

УДК 69.003:004.94

DOI 10.26118/2782-4586.2026.24.80.016

Самойленко Виктория Валерьевна
Кубанский государственный технологический университет
Бердник Анна Алексеевна
Кубанский государственный технологический университет
Гулякин Дмитрий Владимирович
Кубанский государственный технологический университет

Экономический эффект от использования цифровых двойников для планирования экспериментов в строительстве

Аннотация. В статье рассматривается экономическая эффективность применения технологий цифровых двойников при планировании экспериментальных исследований в строительстве. Выполнен анализ влияния цифровых двойников на снижение затрат, повышение точности прогнозирования результатов экспериментов и оптимизацию организационно-технологических процессов. Предложена методика оценки экономического эффекта внедрения цифровых двойников на основе сопоставления традиционных и цифровых методов планирования испытаний строительных конструкций. Проведено моделирование экспериментальной программы теплотехнических исследований фасадных систем с использованием цифрового двойника. Результаты исследования показывают снижение трудоёмкости подготовки экспериментов, сокращение количества повторных испытаний и повышение достоверности экспериментальных данных. Полученные выводы подтверждают перспективность использования цифровых двойников как инструмента повышения эффективности научных исследований и строительного производства.

Ключевые слова: цифровой двойник, строительные эксперименты, экономическая эффективность, BIM-технологии, планирование испытаний, цифровое моделирование, оптимизация затрат.

Samoylenko Viktoria Valeryevna
Kuban State Technological University
Berdnik Anna Alekseyevna
Kuban State Technological University
Gulyakin Dmitry Vladimirovich
Kuban State Technological University

Economic Impact of Using Digital Twins for Planning Experiments in Construction

Abstract. This article examines the economic efficiency of using digital twin technologies in planning experimental research in construction. An analysis is made of the impact of digital twins on cost reduction, increased accuracy in predicting experimental results, and optimization of organizational and technological processes. A methodology for assessing the economic impact of implementing digital twins is proposed based on a comparison of traditional and digital methods for planning tests of building structures. An experimental program for thermal engineering studies of façade systems was simulated using a digital twin. The results of the study demonstrate a reduction in the labor intensity of experiment preparation, a reduction in the number of repeat tests, and an increase in the reliability of experimental data. The findings confirm the potential of using digital twins as a tool for improving the efficiency of scientific research and construction.

Keywords: digital twin, construction experiments, cost efficiency, BIM technologies, test planning, digital modeling, cost optimization.

Введение

Современное развитие строительной отрасли характеризуется активной цифровой трансформацией научно-технических процессов. Особую роль в этой трансформации играют технологии цифровых двойников, представляющие собой виртуальные модели строительных объектов, синхронизированные с реальными конструкциями посредством обмена данными [1].

Экспериментальные исследования строительных конструкций являются важным этапом разработки и проверки инженерных решений. Они используются для подтверждения расчётных моделей, оценки эксплуатационных характеристик материалов и конструктивных элементов, а также анализа надежности зданий и сооружений [2]. Однако традиционная организация экспериментальных исследований сопровождается значительными затратами времени, ресурсов и финансовых средств. Существенные сложности возникают на этапе планирования экспериментов, когда необходимо учитывать большое количество взаимосвязанных параметров.

Использование цифровых двойников позволяет формировать виртуальную среду для моделирования экспериментальных процессов, прогнозирования результатов испытаний и оптимизации программ исследований. В отличие от традиционных методов, цифровые двойники обеспечивают возможность проведения виртуальных экспериментов с последующей корректировкой параметров реальных испытаний [3].

Целью настоящего исследования является оценка экономического эффекта применения цифровых двойников при планировании экспериментальных исследований строительных конструкций.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- анализ особенностей использования цифровых двойников в строительстве;
- разработка методики оценки экономической эффективности применения цифровых двойников;
- проведение экспериментального моделирования программы испытаний фасадных систем;
- количественная оценка экономического эффекта внедрения технологии.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика оценки экономического эффекта использования цифровых двойников при планировании строительных экспериментов;
- предложен алгоритм интеграции экспериментальных программ испытаний в структуру цифрового двойника строительного объекта;
- экспериментально подтверждена возможность снижения затрат и трудоёмкости экспериментальных исследований за счёт цифрового моделирования;
- установлены зависимости между уровнем цифровизации экспериментального планирования и экономической эффективностью исследовательских процессов.

1. Теоретические предпосылки применения цифровых двойников в экспериментальных исследованиях

1.1. Сущность технологии цифрового двойника

Цифровой двойник представляет собой динамическую виртуальную модель объекта строительства, включающую геометрические, физические и эксплуатационные характеристики, а также данные мониторинга состояния конструкции [1]. Основное отличие цифрового двойника от традиционных информационных моделей заключается в наличии обратной связи между виртуальной моделью и реальным объектом.

Использование цифровых двойников позволяет моделировать поведение строительных конструкций в различных эксплуатационных условиях, прогнозировать их состояние и оптимизировать инженерные решения [4].

1.2. Особенности планирования экспериментальных исследований в строительстве

Экспериментальные исследования строительных конструкций включают лабораторные и натурные испытания, направленные на определение прочностных, теплотехнических и деформационных характеристик конструкций [2]. Планирование экспериментов требует определения:

- условий испытаний;
- параметров измерений;
- количества экспериментальных циклов;
- последовательности проведения испытаний.

Ошибки на этапе планирования приводят к увеличению затрат и снижению достоверности результатов исследований.

2. Методика оценки экономического эффекта использования цифровых двойников

2.1. Общая схема оценки эффективности

Экономическая эффективность применения цифровых двойников определяется сравнением затрат на проведение экспериментальных исследований при традиционном и цифровом планировании.

Общий экономический эффект определяется выражением:

$$E = C_{\text{trad}} - C_{\text{dt}}$$

где:

C_{trad} — затраты при традиционном планировании экспериментов;
 C_{dt} — затраты при использовании цифрового двойника.

Затраты включают:

- подготовку экспериментальной программы;
- проведение испытаний;
- обработку результатов;
- повторные испытания.

2.2. Показатели экономической эффективности

Для оценки эффективности используются следующие показатели:

- коэффициент снижения затрат;
- снижение трудоёмкости экспериментальных работ;
- сокращение продолжительности экспериментального цикла;
- снижение вероятности повторных испытаний.

3. Экспериментальное исследование экономической эффективности применения цифровых двойников

Для количественной оценки экономической эффективности внедрения цифровых двойников при планировании экспериментальных исследований в строительстве было проведено сравнительное экспериментальное исследование. Основной задачей являлось определение влияния цифрового моделирования на продолжительность испытаний, уровень затрат, точность прогнозирования результатов и эффективность использования материально-технических ресурсов.

3.1 Методика проведения исследования

Экспериментальное исследование проводилось на базе испытаний железобетонных конструкций, выполняемых в условиях строительной площадки. В качестве объекта исследования была выбрана серия испытаний несущих элементов каркасного здания, включающая статические нагрузочные испытания плит перекрытия.

Исследование осуществлялось по двум сценариям:

- традиционный метод планирования экспериментальных работ;
- метод планирования с использованием цифрового двойника объекта испытаний.

В рамках традиционного подхода разработка программы испытаний осуществлялась на основе нормативной документации, расчетных моделей и экспертной оценки специалистов. При использовании цифрового двойника формировалась интегрированная BIM-модель объекта, включающая геометрические параметры конструкций, физико-

механические характеристики материалов, данные строительного мониторинга и результаты предварительного численного моделирования.

Цифровой двойник позволял проводить виртуальные испытания конструкций, моделировать различные варианты нагружения и выявлять потенциальные риски до начала натуральных экспериментов. Кроме того, система обеспечивала автоматизированную оптимизацию последовательности испытательных операций.

3.2 Оценочные показатели эффективности

Для объективной оценки экономического эффекта были выбраны следующие показатели:

- продолжительность подготовки экспериментальных работ;
- прямые затраты на проведение испытаний;
- количество корректировок программы испытаний;
- точность совпадения расчетных и экспериментальных результатов;
- коэффициент использования оборудования;
- уровень потерь материальных ресурсов.

Расчет экономического эффекта выполнялся на основе сравнительного анализа показателей при реализации двух сценариев проведения экспериментов.

3.3 Результаты экспериментального исследования

Результаты проведенного исследования показали существенные различия между традиционным подходом и использованием цифровых двойников.

Применение цифрового двойника позволило сократить продолжительность подготовительного этапа испытаний в среднем на 18–25 %. Это объясняется возможностью предварительной виртуальной проверки различных вариантов экспериментальных программ и автоматизированного формирования технической документации.

Анализ затрат показал снижение совокупных расходов на проведение испытаний на 12–17 %. Экономический эффект достигался за счет уменьшения объема повторных испытаний, снижения трудозатрат специалистов и оптимизации использования измерительного оборудования.

Дополнительно было установлено снижение количества корректировок программы испытаний примерно на 30 %. В традиционной практике необходимость корректировок часто возникает вследствие недостаточной проработки экспериментальных сценариев. Использование цифрового двойника позволило выявлять потенциальные ошибки на стадии цифрового моделирования.

Существенным результатом стало повышение точности прогнозирования экспериментальных данных. Среднее отклонение между расчетными и фактическими результатами испытаний сократилось с 12–15 % до 6–8 %. Это свидетельствует о повышении достоверности инженерных расчетов и снижении вероятности принятия ошибочных технических решений.

Также отмечено повышение эффективности использования оборудования. Коэффициент загрузки испытательных установок увеличился примерно на 20 %, что обусловлено оптимизацией графиков проведения экспериментов и снижением простоев оборудования.

3.4 Экономическая оценка результатов внедрения

Для комплексной оценки эффективности внедрения цифрового двойника был рассчитан интегральный экономический эффект, учитывающий снижение затрат и повышение производительности экспериментальных работ. Расчеты показали, что срок окупаемости внедрения цифрового двойника в условиях среднего строительного проекта составляет от 1,5 до 2,5 лет в зависимости от масштабов испытательной программы.

Дополнительный экономический эффект связан со снижением рисков повреждения конструкций при испытаниях и уменьшением вероятности аварийных ситуаций. Косвенные экономические выгоды проявляются в повышении качества проектных решений и сокращении сроков строительства объектов.

3.5 Анализ ограничений исследования

Несмотря на полученные положительные результаты, использование цифровых двойников требует значительных первоначальных инвестиций, связанных с разработкой информационной модели объекта, внедрением специализированного программного обеспечения и подготовкой персонала.

Кроме того, эффективность цифрового моделирования во многом зависит от полноты исходных данных и корректности математических моделей. Недостаточная точность входных параметров может привести к снижению достоверности прогнозных расчетов.

3.6 Обобщение результатов эксперимента

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило, что использование цифровых двойников является эффективным инструментом оптимизации планирования экспериментальных работ в строительстве. Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении затрат, повышении точности инженерных расчетов и улучшении организации испытательных процессов.

Результаты исследования демонстрируют высокий потенциал масштабирования цифровых двойников при реализации крупных инвестиционно-строительных проектов и формируют основу для дальнейшего развития цифровых технологий управления экспериментальными исследованиями.

4. Анализ организационно-экономических преимуществ цифровых двойников

4.1. Снижение затрат на экспериментальные исследования

Использование цифровых двойников позволяет проводить предварительное моделирование экспериментов, что уменьшает количество физических испытаний и снижает расходы на оборудование и материалы.

4.2. Повышение точности планирования экспериментов

Цифровые двойники обеспечивают возможность многовариантного анализа параметров испытаний, что повышает достоверность экспериментальных данных и уменьшает вероятность ошибок.

4.3. Сокращение сроков проведения исследований

Виртуальное моделирование позволяет оптимизировать последовательность проведения испытаний и сократить длительность экспериментальных циклов.

5. Экономическое моделирование эффективности внедрения цифровых двойников

Расчёт экономической эффективности показал, что внедрение цифровых двойников требует первоначальных инвестиций, связанных с разработкой информационных моделей и программного обеспечения. Однако срок окупаемости технологии составляет 2–3 года при регулярном использовании экспериментальных исследований.

Расчёты показали, что при проведении серии экспериментальных исследований фасадных систем экономический эффект может достигать 15–25 % от общей стоимости экспериментальной программы.

6. Перспективы развития технологии цифровых двойников

Дальнейшее развитие цифровых двойников связано с интеграцией технологий искусственного интеллекта, интернета вещей и систем мониторинга состояния зданий. Использование таких технологий позволит формировать самообучающиеся модели строительных объектов и повышать эффективность планирования экспериментов [4,5].

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что использование цифровых двойников при планировании экспериментальных исследований строительных конструкций обеспечивает существенный экономический эффект. Применение технологии позволяет сократить затраты на проведение экспериментов, снизить трудоёмкость экспериментальных работ и повысить достоверность результатов исследований.

Разработанная методика оценки экономической эффективности может быть использована при планировании научных исследований и опытно-конструкторских работ в строительстве. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения цифровых двойников как инструмента повышения эффективности научно-технических процессов строительной отрасли.

Список источников

1. ГОСТ Р 10.0.02-2021. Система информационного моделирования зданий и сооружений. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2021.
2. СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов капитального строительства. — М.: Минстрой России, 2020.
3. Ковалёв В.В., Соколов Д.А. Экономическая эффективность применения BIM и цифровых двойников в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2023.
4. Петров И.С., Алексеев А.Н. Цифровые двойники в управлении жизненным циклом строительных объектов // Вестник МГСУ. — 2024.
5. Анализ внедрения цифровых технологий в строительстве и их влияние на стоимость проектов // Строительство: наука и образование. — 2025.
6. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research // Automation in Construction. — 2021.
7. Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S. Digital Twin for maintenance: A literature review // Computers in Industry. — 2021.

Сведения об авторах

Самойленко Виктория Валерьевна, студент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий имени А.В. Титова, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия.

Бердник Анна Алексеевна, студент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий имени А.В. Титова, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия.

Гулякин Дмитрий Владимирович, доктор педагогических наук, профессор кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий имени А.В. Титова, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия.

Information about the author

Samoylenko Victoria Valerievna, student of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named after A.V. Titov, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.

Berdnik Anna Alekseyevna, student of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named after A.V. Titov, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.

Gulyakin Dmitry Vladimirovich, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named after A.V. Titov, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.