиционные показатели (2026-2030 гг.)

Показатель	Единица измерения	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.
Остаток ДС на начало периода	млн руб.	0,0	–23 880,0	–65 050,3	–70 846,2	–61 879,6
Остаток ДС на конец периода	млн руб.	–23 880,0	–65 050,3	–70 846,2	–61 879,6	–44 428,9
Чистая прибыль	млн руб.	-	1 010,8	3 102,3	9 090,7	14 228,1
Амортизация	млн руб.	-	606,0	3 486,0	4 480,5	4 520,5
Изменение оборотного капитала	млн руб.	-	867,9	1 134,1	1 480,2	1 209,9
Итого по операционной деятельности	млн руб.	-	748,9	5 454,2	12 091,0	17 538,6
CAPEX, без НДС	-	19 573,8	34 360,0	9 221,4	2 561,0	72,1
FCFF	млн руб.	–19 573,8	–33 611,1	–3 767,2	9 530,0	17 466,5

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.7 – Итоговые инвестиционные показатели проекта

Показатель	Единица измерения	Значение
WACC	%	20,0
IRR	%	22,6
Срок возврата кредитов	лет	8,00
EBITDA в год выхода на целевую производственную мощность	млн руб.	23 491,2
Capex, без НДС	млн руб.	65 806,6
Сумма DCFF	млн руб.	6 748,2

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.8 – Инвестиционная программа по данным листа «Модель»

В миллионах рублей

Показатель	Значение
Инвестиционная программа – угледобыча	
Лицензия	300,0
ГРР и ТЭО запасов	210,0
Технологическая автодорога от разреза до ж/д станции 5-й км	160,0
Ж/д инфраструктура	200,0
ЛЭП 220 кВ и подстанция 35 МВт	1 500,0
Подготовка разреза	640,0
Пневмосепарационная установка / Газификатор	2 500,0
Бытовая инфраструктура	320,0
Система диспетчеризации и ИТ	110,0
Производственная инфраструктура	650,0
Прочее оборудование (ИТ, СБ и пр.)	80,0
Спецтехника	9 441,6
Инвестиционная программа – прочая спецтехника	
Спецтехника	450,6

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.9 – Технологические предпосылки и производительность оборудования

Показатель	Единица измерения	Значение
1	2	3
Экскаваторы		
Класс 7 м^3	тыс. м³ / год	2336
Класс 12 м^3	тыс. м³ / год	3 996,0
Класс 22 м^3	тыс. м³ / год	7 260,0
Бульдозеры	–	–
Класса 50 т	тыс. м³ / год	5 000,0
Класса 70 т	тыс. м³ / год	7 800,0
Точки забоя	ед.	2,00
Класс 28 т	тыс. м³/год	3 000,0

Продолжение таблицы К.9

1	2	3
Самосвалы, класс 90 т (добыча)		
Грузоподъемность самосвала	т	90,0
Плотность породы	т/м³	1,50
Вместимость кузова	м³	60,0
Время установки самосвала под погрузку	с	30,0
Время погрузки	мин	5,40
Время выезда самосвала после погрузки	с	17,0
Расстояние транспортирования	км	5,40
Среднерейсовая скорость движения автосамосвала	км/ч	22,5
Время установки самосвала под разгрузку	с	23,0
Время разгрузки самосвала	с	50,0
Время в движении (туда обратно)	мин.	28,8
Время оборота одного рейса	мин.	36,2
Количество рейсов в час	рейс/ч	1,66
Производительность в час	м³/ч	99,4
Количество рейсов в смену	рейс/смену	17,0
Сменная производительность самосвала	м³/смену	1 020,0
Количество рейсов в сутки	рейс/сут.	34,0
Расчетная суточная производительность самосвала	м³/сут.	2 040,0
Коэффициент выхода (технической готовности)	доли ед.	0,849
КТГ	доли ед.	0,750
Количество рейсов в месяц	рейс/мес.	986,0
Месячная производительность самосвала с учетом КИ	тыс. м³/мес.	37,7
Годовая производительность	тыс. м³/год	452,1
Самосвалы, класс 90 т (вскрыша)		
Грузоподъемность самосвала	т	90,0
Плотность породы	т/м³	1,50
Вместимость кузова	м³	60,0
Время установки самосвала под погрузку	с	30,0
Время погрузки	мин.	5,40
Время выезда самосвала после погрузки	с	17,0
Расстояние транспортирования	км	0,000

Продолжение таблицы К.9

1	2	3
Среднерейсовая скорость движения автосамосвала	км/ч	22,5
Время установки самосвала под разгрузку	с	23,0
Время разгрузки самосвала	с	50,0
Время в движении (туда обратно)	мин.	50,0
Время оборота одного рейса	мин.	57,4
Количество рейсов в час	рейс/ч	1,05
Производительность в час	м³/ч	62,7
Количество рейсов в смену	рейс/смену	10,0
Сменная производительность самосвала	м³/смену	600,0
Количество рейсов в сутки	рейс/сут.	20,0
Расчетная суточная производительность самосвала	м³/сут.	1 200,0
Коэффициент выхода (технической готовности)	доли ед.	0,849
КТГ	доли ед.	0,750
Количество рейсов в месяц	рейс/мес.	580,0
Месячная производительность самосвала с учетом КИ	тыс. м³/мес.	22,2
Потребность самосвалов на максимальную производительность экскаватора	ед.	-
Годовая производительность	тыс. м³/год	265,9
Самосвалы, класс 220 т		
Грузоподъемность самосвала	т	220,0
Плотность породы	т/м³	2,50
Вместимость кузова	м³	88,0
Время установки самосвала под погрузку	с	30,0
Время погрузки	мин.	3,32
Время выезда самосвала после погрузки	с	17,0
Расстояние транспортирования	км	0,000
Среднерейсовая скорость движения автосамосвала	км/ч	22,5
Время установки самосвала под разгрузку	с	25,0
Время разгрузки самосвала	с	50,0
Время в движении (туда обратно)	мин.	60,0
Время оборота одного рейса	мин.	65,4
Количество рейсов в час	рейс/ч	0,918

Продолжение таблицы К.9

1	2	3
Производительность в час	м³/ч	80,8
Количество рейсов в смену	рейс/смену	9,00
Сменная производительность самосвала	м³/смену	792,0
Количество рейсов в сутки	рейс/сут.	18,0
Расчетная суточная производительность самосвала	м³/сут.	1 584,0
Коэффициент выхода (технической готовности)	доли ед.	0,849
КТГ	доли ед.	0,850
Количество рейсов в месяц	рейс/мес.	522,0
Месячная производительность самосвала с учетом КИ	тыс. м³/мес.	33,2
Годовая производительность	тыс. м³/год	397,8
Погрузчики класса 7 м³	тыс. м³ / год	1374
Срок полезного использования техники и оборудования	лет	7,00

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.10 – Базис CAPEX с НДС (2026-2031 гг.)

В тысячах рублей

Показатель	Всего	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.	2031 г.
1	2	3	4	5	6	7	8
Разведочные работы, в том числе:	1 210 000	1 210 000	500 000	-	-	-	-
Лицензия	300 000,0	300 000,0	-	-	-	-	-
Проектно-изыскательские работы	800 000,0	800 000,0	400 000,0	-	-	-	-
ГРР и ТЭО запасов	110 000,0	110 000,0	100 000,0	-	-	-	-
Технологическая автодорога от разреза до ж/д 5-й км	160 000,0	60 000,0	100 000,0	-	-	-	-
Металлургический завод, оборудование и строительство	37 200 000	11 500 000	20 100 000	5 600 000	-	-	-
ЛЭП и прочая инфраструктура металургического завода	21 400 000	7 300 000	12 400 000	1 700 000	-	-	-
Ж/д инфраструктура	200 000,0	100 000,0	100 000,0	-	-	-	-
ЛЭП 220 кВ и подстанция 35 МВт	2 500 000	1 000 000	1 500 000	-	-	-	-
Подготовка разреза	640 000,0	340 000,0	300 000,0	-	-	-	-
Пневмосепарационная установка / Газификатор	4 800 000	1 800 000	1 800 000	1 200 000	-	-	-
Бытовая инфраструктура	320 000,0	120 000,0	100 000,0	100 000,0	-	-	-
Система диспетчеризации и ИТ	110 000,0	-	60 000,0	50 000,0	-	-	-
Производственная инфраструктура	650 000,0	400 000,0	250 000,0	-	-	-	-
Прочее оборудование (ИТ, СБ и пр.)	80 000,0	50 000,0	30 000,0	-	-	-	-

Продолжение таблицы К.10

В тысячах рублей

1	2	3	4	5	6	7	8
Спецтехника (1-я очередь)	18 161 216	-	4 540 304	-	-	-	-
Спецтехника (2-я очередь)	9 136 784	-	-	2 284 196	-	-	-
Спецтехника (3-я очередь)	11 863 944	-	-	-	2 965 986	-	-
Спецтехника (4-я очередь)	325 600,0	-	-	-	-	81 400,0	-
Спецтехника (5-я очередь)	81 400,0	-	-	-	-	-	20 350,0

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Таблица К.11 – CAPEX с НДС с учетом инфляции (2026-2031 гг.)

В тысячах рублей

Показатель	Всего	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.	2031 г.
Индексация CAPEX	-	12,0	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4
Наращивание ресурсной базы	-	-	-	-	-	-	-
Разведочные работы, в том числе:	1 713 870,0	1 210 000,0	503 869,8	-	-	-	-
Лицензия	300 000,0	300 000,0	-	-	-	-	-
Проектно-изыскательские работы	1 202 505,0	800 000,0	402 505,2	-	-	-	-
ГРР и ТЭО запасов	211 364,6	110 000,0	101 364,6	-	-	-	-
Технологическая автодорога от разреза до ж/д 5 км	161 364,6	60 000,0	101 364,6	-	-	-	-
Металлургический завод, оборудование и строительство	37 395 452	11 500 000	20 141 875	5 753 577	-	-	-
ЛЭП и прочая инфраструктура металургического завода	21 472 455	7 300 000	12 425 833	1 746 622	-	-	-
ЖД инфраструктура	201 364,6	100 000,0	101 364,6	-	-	-	-
ЛЭП 220кВ и подстанция 35МВт	2 520 468	1 000 000	1 520 468	-	-	-	-
Подготовка разреза	644 093,7	340 000,0	304 093,7	-	-	-	-
Пневмосепарационная установка / Газификатор	4 871 697	1 800 000	1 824 562	1 247 135	-	-	-
Бытовая инфраструктура	325 292,5	120 000,0	101 364,6	103 927,9	-	-	-
Система диспетчеризации и IT	112 782,7	-	60 818,7	51 964,0	-	-	-
Производственная инфраструктура	653 411,4	400 000,0	253 411,4	-	-	-	-
Прочее оборудование (ИТ, СБ, прочее)	80 409,4	50 000,0	30 409,4	-	-	-	-
Спецтехника (1-я очередь)	24 109 723	-	4 549 763	-	-	-	-
Спецтехника (2-я очередь)	12 436 172	-	-	2 346 839	-	-	-
Спецтехника (3-я очередь)	16 556 500	-	-	-	3 124 389	-	-
Спецтехника (4-я очередь)	465 875,5	-	-	-	-	87 915,7	-
Спецтехника (5-я очередь)	119 414,2	-	-	-	-	-	22 534,7

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Приложение Л

(информационное)

Расчеты чувствительности показателя КУЕСЭ проекта и внутренней цены термококса к логистическому коэффициенту

Таблица Л.1 – Чувствительность КУЕСЭ проекта к логистическому коэффициенту

В процентах

Коэффициент превышения логистических затрат kлог	Полная стоимость альтернативного энергоносителя, в рублях за тонну	$КУЕСЭ_{проект}$	Снижение относительно альтернативы
1	5 592,9	70,9	29,1
3	6 563,3	60,4	39,6
5	7 533,7	52,6	47,4
10	9 959,7	39,8	60,2

Источник: составлено автором.

Таблица Л.2 – Чувствительность экономически обоснованной цены к логистическому коэффициенту

В рублях

$k_{лог}$	Полная стоимость с доставкой альтернативного энергоносителя	Верхняя граница внутренней цены	Экономически обоснованная цена при $\alpha = 0,5$	Распределяемая синергия за год
1	5 592,9	5 107,7	4 964,8	800 000 000
3	6 563,3	6 078,1	5 450,0	3 700 000 000
5	7 533,7	7 048,5	5 935,2	6 500 000 000
10	9 959,7	9 474,5	7 148,2	13 600 000 000

Источник: составлено автором.