ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ С ПУЛЬТРУЗИОННЫМ КОМПОЗИТНЫМ КАРКАСОМ И 3D-ПЕЧАТНЫМИ СТЕНАМИ

Акбаров Дильшод Баходирович
Акрамов Хуснитдин Ахарович
научного руководителя
Интегрированная оценка капитальных затрат,
LCC, углеродного следа, сроков, риска и циркулярности

Аннотация.

Цель исследования состоит в разработке воспроизводимой методики технико-экономического и экологического обоснования малоэтажного здания, в котором несущая система выполнена из пултрузионных стеклопластиковых профилей, а наружные ненесущие стены формируются методом экструзионной 3D-печати с заполнением полистиролбетоном. Сопоставлены четыре сценария: традиционный стальной каркас с газобетонным ограждением T0; пилотный вариант P1; серийный локализованный вариант P2; целевой низкоуглеродный вариант P3. Функциональная единица включает несущий каркас и непрозрачное наружное ограждение двухэтажного здания площадью 155,52 м² в течение 50 лет при сопоставимых несущей и тепловой функциях. Рассчитаны капитальные затраты, чистая приведённая стоимость жизненного цикла, эквивалентные годовые затраты, продолжительность строительства и потенциал глобального потепления по модулям A1–A5, B2–B4, C1–C4 и D. Для демонстрационного набора исходных данных CAPEX составил 377,74; 481,14; 349,67 и 320,56 у.е./м² соответственно для T0, P1, P2 и P3. Чистая приведённая стоимость за 50 лет равна 444,21; 527,49; 383,48 и 348,22 у.е./м². Углеродный след составил 134,66; 200,34; 157,31 и 95,45 кг CO_2-экв./м². Таким образом, масштабирование и локализация позволяют P2 снизить капитальные затраты на 7,4 %, но сами по себе не гарантируют экологического выигрыша; вариант P3 одновременно уменьшает жизненные затраты на 21,6 % и углеродный след на 29,1 % относительно T0. Установлены пороговые значения цены GFRP-профиля 6,23 у.е./кг и полного углеродного фактора 2,57 кг CO_2-экв./кг. Монте-Карло-анализ показал вероятность стоимостного преимущества P2 около 88 %, тогда как вероятность его углеродного преимущества составляет около 29 %; для целевого P3 последняя возрастает примерно до 98 % при условии достижения заданных низкоуглеродных параметров. Результаты являются расчётно-сценарными и предназначены для последующей замены коммерческими предложениями, экологическими декларациями продукции и данными натурного пилота.

Ключевые слова: строительная 3D-печать; пултрузионный GFRP; полистиролбетон; капитальные затраты; стоимость жизненного цикла; LCC; оценка жизненного цикла; LCA; углеродный след; проектирование для разборки; циркулярная экономика; анализ неопределённости.

Для цитирования: [Ф.И.О.]. Технико-экономическая эффективность и оценка жизненного цикла малоэтажного здания с пултрузионным композитным каркасом и 3D-печатными стенами // [Название журнала]. 2026. Т. [ ], № [ ]. С. [–].

TECHNO-ECONOMIC EFFICIENCY AND LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF A LOW-RISE BUILDING WITH A PULTRUDED COMPOSITE FRAME AND 3D-PRINTED WALLS

Abstract. A transparent scenario-based framework is proposed for comparing a conventional steel-frame building with pilot, serial and target low-carbon variants combining a pultruded GFRP frame and 3D-printed non-load-bearing walls filled with polystyrene concrete. The assessment covers capital cost, 50-year life-cycle cost, schedule, greenhouse-gas emissions, uncertainty, design for disassembly and multi-criteria decision support. The serial scenario reduces CAPEX but does not automatically reduce embodied carbon; a simultaneous economic and environmental advantage is achieved only in the target scenario through mass optimisation, low-carbon mixes, local supply and component reuse. All numerical values are demonstrative and require project-specific verification.

Keywords: 3D construction printing; pultruded GFRP; polystyrene concrete; life-cycle costing; life-cycle assessment; embodied carbon; design for disassembly; uncertainty analysis.



Рисунок 1 — Структура интегрированной технико-экономической и экологической оценки

1. Введение

Переход от экспериментальной демонстрации строительной 3D-печати к серийному применению требует ответа не только на вопросы прочности, устойчивости и технологичности, но и на вопрос о том, при каких условиях новая конструктивно-технологическая система создаёт измеримую экономическую ценность. Отдельная оценка стоимости печатаемой смеси или массы каркаса не позволяет установить эффективность здания в целом, поскольку итоговый результат определяется мобилизацией оборудования, логистикой, производительностью, контролем качества, ремонтными сценариями, сроком службы и возможностью повторного использования компонентов.

Для систем с пултрузионным стеклопластиковым каркасом экономический анализ дополнительно осложняется высокой долей первоначальной стоимости профилей и соединительных деталей, необходимостью специальной обработки отверстий и отсутствием устоявшейся локальной цепочки поставок. Одновременно коррозионная стойкость, малая масса и возможность сухой сборки могут сократить затраты на монтаж, обслуживание и демонтаж. Следовательно, сравнение только по

начальной цене способно систематически занижать долгосрочный эффект композитного решения.

Экологическая оценка также неоднозначна. Свобода формы, отсутствие опалубки и снижение отходов часто рассматриваются как безусловные преимущества 3D-печати, однако высокое содержание цементного вяжущего, химических добавок и энергозатраты на производство армирующих волокон и полимерной матрицы могут увеличить воздействие модулей A1–A3. Поэтому экологический выигрыш должен подтверждаться расчётом для функционально сопоставимых вариантов, а не декларироваться по факту применения цифрового оборудования.

Настоящая работа продолжает цикл исследований конструктивной системы двухэтажного дома с GFRP-каркасом и трёхслойными 3D-печатными стенами. В предыдущих частях были разработаны несущая схема, модели напряжённо-деформированного состояния, теплотехнические параметры стены, деформационно-развязные узлы, сейсмическая концепция и BIM-ориентированный производственный маршрут. Здесь эти решения объединены в единую модель стоимости и жизненного цикла.

Таблица 1 — Основные сокращения и обозначения

Обозначение	Расшифровка
CAPEX	первоначальные капитальные затраты
LCC	стоимость жизненного цикла
NPV	чистая приведённая стоимость
EUAC	эквивалентные годовые затраты
LCA	оценка жизненного цикла
GWP	потенциал глобального потепления, CO_2-экв.
EPD	экологическая декларация продукции
GFRP	стеклопластик, армированный стеклянными волокнами
DfD/A	проектирование для разборки и адаптируемости
MCDA	многокритериальный анализ решений

2. Состояние вопроса и исследовательский разрыв

2.1. Экономика строительной 3D-печати

Научные обзоры связывают строительную 3D-печать с сокращением ручного труда, опалубки, отходов и продолжительности отдельных операций. Однако фактический экономический результат зависит от уровня загрузки оборудования, геометрической повторяемости, расположения производства и стоимости обеспечения непрерывного материального потока. Исследования ценностного потока показывают, что как площадочная, так и внеплощадочная печать сохраняют значительную долю операций, не создающих непосредственной ценности; при малом объёме заказа мобилизация, хранение и сборка способны нейтрализовать экономию труда.

Преимущество аддитивного метода проявляется наиболее устойчиво при повторяемой серии, близком расположении поставщиков и использовании геометрии, которая действительно сокращает расход материала или объединяет несколько функций. Простая замена традиционной кладки сплошной высококлинкерной

печатаемой оболочкой без оптимизации формы может дать технологический эффект, но не обеспечить ни меньшую стоимость, ни меньший углеродный след.

2.2. Экономика пултрузионных композитных конструкций

Пултрузионные профили характеризуются высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и малой массой. Для лёгкого здания это уменьшает грузоподъёмность монтажной техники, транспортные нагрузки и трудоёмкость сборки. В то же время стоимость смолы, волокон, пултрузии и специальных соединений обычно выше стоимости массового проката на единицу массы. Экономическая состоятельность GFRP определяется не только закупочной ценой, но и сроком службы защитных покрытий стального аналога, частотой ремонта, доступностью узлов и остаточной стоимостью компонентов.

Для малоэтажной системы особенно важна проектная дисциплина: избыточно крупные профили быстро увеличивают и CAPEX, и GWP, тогда как рациональная связевая схема, стандартизация сечений и снижение количества уникальных деталей позволяют приблизить решение к серийному уровню.

2.3. Экологическая оценка и циркулярность

Методология LCA требует фиксировать функциональную единицу, границы, сценарии обслуживания и конца жизненного цикла. Для строительных изделий EPD формируются по модульной структуре, позволяющей раздельно показывать производство, транспорт, монтаж, эксплуатацию, демонтаж и эффекты за пределами системы. Такое разделение принципиально для композитных профилей: производственный углерод может быть выше, чем у стального варианта, но сухой демонтаж и повторное использование способны сформировать значимый кредит модуля D.

Циркулярность не возникает автоматически из долговечности материала. Она требует доступных соединений, маркировки, цифрового паспорта, отсутствия необратимого склеивания несовместимых слоёв и договорной схемы возврата компонентов. Именно поэтому проектирование для разборки включено в настоящее исследование как самостоятельный критерий, а не как качественное пожелание.

2.4. Исследовательский разрыв

В опубликованных работах экономические и экологические показатели строительной 3D-печати часто анализируются отдельно от стоимости несущей системы, а исследования GFRP-каркасов редко учитывают аддитивное ограждение, цифровой контроль и деформационно-развязные узлы. Недостаточно работ, в которых одновременно: (1) соблюдается единая функциональная единица; (2) различаются пилотный, серийный и целевой сценарии; (3) рассчитываются CAPEX, LCC и GWP; (4) устанавливаются пороговые значения цены и углеродного фактора; (5) учитывается неопределённость и циркулярность. Настоящая статья направлена на закрытие этого разрыва.

3. Цель, задачи и научная новизна

Цель работы — определить условия, при которых конструктивно-технологическая система малоэтажного здания с пултрузионным композитным каркасом и 3D-печатными стенами становится экономически и экологически предпочтительной относительно традиционного решения.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- сформирована функциональная единица и единые границы сравнения;
- разработаны четыре сценария зрелости технологии T0, P1, P2 и P3;
- составлены параметрические модели объёмов, CAPEX, календарного срока, LCC и GWP;
- проведён анализ точек безубыточности по цене и углеродному фактору GFRP;

- оценена чувствительность результата к ключевым исходным данным;
- выполнено вероятностное сравнение методом Монте-Карло;
- сформированы требования DfD, MCDA-модель и дорожная карта локализации.

Научная новизна заключается в совместном рассмотрении экономического, экологического и циркулярного поведения гибридной системы на уровне здания; в разделении эффекта пилотного внедрения, серийного освоения и целевой декарбонизации; а также в установлении количественных порогов, после которых новая система меняет сравнительную эффективность.

4. Методика исследования

4.1. Объект, функциональная единица и границы

Объектом служит двухэтажное прямоугольное здание размером 10,8 × 7,2 м с высотой этажа 3,0 м. Несущая система предлагаемых вариантов включает пултрузионные GFRP-колонны, балки и связи. Наружное ограждение состоит из двух 3D-печатных цементных оболочек толщиной по 30 мм и полистиролбетонного ядра толщиной 190 мм. Стены считаются ненесущими и соединяются с каркасом через нижние опоры и скользящие анкеры.

Функциональная единица сформулирована как обеспечение несущего каркаса и непрозрачного наружного ограждения здания общей площадью 155,52 м² в течение расчётного периода 50 лет при одинаковых требованиях к несущей способности, пространственной жёсткости и теплопередаче. Из базовой границы исключены фундамент, перекрытия, кровля, окна, инженерные системы и эксплуатационная энергия B6, поскольку для сравниваемых ограждений задана сопоставимая тепловая функция. Такое ограничение предотвращает смешение эффекта исследуемой системы с общими элементами здания.



Рисунок 2 — Функциональная единица и модульные границы расчёта

Таблица 2 — Геометрические и материальные параметры расчётного объекта

Параметр	Значение	Комментарий
Размер в плане	10,8 × 7,2 м	двухэтажное здание
Общая площадь	155,52 м²	2 × 77,76 м²
Высота этажа	3,0 м	общая высота 6,0 м

Параметр	Значение	Комментарий
Площадь непрозрачных стен	172,8 м²	после вычета проёмов
Толщина стены	250 мм	30 + 190 + 30 мм
Объём печатаемого состава	11,61 м³	оболочки с перемычками
Объём полистиролбетона	31,59 м³	теплоизоляционное ядро
Масса GFRP P1/P2	4 234 кг	демонстрационная ведомость
Масса GFRP P3	3 726 кг	оптимизация на 12 %
Расчётный период	50 лет	для LCC и LCA

Примечание. Параметры являются исходными данными расчётного примера и должны быть заменены ведомостью объёмов конкретного проекта.

4.2. Сценарии сравнения

Сценарии сформированы так, чтобы отделить эффект самой технологии от эффекта масштаба, локализации и целевой декарбонизации. T0 представляет традиционную систему со стальным каркасом и газобетонным ограждением со штукатуркой. P1 соответствует первому пилоту с низкой загрузкой принтера, импортной логистикой и повышенными затратами на контроль. P2 моделирует повторяемую серию с обученной бригадой и распределением стоимости оборудования между объектами. P3 дополнительно предусматривает оптимизацию массы, низкоклинкерный печатаемый состав, низкоуглеродное энергоснабжение и проектирование компонентов для повторного использования.

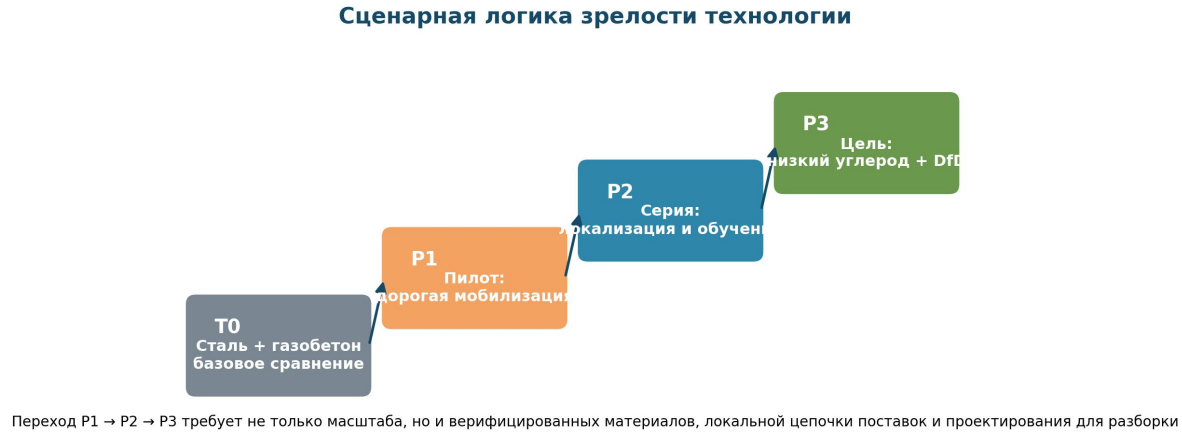

Рисунок 3 — Сценарии зрелости конструктивно-технологической системы

Таблица 3 — Содержание сценариев T0–P3

Сценарий	Каркас	Ограждение	Организация и экологическая предпосылка
T0	8,30 т стального каркаса	газобетон 43,20 м³ + штукатурка	традиционный монтаж, базовый ремонт и переработка стали

Сценарий	Каркас	Ограждение	Организация и экологическая предпосылка
P1	4,234 т GFRP	3D-печать 11,61 м³ + ядро 31,59 м³	пилот, импорт, высокая мобилизация и QA
P2	4,234 т GFRP	то же	серия, локальная логистика, обучение, распределение стоимости принтера
P3	3,726 т GFRP	низкоклинкерная оболочка 11,20 м³ + ядро	оптимизация, низкоуглеродная энергия, DfD и повторное использование

4.3. Стоимостная модель

CAPEX определён методом элементных ресурсов. В модель включены материалы каркаса и стен, подготовка и соединительные детали, труд, оборудование, контроль качества, логистика, отходы и временные накладные расходы площадки. Денежные значения выражены в условных единицах и не являются коммерческим предложением или прогнозом рыночной цены. Такой формат выбран для выделения пороговых зависимостей и последующей простой замены ставок.

$$CAPEX = \Sigma_i (Q_i \cdot p_i) + C_lab + C_eq + C_QA + C_log + C_w + C_oh \quad (1)$$

где Q_i и p_i — объём и единичная ставка i-го ресурса; C_lab — труд; C_eq — оборудование; C_QA — контроль качества; C_log — логистика; C_w — отходы; C_oh — накладные расходы.

Продолжительность определена укрупнённым сетевым графиком с частичным совмещением операций. Экономический эффект сокращения срока отражён в переменной части накладных расходов, но финансовая выгода от более раннего ввода объекта в эксплуатацию в базовый расчёт не включалась.

4.4. Стоимость жизненного цикла

LCC рассчитывается как сумма первоначальных затрат, дисконтированных расходов на обслуживание, ремонт, замены и завершение жизненного цикла за вычетом дисконтированной остаточной стоимости. Принята реальная ставка дисконтирования 4 % и горизонт 50 лет.

$$LCC_NPV = CAPEX + \Sigma_t [C_t / (1 + r)^t] - RV_n / (1 + r)^n \quad (2)$$

$$EUAC = LCC_NPV \cdot [r(1+r)^n / ((1+r)^n - 1)] \quad (3)$$

где C_t — затрата в год t; RV_n — остаточная стоимость в конце периода; r — реальная ставка дисконтирования; n — длительность расчёта. Набор событий является сценарным и должен быть уточнён по регламентам производителя, доступности узлов и фактическим условиям эксплуатации.

4.5. Экологическая модель

Экологический расчёт представлен показателем GWP в кг CO_2-экв. и разделён на производство A1–A3, транспорт A4, монтаж A5, обслуживание и замены B2–B4, завершение жизненного цикла C1–C4 и потенциальный эффект повторного использования или переработки D. Для каждого материала применяется масса или объём, умноженные на соответствующий фактор.

$$GWP_total = \Sigma_m (Q_m \cdot EF_m) + GWP_A4 + GWP_A5 + GWP_B + GWP_C + GWP_D \quad (4)$$

$$I_GWP = 1000 \cdot GWP_total / A_floor \quad (5)$$

Фактор 3,97 кг CO_2-экв./кг для производственных модулей A1–A3 пултрузионного GRP в пилотном сценарии принят по опубликованной EPD одного производителя и не рассматривается как универсальное свойство всех профилей.

Факторы P2 и P3 являются целевыми сценарными значениями, которые должны подтверждаться EPD конкретного поставщика. Аналогично факторы печатаемых составов, полистиролбетона, транспорта и строительной энергии являются допущениями.

4.6. Точки безубыточности, чувствительность и неопределённость

Стоимостная точка безубыточности определяется как значение цены GFRP, при котором CAPEX предлагаемого варианта равен CAPEX T0 при неизменных остальных параметрах. Экологическая точка определяется как полный углеродный фактор GFRP, при котором GWP сравниваемых систем становится одинаковым.

$$p_{GFRP,be} = p_{GFRP,0} + (CAPEX_{T0} - CAPEX_P) / m_{GFRP} \quad (6)$$

$$EF_{GFRP,be} = EF_{GFRP,0} + (GWP_{T0} - GWP_P) / m_{GFRP} \quad (7)$$

Чувствительность оценена изменением ключевых параметров на ±20 %. Для вероятностной оценки агрегированные разности результатов представлены двухчастными нормальными распределениями, калиброванными по медиане и 5-му/95-му процентилям. Выполнено 50 000 реализаций с фиксированным seed 20260721. Такой сокращённый подход предназначен для иллюстрации устойчивости решения; после получения коммерческих и EPD-данных следует использовать распределения отдельных ресурсов.

$$P_{adv} = N(\Delta X < 0) / N \quad (8)$$

где ΔX — разность показателя предлагаемого и традиционного сценариев, N — число реализаций.

4.7. Многокритериальная оценка

MCDA объединяет LCC, GWP, срок, технологическую готовность, ремонтопригодность и циркулярность. Количественные критерии нормированы по наилучшему и наихудшему значению, качественные оценки заданы по 100-балльной шкале. Весовые коэффициенты отражают исследовательский приоритет, а не универсальную систему ценностей.

$$S_j = \Sigma_k (w_k \cdot z_{jk}), \quad \Sigma_k w_k = 1 \quad (9)$$

5. Количественная модель здания

Ведомость объёмов сформирована на основании геометрии расчётного дома и конструктивных решений предыдущих этапов исследования. Для предлагаемых вариантов масса каркаса P1/P2 принята равной 4 234 кг. В целевом варианте P3 она снижена на 12 % за счёт уточнения связевой схемы, унификации сечений и исключения избыточных элементов. Это снижение не должно восприниматься как уже достигнутый проектный результат: оно является целевым ограничением для последующей оптимизации по прочности, устойчивости, прогибам и узловой податливости.

Объём печатаемого состава 11,61 м³ учитывает две оболочки общей толщиной 60 мм и дополнительный материал локальных перемычек. Полистиролбетонное ядро занимает 31,59 м³. Для T0 принято 43,20 м³ газобетона и 10,37 м³ штукатурного слоя. Разница объёмов не является прямым показателем эффективности, поскольку материалы выполняют неодинаковое число функций и имеют различную плотность.

Таблица 4 — Ведомость ключевых ресурсов традиционного сценария T0

Ресурс	Количество	Ставка, у.е.	Стоимость, у.е.
Стальной каркас	8 300 кг	1,55/кг	12 865
Изготовление и защита стали	8 300 кг	0,82/кг	6 806
Крепёж	комплект	—	900

Ресурс	Количество	Ставка, у.е.	Стоимость, у.е.
Газобетон	43,20 м³	78/м³	3 369,6
Штукатурка	10,37 м³	150/м³	1 555,5
Раствор, сетка, анкеры	комплект	—	2 800
Монтаж каркаса	400 чел.-ч	8/ч	3 200
Кладка и отделка	900 чел.-ч	8/ч	7 200
Оборудование и леса	комплект	—	4 200
Контроль качества	комплект	—	1 000
Логистика	комплект	—	3 500
Отходы	комплект	—	1 200
Площадочные накладные	29 дней	350/день	10 150

Примечание. Ставки служат для демонстрации методики и не отражают актуальные цены конкретного региона.

Таблица 5 — Ведомость ключевых ресурсов предлагаемых сценариев

Ресурс	P1	P2	P3
GFRP-профили	4 234 кг × 6,50	4 234 кг × 5,20	3 726 кг × 5,00
Подготовка профилей	1,15 у.е./кг	0,85 у.е./кг	0,80 у.е./кг
Металлические детали	650 кг × 2,20	650 кг × 2,00	600 кг × 2,10
Печатаемый состав	11,61 м³ × 240	11,61 м³ × 205	11,20 м³ × 225
Полистиролбетон	31,59 м³ × 95	31,59 м³ × 85	31,59 м³ × 90
Анкеры и герметизация	3 200	2 900	3 000
Труд: каркас	280 ч × 8	220 ч × 8	210 ч × 8
Труд: печать/заполнение	260 ч × 8	180 ч × 8	180 ч × 8
Принтер: мобилизация/доля	9 000	2 500	2 500
Прочее оборудование	2 200	1 800	1 800
Контроль качества	4 500	2 600	3 000
Логистика	5 000	2 600	1 800
Отходы	700	500	450
Площадочные накладные	18 × 350	18 × 350	17 × 350

Примечание. P3 предполагает не снижение качества, а замену части затрат на корректирующий контроль предупредительным проектированием, цифровой прослеживаемостью и подтверждёнными EPD.

Материальный баланс показывает, что основной экономический риск предлагаемой системы сосредоточен не в объёме печатаемого раствора, а в цене профилей, организации оборудования и стоимости гарантированного качества. Это важный результат для стратегии локализации: попытка снизить цену только за счёт более дешёвого печатаемого состава не устранит проблему пилотного сценария, если принтер простаивает и каркас закупается единичной партией.

6. Капитальные затраты и календарная эффективность

6.1. Структура CAPEX

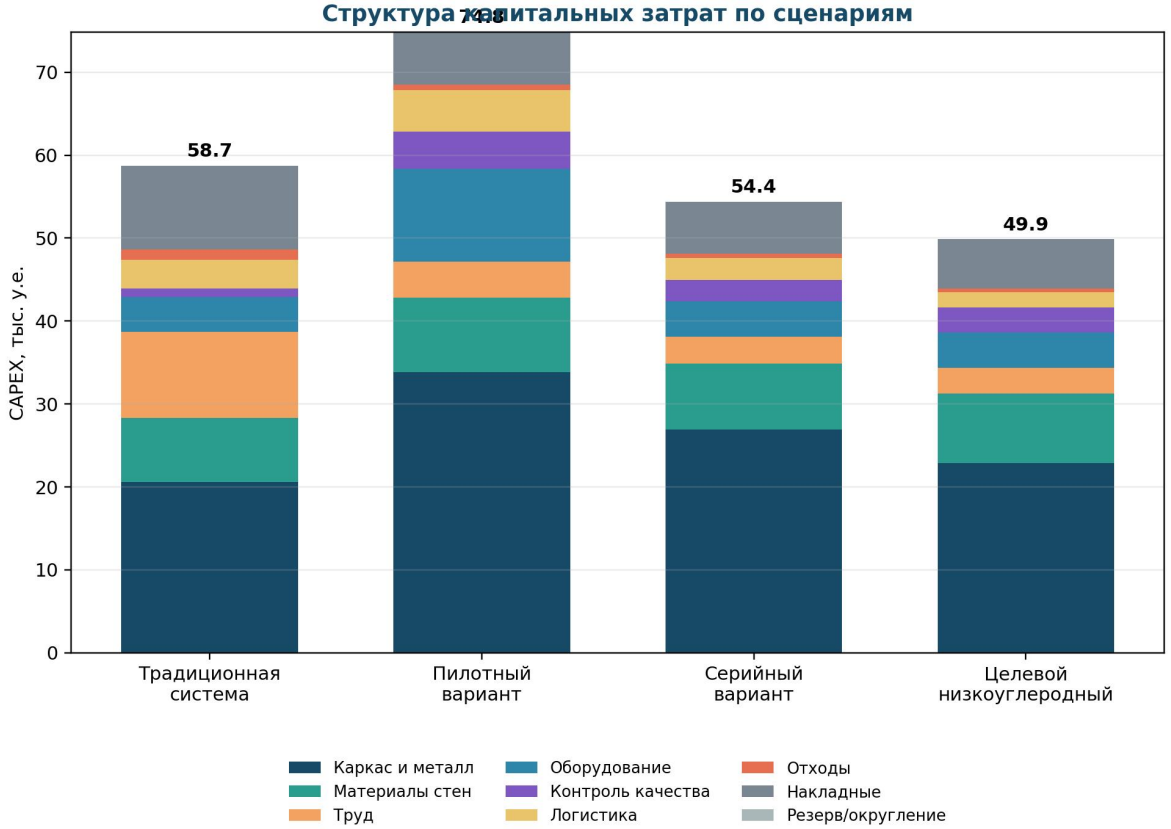

Рисунок 4 — Состав капитальных затрат по четырём сценариям

Расчёт показывает выраженный эффект технологической зрелости. Пилотный P1 имеет CAPEX 74,83 тыс. у.е., что на 27,4 % выше T0. Причины — закупка GFRP по высокой единичной цене, мобилизация принтера для одного объекта, повышенные расходы на логистику и контроль качества. Само сокращение трудозатрат не компенсирует эти позиции.

В серийном P2 CAPEX снижается до 54,38 тыс. у.е. и становится на 7,4 % ниже T0. Ключевыми механизмами являются распределение стоимости оборудования, снижение трудоёмкости вследствие обучения, локальная логистика и контрактная цена профилей. Целевой P3 даёт 49,85 тыс. у.е., или на 15,1 % ниже T0, но этот результат зависит от достижения оптимизированной массы и стабильной серийной поставки.

Таблица 6 — Итоговые капитальные затраты

Сценарий	CAPEX, у.е.	CAPEX, у.е./м²	Отклонение от T0
T0	58 746,10	377,74	0 %
P1	74 827,55	481,14	+27,4 %

Сценарий	CAPEX, у.е.	CAPEX, у.е./м²	Отклонение от T0
P2	54 380,90	349,67	−7,4 %
P3	49 853,90	320,56	−15,1 %

Таблица 7 — Агрегированная структура CAPEX, тыс. у.е.

Категория	T0	P1	P2	P3
Каркас и металл	20.57	33.82	26.92	22.87
Материалы стен	7.73	8.99	7.97	8.36
Труд	10.40	4.32	3.20	3.12
Оборудование	4.20	11.20	4.30	4.30
Контроль качества	1.00	4.50	2.60	3.00
Логистика	3.50	5.00	2.60	1.80
Отходы	1.20	0.70	0.50	0.45
Накладные	10.15	6.30	6.30	5.95
Резерв/округление	0.00	0.00	0.00	0.00

Примечание. Строка «резерв/округление» обеспечивает совпадение агрегированной структуры с итогами ресурсной модели.

6.2. Продолжительность строительства

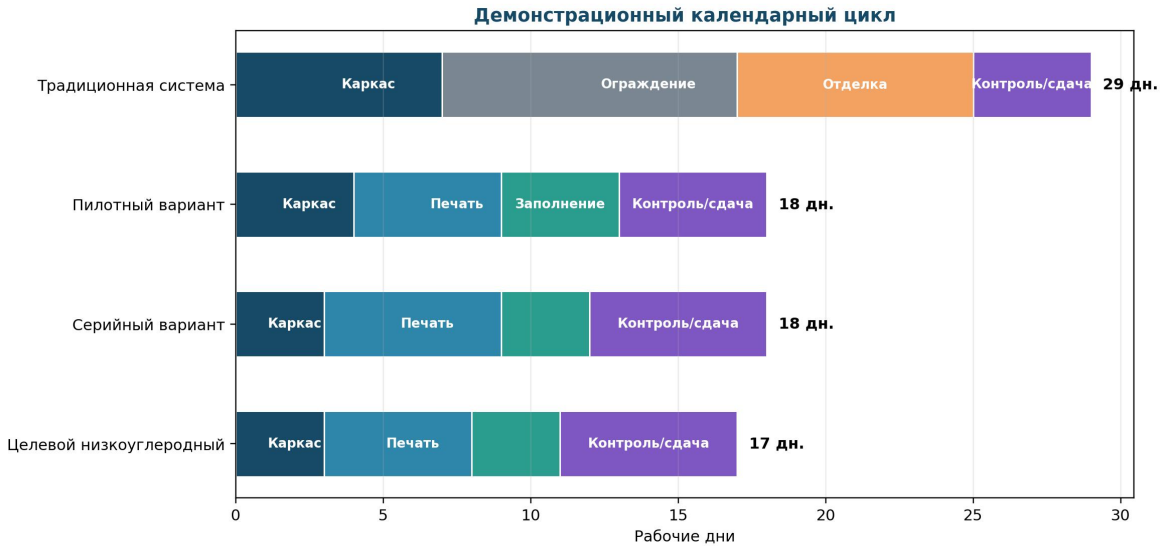

Рисунок 5 — Сопоставление укрупнённых календарных циклов

Традиционный вариант имеет расчётную продолжительность 29 рабочих дней, тогда как P1 и P2 — 18 дней, P3 — 17 дней. Сокращение достигается не только высокой скоростью движения сопла, но и параллельностью цифровой подготовки, сборки каркаса и печати отдельных зон. При этом календарный выигрыш возможен только при устойчивой поставке смеси и отсутствии длительных остановок на корректировку геометрии.

Продолжительность печати как машинной операции не равна продолжительности возведения ограждения. Необходимо учитывать пробную печать, очистку, смену

партий, установку закладных деталей, выдерживание ранней прочности, заполнение ядра, геодезический контроль и устранение локальных дефектов. Поэтому в модели не используется рекламная скорость печати как прямой эквивалент срока здания.

Таблица 8 — Сравнение календарных и трудовых показателей

Показатель	T0	P1	P2	P3
Продолжительность, рабочие дни	29	18	18	17
Сокращение к T0	—	37,9 %	37,9 %	41,4 %
Труд каркаса, чел.-ч	400	280	220	210
Труд ограждения, чел.-ч	900	260	180	180
Совокупный труд, чел.-ч	1 300	540	400	390
Площадочные накладные, у.е.	10 150	6 300	6 300	5 950

6.3. Интерпретация стоимостного эффекта

Экономическая эффективность P2/P3 основана на четырёх взаимосвязанных условиях: серийной загрузке оборудования; контрактной закупке унифицированных профилей; сокращении ручных операций без потери качества; и сохранении календарной параллельности. Нарушение любого из условий сдвигает систему к P1. Следовательно, объект нельзя оценивать вне производственной программы: единичный демонстрационный дом и серия типовых домов представляют разные экономические системы.

Особое значение имеет контроль качества. Его снижение в P2 по сравнению с P1 не должно трактоваться как уменьшение объёма доказательств. Предполагается переход от большого количества ручных проверок и повторных измерений к автоматизированной регистрации параметров, типовым квалифицированным процессам и выборочному аудиту. В P3 расходы на QA несколько повышены, поскольку требуется подтверждение низкоуглеродных материалов, разборности и цифровой прослеживаемости.

7. Стоимость жизненного цикла

7.1. Сценарии обслуживания и конца жизненного цикла

Для T0 предусмотрены периодические ремонты защитных покрытий, локальное восстановление ограждения и более крупное вмешательство в середине расчётного периода. Для GFRP-систем предполагаются меньшие расходы на антикоррозионную защиту, но сохраняются затраты на осмотр болтовых узлов, замену герметиков, локальный ремонт печатных оболочек и обследование после экстремальных воздействий. В конце 50-летнего периода учитывается демонтаж и остаточная стоимость.

Таблица 9 — Сценарные денежные события жизненного цикла, у.е.

Год/событие	T0	P1	P2	P3
10: обслуживание	3 500	2 500	1 800	1 500
20: обслуживание	4 500	3 000	2 200	2 000
25: крупный ремонт	8 000	4 500	3 500	3 000
30: обслуживание	4 500	3 000	2 200	2 000

Год/событие	T0	P1	P2	P3
40: обслуживание	6 000	4 000	3 000	2 700
50: демонтаж	6 000	7 000	6 000	5 500
50: остаточная стоимость	−4 000	−2 000	−3 000	−5 000

Примечание. Отрицательное значение остаточной стоимости уменьшает суммарные затраты. События являются сценарными, а не нормативно установленными.

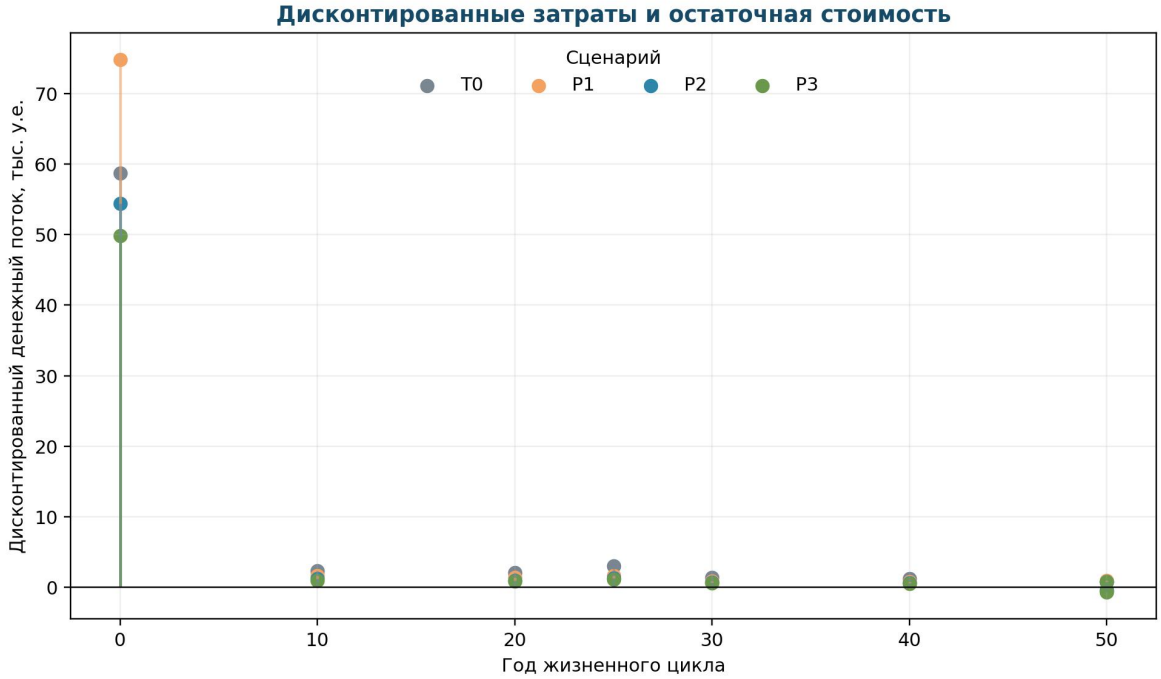

Рисунок 6 — Дисконтированные денежные потоки по сроку службы

7.2. Результаты LCC

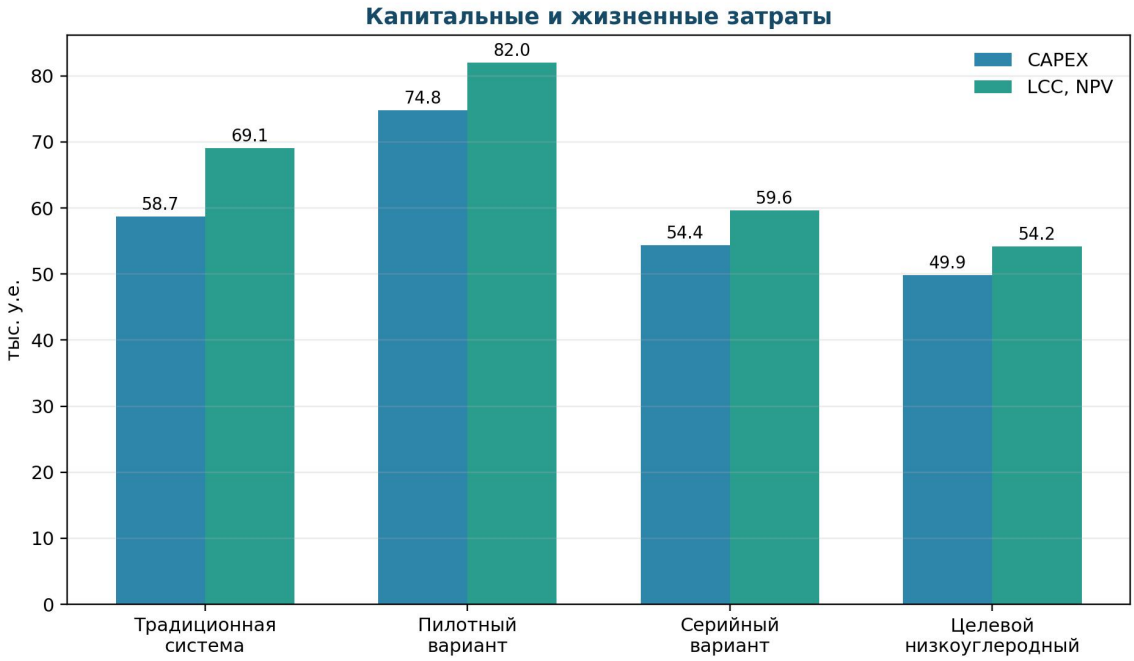

Рисунок 7 — Сопоставление первоначальных и жизненных затрат

После дисконтирования LCC T0 составляет 69,08 тыс. у.е. Пилотный P1 сохраняет худший результат — 82,04 тыс. у.е., несмотря на меньшие расходы на обслуживание. Серийный P2 достигает 59,64 тыс. у.е., что на 13,7 % ниже T0. Целевой P3 имеет 54,15 тыс. у.е. и преимущество 21,6 %. Увеличение относительного выигрыша P2/P3 по сравнению с CAPEX связано с меньшими ремонтными затратами и более высокой остаточной стоимостью разборных компонентов.

Таблица 10 — Результаты расчёта стоимости жизненного цикла

Сценарий	LCC NPV, у.е.	LCC, у.е./м²	EUAC, у.е./год	Отклонение LCC от T0
T0	69 083,84	444,21	3 215,87	0 %
P1	82 035,32	527,49	3 818,76	+18,7 %
P2	59 639,18	383,48	2 776,22	−13,7 %
P3	54 154,74	348,22	2 520,91	−21,6 %

7.3. Влияние ставки дисконтирования

При более высокой ставке дисконтирования будущие ремонты и остаточная стоимость имеют меньший вес, поэтому результат приближается к сравнению CAPEX. При низкой ставке сильнее проявляются долговечность, ремонтопригодность и ценность повторного использования. Для долгоживущих композитных систем это означает, что выбор r должен быть согласован с правилами инвестора, источником финансирования и использованием реальных или номинальных денежных потоков.

Таблица 11 — Чувствительность LCC к реальной ставке дисконтирования, тыс. у.е.

Ставка	T0	P1	P2	P3
2 %	75.47	86.97	63.16	56.77
4 %	69.08	82.04	59.64	54.15
6 %	65.44	79.39	57.73	52.65
8 %	63.27	77.88	56.62	51.75

Во всём рассмотренном диапазоне P2 и P3 сохраняют преимущество относительно T0, а P1 остаётся дороже. Это указывает на структурный, а не случайный характер результата в пределах принятых сценариев. Однако отсутствие фактических данных по долговременной герметизации, ремонту печатной оболочки и повторному использованию профилей остаётся существенным источником неопределённости.

8. Оценка углеродного следа

8.1. Исходные экологические факторы

Экологическая модель построена по модульному принципу и предназначена прежде всего для выявления факторов, определяющих направление результата. Пилотный фактор GFRP A1–A3 принят равным 3,97 кг CO_2-экв./кг по EPD пултрузионных GRP-профилей. Для P2 использовано сценарное значение 3,40 кг CO_2-экв./кг, отражающее более эффективную поставку, а для P3 — целевой фактор 2,60 кг CO_2-экв./кг, который может быть достигнут только при выборе подтверждённого продукта, оптимизации состава и низкоуглеродной энергии. В расчёте жизненного цикла к производственному фактору добавляются транспорт, монтаж, обслуживание, конец жизненного цикла и модуль D.

Для печатаемого состава факторы 0,22; 0,19 и 0,14 кг CO_2-экв./кг соответствуют переходу от пилотной цементоёмкой смеси к оптимизированной низкоклинкерной. Для полистиролбетона приняты 0,12; 0,10 и 0,075 кг CO_2-экв./кг. Эти значения не являются результатами EPD конкретного завода и должны использоваться только как сценарные ориентиры.

Таблица 12 — Ключевые экологические факторы расчётных сценариев

Материал/процесс	T0	P1	P2	P3	Статус данных
Сталь, изготовленный каркас	1,076 кг CO_2-экв./кг	—	—	—	сценарий
GFRP, A1–A3	—	3,97	3,40	2,60	P1 — EPD одного продукта; P2/P3 — сценарии
Печатаемый состав	—	0,22	0,19	0,14	сценарий, кг CO_2-экв./кг
Полистиролбетон	—	0,12	0,10	0,075	сценарий, кг CO_2-экв./кг
Грузовой транспорт	0,09 кг/т·км	0,09	0,09	0,09	сценарий
Расчётный период	50 лет	50 лет	50 лет	50 лет	единая функция

Примечание. Факторы следует заменять EPD/LCI конкретных поставщиков в одной версии правил категории продукции и с согласованными границами.

8.2. Результаты по модулям жизненного цикла

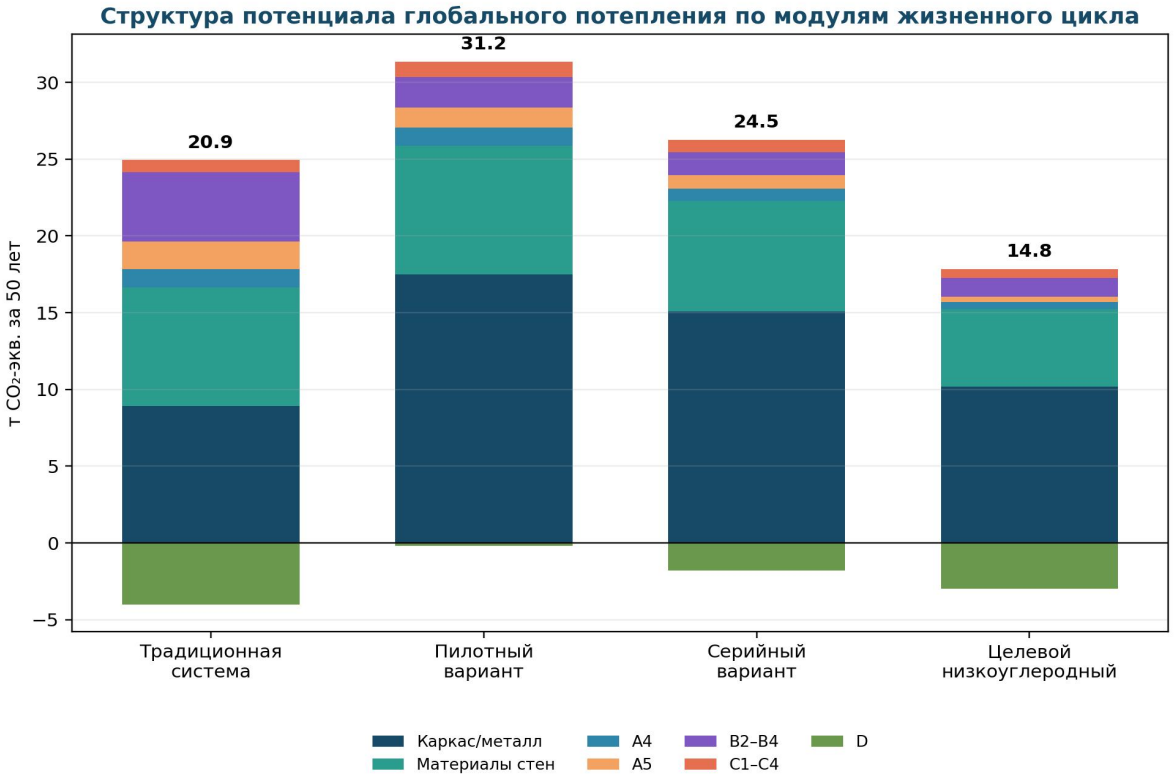

Рисунок 8 — Распределение GWP по стадиям жизненного цикла

Полный GWP T0 составляет 20,94 т CO_2-экв., или 134,66 кг CO_2-экв./м². У P1 показатель возрастает до 31,16 т, что на 48,8 % выше T0. Главная причина — производственный вклад композитного каркаса при малой партии и высоком факторе профиля. Несмотря на меньшую массу каркаса, произведение массы на углеродный фактор остаётся больше, чем у принятого стального сценария.

P2 снижает GWP относительно P1 до 24,46 т, однако всё ещё превышает T0 на 16,8 %. Следовательно, одной локализации и экономии труда недостаточно для экологического преимущества. P3 достигает 14,85 т CO_2-экв., или 95,45 кг/м², что на 29,1 % ниже T0. Результат обеспечивают одновременно снижение массы GFRP, более низкий фактор профиля, декарбонизация печатаемого состава, уменьшение логистики и увеличенный кредит повторного использования.

Таблица 13 — Итоги расчёта GWP

Сценарий	GWP, т CO_2-экв.	Интенсивность, кг CO_2-экв./м²	Отклонение от T0
T0	20,942	134,66	0 %
P1	31,157	200,34	+48,8 %
P2	24,465	157,31	+16,8 %
P3	14,845	95,45	−29,1 %

Таблица 14 — Баланс GWP по модулям, т CO_2-экв.

Модуль/группа	T0	P1	P2	P3
Каркас и металлические детали	8,931	17,508	15,095	10,168
Материалы стен	7,711	8,349	7,170	5,077
A4 — транспорт	1,200	1,200	0,800	0,450
A5 — строительство	1,800	1,300	0,900	0,350
B2–B4 — обслуживание/замены	4,500	2,000	1,500	1,200
C1–C4 — конец жизненного цикла	0,800	1,000	0,800	0,600
D — потенциальные выгоды	−4,000	−0,200	−1,800	−3,000
Итого	20,942	31,157	24,465	14,845

8.3. Совместная интерпретация стоимости и углерода

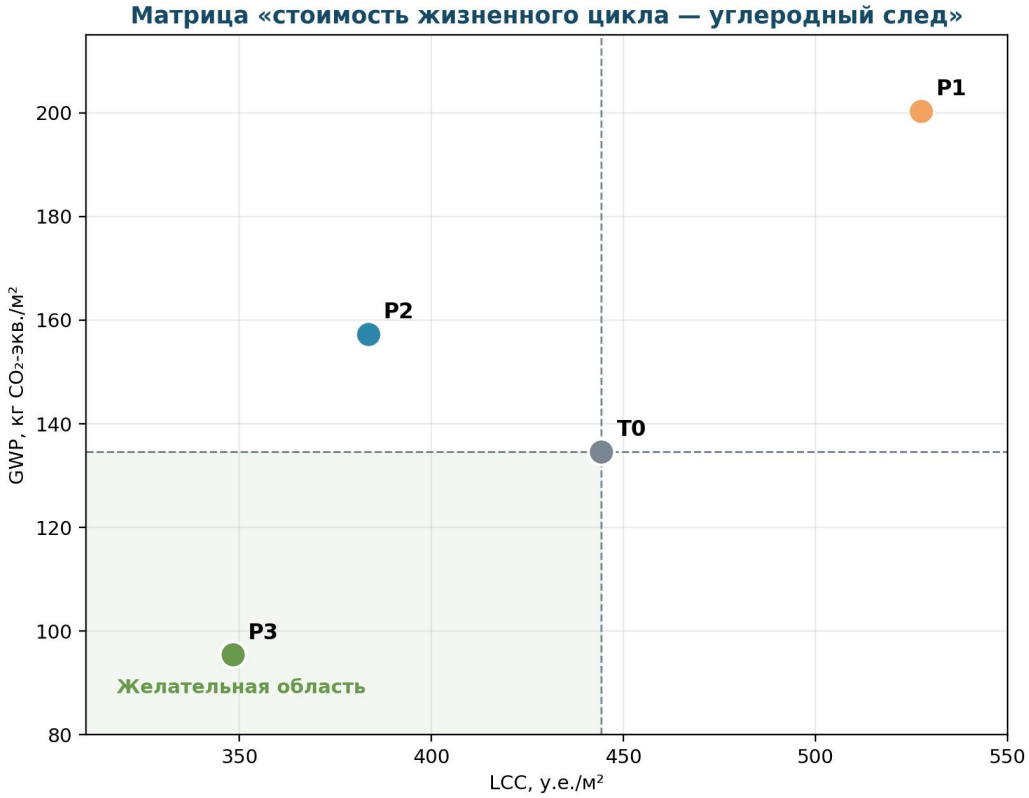

Рисунок 9 — Положение сценариев в пространстве LCC–GWP

Матрица показывает четыре принципиально разные ситуации. T0 является базовой точкой. P1 хуже по обоим критериям и оправдан только как этап обучения и получения доказательной базы. P2 экономически предпочтителен, но экологически хуже базового решения. P3 находится в желательной области одновременного снижения LCC и GWP. Следовательно, решение о внедрении не должно основываться только на цене: при P2 экономический эффект может сопровождаться ростом воплощённых выбросов.

Исключение эксплуатационной энергии B6 допустимо только при действительно сопоставимом тепловом сопротивлении, герметичности и долговечности ограждений. Если натурные измерения покажут различие тепловых потерь или потребности в кондиционировании, B6 необходимо включить, поскольку даже небольшая ежегодная разница может изменить 50-летний баланс.

9. Пороговые значения и анализ чувствительности

9.1. Стоимостная точка безубыточности

Для P2 при остальных неизменных параметрах максимальная цена GFRP, при которой CAPEX не превышает T0, составляет 6,23 у.е./кг. Текущая сценарная ставка P2 5,20 у.е./кг имеет резерв около 1,03 у.е./кг. Для P1 порог равен лишь 2,70 у.е./кг, то есть проблема пилота не может быть устранена реалистичным снижением цены профиля без одновременного уменьшения мобилизации, логистики и затрат на освоение.

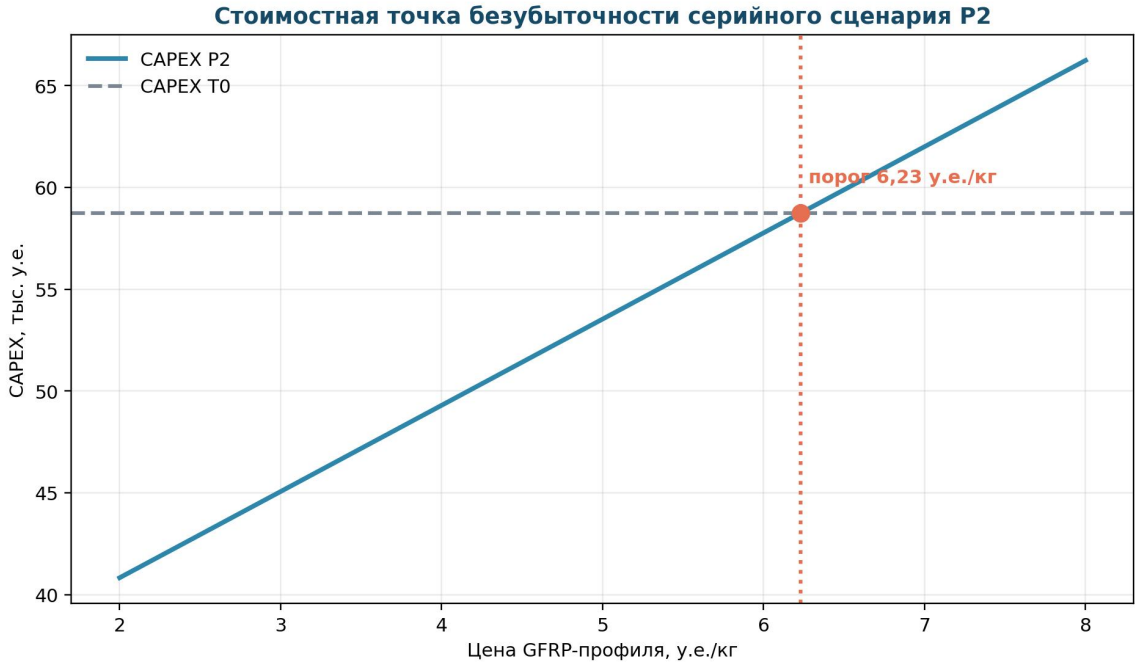

Рисунок 10 — Зависимость CAPEX P2 от цены пултрузионного профиля

Таблица 15 — Пороговые значения безубыточности

Показатель	P1	P2	Интерпретация
Цена GFRP при равенстве CAPEX с T0	2,70 у.е./кг	6,23 у.е./кг	P1 требует системного снижения всех пилотных расходов
Полный фактор GFRP при равенстве GWP с T0	—	2,57 кг CO_2-экв./кг	P2 при 3,40 не достигает углеродного паритета
Необходимое снижение CAPEX к текущему сценарию	21,5 %	—	для P1 до уровня T0
Необходимое снижение GWP P2	—	3,52 т CO_2-экв.	до уровня T0

9.2. Чувствительность капитальных затрат



Рисунок 11 — Влияние изменения ключевых параметров на CAPEX P2

Наибольший стоимостный рычаг — цена GFRP: изменение на ±20 % меняет CAPEX P2 примерно на ±4,40 тыс. у.е. На втором месте находятся накладные, зависящие от срока, затем цена полистиролбетона, логистика, труд, печатаемый состав и доля стоимости принтера. Результат подтверждает необходимость долгосрочного контракта на профили и устойчивого портфеля заказов.

Важен и обратный вывод: чрезмерное снижение стоимости контроля качества оказывает меньшее влияние на общий CAPEX, чем нестабильная цена каркаса, но резко повышает риск скрытых дефектов. Поэтому оптимизация QA должна осуществляться через автоматизацию и квалификацию процесса, а не через исключение проверок.

9.3. Чувствительность углеродного результата

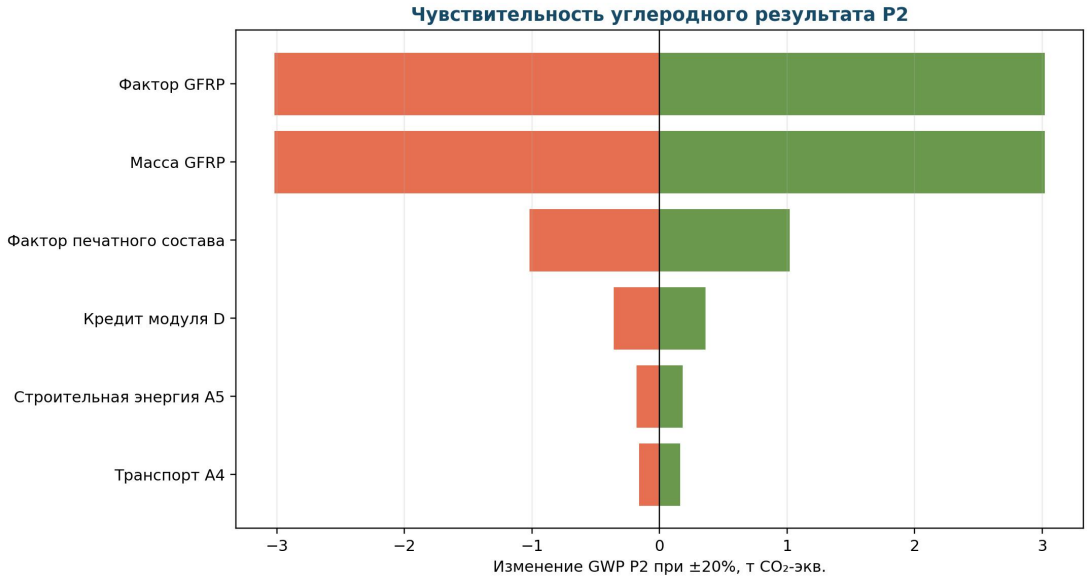

Рисунок 12 — Влияние изменения ключевых параметров на GWP P2

Углеродный баланс P2 почти симметрично чувствителен к массе и фактору GFRP. Изменение каждого на ±20 % даёт около ±3,0 т CO_2-экв., то есть сопоставимо со всей величиной отставания P2 от T0. Следующими по влиянию являются печатаемый

состав и кредит модуля D. Транспорт и энергия монтажа важны, но не способны самостоятельно обеспечить паритет.

Практический вывод состоит в том, что экологическая программа должна начинаться с оптимизации каркаса и выбора поставщика с проверенной EPD. Замена топлива грузовика или сокращение отходов, оставаясь полезными мерами, имеют вторичный эффект по сравнению с производством профиля и цементной матрицы.

10. Вероятностный анализ

10.1. Неопределённость стоимости

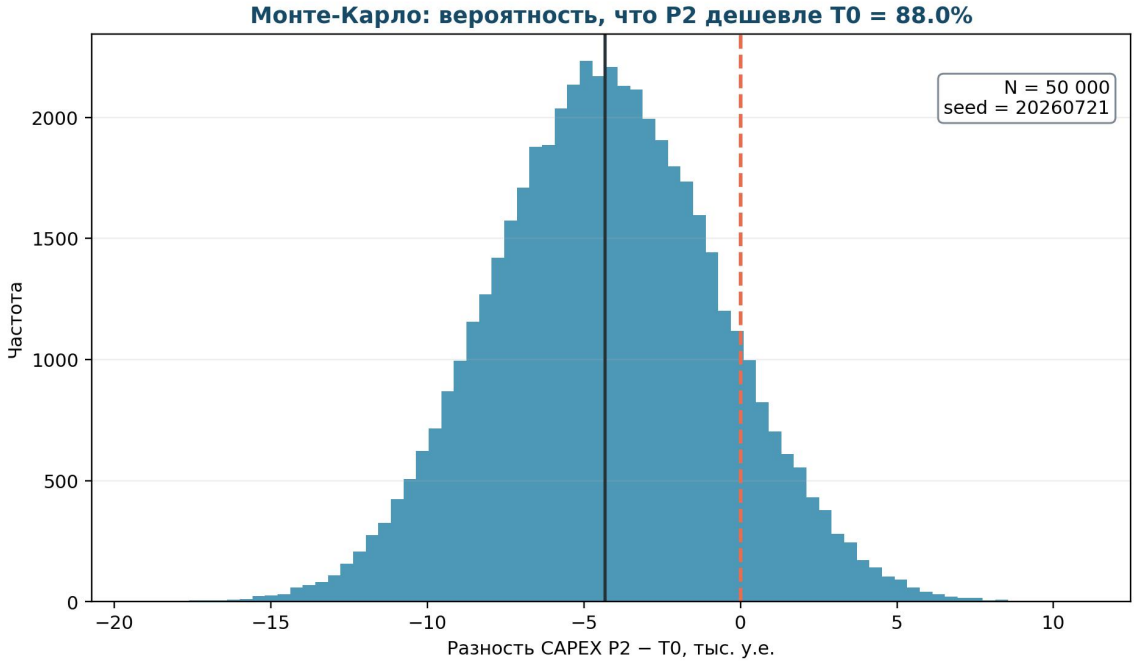

Рисунок 13 — Распределение разности CAPEX P2 и T0 по результатам 50 000 реализаций

Вероятность того, что P2 имеет меньший CAPEX, чем T0, составила 88.0 %. Медиана разности равна −4,35 тыс. у.е.; 5-й и 95-й процентили составляют приблизительно −10,24 и +1,73 тыс. у.е. Следовательно, экономический вывод является достаточно устойчивым, но не гарантированным: примерно в каждом восьмом сочетании неблагоприятных исходных данных P2 может оказаться дороже.

Управление этой остаточной неопределённостью требует заранее фиксировать предельную цену профилей, производительность смены, долю мобилизации на объект и ответственность за простои. Без таких условий средняя оценка P2 может создавать ложное чувство определённости.

10.2. Неопределённость углеродного преимущества

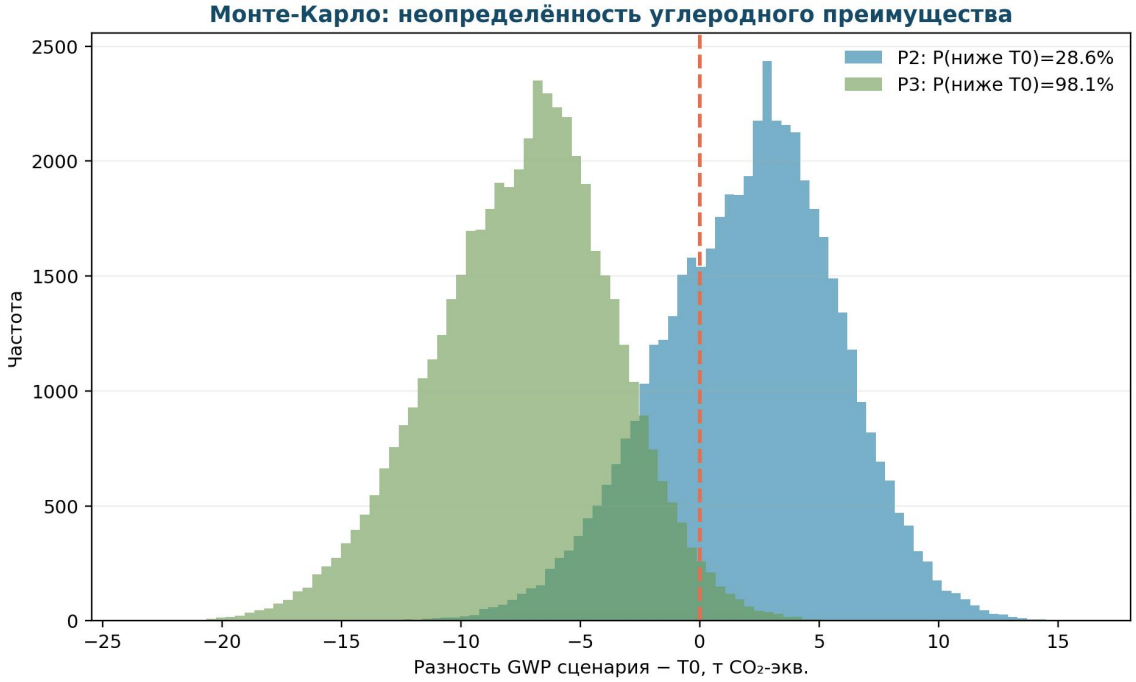

Рисунок 14 — Распределения разности GWP P2/P3 относительно T0

Для P2 вероятность меньшего GWP относительно T0 равна только 28.6 %. Медиана разности составляет +2,34 т CO_2-экв.; 5-й и 95-й процентили — около −4,47 и +7,93 т. Иными словами, отдельные благоприятные комбинации способны дать паритет, но наиболее вероятный результат остаётся хуже T0.

Для P3 вероятность меньшего GWP достигает 98.1 %. Медиана преимущества составляет 7,12 т CO_2-экв.; 5-й и 95-й процентили разности равны примерно −13,88 и −1,47 т. Этот высокий показатель условен: он подтверждает внутреннюю устойчивость заданного целевого сценария, но не доказывает, что требуемые материалы и углеродные факторы уже доступны на рынке.

Заявления и сведения для редакции

Финансирование. Исследование выполнено без указания внешнего финансирования; сведения подлежат уточнению авторами.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов; формулировка подлежит подтверждению.

Вклад авторов. Концепция, методика, расчёты, визуализация, подготовка текста и верификация — заполнить согласно CRediT.

Доступность данных. Расчётная модель и исходные таблицы могут быть предоставлены после обезличивания коммерческих данных.

Благодарности. Заполнить при наличии организаций, лабораторий и поставщиков, оказавших поддержку.

Литература

1. ISO 15686-5:2017. Buildings and Constructed Assets — Service Life Planning — Part 5: Life-Cycle Costing. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
2. ISO 21930:2017. Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works — Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services. Geneva: ISO, 2017.

3. ISO 14040:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. Geneva: ISO, 2006.
4. ISO 14044:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines. Geneva: ISO, 2006.
5. ISO 14067:2018. Greenhouse Gases — Carbon Footprint of Products — Requirements and Guidelines for Quantification. Geneva: ISO, 2018.
6. ISO 20887:2020. Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works — Design for Disassembly and Adaptability — Principles, Requirements and Guidance. Geneva: ISO, 2020.
7. ISO 15392:2019. Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works — General Principles. Geneva: ISO, 2019.
8. EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of Construction Works — Environmental Product Declarations — Core Rules for the Product Category of Construction Products. Brussels: CEN, 2019.
9. EN 15978:2011. Sustainability of Construction Works — Assessment of Environmental Performance of Buildings — Calculation Method. Brussels: CEN, 2011.
10. ISO/ASTM 52939:2023. Additive Manufacturing for Construction — Qualification Principles — Structural and Infrastructure Elements. Geneva: ISO, 2023.
11. ISO/ASTM 52900:2021. Additive Manufacturing — General Principles — Fundamentals and Vocabulary. Geneva: ISO, 2021.
12. ISO 19650-1:2018. Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including BIM — Information Management Using BIM — Part 1: Concepts and Principles. Geneva: ISO, 2018.
13. ISO 31000:2018. Risk Management — Guidelines. Geneva: ISO, 2018.
14. ASCE/SEI 74-23. Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures. Reston, VA: ASCE, 2023. DOI: 10.1061/9780784415771.
15. CEN/TS 19101:2022. Design of Fibre-Polymer Composite Structures. Brussels: European Committee for Standardization, 2022.