

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.135-144

## Риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях жизненного цикла

Анатолий Викторович Алексейцев, Наталья Григорьевна Верстина,  
Валерия Викторовна Глазкова

Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Разработан и апробирован подход к оценке жизненного цикла (ЖЦ) для несущих стальных конструкций объектов промышленности с применением стоимостной оценки рисков. Подход основан на принципах дисконтирования денежных потоков и включает детализированную декомпозицию всех этапов ЖЦ: от предпроектных исследований до утилизации, с выделением фазы реконструкции стальных конструкций как ключевого стоимостнообразующего фактора.

**Материалы и методы.** Центральным элементом исследования является интеграция в классическую модель стоимостной оценки вероятностных аварийных рисков (механических, коррозионных, усталостных и т.п.), выполненная с применением методологии анализа деревьев событий.

**Результаты.** Разработан риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях ЖЦ. На примере стропильной фермы пролетом 24 м проведен подробный расчет, иллюстрирующий динамику затрат и рисков в течение 40-летнего горизонта планирования. Результаты, представленные в табличной форме, демонстрируют, что доля рисковых составляющих может достигать 20–25 % от общей стоимости для решений с минимальными начальными инвестициями. Сравнительный анализ альтернатив с базовой и усиленной защитой подтверждает экономическую целесообразность превентивных инвестиций, обеспечивающих снижение совокупных затрат по ЖЦ на 35–45 % за счет резкого уменьшения эксплуатационных расходов и вероятности катастрофических отказов. Проведен анализ чувствительности, устанавливающий зависимость итоговой стоимости от ставки дисконтирования, стоимости простоя производства и достоверности исходных вероятностных данных.

**Выводы.** Разработанный подход предназначен для использования в технико-экономическом обосновании проектов при выборе конструктивных решений промышленных зданий в составе объектов промышленности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** стоимость жизненного цикла (LCC), стальные конструкции объектов промышленности, стропильные фермы, эксплуатационные риски, аварийная ситуация, анализ деревьев событий (ETA), дисконтирование, реконструкция, вероятностная оценка

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Алексейцев А.В., Верстина Н.Г., Глазкова В.В. Риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях жизненного цикла // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 135–144. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.135-144

Автор, ответственный за переписку: Валерия Викторовна Глазкова, leram86@mail.ru.

## Risk-based approach to assessment of industrial facilities within the framework of lifecycles

Anatoly V. Aleksetsev, Natalia G. Verstina, Valeriya V. Glazkova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The authors developed and pilot-tested an approach to the lifecycle prognostication for load-bearing steel structures of industrial facilities using a cost-based risk assessment paradigm. The authors' approach is based on principles of discounted cash flows and itemized decomposition of each stage of a lifecycle, from pre-project studies to disposal, with a focus on the reconstruction phase of steel structures as a key cost generator.

**Materials and methods.** The core element of this research work is to integrate probabilistic risks of accidents (mechanical risks, corrosion, fatigue, etc.) into a classical model of cost assessment using event tree analysis.

**Results.** A risk-based approach was developed to assess lifecycles of industrial facilities. A roof truss with a 24-meter span served as an example for a detailed calculation made to illustrate the cost and risk pattern over a 40-year planning time-frame. The results, presented in tabular form, demonstrate that the risk share can reach 20–25 % of the total cost for solutions with minimal upfront investments. A comparative analysis of alternatives with basic and enhanced protection confirms the economic feasibility of preventive investments which reduce the total cost of the lifecycle by 35–45 % due to a se-

vere reduction in operating costs and the probability of disastrous failures. Sensitivity was analyzed to identify dependence of the final cost on the discount rate, the cost of production downtime, and reliability of initial probabilistic data.

**Conclusions.** The proposed approach can be contributed to feasibility studies of projects to choose structural solutions for industrial buildings constructed as part of industrial facilities.

**KEYWORDS:** lifecycle cost (LCC), steel structures of industrial buildings, roof trusses, operational risks, emergency situation, event tree analysis (ETA), discounting, reconstruction, probabilistic assessment, preventive investments

**FOR CITATION:** Aleksetsev A.V., Verstina N.G., Glazkova V.V. Risk-based approach to assessment of industrial facilities within the framework of lifecycles. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):135-144. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.135-144 (rus.).

*Corresponding author:* Valeriya V. Glazkova, leram86@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобальной трансформации промышленного сектора, характеризующейся ростом сложности технологических процессов и ужесточением требований к безопасности и надежности, традиционные методы оценки эффективности инвестиций в объекты промышленности демонстрируют свою ограниченность. Классический «сметный подход», фокусирующийся на минимизации первоначальных (капитальных) затрат (Capital Expenditures — CAPEX), применительно к объектам с жизненным циклом (ЖЦ), исчисляемым десятилетиями, систематически приводит к принятию субоптимальных решений. Это происходит вследствие игнорирования значительной доли будущих операционных расходов (Operational Expenditures — OPEX), затрат на капитальный ремонт и реконструкцию, а также потенциальных финансовых потерь, связанных с реализацией аварийных рисков [1–3].

Стальной несущий каркас промышленного здания (рис.) представляет собой характерный пример важнейшего конструктивного элемента и при этом долгосрочного актива в составе объекта промышленности, чья реальная эффективность на протяжении ЖЦ определяется не стоимостью изготовления и монтажа, а совокупностью денежных потоков на всем периоде его службы. Прогрессирующая коррозия, усталостное повреждение, риск внезапных перегрузок формируют спектр угроз, способных вы-

звать частичное или полное обрушение конструкций с сопутствующими колоссальными издержками: прямыми затратами на аварийно-восстановительные работы, косвенными убытками от остановки производства, репутационным ущербом и, что наиболее критично, человеческими жертвами. Согласно исследованиям в области управления рисками инфраструктурных объектов, неучет этих составляющих может привести к занижению оценки полной стоимости владения (Total Cost of Ownership — TCO) на 30–60 % по сравнению с расчетами, основанными только на CAPEX [4–6].

Мировая научная и инженерно-экономическая практика в ответ на этот вызов активно развивает методологию оценки стоимости жизненного цикла (Life Cycle Costing — LCC) [7–12]. Современные тренды в данной области можно сгруппировать по трем основным направлениям:

1. Цифровизация и интеграция с BIM (Building Information Modeling). Создание «цифровых двойников» конструкций, позволяющих автоматизировать сбор данных о состоянии, прогнозировать износ и обновлять экономические модели в реальном времени. Исследования демонстрируют потенциал снижения ошибок прогнозирования LCC на 15–25 % за счет использования исторических данных из BIM-моделей аналогичных объектов.

2. Вероятностное моделирование и учет неопределенностей. Применение методов Монте-Карло,



Стальной каркас промышленного здания: 1 — колонны; 2 — стропильные фермы; 3 — обвязочные балки

Steel frame of an industrial building: 1 — columns; 2 — roof trusses; 3 — bracing beams

интервального анализа и fuzzy-логики для работы с неточными или стохастическими входными параметрами, такими как цена на металлопрокат, срок службы защитных покрытий, интенсивность коррозии [2]. Это дает возможность перейти для LCC от детерминированной оценки к вероятностной.

3. Инкорпорация риск-менеджмента в LCC-модели. Наиболее актуальное и сложное направление, предполагающее количественную денежную оценку последствий отказов. Работы показывают, что для стальных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, дисконтированная стоимость рисков (математическое ожидание ущерба) может достигать 20–35 % от общей LCC. Однако большинство существующих подходов к управлению рисками либо ограничиваются использованием общих поправочных коэффициентов «на риск», либо рассматривают риски обособленно, не связывая их напрямую с конкретными техническими решениями на этапе проектирования и изготовления.

Таким образом, наблюдается явный разрыв между необходимостью комплексного технико-экономического обоснования инвестиций в надежность и имеющимися упрощенными подходами. Настоящее исследование призвано предложить подход, который бы позволил преодолеть этот разрыв, обеспечив проектировщиков, инвесторов и службы эксплуатации объектов промышленности инструментом для сопоставления альтернатив на основе определения их эффективности с учетом вероятностной природы отказов.

Цель и новизна исследования заключаются в разработке практико-ориентированного подхода к расчету LCC для несущих стальных конструкций объектов промышленности (рис.), обеспечивающего раздельную и количественную оценку затрат на эксплуатацию, плановую реконструкцию и ликвидацию потенциальных аварийных ситуаций. Для достижения поставленной цели применительно к стальным конструкциям объектов промышленности была разработана расширенная декомпозиция ЖЦ с учетом таких этапов, как предпроектная подготовка, производство, монтаж, нормальная эксплуатация, текущие и капитальный ремонты, реконструкция, утилизация. Для каждого этапа формализован расчет всех видов затрат. В свою очередь, для этого на основе анализа статистики отказов и механизмов повреждения идентифицированы доминирующие аварийные риски на примере типовых стропильных ферм. Многообразие сценариев риска и отказов в несущих конструкциях требует рассмотрения различных исходов при определении LCC.

С этой целью может быть эффективно использован анализ деревьев событий (ETA) с присвоением стоимостных эквивалентов каждому сценарию развития аварии. При определении этих эквивалентов модель стоимостной оценки рисков должна однозначно устанавливать связь между дисконтиро-

ванными детерминированными затратами по всем этапам ЖЦ и математическими ожиданиями приведенного (относительного) ущерба от реализации идентифицированных рисков [13, 14].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выделение несущей системы в качестве важнейшего конструктивного элемента и при этом долгосрочного актива в составе объектов промышленности основано на гипотезе о том, что стоимость оборудования промышленных зданий может рассматриваться отдельно и независимо от каркаса в случае его нормальной эксплуатации, а отказ ограждающих конструкций, как правило, не приводит к существенным финансовым потерям за короткий промежуток времени (стоимость оборудования сопоставима или превышает стоимость несущей системы) [15].

**Концептуальная основа и базовые принципы подхода** к оценке ЖЦ. В основе предлагаемого подхода лежит фундаментальное положение о временной ценности денег. Все будущие денежные потоки как оттоки (затраты), так и потенциальные притоки (ликвидационная стоимость), приводятся к моменту принятия инвестиционного решения (базовый год) с помощью ставки дисконтирования  $r$ . Расчет итоговой стоимости ЖЦ представлен дискретной моделью с шагом 1 год и горизонтом анализа по этапам ЖЦ, связанным с временем эксплуатации  $T_{op}$  с учетом ремонтов, реконструкции  $T_{rec}$ , демонтажа  $T_{dem}$  и утилизации, что может соответствовать в частном случае периоду владения активом или сроку кредитования. Общая формула для расчета итоговой стоимости ЖЦ  $LCC_R$  имеет вид:

$$LCC_R = \sum_{i=1}^{T_{op}} \frac{C_{op,i} + R_i}{(1+r)^i} + \sum_{j=1}^{T_{rec}} \frac{C_{rec,j}}{(1+r)^j} + \sum_{k=1}^{T_{dem}} \frac{C_{dem,k}}{(1+k)^j}, \quad (1)$$

где  $C_{op,i}$ ,  $C_{rec,j}$ ,  $C_{dem,k}$  — стоимости владения активом на этапах эксплуатации, реконструкции, демонтажа и утилизации соответственно в году  $i, j, k$ ;  $R_i$  — стоимостное выражение риска финансовых потерь при возникновении аварийных ситуаций на этапе эксплуатации.

Стоимость  $C_{op,i}$  применительно к стальной конструкции здания включает составляющие, связанные с его проектированием, заводским изготовлением, монтажом с учетом специфики укрупнительной сборки и технологической комплектации, а также ежегодные последующие затраты, связанные с плановыми текущими ремонтами, направленными на поддержание нормативного технического состояния. Стоимость  $C_{rec,j}$  включает затраты на техническое обследование несущей системы, проектирование и устройство системы усиления или восстановления несущей способности стальных конструкций, а также затраты на поддержание работоспособности усилен-

ной системы. Следует отметить, что реконструкция здесь может быть обусловлена не только устранением повреждений конструкций, но и инвестиционными проектами, связанными с технической модернизацией или изменением функционального назначения здания.

**Структура затрат в жизненном цикле конструктивной системы.** Для адекватного учета специфики промышленного строительства предлагается разбить ЖЦ на ряд последовательных и логически взаимосвязанных частных этапов.

*Этап 1. Предпроектная подготовка и проектирование.* Данная фаза формирует техническую и организационную основу для всего последующего ЖЦ. Ее структура затрат включает:

- затраты на инженерные изыскания (геодезические, геологические, экологические, обследование территории). Зависят от площади и сложности участка;
- стоимость разработки технико-экономического обоснования (ТЭО) или концепции, включая анализ технологических рисков (выполняется для крупных объектов);
- затраты на разработку рабочей проектной документации (архитектурные решения, конструктивные решения (КМ), детализовочные чертежи для изготовления металлоконструкций (КМД), инженерные системы (при их влиянии на конструкцию), оплата проведения государственной или негосударственной экспертизы проектной документации, стоимость работ по внесению корректировок в проект по замечаниям экспертизы или заказчика)). Для определения стоимости проектирования все перечисленные составляющие затрат суммируются.

*Этап 2. Производство, обработка и логистика металлоконструкций.* Наиболее капиталоемкая фаза, определяющая ключевые эксплуатационные характеристики. Структура затрат на материал включает:

- стоимость основного материала: металлопроката (лист, двутавр, уголок) по цене за тонну на момент закупки, брутто-масса металла по чертежам КМД, тонны; стоимость технологических отходов металла (при резке, сверловке). Например, для ферм сложной формы этот показатель составляет 0,08–0,15 (8–15 %) от основного материала.

Структура стоимости изготовления, включает:

- заработную плату рабочих-сборщиков и сварщиков с начислениями;
- затраты на электроэнергию для работы станков и сварочного оборудования;
- амортизацию технологического оборудования (гильотины, станки плазменной резки, сварочные автоматы);
- затраты на операционный и приемочный контроль качества: визуальный, ультразвуковой контроль сварных швов (УЗК), измерение геометрии;

- стоимость антикоррозионной и огнезащитной обработки. Может варьироваться от стоимости покраски до горячего цинкования и нанесения вспучивающихся составов. Это критически важная статья затрат, определяющая долговечность металлоконструкций;

- затраты на складирование готовых конструкций до отгрузки.

Стоимость транспортировки (логистики) от завода-изготовителя до строительной площадки. Зависит от расстояния, массы и габаритов отправочных марок или сборочных технологических комплектов.

*Этап 3. Строительно-монтажные работы — преобразование материалов в готовый актив.* Затраты имеют следующую структуру:

- общеплощадочные расходы: устройство временных подъездных путей, ограждений, бытовых городков, инженерных сетей;
- подготовительные строительные работы: разработка котлованов под фундаменты, устройство оснований, точная геодезическая разбивка осей;
- основные монтажные операции: аренда и эксплуатация грузоподъемных механизмов (кранов), главный фактор — грузоподъемность и время работы;
- заработная плата бригады монтажников, такелажников;
- изготовление и использование монтажной оснастки, лесов, подмостей;
- стоимость монтажных элементов (болты, шпильки, прокладки);
- геодезический контроль смонтированных стальных конструкций.

*Этап 4. Нормальная эксплуатация — ежегодные затраты, обеспечивающие поддержание работоспособности.* Структура затрат этого этапа:

- ежегодные затраты на плановое техническое обследование несущих конструкций. Включают визуальный осмотр, инструментальный контроль толщины покрытий, выявление дефектов (коррозии, усталостных трещин, погибей и т.п.). Эти затраты могут быть постоянными или возрастать со временем;
- стоимость работ по результатам обследований: очистка от загрязнений, подтяжка болтовых соединений, устранение мелких повреждений, окраска, устройство (обновление) защиты от огневого воздействия.

*Этап 5. Реконструкция или капитальный ремонт.* Данный этап направлен на восстановление или повышение несущей способности конструктивной системы и включает такой набор затрат:

- затраты на детальное инструментальное техническое обследование перед реконструкцией (с применением неразрушающих и разрушающих методов) для оценки фактического состояния и разработки проекта усиления;

- стоимость частичного демонтажа поврежденных элементов;
- стоимость изготовления и поставки элементов системы усиления или полной замены поврежденных элементов;
- затраты на монтаж системы усиления/восстановления, включая временное обеспечение безопасности конструкции на период работ, связанных с реконструкцией.

*Этап 6. Аварийное восстановление.* Этот этап рассматривается только в случае реализации аварийной ситуации, а связанные с ней затраты включают в себя величину  $R_i$  в формуле (1). Для стальных конструкций эту величину можно вычислить так:

$$R_i = pU_i; p = f(\beta), \quad (2)$$

где  $U_i$  — размер ущерба от аварии в году  $i$ ;  $p$  — вероятность отказа, определяемая по теории надежности через индекс надежности  $\beta$ , зависящий от запаса прочности или деформируемости конструкции в аварийной ситуации. При отсутствии техногенных причин и агрессивных природно-климатических условий эта вероятность достаточно низкая:  $p \approx 10^{-6}$ .

*Этап 7. Демонтаж и утилизация.* Завершающая фаза ЖЦ включает следующие затраты:

- затраты на демонтаж демонтируемой конструкции;
- затраты на металл, отправляемый в переработку (его масса может составлять до 90 % от массы демонтируемой конструкции).

Затраты  $C_{dem,k}$  (см. формулу (1)) должны вычисляться как сумма затрат на демонтаж и затрат на переработку демонтируемой конструкции с учетом возвратной суммы за металлолом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стропильные фермы покрытия промышленных зданий (рис.) представляют собой высоконагруженные статически определимые системы, чей отказ может привести к прогрессирующему обрушению значительной части крыши и кровли. Оценка их ЖЦ требует учета следующих особенностей [16–20]:

**1. Высокая чувствительность к коррозии узлов.** Наиболее уязвимыми являются верхние пояса в зоне конденсации влаги под утеплителем и узлы сопряжения раскосов с поясами, где возможны щелевая и контактная коррозия. Стоимость защиты от коррозии и регулярность инспекций становятся ключевыми управляющими параметрами, влияющими на долговечность всего объекта промышленности в целом.

**2. Циклический характер нагружения и усталость.** Помимо постоянной нагрузки, фермы могут воспринимать ветровые пульсации, температурные деформации, вибрации от работающего оборудования, кранов. Это инициирует усталостные трещины, в первую очередь, в сварных швах и зонах отверстий под болты. Следовательно, оценка ЖЦ должна учитывать затраты на усталостно-безопасное проектирование и специализированный контроль сварных швов.

**3. Риск внезапной аварийной перегрузки.** Возможен при аварийных ситуациях в цехе (падение груза, наезд транспорта), ошибках эксплуатации (скопление снега из-за неработающих водостоков, складирование материалов на кровле). Этот риск напрямую связан с культурой производства на предприятии.

На основе анализа отказов, фиксируемых при наблюдении опыта эксплуатации для стропильных ферм, можно выделить основные рисковые сценарии, требующие стоимостной оценки (табл. 1).

Табл. 1. Типология рисков отказа для стальной стропильной фермы

Table 1. Failure risk typology for a steel truss

Описание / Description	Формула для года $i$ The formula for the year $i$
Катастрофический отказ элемента (пояса, раскоса, стойки) вследствие критической потери сечения из-за прогрессирующей коррозии, приведшей к разрушению под расчетной нагрузкой / Disastrous failure of an element (band, brace, or post) due to critical loss of cross-section due to progressive corrosion, resulting in failure under design load	$R_{cor,i} = p_{cor,i} U_{cor,i}$
Усталостное разрушение элемента в зоне концентратора напряжений (сварной шов растянутого раскоса, отверстие в поясе) / Fatigue failure of an element in a stress concentration zone (welded joint of a stretched brace, band opening)	$R_{fat,i} = p_{fat,i} U_{fat,i}$
Потеря устойчивости сжатого пояса или несущей способности растянутого элемента при однократном значительном превышении эксплуатационной нагрузки (техногенное воздействие, экстремальная снеговая нагрузка) / Stability loss of a compressed band or load-bearing capacity loss of a stretched element if the maximum operating load value is exceeded greatly (technogenic impact, extreme snow load)	$R_{over,i} = p_{over,i} U_{over,i}$
Потеря устойчивости сжатого пояса или несущей способности растянутого элемента при огневом воздействии / Stability loss of a compressed band or load-bearing capacity loss of a stretched element under fire exposure	$R_{fire,i} = p_{fire,i} U_{fire,i}$

Таким образом, получим общую формулу для расчета математического ожидания стоимостных последствий по всем типам рисков, представленных в табл. 1, за год:

$$R_i = \sum_{k=1}^4 p_{ik} U_{ik}. \quad (3)$$

Если необходимо оценить стоимость рисков на уровень базового года, то его величину следует ежегодно дисконтировать, как показано в формуле (1). Годовые вероятности реализации рисков  $p_{ik}$  зависят от времени и условий эксплуатации, возрастающая с течением этого времени. Если не учитывать конкретные схемы расположения оборудования и рабочих мест в здании, то можно предположить, что тяжесть последствий (полное обрушение фермы) примерно одинакова для всех сценариев, т.е. величины годовых ущербов  $U_{ik}$  приблизительно равны между собой.

Для каждого типа риска (см. табл. 1) строится отдельное дерево событий. Начиная с инициирующего неблагоприятного события будем проследивать все возможные пути его развития через последовательность барьеров безопасности или систем защиты. Выполним построение ЕТА для риска  $R_{cor}$  (прогрессирующая коррозия):

**1. Иницирующее событие:** образование повреждения (скола, царапины) в защитном покрытии ключевого элемента фермы. Годовая вероятность:  $p_{cor,i}$  (зависит от среды,  $p_{cor,i} \approx 0,01/0,05$ ).

**2. Барьер 1 — обнаружение при инспекции.** Проводится ежегодная инспекция:

- *успех (ветвь А):* повреждение обнаружено. Вероятность обнаружения (эффективность инспекции)  $p_{det,i} \approx 0,7/0,9$ . Результат: запланирован локальный ремонт покрытия. Затраты: незначительные, около 0,1 % от полной стоимости конструкции  $C_{tot} \cdot C_{det,i} \approx 0,001 C_{tot}$ ;

- *неудача (ветвь Б):* повреждение не обнаружено. Вероятность этого события  $1 - p_{det,i}$ .

**3. Барьер 2 — скорость коррозии.** В поврежденном месте начинается коррозия:

- *ветвь Б1:* коррозия не достигает критической глубины/сечения к моменту следующей инспекции. Вероятность этого события  $(1 - p_{cor,c,i})$ . Результат:

повреждение может быть обнаружено позже, ремонт дороже. Затраты:  $C_{det,i} + C_{det,i^*}$ , где  $C_{det,i}$  — затраты на ремонт прогрессирующей за время  $t$  коррозии;

- *ветвь Б2:* коррозия достигает критического сечения. Вероятность этого события  $p_{cor,c,i}$  (зависит от агрессивности среды и свойств стали, растет со временем).

**4. Барьер 3 — нагрузка в момент наличия критического повреждения.** На конструкцию действуют пиковые нормативные нагрузки:

- *ветвь Б2.1:* элемент с критическим сечением выдерживает нагрузку. Вероятность этого события  $(1 - p_{cor,i})$ ;

- *ветвь Б2.2 (наихудший сценарий):* происходит разрушение элемента. Вероятность этого события  $(p_{cor,cr,i} \approx 0,8/0,95)$ . Результат: обрушение части покрытия.

Вероятность наилучшего сценария за год:  $p_i = p_{cor,i} \cdot (1 - p_{det,i}) \cdot p_{cor,c,i} \cdot p_{cor,cr,i}$ , совокупный ущерб (табл. 1) можно приближенно вычислить по формуле  $U_{cor,i} = C_m + C_{nm}$ , где  $C_m$  — материальные затраты, связанные с аварийной ситуацией (стоимость фермы, связанных с ней конструкций, демонтажа и восстановления стальной конструкции при возможности);  $C_{nm}$  — нематериальные затраты, связанные со штрафами, репутационными рисками, компенсациями пострадавшим.

Приведем практический пример расчета стоимости жизненного цикла (LCC) для стропильной фермы с динамикой по годам. Исходные данные для расчета. Каркас здания, включающий 12 ферм. Стропильная ферма из стального профиля, пролет 24 м, шаг 6 м. Масса по чертежу (брутто): альтернатива 1 — 2,8 т, альтернатива 2 — 2,1 т. Условия эксплуатации: цех химического производства, среда агрессивности С4 (высокая) по ISO 12944-2. Расчетный срок службы  $T = 40$  лет. Ставка дисконтирования:  $r = 8\%$  (средневзвешенная стоимость капитала для промышленного предприятия). Рассматриваемые альтернативные конструктивные решения:

1. Alt-1 (базовая): сталь С255. Антикоррозионная защита — система лакокрасочных покрытий (2 грунта, 2 эмали) общей толщиной 150 мкм. Расчетная долговечность покрытия 12 лет. Огнезащита не предусмотрена.

Табл. 2. Сравнительный расчет LCC по строительным конструкциям зданий из 12 ферм

Table 2. Comparative calculation of LCC for building structures of 12 trusses

Статья затрат Cost item	Альтернатива 1 (Alt-1, базовая), стоимость, тыс. руб. / Alternative 1 (Alt-1, basic), cost, thousand rubles	Альтернатива 2 (Alt-2, премиум), стоимость, тыс. руб. / Alternative 2 (Alt-2, premium), cost, thousand rubles	Комментарий / Comment
1. Проектирование Design	250	280	+30 из-за расчета огнестойкости и трудоемкости проектирования узлов / +30 due to the calculation of fire resistance and node design complexity

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Статья затрат Cost item	Альтернатива 1 (Alt-1, базовая), стоимость, тыс. руб. / Alternative 1 (Alt-1, basic), cost, thousand rubles	Альтернатива 2 (Alt-2, премиум), стоимость, тыс. руб. / Alternative 2 (Alt-2, premium), cost, thousand rubles	Комментарий / Comment
2. Производство Production	3,200	3,100	–100, несмотря на дорогую защиту, за счет экономии металла (С345) / –100, despite expensive protection, due to saved metal (С345)
3. Монтаж Mounting	1,300	1,050	–250 за счет меньшей массы и объема конструкций / –250 due to lower mass and volume of the structures
4. Эксплуатация Exploitation	1,950	1,050	–900. Alt-1: две дорогие перекраски. Alt-2: только инспекции и один ремонт / –900. Alt-1: two expensive repaints. Alt-2: examination sessions and one repair only
5. Реконструкция Reconstruction	1,500	450	–1050. Alt-1: два цикла усиления/замены. Alt-2: один цикл ремонта / –1,050. Alt-1: two amplification/replacement cycles. Alt-2: one repair cycle
6. Утилизация Disposal	–180	–140	+40. Меньший доход от лома у Alt-2 из-за меньшей массы +40. Alt-2 has lower scrap revenue due to its lower mass
7. Риски / Risks	1,720	380	–1,340. Ключевое преимущество –1.340. Key advantage
Итого LCC Total LCC	9,740	6,170	Экономия по Alt-2: 3,570 тыс. руб. (36,7 %) / Savings for Alt-2: 3.570 thousand rubles (36.7 %)
Доля рисков в LCC, % / Share of risks in LCC, %	17,7	6,2	–

2. Alt-2 (премиум): сталь С345. Антикоррозионная защита — горячее цинкование (толщина 80 мкм) + полиуретановый финишный слой. Огнезащита — тонкослойное вспучивающееся покрытие (предел огнестойкости R15). Долговечность системы — 25 лет.

План технических мероприятий: для Alt-1 — замена защитного покрытия и усиление 30 % элементов на 12-й и 24-й год. Для Alt-2 — инспекция и локальный ремонт на 25-й год. Параметры рисков (оценочные, на основе инженерного опыта): ущерб от обрушения  $U_i = 80\,000$  руб. Базовые годовые вероятности для нового объекта:

- Alt-1:  $p_{cor,i} = 0,03$ ,  $p_{det,i} = 0,8$ ,  $p_{cr,i} = 0,9$ .  $p_{cr,i}$  возрастает линейно от 0,001 в год 1 до 0,02 в год 12 (до перекраски);

- Alt-2:  $p_{cor,i} = 0,01$ ,  $p_{det,i} = 0,9$ ,  $p_{cr,i} = 0,9$ .  $p_{cr,i}$  возрастает от 0,0001 до 0,002 за 25 лет. Вероятно-

сти  $p_{fat,i}$  и  $p_{over,i}$  приняты постоянными: Alt-1: 0,0003 и 0,0002; Alt-2: 0,00015 и 0,0001 соответственно. Вероятность  $p_{fire,i} = 0$ , возгорание исключено. Результаты расчета LCC по рассматриваемым альтернативам приведены в табл. 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная модель стоимостной оценки рисков и результаты расчета демонстрируют, что для объектов промышленности эффективность технических решений не может быть оценена в отрыве от анализа их влияния на полный ЖЦ и связанные с ним риски. Выбор в пользу минимальных капитальных вложений (альтернатива 1) оказывается стратегической ошибкой, приводящей к более высоким совокупным затратам. Инвестиции в качественные материалы, современные системы защиты и детальное проектирование (альтернатива 2), напротив,

определяют эффективный портфель превентивных мер. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Рисксовая составляющая является существенным, а часто и определяющим фактором итоговой стоимости ЖЦ для стальных конструкций, в особенности работающих в агрессивных промышленных средах. В рассмотренном примере ее доля в ЛСС для базового решения достигала 17,7 %, что сопоставимо с затратами на монтаж или эксплуатацию. Использование методологии Event Tree Analysis (ETA) позволяет не только оценить этот компонент количественно, но и выявить наиболее эффективные точки приложения управленческих инструментов для его снижения (например, повышение вероятности обнаружения дефектов  $p_{det,i}$  через улучшение системы мониторинга).

2. Выделение этапа реконструкции в самостоятельную стоимостную фазу методологически важно. Это позволяет наглядно оценить экономические последствия различных стратегий обслуживания стальной конструкции. Решения, увеличивающие межремонтный период (как в альтернативе 2), обеспечивают значительную экономию не только за счет отсрочки затрат, но и за счет снижения кумулятивных рисков в периоды между реконструкциями. Модель стоимостной оценки рисков дает возможность опти-

мизировать график ремонтных мероприятий, балансируя затраты на них и растущие риски.

3. Чувствительность итоговых экономических показателей к макропараметрам (ставка дисконтирования) и отраслевым условиям (стоимость простоя) крайне высока. Это означает, что универсальных «лучших решений» не существует. Применение предложенного подхода к оценке ЖЦ несущих стальных конструкций промышленных зданий с применением стоимостной оценки рисков требует его адаптации под конкретный бизнес-контекст объекта промышленности, стоимость капитала и производственную модель. Подход выступает не как калькулятор с единственным ответом, а как инструмент для сценарного анализа и обоснования решений в условиях неопределенности. Его практическая ценность максимально раскрывается при интеграции с отраслевыми базами данных по отказам и долговечности материалов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в интеграции предложенной модели стоимостной оценки рисков с платформами информационного моделирования (BIM) для создания автоматизированных систем поддержки принятия решений на ранних стадиях проектирования, а также в разработке стандартизированных отраслевых баз данных для параметров надежности и стоимостных последствий отказов конструкций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эминян К.М. Оптимальность и равновесие экономических событий как единство противоречий // Дискуссия. 2024. № 2 (123). С. 6–10. DOI: 10.46320/2077-7639-2024-2-123-6-10. EDN JMRZXA.

2. Basu M., Kaja N., Rao P. Study on life cycle assessment and life cycle sustainability assessment of buildings : a review // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2024. Vol. 105. Issue 3. Pp. 749–766. DOI: 10.1007/s40030-024-00831-3. EDN SUEZGK.

3. Moutik B., Summerscales J., Graham-Jones J., Pemberton R. Life cycle assessment research trends and implications: a bibliometric analysis // Sustainability. 2023. Vol. 15. Issue 18. P. 13408. DOI: 10.3390/su151813408. EDN MDNTYO.

4. Алексейцев А.В. Научные основы оптимизации железобетонных конструкций с использованием генетических алгоритмов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2021. 481 с. EDN GMVSGI.

5. Терехов И.Г., Варивода В.А., Сухинин Д.А. Теория расчета железобетонных конструкций в строительстве: технико-экономические аспекты // Human Progress. 2024. Т. 10. № 12. DOI: 10.46320/2073-4506-2024-12a-7. EDN AEHCLA.

6. Udisi B., Gorgolewski M. A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment // Environmental Research

Communications. 2025. Vol. 7. Issue 2. P. 022003. DOI: 10.1088/2515-7620/adb669. EDN OOPNKO.

7. Кисель Т.Н., Мишланова М.Ю., Галеев К.Ф. Исследование рисков участников инвестиционно-строительных проектов в условиях внедрения технологий информационного моделирования // Real Estate: Economics, Management. 2023. № 4. С. 37–40. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-4-37-40. EDN ADNFTG.

8. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 40. Issue 1–6. Pp. 201–214. DOI: 10.1007/s00158-008-0351-3

9. De Almeida P.R., Solas M.Z., Renz A., Bühler M.M., Gerbert P., Castagnino S. et al. Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mind-set and Technology. Geneva, World Economic Forum, 2016.

10. Elsner Ju., Gabriel A., Ackermann T., Körkemeyer Ja., Schmitt R.H. Auf digitalen zwillingen basiertes life cycle assessment // ZWF. Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 2023. Vol. 118. Issue 12. Pp. 883–887. DOI: 10.1515/zwf-2023-1167. EDN PJRGCD.

11. Golej Ju., Veverková D., Schwarz M., Sečkar M. Life cycle assessment and software tools comparison // International Journal of Environment and Sustainable Development. 2024. Vol. 1. Issue 1. DOI: 10.1504/ijesd.2024.10064669. EDN AOHVCE.

12. Martínez-Ramón N., Calvo-Rodríguez F., Iribarren D., Dufour Ja. Frameworks for the application of machine learning in life cycle assessment for process modeling // *Cleaner Environmental Systems*. 2024. Vol. 14. P. 100221. DOI: 10.1016/j.cesys.2024.100221
13. Adel G., Othman A.A.E., Harinarain N. Integrated Project Delivery (IPD): An Innovative Approach for Achieving Sustainability in Construction Projects // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Pp. 195–209. DOI: 10.1007/978-3-030-97748-1\_16
14. Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. *Megaprojects and Risk*. UK; New York : Cambridge University Press, 2003.
15. Канатова Э.А., Медведева М.Н., Смирнова А.А. Усиление металлических конструкций при реконструкции // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2024. № 1. С. 57–62. EDN ZSOPBT.
16. Kasulanati M.L., Pancharathi R.K. Optimizing multi-recycled concrete for sustainability: aggregate gradation, surface treatment methods and life cycle impact assessment // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 449. P. 138510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138510
17. Marcinkowski A., Hareža P. Integration of life cycle sustainability assessment indicators in different energy sectors // *Economics and Environment*. 2025. Vol. 91. Issue 4. P. 799. DOI: 10.34659/eis.2024.91.4.799
18. Tamrazyan A., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage // *Engineering Optimization*. 2023. Vol. 55. Issue 11. Pp. 1905–1922. DOI: 10.1080/0305215x.2022.2134356
19. Wood J.G.M. Pipers row car park collapse: Identifying risk // *Concrete*. 2003. Vol. 37. Issue 9. Pp. 29–31.
20. Xudong H., Shuli S., Pu C., Tao L. A multi-scenario analysis method for collapse risks due to initial local failure of building structures // *Structures*. 2023. Vol. 58. P. 105479. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105479

Поступила в редакцию 12 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 21 января 2026 г.

Одобрена для публикации 23 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Анатолий Викторович Алексейцев — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Наталья Григорьевна Верстина — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-201, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstina@mail.ru;

Валерия Викторовна Глазкова — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Eminyán K.M. Optimality and equilibrium of economic events as a unity of contradictions. *Discussion*. 2024; 2(123):6-10. DOI: 10.46320/2077-7639-2024-2-123-6-10. EDN JMRZXA. (rus.).
2. Basu M., Kaja N., Rao P. Study on life cycle assessment and life cycle sustainability assessment of buildings : a review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 2024; 105(3):749-766. DOI: 10.1007/s40030-024-00831-3. EDN SUEZGK
3. Moutik B., Summerscales J., Graham-Jones J., Pemberton R. Life cycle assessment research trends and implications : a bibliometric analysis. *Sustainability*. 2023; 15(18):13408. DOI: 10.3390/su151813408. EDN MDNTYO.
4. Aleksetsev A.V. *Scientific foundations of optimization of reinforced concrete structures using genetic algorithms : dis. for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2021; 481. EDN GMVSGI. (rus.).
5. Terekhov I.G., Varivoda V.A., Sukhinin D.A. Theory of calculation of reinforced concrete structures in construction: technical and economic aspects. *Human Progress*. 2024; 10(12). DOI: 10.46320/2073-4506-2024-12a-7. EDN AEHCLA. (rus.).
6. Udisi B., Gorgolewski M. A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment. *Environmental Research Communications*. 2025; 7(2):022003. DOI: 10.1088/2515-7620/adb669. EDN OOPNKO.

7. Kisel T.N., Mishlanova M.Yu., Galeev K.F. Study of the risks of investment and construction projects of participants in the context of the introduction of information modeling technologies. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; (4):37-40. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-4-37-40. EDN ADNFTG. (rus.).
8. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2010; 40(1-6):201-214. DOI: 10.1007/s00158-008-0351-3
9. De Almeida P.R., Solas M.Z., Renz A., Buhler M.M., Herbert P., Castagnino S. et al. *Shaping the future of construction: a breakthrough in thinking and technology*. Geneva, World Economic Forum, 2016.
10. Elsner Ju., Gabriel A., Ackermann T., Körkemeyer Ja., Schmitt R.H. Auf digitalen zwillingen basiertes life cycle assessment. *ZWF. Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2023; 118(12):883-887. DOI: 10.1515/zwf-2023-1167. EDN PJRGCD
11. Golej Ju., Veverková D., Schwarz M., Sečkar M. Life cycle assessment and software tools comparison. *International Journal of Environment and Sustainable Development*. 2024; 1(1). DOI: 10.1504/ijesd.2024.10064669. EDN AOHVCE.
12. Martínez-Ramón N., Calvo-Rodríguez F., Iribarren D., Dufour Ja. Frameworks for the application of machine learning in life cycle assessment for process modeling. *Cleaner Environmental Systems*. 2024; 14:100221. DOI: 10.1016/j.cesys.2024.100221
13. Adel G., Othman A.A.E., Harinarain N. Integrated Project Delivery (IPD): An Innovative Approach for Achieving Sustainability in Construction Projects. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 195-209. DOI: 10.1007/978-3-030-97748-1\_16
14. Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. *Megaprojects and Risk*. UK; New York, Cambridge University Press, 2003.
15. Kanatova E.A., Medvedeva M.N., Smirva A.A. Strengthening metal structures during reconstruction. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2024; 1:57-62. EDN ZSOPBT. (rus.).
16. Kasulanati M.L., Pancharathi R.K. Optimizing multi-recycled concrete for sustainability: aggregate gradation, surface treatment methods and life cycle impact assessment. *Construction and Building Materials*. 2024; 449:138510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138510
17. Marcinkowski A., Hareža P. Integration of life cycle sustainability assessment indicators in different energy sectors. *Economics and Environment*. 2025; 91(4):799. DOI: 10.34659/eis.2024.91.4.799
18. Tamrazyan A., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage. *Engineering Optimization*. 2023; 55(11):1905-1922. DOI: 10.1080/0305215x.2022.213-4356
19. Wood J.G.M. Collapse of the parking lot on Pipers Row: risk definition. *Concrete*. 2003; 37(9):29-31.
20. Xudong H., Shuli S., Pu C., Tao L. A multi-scenario analysis method for collapse risks due to initial local failure of building structures. *Structures*. 2023; 58:105479. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105479

Received January 12, 2026.

Adopted in revised form on January 21, 2026.

Approved for publication on January 23, 2026.

**B I O N O T E S :** **Anatoly V. Aleksetsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

**Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-201, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstina@mail.ru;

**Valeriya V. Glazkova** — Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru.

*Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.*