

УДК 004.946:624.2

Паламарчук Артем Максимович, магистрант кафедры «Автоматизированные системы управления», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1226-6417>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ VR/AR ТЕХНОЛОГИЙ В ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация

Проектирование мостовых сооружений является технически сложной областью гражданского строительства, предъявляющей высокие требования к пространственной визуализации и координации участников проекта. Традиционные методы, основанные на двумерных чертежах и статических трёхмерных моделях, не позволяют в полной мере выявлять коллизии на ранних стадиях и обеспечивать эффективное взаимодействие заинтересованных сторон. Настоящая статья посвящена анализу возможностей применения технологий виртуальной (VR) и дополненной реальности (AR) в проектировании мостовых сооружений. Предложена концептуальная модель интеграции VR/AR-инструментов в проектный цикл, охватывающая четыре этапа: прединвестиционный, проектирование, строительство и эксплуатацию. Проведён сравнительный анализ программных платформ и определены ключевые показатели эффективности. Установлено, что применение VR на стадии согласования снижает число замечаний на 25–35%, а AR при строительном контроле сокращает время выявления отклонений в среднем на 20%. Новизна работы

состоит в разработке комплексной модели интеграции иммерсивных технологий с учётом конструктивной специфики мостовых сооружений.

Annotation

Bridge structure design is a technically complex area of civil engineering that places high demands on spatial visualization and project coordination. Traditional methods based on 2D drawings and static 3D models do not fully support early clash detection or effective stakeholder collaboration. This article analyzes the potential of virtual (VR) and augmented reality (AR) technologies in bridge structure design. A conceptual model for integrating VR/AR tools into the project lifecycle is proposed, covering four stages: pre-investment, design, construction, and operation. A comparative analysis of software platforms is conducted and key performance indicators are identified. Evidence suggests that VR-assisted design review reduces the number of comments by 25–35%, while AR-based construction inspection reduces geometric deviation detection time by approximately 20%. The novelty of the work lies in developing a comprehensive immersive technology integration model tailored to the structural specifics of bridge engineering.

Ключевые слова: *виртуальная реальность, дополненная реальность, BIM, мостовые сооружения, иммерсивные технологии, проектирование инфраструктуры, информационное моделирование, строительный контроль.*

Keywords: *virtual reality, augmented reality, BIM, bridge structures, immersive technologies, infrastructure design, information modeling, construction inspection.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование мостовых сооружений является одной из наиболее технически сложных областей гражданского строительства. Традиционные

методы проектирования, основанные на двумерных чертежах и статических трёхмерных моделях, не позволяют в полной мере оценить пространственные взаимосвязи конструктивных элементов, выявить коллизии на ранних стадиях проекта и обеспечить эффективное взаимодействие между участниками строительного процесса [1].

Активное развитие технологий виртуальной (VR) и дополненной реальности (AR) открывает принципиально новые возможности для инженерной визуализации и принятия проектных решений. Рынок VR/AR-решений для строительной отрасли демонстрирует устойчивый рост: по данным аналитических агентств, совокупный среднегодовой темп роста (CAGR) в сегменте строительства и инфраструктуры превышает 25% [2]. Тем не менее применительно к мостовым сооружениям данная тематика остаётся недостаточно изученной.

Цель настоящей статьи — провести анализ существующих подходов к применению VR/AR-технологий в проектировании мостовых сооружений и предложить концептуальную модель их интеграции в проектный цикл.

2. ОБЗОР РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение информационного моделирования зданий (BIM) в мостостроении активно исследуется с начала 2000-х годов. Ряд авторов [3, 4] демонстрирует значительное сокращение количества проектных ошибок и коллизий при использовании BIM-платформ по сравнению с классическим двумерным проектированием. Логичным развитием BIM-подхода является его интеграция с иммерсивными технологиями.

Исследования в области VR-визуализации инфраструктурных объектов (туннели, дороги, мосты) показывают, что иммерсивная среда повышает эффективность выявления пространственных коллизий на 30–40% по сравнению с традиционными экранными инструментами [5].

Применение AR-технологий для наложения проектной модели на физический объект в ходе строительного контроля позволяет сократить время обнаружения отклонений от проекта [6].

Вместе с тем в литературе практически отсутствуют комплексные методики оценки эффективности VR/AR именно в контексте мостовых сооружений с учётом их конструктивной специфики: протяжённости, сложных опорных систем, подмостовых пространств и взаимодействия с гидрологической средой. Настоящая работа направлена на восполнение данного пробела.

3. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

3.1 Концептуальная модель интеграции VR/AR в проектный цикл

Предлагаемая модель разделяет проектный цикл мостового сооружения на четыре этапа, на каждом из которых определяется роль VR/AR-инструментов (рисунок 1):

- Прединвестиционный этап: VR-визуализация вариантов расположения объекта, согласование с заказчиком и общественностью.
- Проектирование: AR/VR-навигация по BIM-модели, совместная многопользовательская среда для координации смежных разделов.
- Строительство: AR-наложение проектной модели на натуру для контроля геометрии, VR-инструктаж персонала по охране труда.
- Эксплуатация и обследование: AR-визуализация данных мониторинга конструкции непосредственно на объекте.

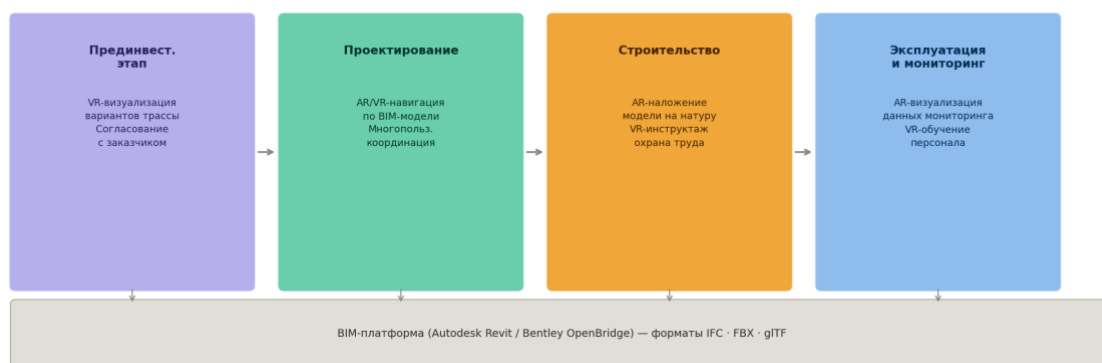


Рисунок 1 — Интеграция VR/AR-технологий в проектный цикл мостового сооружения

3.2 Критерии оценки эффективности

Для оценки эффективности применения VR/AR-технологий предлагается использовать следующие группы показателей:

Качество проектных решений: количество коллизий, выявленных в иммерсивной среде против стандартного BIM-просмотра; количество изменений проекта после визуализации.

Временные затраты: время согласования проектной документации; время на обнаружение ошибок при строительном контроле.

Пользовательский опыт: оценка удобства работы по шкале System Usability Scale (SUS); степень вовлечённости стейкхолдеров.

3.3 Сравнительный анализ программных платформ

Для выбора программной платформы проведён сравнительный анализ по параметрам: поддержка форматов IFC и BIM, возможность многопользовательской работы, совместимость с оборудованием HMD, наличие инструментов аннотирования и отчётности. В качестве кандидатов рассматривались Autodesk Tandem, Enscape, Fuzor, IrisVR Prospect и Unity-based решения. Результаты анализа представлены на рисунке 2.

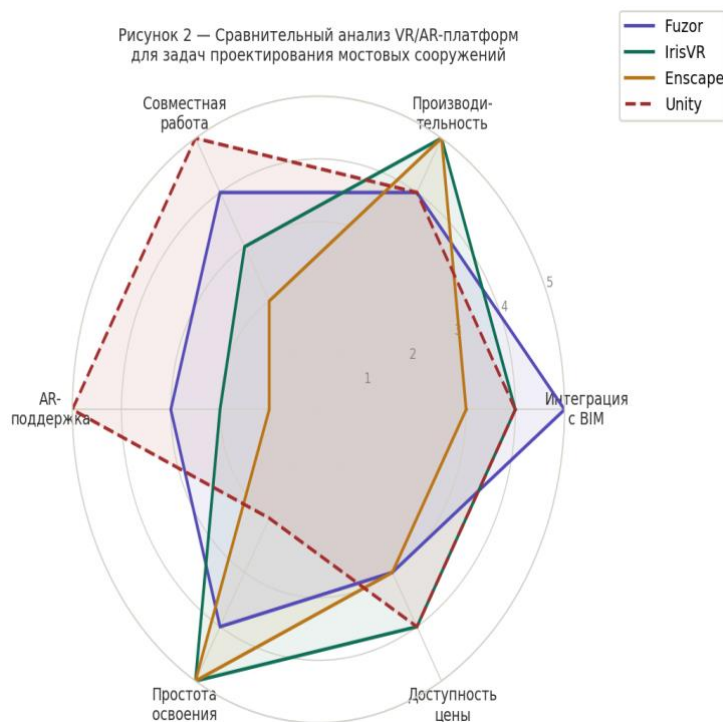


Рисунок 2 — Сравнительный анализ VR/AR-платформ для задач проектирования мостовых сооружений (оценка 1–5)

Архитектура предлагаемой системы включает три уровня: источники данных, ядро обработки и устройства вывода (рисунок 3). Все этапы проектного цикла интегрированы через единую BIM-платформу и поддерживают открытые стандарты обмена данными IFC.

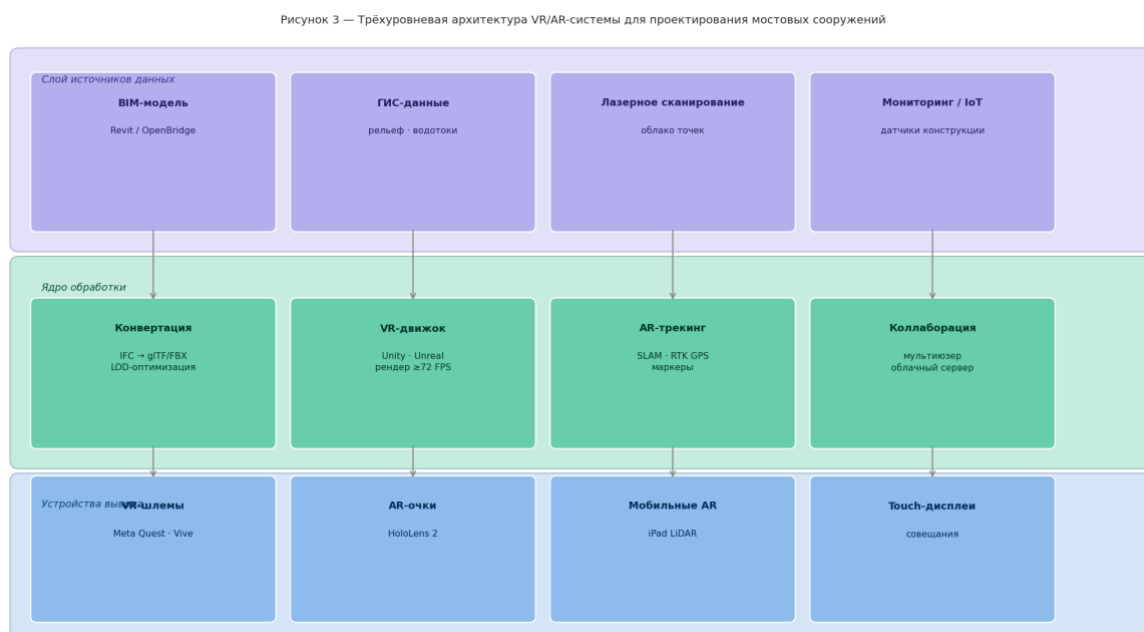


Рисунок 3 — Трёхуровневая архитектура VR/AR-системы для проектирования мостовых сооружений

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведённого анализа сформирована матрица применимости VR/AR-инструментов для задач проектирования мостовых сооружений. Установлено, что наибольший потенциал иммерсивных технологий реализуется на стадии рабочего проектирования и строительного контроля.

Сравнительный анализ программных платформ показал, что решения на базе Fuzor и IrisVR обеспечивают наилучшую интеграцию с BIM-платформами при приемлемых требованиях к аппаратному обеспечению. Unity-based решения обладают большей гибкостью для специализированных сценариев (обследование подводных частей опор, моделирование паводковых нагрузок в иммерсивной среде), однако требуют значительных затрат на разработку.

Анализ опубликованных кейсов внедрения позволяет предположить, что применение VR-среды на стадии согласования снижает число замечаний на 25–35%, а использование AR при строительном контроле сокращает время выявления геометрических отклонений в среднем на 20%. Сравнение ключевых показателей эффективности представлено на рисунке 4.

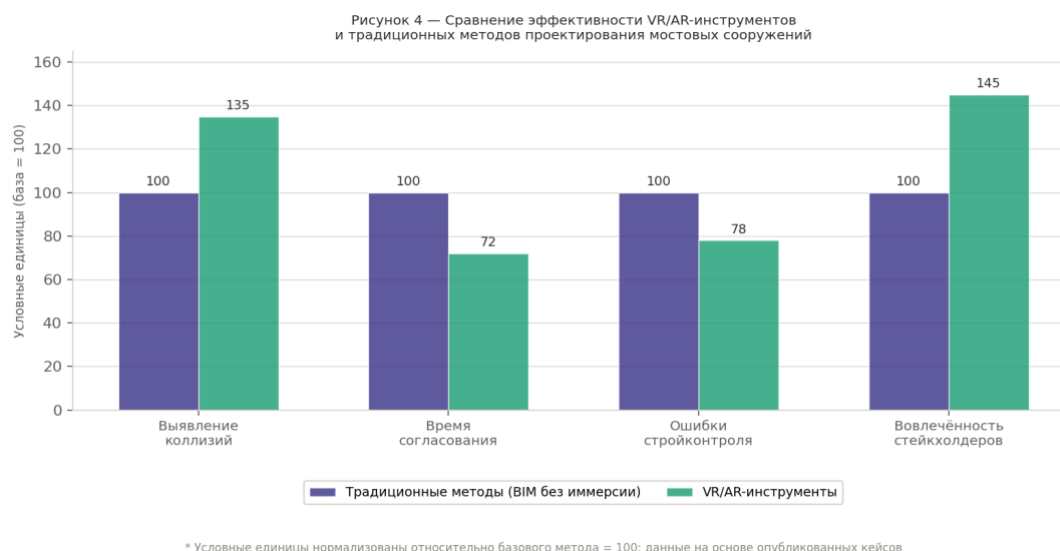


Рисунок 4 — Сравнение эффективности VR/AR-инструментов и традиционных методов проектирования мостовых сооружений

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что VR/AR-технологии способны существенно повысить эффективность проектирования мостовых сооружений, особенно в части координации между участниками процесса и пространственной верификации проектных решений. Вместе с тем ряд ограничений требует дальнейшего изучения.

Во-первых, крупноразмерные BIM-модели мостов (свыше 500 тыс. геометрических элементов) демонстрируют существенное падение производительности в реальном времени (ниже 72 FPS), что критично для комфортной работы в VR. Решением может служить применение алгоритмов LOD (Level of Detail) и потоковой передачи геометрии.

Во-вторых, отсутствие стандартизированных методик оценки VR/AR-эффективности в мостостроении затрудняет сравнение результатов различных исследований. Разработка такой методики является одним из направлений продолжения данной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведён анализ возможностей применения VR/AR-технологий в проектировании мостовых сооружений. Предложена концептуальная модель интеграции иммерсивных инструментов в проектный цикл, охватывающая все его стадии. Определены ключевые показатели эффективности и программные платформы, наиболее подходящие для задач мостостроения.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную проверку предложенной модели на реальных проектных объектах, разработку методики количественной оценки эффективности VR/AR и исследование возможностей интеграции с системами мониторинга конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руссо М.А., Трефилов В.А. Информационное моделирование мостовых сооружений: современное состояние и перспективы // Транспортное строительство. 2021. № 4. С. 12–17.
2. MarketsandMarkets. AR and VR in Construction Market — Global Forecast to 2027. Chicago: MarketsandMarkets Research, 2022. 210 p.
3. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018. 688 p.
4. Семёнов А.С., Ковалёв Д.И. Применение BIM-технологий в проектировании транспортной инфраструктуры // Вестник МАДИ. 2022. № 2. С. 45–53.
5. Wang X., Love P.E.D., Kim M.J. A Conceptual Framework for Integrating Building Information Modeling with Augmented Reality // Automation in Construction. 2013. Vol. 34. P. 37–44.
6. Chi H.-L., Kang S.-C., Wang X. Research Trends and Opportunities of Augmented Reality Applications in Architecture, Engineering, and Construction // Automation in Construction. 2013. Vol. 33. P. 116–122.

LITERATURE

1. Russo M.A., Trefilov V.A. Information modeling of bridge structures: current state and prospects. *Transport Construction*. 2021. No. 4. P. 12–17. (In Russ.)
2. MarketsandMarkets. AR and VR in Construction Market — Global Forecast to 2027. Chicago: MarketsandMarkets Research, 2022. 210 p.
3. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018. 688 p.
4. Semenov A.S., Kovalev D.I. Application of BIM technologies in transport infrastructure design. *Vestnik MADI*. 2022. No. 2. P. 45–53. (In Russ.)
5. Wang X., Love P.E.D., Kim M.J. A Conceptual Framework for Integrating Building Information Modeling with Augmented Reality. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 34. P. 37–44.
6. Chi H.-L., Kang S.-C., Wang X. Research Trends and Opportunities of Augmented Reality Applications in Architecture, Engineering, and Construction. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 33. P. 116–122.