



Экономическая оценка инновационных технологий производства бетона в условиях неопределённости: управление качеством, суперпластификаторы и биобетон

Нелюфар Умаровна Дадабаева

Старший преподаватель Факультет экономики

Кафедра экономики транспорта

Ташкентский государственный транспортный университет

Scopus ID: 59725846000 ORCID: 0009-0005-8002-1323

Web of Science: PJT-4215-2026 РИНЦ SPIN: 6104-3059

E-mail: nelyufardadabayeva@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье выполнена сравнительная экономическая оценка шести технологических вариантов производства товарного бетона класса В30, сочетающих цифровое управление качеством, применение поликарбоксилатного суперпластификатора и технологию самовосстанавливающегося биобетона. Составы подобраны по формуле Боломея–Скрамтаева с учётом фактической изменчивости прочности. Стоимость жизненного цикла на горизонте 50 лет рассчитана по методологии ISO 15686-5 с вероятностным моделированием методом Монте-Карло (10 000 реализаций) по 13 неопределённым параметрам; цены цемента приняты по данным Узбекской республиканской товарно-сырьевой биржи за 2024–2026 гг. Дополнительно оценены выбросы CO₂, влияние теневой цены углерода и интегральный рейтинг вариантов методом TOPSIS. Установлено, что снижение коэффициента вариации прочности с 13,5 до 10 % является единственной мерой, снижающей одновременно стоимость и выбросы, и обеспечивает минимальную стоимость жизненного цикла в 90 % реализаций. При текущих биржевых ценах цемента суперпластификатор увеличивает материальные затраты на 2,6–5,8 %, но становится экономически выгодным при теневой цене углерода выше 381 тыс. сум/т CO₂. Биобетон снижает стандартное отклонение стоимости жизненного цикла на 61 %, однако выигрывает по ожидаемой стоимости лишь при стоимости ремонта выше 1,0 млн сум на 1 м³. Обоснованы рекомендации для предприятий и государственных заказчиков.

Ключевые слова:

бетон, стоимость жизненного цикла, управление качеством, коэффициент вариации, суперпластификатор, биобетон, метод Монте-Карло, TOPSIS, углеродный след

Noaniqlik sharoitida beton ishlab chiqarishning innovatsion texnologiyalarini iqtisodiy jihatdan baholash: sifatni boshqarish, superplastifikatorlar va biobeton



ANNOTATSIIYA

Maqolada raqamli sifat boshqaruvi, polikarboksilat superplastifikatori va o'z-o'zini tiklovchi biobeton texnologiyasini birlashtirgan B30 sinfdagi tovar betonini ishlab chiqarishning oltita texnologik varianti qiyosiy iqtisodiy baholangan. Tarkiblar mustahkamlikning haqiqiy o'zgaruvchanligini hisobga olgan holda Bolomey–Skramtayev formulasi bo'yicha tanlangan. 50 yillik davr uchun hayotiy sikl qiymati ISO 15686-5 metodologiyasi asosida 13 ta noaniq parametr bo'yicha Monte-Karlo usulida (10 000 ta hisob) aniqlangan; sement narxlari O'zbekiston respublika tovar-xomashyo birjasining 2024–2026-yillardagi ma'lumotlari bo'yicha olingan. Shuningdek, CO₂ chiqindilari, uglerodning soya narxi ta'siri va TOPSIS usulida variantlarning integral reytingi baholangan. Mustahkamlik variatsiya koeffitsientini 13,5 dan 10 foizgacha pasaytirish xarajatlar va chiqindilarni bir vaqtda kamaytiradigan yagona chora ekani hamda hisoblarning 90 foizida eng kam hayotiy sikl qiymatini ta'minlashi aniqlangan. Biobeton hayotiy sikl qiymatining standart chetlanishini 61 foizga kamaytiradi, biroq ta'mirlash qiymati 1 m³ uchun 1,0 mln so'mdan yuqori bo'lgandagina foydali bo'ladi. Korxonalar va davlat buyurtmachilari uchun tavsiyalar asoslab berilgan.

Kalit so'zlar:

beton, hayotiy sikl qiymati, sifat boshqaruvi, variatsiya koeffitsienti, superplastifikator, biobeton, Monte-Karlo usuli, TOPSIS, uglerod izi.

Economic evaluation of innovative concrete production technologies under uncertainty: quality management, superplasticizers, and bioconcrete

ABSTRACT

The paper presents a comparative economic assessment of six technological options for producing ready-mixed concrete of class B30 that combine digital quality management, a polycarboxylate superplasticizer and self-healing bioconcrete. Mixes are designed using the Bolomey–Skramtaev equation with the actual variability of strength taken into account. The 50-year life-cycle cost is calculated following ISO 15686-5 with Monte Carlo simulation (10,000 runs) of 13 uncertain parameters, using cement prices from the Uzbek Republican Commodity Exchange for 2024–2026. CO₂ emissions, the effect of a shadow carbon price and an integrated TOPSIS ranking are also assessed. Reducing the coefficient of variation of strength from 13.5% to 10% is the only measure that lowers both cost and emissions, and it yields the minimum life-cycle cost in 90% of runs. At current exchange prices the superplasticizer raises material costs by 2.6–5.8% but becomes cost-effective at a shadow carbon price above 381 thousand UZS per tonne of CO₂. Bioconcrete reduces the standard deviation of the life-cycle cost by 61% but has a lower expected cost only when a repair costs more than 1.0 million UZS per m³. Recommendations for producers and public clients are substantiated.

Keywords:

concrete, life-cycle cost, quality management, coefficient of variation, superplasticizer, bioconcrete, Monte Carlo method, TOPSIS, carbon footprint.

ВВЕДЕНИЕ

Строительный комплекс Узбекистана в последние годы развивается опережающими темпами, и базовым материалом этого роста остаётся бетон на основе портландцемента. За январь–июль 2026 года крупные предприятия республики произвели 12,1 млн т цемента



против 9,1 млн т за тот же период 2024 года [1]; в стране действует около сорока цементных заводов суммарной мощностью порядка 40 млн т в год [2]. Рост предложения сопровождается значительной волатильностью цен: биржевая стоимость цемента в течение 2025 года выросла почти на 25 % - с 511,8 до 637,9 тыс. сум за тонну [3], а к августу 2026 года снизилась до 564,7 тыс. сум [4]. Цемент является одновременно главной статьёй материальных затрат на производство бетона и основным источником его углеродного следа [5, 6]. Поэтому экономия цемента на единицу продукции прямо отвечает задачам Стратегии перехода Республики Узбекистан на «зелёную» экономику [7] и Стратегии развития Нового Узбекистана [8], ориентирующих промышленность на повышение ресурсо- и энергоэффективности.

В практике бетонного производства сложились три направления инноваций, влияющих на расход цемента и долговечность конструкций. Первое- управление качеством: снижение изменчивости прочности за счёт автоматизированного дозирования и статистического контроля позволяет уменьшить требуемую среднюю прочность и, следовательно, расход вяжущего. Второе-химические добавки, прежде всего поликарбоксилатные суперпластификаторы (ПКЭ), снижающие водопотребность смеси. Третье - самовосстанавливающийся биобетон, в котором бактерии осаждают карбонат кальция в образующихся трещинах и тем самым сокращают потребность в ремонтах.

Эти направления различаются по структуре затрат: первое требует организационных и цифровых инвестиций, второе увеличивает переменные затраты на добавку, третье резко повышает начальную стоимость ради снижения будущих эксплуатационных расходов. Корректное сравнение таких решений невозможно по начальной цене кубометра и требует оценки стоимости жизненного цикла с учётом неопределённости цен, ставок и сроков службы. Между тем в отечественной практике выбор бетона в закупках по-прежнему определяется преимущественно начальной ценой, а комплексные сравнительные оценки перечисленных технологий в условиях Узбекистана в литературе практически отсутствуют.

Цель исследования. Разработать и апробировать методику сравнительной экономической оценки инновационных технологий производства бетона, учитывающую изменчивость прочности, стоимость жизненного цикла, неопределённость исходных параметров и углеродный след. **Задачи:** 1) систематизировать подходы к экономической оценке долговечности и ресурсоэффективности бетона; 2) сформировать сопоставимые технологические варианты и подобрать их составы; 3) построить вероятностную модель стоимости жизненного цикла; 4) оценить влияние теневой цены углерода; 5) выполнить многокритериальное ранжирование вариантов; 6) разработать рекомендации для производителей и заказчиков.

Научная новизна. Работы состоят в том, что: впервые для условий Узбекистана выполнена совместная вероятностная оценка стоимости жизненного цикла бетона с управлением качеством, суперпластификатором и биодобавкой на основе фактических биржевых цен цемента; показано, что биобетон выполняет функцию «страхования» от неопределённости эксплуатационных затрат, количественно выраженную снижением дисперсии стоимости жизненного цикла; определены пороговые значения стоимости ремонта, цены суперпластификатора и теневой цены углерода, при которых меняется предпочтительность вариантов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Стоимость жизненного цикла в строительстве. Методологическую основу исследования составляет концепция стоимости жизненного цикла (life-cycle cost, LCC), стандартизированная в ISO 15686-5 [9]. Стандарт определяет LCC как дисконтированную сумму затрат на создание, эксплуатацию, обслуживание и ремонт объекта за период анализа. Практические процедуры расчёта, включая выбор ставки дисконтирования и анализ чувствительности, подробно описаны в руководстве Национального института стандартов и



технологий США [10], а в работе Р. Флэнагана и соавторов обоснован переход от оценки по начальной стоимости к «полной оценке жизненного цикла» строительных решений [11].

Для железобетонных конструкций ключевым фактором эксплуатационных затрат является деградация, связанная с трещинообразованием и коррозией арматуры. Классическая модель К. Туутти разделяет срок службы на период инициирования коррозии и период её развития [12], что задаёт физическую основу для моделирования межремонтных интервалов. Д. Вал и М. Стюарт показали, что для конструкций в агрессивной среде затраты на ремонт в течение жизненного цикла могут превышать первоначальные вложения, а учёт их вероятностной природы существенно меняет выбор проектных решений [13]. Д. Франгопол и М. Лю предложили рамочную модель управления инфраструктурой, объединяющую оценку состояния, надёжности и стоимости жизненного цикла [14].

Ресурсоэффективность и декарбонизация бетона. Обзоры К. Скривенер и соавторов [5] и Г. Абера и соавторов [6] показывают, что наряду с изменением состава цемента значительный резерв снижения выбросов связан с эффективностью использования цемента в бетоне. С. Миллер и соавторы продемонстрировали, что уже доступные технические меры способны сократить ежегодные выбросы CO_2 при производстве бетона более чем на 20 % [15]. Для измерения эффективности использования вяжущего Б. Даминели и соавторы предложили индекс интенсивности вяжущего - расход цемента на 1 м^3 бетона, отнесённый к единице прочности ($\text{кг/м}^3/\text{МПа}$), - и показали его значительный разброс в мировой практике [16]. Этот индекс используется в настоящей работе как показатель ресурсоэффективности.

Изменчивость прочности и управление качеством. Нормативный подход к назначению состава бетона исходит из того, что требуемая средняя прочность должна превышать нормируемую на величину, пропорциональную фактической изменчивости; в межгосударственном стандарте ГОСТ 18105-2018 эта связь реализована через коэффициент требуемой прочности, зависящий от коэффициента вариации [17]. А. Невилл подчёркивает, что снижение стандартного отклонения прочности является прямым источником экономии цемента [18]. Инструменты статистического управления процессами, описанные Д. Монтгомери [19], позволяют перевести эту зависимость в управленческую практику предприятия.

Химические добавки. Поликарбоксилатные суперпластификаторы действуют за счёт электростерического диспергирования частиц цемента, позволяя снизить водопотребность смеси при сохранении подвижности [20, 21]. Экономический эффект добавки определяется соотношением её стоимости и стоимости сэкономленного цемента и потому существенно зависит от конъюнктуры рынка, что редко учитывается в технологических исследованиях.

Самовосстанавливающийся биобетон. Концепция бактериального самовосстановления разработана Х. Йонкерсом и соавторами: споры алкалифильных бактерий и лактат кальция, введённые в бетон, при попадании в трещину воды обеспечивают осаждение карбоната кальция [22]. В. Виктор и Х. Йонкерс зафиксировали залечивание трещин шириной до 0,46 мм в бактериальных образцах против 0,18 мм в контрольных [23]. Обзоры К. Ван Титтельбум и Н. Де Бели [24, 25], а также М. Сейфана и соавторов [26] систематизируют механизмы и технологии капсулирования. Ф. Сильва и соавторы, рассматривая промышленное применение биобетона, указали на высокую стоимость биологического агента как на главный барьер его внедрения [27]. Однако количественных оценок, соотносящих эту стоимость с вероятностно заданными эксплуатационными затратами, в литературе немного.

Методы учёта неопределённости и многокритериального выбора. Для анализа неопределённости в экономических расчётах широко применяется метод Монте-Карло [28], для многокритериального ранжирования альтернатив - метод TOPSIS К. Хвана и К. Юна [29], а для объективного определения весов критериев - энтропийный метод [30].

Таким образом, анализ литературы выявил **научный пробел**: технологические, экономические и экологические аспекты рассматриваемых инноваций изучены преимущественно по отдельности, без совместной вероятностной оценки на едином горизонте жизненного цикла и без привязки к ценовым условиям Узбекистана.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект и функциональная единица. Объектом исследования является товарный бетон класса В30 для железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях периодического увлажнения и агрессивных воздействий (гидротехнические и подземные сооружения, опоры мостов). Функциональная единица - 1 м³ бетона в конструкции; горизонт анализа Н = 50 лет.

Технологические варианты. Рассмотрены шесть вариантов, образованных сочетанием трёх инноваций (табл. 1).

Таблица 1

Технологические варианты исследования

Вариант	Коэффициент вариации прочности v , %	Суперпластификатор ПКЭ	Биодобавка
A0 - базовый	13,5	-	-
A1 - цифровое управление качеством	10,0	-	-
A2 - суперпластификатор	13,5	0,8 % от массы цемента	-
A3 - A1 + A2	10,0	0,8 % от массы цемента	-
A4 - биобетон	13,5	-	есть
A5 - комплексный (A1 + A2 + биобетон)	10,0	0,8 % от массы цемента	есть

Источник: составлено автором.

Подбор составов. Требуемая средняя прочность при обеспеченности 95 % определялась по формуле

$$R_T = B / (1 - t \cdot v) / k_b, \quad (1)$$

где $B = 30$ МПа - класс бетона; $t = 1,64$; v - коэффициент вариации; k_b - коэффициент, учитывающий влияние биодобавки на прочность (0,95 для A4 и A5, 1,0 для остальных вариантов). Цементно-водное отношение и расход цемента находились по формуле Болломея-Скрамтаева [31, 32]:

$$Ц/B = R_T / (A \cdot R_{ц}) + 0,5, \quad Ц = B \cdot (Ц/B), \quad (2)$$

где $A = 0,60$ - коэффициент качества заполнителей; $R_{ц} = 42,5$ МПа - активность цемента; B - водопотребность: 200 л/м³ без добавки и 160 л/м³ с ПКЭ (водоредуцирование 20 %). Расход щебня фракции 5–20 мм принят постоянным (1 237 кг/м³), расход мелкого заполнителя определялся методом абсолютных объёмов:

$$V_{мз} = 1000 - (Ц/\rho_{ц} + B + Щ/\rho_{щ} + m_{сп}/\rho_{сп} + m_{л}/\rho_{л}). \quad (3)$$

В биобетоне предусмотрено введение 11 кг/м³ лактата кальция и споровой культуры бактерий на пористом керамзитовом носителе, замещающем 20 % объёма мелкого заполнителя.

Модель затрат. Материальные затраты и начальная стоимость 1 м³ бетона в конструкции:

$$C_M = \sum m_i \cdot p_i + S_6, \quad C_0 = C_M + C_y, \quad (4)$$

где m_i , p_i - расход и цена i -го компонента; S_6 — стоимость споровой культуры (для A4, A5); C_y - затраты на транспортировку и укладку. Стоимость жизненного цикла:

$$LCC = C_0 + \sum_{k=1 \dots n} R \cdot (1 + r)^{-kT}, \quad n = \max\{k: kT < H\}, \quad (5)$$



где R - стоимость одного ремонта трещин в расчёте на 1 м^3 конструкции (инъектирование, обеспечение доступа, простой); T - межремонтный интервал; r - реальная ставка дисконтирования.

Экологическая модель. Выбросы CO_2 за жизненный цикл и эколого-экономическая стоимость жизненного цикла:

$$E = \sum m_i \cdot e_i + n \cdot e_R, \quad LCC_{\text{эко}} = LCC + p_{\text{CO}_2} \cdot E, \quad (6)$$

где e_i - удельный коэффициент выбросов компонента (цемент - 0,80–0,90; ПКЭ и лактат кальция - 1,5; керамзит - 0,3; заполнители - 0,005 кг $\text{CO}_2/\text{кг}$); $e_R = 20$ кг CO_2 на один ремонт; p_{CO_2} - теневая цена углерода.

Учёт неопределённости. Тринадцать параметров модели заданы треугольными распределениями (табл. 2). Диапазон цены цемента соответствует биржевым котировкам 2025–2026 гг. с надбавкой на доставку [3, 4]; диапазоны остальных параметров приняты по данным поставщиков и литературы [23, 27] и отражают экспертные допущения автора. Выполнено $N = 10\,000$ реализаций с фиксированным начальным значением генератора случайных чисел, что обеспечивает воспроизводимость результатов.

Таблица 2

Параметры вероятностной модели (треугольные распределения)

Параметр	Минимум	Мода	Максимум
Цена цемента, сум/кг	565	650	750
Цена песка / щебня, сум/кг	60 / 80	70 / 90	90 / 110
Цена ПКЭ, тыс. сум/кг	20	25	32
Цена лактата кальция, тыс. сум/кг	35	50	65
Цена керамзитового носителя, сум/кг	600	800	1 000
Споровая культура, тыс. сум/м ³	100	150	250
Транспортировка и укладка S_u , тыс. сум/м ³	200	250	300
Стоимость ремонта R , тыс. сум/м ³	300	600	1 200
Ставка дисконтирования r , %	5	8	12
Межремонтный интервал: обычный бетон / биобетон, лет	7 / 20	10 / 30	15 / 40
Коэффициент выбросов цемента, кг $\text{CO}_2/\text{кг}$	0,80	0,85	0,90

Источник: составлено автором.

Многокритериальная оценка. Для интегрального ранжирования применён метод TOPSIS [29]. Нормированная взвешенная матрица и относительная близость альтернативы к идеальному решению рассчитываются по формулам:

$$v_{ij} = w_j \cdot x_{ij} / (\sum_i x_{ij}^2)^{1/2}, \quad (7)$$

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-), \quad (8)$$

где D_i^+ , D_i^- - евклидовы расстояния до идеального и антиидеального решений. Использованы шесть критериев: начальная стоимость C_0 (min), ожидаемая LCC (min), стандартное отклонение LCC как мера риска (min), выбросы CO_2 (min), число ремонтов как мера эксплуатационных нарушений (min) и уровень технологической готовности TRL (max; 9 - для A0–A3, 6 - для биобетона). Веса критериев определены в трёх сценариях: энтропийным методом [30], равными весами и по приоритетам заказчика, ориентированного на экономику и декарбонизацию (0,15; 0,30; 0,10; 0,25; 0,10; 0,10).

Анализ чувствительности выполнен методом поочерёдного изменения параметров от минимального до максимального значения при прочих модальных значениях с построением диаграммы «торнадо»; дополнительно найдены пороговые значения ключевых параметров. Расчёты выполнены на языке Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Рыночный контекст. Динамика производства и биржевой цены цемента представлена на рисунке 1. Рост выпуска на треть в 2025 году сменился стабилизацией в 2026

году (+0,8 %), а цена после скачка в 2025 году вернулась к уровню 565–590 тыс. сум/т. Такая волатильность делает экономический эффект мер по экономии цемента нестабильным во времени и обосновывает необходимость вероятностного подхода.

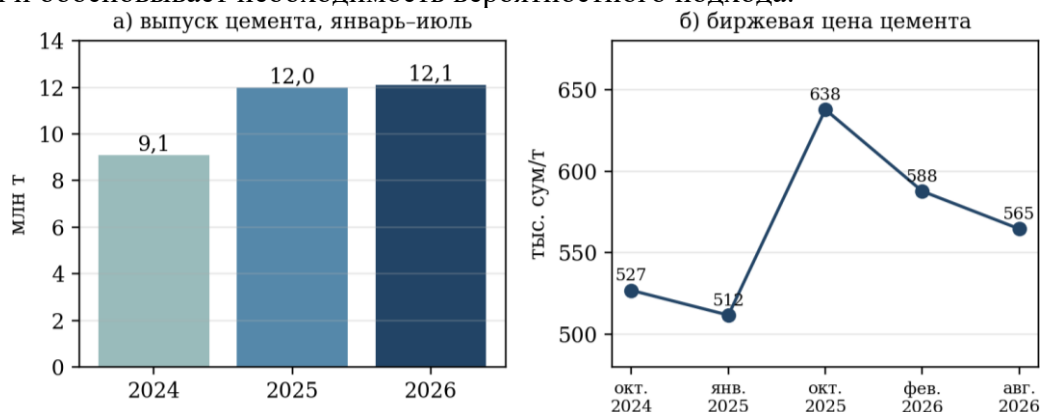


Рис. 1. Производство цемента крупными предприятиями Узбекистана (а) и его биржевая цена (б)

Источник: составлено автором по данным [1, 3, 4].

2. Составы и ресурсоэффективность

Результаты подбора составов приведены в таблице 3. Снижение коэффициента вариации с 13,5 до 10 % уменьшает требуемую прочность с 38,5 до 35,9 МПа и расход цемента на 21 кг/м³ (5,2 %). Суперпластификатор сокращает расход цемента на 80 кг/м³ (19,9 %), а их сочетание - на 97 кг/м³ (24,1 %). Индекс интенсивности вяжущего снижается с 13,4 до 10,2 кг/м³/МПа. Биодобавка, напротив, из-за понижающего коэффициента прочности увеличивает расход цемента на 16 кг/м³; в комплексном варианте А5 этот эффект перекрывается действием двух других мер.

Таблица 3

Составы бетона класса В30 и показатели ресурсоэффективности на 1 м³

Показатель	А0	А1	А2	А3	А4	А5
Требуемая прочность R_t , МПа	38,5	35,9	38,5	35,9	40,6	37,8
Цемент, кг	402	381	322	305	418	317
Вода, л	200	200	160	160	200	160
В/Ц	0,498	0,525	0,497	0,525	0,478	0,505
Песок, кг	535	553	702	717	402	550
ПКЭ, кг	-	-	2,58	2,44	-	2,54
Лактат кальция / носитель, кг	-	-	-	-	11 / 42	11 / 57
Интенсивность вяжущего, кг/м ³ /МПа	13,4	12,7	10,7	10,2	13,9	10,6
Выбросы CO ₂ (без ремонтов), кг	350,6	332,8	287,3	272,7	392,6	315,8

Источник: расчёты автора.

3. Начальная стоимость

При модальных ценах материальные затраты базового варианта составляют 411,1 тыс. сум/м³, из них 63,6 % приходится на цемент (табл. 4). Вариант А1 оказывается единственным, снижающим начальную стоимость (-3,0 %). Существенным и не вполне очевидным результатом является то, что при текущих биржевых ценах цемента суперпластификатор увеличивает материальные затраты на 5,8 % (А2) и 2,6 % (А3): стоимость 2,6 кг добавки (64,5 тыс. сум) превышает стоимость сэкономленных 80 кг цемента (52,0 тыс. сум). Расчёт показывает, что ПКЭ окупается на уровне материалов лишь при цене добавки ниже 15,7 тыс. сум/кг или цене цемента выше 950 сум/кг. Материальные затраты биобетона выше базовых

в 2,8 раза, причём 47,2 % затрат варианта А5 формирует лактат кальция, а 12,9 % - споровая культура.

Таблица 4

Начальная стоимость 1 м³ бетона при модальных ценах, тыс. сум

Показатель	A0	A1	A2	A3	A4	A5
Материальные затраты С _м	411,1	398,7	435,1	421,6	1 145,8	1 165,8
Изменение к А0, %	—	-3,0	+5,8	+2,6	+178,7	+183,6
Начальная стоимость С ₀	661,1	648,7	685,1	671,6	1 395,8	1 415,8

Источник: расчёты автора.

4. Вероятностная оценка стоимости жизненного цикла

Результаты моделирования методом Монте-Карло представлены в таблице 5 и на рисунке 2. Вариант А1 обеспечивает наименьшую ожидаемую LCC (1 199,6 тыс. сум/м³) и оказывается лучшим в 90,0 % реализаций; в остальных 10,0 % лучшим является биобетон А4. Ожидаемая LCC биобетона на 282 тыс. сум/м³ выше, чем у базового варианта, и лишь в 10,8 % реализаций вариант А4 дешевле А0, а А5 дешевле А3 - в 10,2 % реализаций.

Таблица 5

Стоимость жизненного цикла на горизонте 50 лет, тыс. сум на 1 м³

Показатель	A0	A1	A2	A3	A4	A5
LCC при модальных значениях	1 155,0	1 142,6	1 179,0	1 165,5	1 455,4	1 475,4
Среднее (Монте-Карло)	1 212,1	1 199,6	1 237,7	1 224,1	1 494,4	1 515,9
Стандартное отклонение	238,7	238,7	238,5	238,5	92,2	91,8
10-й процентиль	949,6	937,2	975,2	961,9	1 378,3	1 400,0
90-й процентиль	1 532,8	1 519,9	1 559,8	1 545,8	1 613,3	1 635,0
Вероятность минимальной LCC, %	0	90,0	0	0	10,0	0,01

Источник: расчёты автора.

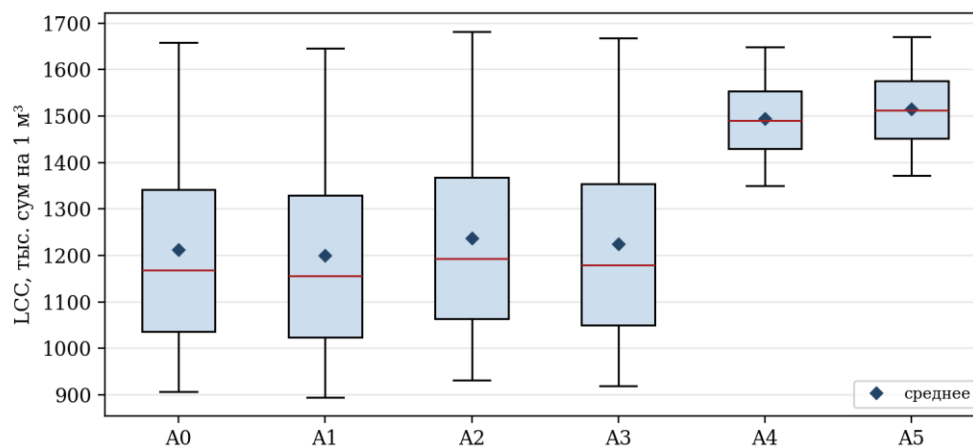


Рис. 2. Распределения стоимости жизненного цикла (усы - 5-й и 95-й процентиля)

Источник: расчёты автора.

Вместе с тем распределения существенно различаются по форме. Стандартное отклонение LCC биобетона на 61 % меньше, чем у вариантов без биодобавки, а 90-й процентиль LCC варианта А4 (1 613,3 тыс. сум) лишь на 5 % выше 90-го перцентиля А0. Иными словами, биобетон «обменивает» более высокое ожидаемое значение затрат на меньшую неопределённость: он выполняет функцию страхования от неблагоприятных сценариев эксплуатации дорогих и частых ремонтов. Для заказчика, не склонного к риску, либо для объектов, где отказ связан с высокими косвенными потерями, эта характеристика может иметь самостоятельную ценность.

5. Чувствительность и пороговые значения

Диаграмма чувствительности разности $\Delta LCC = LCC(A5) - LCC(A3)$ представлена на рисунке 3. Наибольшее влияние оказывают стоимость ремонта, межремонтный интервал обычного бетона, ставка дисконтирования и цена лактата кальция. Лишь два параметра при своих крайних значениях меняют знак разности: стоимость ремонта (при $R = 1,2$ млн сум $\Delta LCC = -124$ тыс. сум) и межремонтный интервал обычного бетона (при $T = 7$ лет $\Delta LCC = -17$ тыс. сум).

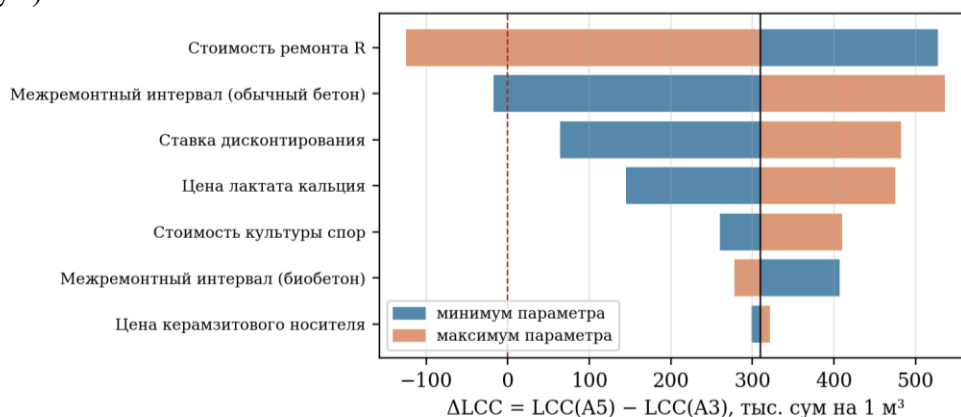


Рис. 3. Чувствительность разности стоимости жизненного цикла вариантов A5 и A3

Источник: расчёты автора.

Пороговая стоимость ремонта, при которой биобетон выравнивается по LCC с сопоставимым вариантом без биодобавки, составляет при модальных значениях прочих параметров 1,03 млн сум/м³ для пары A5–A3 и 1,02 млн сум/м³ для пары A4–A0. Показательно, что при нулевой стоимости питательного субстрата вариант A5 был бы дешевле A3 на 240 тыс. сум/м³. Следовательно, экономическая целесообразность биобетона определяется прежде всего стоимостью лактата кальция, и снижение её, например за счёт использования субстратов из отходов пищевой и сельскохозяйственной промышленности, является главным резервом повышения конкурентоспособности технологии, что согласуется с выводами [27].

6. Выбросы CO₂ и теневая цена углерода

С учётом ремонтов выбросы за жизненный цикл составляют от 335,8 кг CO₂/м³ (A5) до 430,6 кг CO₂/м³ (A0). Введение теневой цены углерода меняет ранжирование вариантов (табл. 6). При цене 300 тыс. сум/т комплексный вариант A5 обгоняет A4, а при цене выше 381 тыс. сум/т вариант A3 становится выгоднее A1: дополнительные затраты на добавку (22,9 тыс. сум/м³) компенсируются стоимостью предотвращённых выбросов (60,1 кг CO₂/м³). При цене 1,2 млн сум/т наименьшую эколого-экономическую стоимость жизненного цикла имеет A3, а варианты с суперпластификатором опережают свои аналоги без него.

Таблица 6

Выбросы и эколого-экономическая стоимость жизненного цикла при модальных значениях

Показатель	A0	A1	A2	A3	A4	A5
Выбросы за жизненный цикл, кг CO ₂ /м³	430,6	412,8	367,3	352,7	412,6	335,8
LCC _{эко} , тыс. сум/м³, при pCO ₂ = 0	1 155,0	1 142,6	1 179,0	1 165,5	1 455,4	1 475,4
то же при pCO ₂ = 300 тыс. сум/т	1 284,1	1 266,4	1 289,1	1 271,3	1 579,2	1 576,1
то же при pCO ₂ = 600 тыс. сум/т	1 413,3	1 390,3	1 399,3	1 377,1	1 703,0	1 676,9
то же при pCO ₂ = 1 200 тыс. сум/т	1 671,6	1 637,9	1 619,7	1 588,7	1 950,5	1 878,4

Примечание: жирным выделен вариант с минимальным значением. Источник: расчёты автора.

7. Многокритериальное ранжирование

Результаты ранжирования методом TOPSIS представлены в таблице 7. Энтропийный метод присвоил наибольшие веса критериям с максимальным разбросом значений числу ремонтов (0,441), стандартному отклонению LCC (0,248) и начальной стоимости (0,226), тогда как веса ожидаемой LCC и выбросов оказались минимальными (0,017 и 0,014). В этом сценарии, как и при равных весах, первые места занимают варианты с биодобавкой. При приоритетах заказчика, ориентированного на экономику и декарбонизацию, лидером становится вариант А3, а биобетон перемещается на последние места.

Таблица 7

Относительная близость к идеальному решению C_i и ранг вариантов

Сценарий весов	A0	A1	A2	A3	A4	A5
Энтропийные веса	0,287 (4)	0,290 (3)	0,280 (6)	0,284 (5)	0,715 (1)	0,710 (2)
Равные веса	0,427 (6)	0,433 (4)	0,429 (5)	0,436 (3)	0,564 (2)	0,569 (1)
Приоритет экономики и декарбонизации	0,514 (4)	0,530 (3)	0,541 (2)	0,555 (1)	0,444 (6)	0,480 (5)

Источник: расчёты автора.

Чувствительность рейтинга к весам содержательный, а не технический результат: не существует варианта, доминирующего по всем критериям, и выбор определяется системой предпочтений заказчика. Энтропийные веса отражают различимость альтернатив, а не значимость критериев, поэтому для обоснования управленческих решений их целесообразно сочетать с экспертными весами.

8. Масштаб эффекта для экономики республики

Для оценки макроэкономического потенциала рассмотрен сценарий, в котором годовое потребление цемента составляет около 20 млн т, а 20 % его используется в товарном конструкционном бетоне. Внедрение цифрового управления качеством (A1) на этих предприятиях сократило бы потребление цемента примерно на 0,21 млн т в год, а выбросы - на 0,18 млн т CO₂; комплексное применение А3 - на 0,97 млн т цемента и 0,82 млн т CO₂ в год. Стоимость сэкономленного цемента при модальной цене составила бы 136 и 627 млрд сум соответственно. Эти оценки носят сценарный характер, однако показывают, что эффект комплексной меры, не требующей изменения цементного производства, сопоставим с годовым выпуском крупного цементного завода.

9. Обсуждение и ограничения

Полученные результаты согласуются с выводом [18, 16] о значительном резерве экономии цемента за счёт управления качеством и уточняют его для условий Узбекистана: эта мера оказалась единственной, выигрышной одновременно по стоимости и по выбросам. Результат для суперпластификатора расходится с распространённым представлением о его безусловной экономичности; причина относительно низкая биржевая цена цемента в республике, при которой ценность добавки проявляется прежде всего через экологический эффект и технологические свойства смеси. Вывод о барьерной роли стоимости биодобавки согласуется с [27, 26], а выявленный эффект снижения дисперсии затрат дополняет его новым аргументом в пользу биобетона для объектов с высокими рисками. Исследование имеет ограничения. Межремонтные интервалы заданы экспертно, а не по данным мониторинга конкретных объектов; не учтены возможные различия в долговечности бетонов с разным водоцементным отношением, косвенные потери от простоя и затраты на внедрение системы управления качеством на уровне предприятия; коэффициенты выбросов приняты по литературным данным. Эти ограничения определяют направления дальнейших исследований.



ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

На основании проведённого исследования сделаны следующие выводы.

1. Разработана методика сравнительной экономической оценки инновационных технологий производства бетона, объединяющая подбор состава с учётом изменчивости прочности, вероятностную модель стоимости жизненного цикла, эколого-экономическую оценку и многокритериальное ранжирование.

2. Снижение коэффициента вариации прочности бетона В30 с 13,5 до 10 % сокращает расход цемента на 21 кг/м³, снижает начальную стоимость на 3,0 % и выбросы на 4,1 % и обеспечивает минимальную стоимость жизненного цикла в 90 % реализаций модели. Это наиболее эффективная из рассмотренных мер.

3. При биржевой цене цемента 565–750 сум/кг поликарбоксилатный суперпластификатор увеличивает материальные затраты на 2,6–5,8 %, но снижает выбросы CO₂ за жизненный цикл на 15 % (на стадии производства материалов - на 18 %); он экономически оправдан при цене добавки ниже 15,7 тыс. сум/кг, цене цемента выше 950 сум/кг или теневой цене углерода выше 381 тыс. сум/т CO₂.

4. Биобетон повышает начальную стоимость в 2,1 раза, а ожидаемую стоимость жизненного цикла - на 23 %, но снижает её стандартное отклонение на 61 % и число ремонтов с четырёх до одного. Он выигрывает по ожидаемой стоимости при стоимости ремонта выше 1,0 млн сум/м³; ключевым фактором его конкурентоспособности является цена питательного субстрата.

На основе выводов предлагается:

- *бетонным заводам* - рассматривать коэффициент вариации прочности как ключевой показатель эффективности производства и в первую очередь инвестировать в автоматизированное дозирование и статистический контроль качества;

- *государственным заказчикам* - включить в конкурсную документацию на объекты инфраструктуры критерий стоимости жизненного цикла вместо критерия минимальной начальной цены, а для труднодоступных сооружений допускать применение самовосстанавливающихся бетонов при обосновании рисками эксплуатации;

- *регулирующим органам* - в рамках реализации Стратегии «зелёной» экономики рассмотреть механизмы учёта стоимости выбросов CO₂ при закупках строительных материалов, которые сделают экономически выгодным применение суперпластификаторов;

- *научному сообществу и промышленности* - развивать производство недорогих питательных субстратов для биобетона из местного вторичного сырья и организовать мониторинг межремонтных интервалов бетонных сооружений для калибровки моделей стоимости жизненного цикла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство цемента в Узбекистане достигло 12,1 млн тонн // UzDaily.uz. – 2026. URL: <https://www.uzdaily.uz/ru/proizvodstvo-tsementa-v-uzbekistane-dostiglo-121-mln-tonn/>
2. В 2025 году Узбекистан собирается произвести 18,5 млн тонн цемента // Jcement.ru. – 2025. – 6 мая. – URL: <https://jcement.ru/content/news/v-2025-godu-uzbekistan-sobiraetsya-proizvesti-18-5-mln-tonn-tsementa/>
3. Узбекистан снизит налог на добычу гипса и смягчит требования к продаже цемента // Gazeta.uz. 2025. 31 октября. URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2025/10/31/gips/>
4. На Узбекской республиканской товарно-сырьевой бирже снизились цены на полиэтилен, цемент и карбамид // Yuz.uz. 2026. 17 августа. URL: <https://yuz.uz/ru/news/na-uzbekskoy-respublikanskoy-tovarno-srevoy-birje-snizilis-tsen-polietilen-tsement-i-karbamid>
5. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 114. – P. 2–26.



6. Habert G., Miller S.A., John V.M., Provis J.L., Favier A., Horvath A., Scrivener K.L. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2020. – Vol. 1. – P. 559–573.
7. Постановление Президента Республики Узбекистан от 04.10.2019 № ПП-4477 «Об утверждении Стратегии по переходу Республики Узбекистан на «зелёную» экономику на период 2019–2030 годов».
8. Указ Президента Республики Узбекистан от 28.01.2022 № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы».
9. ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 5: Life-cycle costing. – Geneva: ISO, 2017.
10. Fuller S.K., Petersen S.R. Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program: NIST Handbook 135. – Washington: U.S. Government Printing Office, 1996.
11. Flanagan R., Jewell C., Norman G. Whole Life Appraisal for Construction. – Oxford: Blackwell Publishing, 2005.
12. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete: CBI Research Report 4:82. – Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
13. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments // *Structural Safety*. – 2003. – Vol. 25, № 4. – P. 343–362.
14. Frangopol D.M., Liu M. Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2007. – Vol. 3, № 1. – P. 29–41.
15. Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J.M. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20% // *Environmental Research Letters*. – 2016. – Vol. 11, № 7. – Art. 074029.
16. Damineli B.L., Kemeid F.M., Aguiar P.S., John V.M. Measuring the eco-efficiency of cement use // *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32, № 8. P. 555–562.
17. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М.: Стандартинформ, 2019.
18. Neville A.M. Properties of Concrete. 5th ed. – Harlow: Pearson Education, 2011.
19. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. – Hoboken: Wiley, 2019.
20. Plank J., Sakai E., Miao C.W., Yu C., Hong J.X. Chemical admixtures Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability // *Cement and Concrete Research*. – 2015. – Vol. 78. – P. 81–99.
21. Aïtcin P.-C., Flatt R.J. (eds.) Science and Technology of Concrete Admixtures. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.
22. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete // *Ecological Engineering*. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 230–235.
23. Wiktor V., Jonkers H.M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33, № 7. P. 763–770.
24. Van Tittelboom K., De Belie N. Self-healing in cementitious materials a review // *Materials*. – 2013. Vol. 6, № 6. – P. 2182–2217.
25. De Belie N., Gruyaert E., Al-Tabbaa A., et al. A review of self-healing concrete for damage management of structures // *Advanced Materials Interfaces*. – 2018. – Vol. 5, № 17. – Art. 1800074.
26. Seifan M., Samani A.K., Berenjian A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100, № 6. P. 2591–2602.
27. Silva F.B., Boon N., De Belie N., Verstraete W. Industrial application of biological self-healing concrete: challenges and economical feasibility // *Journal of Commercial Biotechnology*. – 2015. – Vol. 21, № 1. – P. 31–38.
28. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo method // *Journal of the American Statistical Association*. – 1949. – Vol. 44, № 247. – P. 335–341.



29. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. – Berlin: Springer-Verlag, 1981.
30. Zou Z., Yi Y., Sun J. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment // Journal of Environmental Sciences. – 2006. – Vol. 18, № 5. – P. 1020–1023.
31. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2011.
32. ГОСТ 27006-2019. Бетоны. Правила подбора состава. – М.: Стандартинформ, 2019.