Современная парадигма интеграции иммерсивных технологий в строительной отрасли

Плотников Сергей Алексеевич
магистрант, НИУ МГСУ, splot04@mail.ru,

Овчаренко Екатерина Евгеньевна
магистрант, НИУ МГСУ, ovcarenkoekaterina77@gmail.com,

Самосудов Егор Александрович
магистрант, НИУ МГСУ, sea-2205@mail.ru,

Сергеева Полина Сергеевна
магистрант, НИУ МГСУ, sergeevapolina38@gmail.com,

Назарова Алина Алексеевна
магистрант, НИУ МГСУ, xolittt@mail.ru

В статье рассматривается изменение роли иммерсивных технологий в строительной отрасли и обосновывается переход от их локального применения в качестве средства трехмерной визуализации к включению в единую цифровую среду жизненного цикла объекта. Показано, что виртуальная, дополненная и смешанная реальность приобретают наибольшую практическую ценность при интеграции с технологиями информационного моделирования, цифровыми двойниками, системами мониторинга и общими средами данных. Проанализированы направления применения XR-технологий на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации, а также ограничения, препятствующие их масштабированию. Предлагается рассматривать иммерсивную среду не как самостоятельный программный продукт, а как человеко-машинный интерфейс доступа к актуальной информационной модели объекта и средство обратной передачи данных в цифровой контур проекта. Такой подход позволяет связать пространственное восприятие строительного объекта с управленческими и производственными процессами и формирует основу для перехода к контекстно-зависимому цифровому сопровождению строительства.

Ключевые слова: иммерсивные технологии, строительство, виртуальная реальность, дополненная реальность, смешанная реальность, XR, информационное моделирование, BIM, цифровой двойник.

Современное развитие строительной отрасли характеризуется не столько появлением отдельных цифровых инструментов, сколько постепенным объединением ранее автономных технологий в единую информационную среду. В этом процессе иммерсивные технологии — виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR) и смешанная реальность (MR), объединяемые понятием Extended Reality (XR), — занимают особое положение. Их принципиальное отличие от традиционной трехмерной визуализации заключается в том, что пользователь получает возможность воспринимать цифровые данные непосредственно в пространственном контексте объекта, взаимодействовать с ними и соотносить модель с реальной производственной средой. Для строительства, где значительная часть решений связана с геометрией, последовательностью операций, доступностью конструкций и взаимным расположением элементов, данное свойство имеет самостоятельную производственную ценность. Современные исследования также показывают устойчивое расширение сферы применения VR и AR в AEC-секторе и усиление их взаимосвязи с BIM и технологиями цифровых двойников [1].

На ранних этапах внедрения VR и AR в архитектурно-строительной практике основной эффект связывался преимущественно с наглядностью. Виртуальные модели применялись для демонстрации проектных решений заказчику, оценки архитектурного восприятия помещений, обучения персонала или представления отдельных технологических операций. Подобные сценарии сохраняют свое значение и сегодня, однако их нельзя считать достаточными для системной цифровой трансформации отрасли. Современная парадигма предполагает, что иммерсивная среда должна быть связана с информационной моделью объекта, календарными данными, результатами строительного контроля, параметрами оборудования и, при необходимости, потоками информации от датчиков. Исследования последних лет прямо связывают дальнейшее развитие XR в строительстве с цифровыми двойниками, BIM, IoT и системами управления данными [2]. В такой системе XR перестает быть своеобразной «витриной» трехмерной модели и становится интерфейсом работы с цифровым состоянием строительного объекта.

Цель настоящего исследования состоит в формировании концептуального представления о месте иммерсивных технологий в цифровом контуре строительного проекта и определении условий, при которых их использование способно обеспечивать устойчивый организационно-технологический эффект. Методологическую основу исследования составили сравнительный анализ научных работ по применению VR, AR и MR в архитектурно-строительной сфере, обобщение практики информационного моделирования и системный анализ взаимосвязей между цифровой моделью, физическим объектом и пользователем. Такой подход позволяет рассматривать иммерсивные технологии не изолированно, а в системе информационных потоков, сопровождающих объект в течение его жизненного цикла.

На стадии проектирования наиболее очевидным преимуществом иммерсивных технологий является возможность пространственной проверки решений до начала выполнения строительно-монтажных работ. Традиционный просмотр модели на экране позволяет оценить геометрию объекта, однако не всегда дает достоверное представление о масштабе помещений, доступности оборудования, удобстве перемещения персонала или фактической видимости отдельных конструктивных элементов. В VR проектная группа получает возможность рассматривать объект в масштабе 1:1, моделировать маршруты, оценивать зоны обслуживания инженерного оборудования, анализировать эргономику и проводить коллективные проектные сессии. При этом практическая значимость технологии определяется не качеством визуального эффекта, а тем, насколько обнаруженные замечания включаются в формальный процесс управления изменениями. Если выявленное в виртуальной среде замечание фиксируется как задача, связывается с конкретным элементом информационной модели и передается ответственному участнику проектирования, XR становится частью процесса координации. Если же результат остается исключительно предметом устного обсуждения, цифровой эффект применения технологии существенно снижается.

На строительной площадке функции иммерсивных решений изменяются. Здесь приоритет получают AR и MR, поскольку специалист взаимодействует не с полностью искусственной средой, а с физическим объектом, на который накладывается цифровая информация. Возможными сценариями являются визуализация проектного положения конструкций и инженерных сетей, отображение последовательности монтажа, обозначение опасных зон, просмотр технологической документации и получение удаленных консультаций. Особый интерес представляет сопоставление фактически выполненных работ с информационной моделью. При корректной пространственной привязке цифрового слоя появляется возможность выявлять расхождения между проектным и фактическим положением элементов непосредственно в зоне производства работ. Вместе с тем надежность такого способа контроля зависит от точности позиционирования, качества исходной модели, условий освещения, стабильности трекинга и допустимой погрешности для конкретного вида работ. По этой причине иммерсивный контроль не следует автоматически отождествлять с инструментальным или геодезическим контролем.

Границы его применения должны устанавливаться исходя из требуемой точности и назначения конкретной контрольной процедуры.

Самостоятельное направление применения иммерсивных технологий связано с обеспечением безопасности труда. Виртуальная реальность позволяет воспроизводить потенциально опасные производственные ситуации без воздействия реального риска: падение с высоты, работу рядом с движущимися механизмами, нахождение в опасных зонах или нарушение порядка эвакуации. Метаанализ исследований применения VR в строительном обучении показал положительные результаты по показателям поведения, формирования навыков и пользовательского опыта по сравнению с традиционными форматами подготовки [3]. Вместе с тем результаты исследований не дают оснований считать любой иммерсивный курс заведомо эффективнее очного инструктажа. Результат определяется качеством сценария, характером обратной связи, продолжительностью подготовки, профессиональным опытом работников и соответствием виртуальной ситуации реальным условиям производства. Исследования AR-обучения также свидетельствуют о положительном потенциале технологии, однако в части усвоения знаний статистически значимое преимущество над традиционным обучением выявляется не во всех случаях [4]. Следовательно, сама технологическая новизна не может выступать критерием эффективности образовательного решения.

На стадии эксплуатации иммерсивные технологии получают иной информационный контекст. Пользователю требуется уже не проектная модель как таковая, а возможность оперативно получить сведения о фактическом состоянии конкретного элемента: его характеристиках, истории обслуживания, диагностических показателях, сопутствующей документации и взаимосвязях с инженерными системами. При наличии цифрового двойника специалист может получать в пространственном представлении не только сведения о расположении оборудования, но и его актуальные параметры, предупреждения и результаты мониторинга. В такой конфигурации XR фактически выполняет функцию пространственного интерфейса цифрового двойника. Подобный подход особенно востребован на объектах со значительной концентрацией инженерного оборудования, где поиск скрытых коммуникаций или идентификация элементов по традиционной исполнительной документации требует значительного времени.

Принципиальным условием современной интеграции является обеспечение двустороннего информационного обмена. Во многих ранних решениях данные передавались из BIM-модели в VR- или AR-приложение посредством однократной выгрузки. Такая схема неизбежно создает риск расхождения между исходной моделью и ее иммерсивным представлением. Более зрелая архитектура должна предполагать наличие единого авторитетного источника данных, механизмов синхронизации и возможности обратной фиксации результатов работы. Информационная модель или цифровой двойник передает XR-среде геометрические параметры, атрибуты элементов, их статусы и связанные документы; пользователь, в свою очередь, получает возможность зафиксировать дефект, подтвердить выполнение операции, сформировать замечание или связать фактические данные с конкретным элементом объекта. В результате возникает замкнутый информационный цикл «модель — физический объект — пользователь — актуализированная модель». Именно наличие подобного цикла позволяет отличать системную интеграцию от использования иммерсивной визуализации в качестве изолированного сервиса.

В российской практике предпосылки для реализации такого подхода связаны с развитием технологий информационного моделирования и нормативным закреплением требований к информационным моделям объектов капитального строительства. Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 мая 2024 г. № 614 утверждены правила формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, а СП 333.1325800.2020 определяет правила ее формирования на различных стадиях жизненного цикла [5, 6]. Указанные документы непосредственно не регламентируют применение иммерсивных технологий, однако создают важную информационную основу для их использования. XR-решения при таком подходе могут развиваться не в качестве самостоятельных хранилищ геометрии и атрибутивных данных, а как прикладной уровень доступа к структурированной информации проекта. Это позволяет уменьшить дублирование сведений и облегчает включение иммерсивных инструментов в существующие процессы строительной организации.

Серьезные препятствия дальнейшей интеграции связаны не только со стоимостью оборудования. Существенное значение имеют интероперабельность программных платформ, необходимость передачи сложных BIM-моделей на устройства с ограниченными вычислительными ресурсами, устойчивость пространственной регистрации, управление версиями, информационная безопасность и отсутствие унифицированных требований к достоверности результатов иммерсивного контроля. Сохраняются и человекоориентированные ограничения: зрительная утомляемость, киберболезнь, информационная перегрузка интерфейса, ограниченное поле зрения некоторых устройств и необходимость подготовки персонала. Современные исследования дополнительно обращают внимание на когнитивное состояние пользователя. AR-интерфейс, перегруженный обозначениями, подсказками и предупреждениями, способен снижать ситуационную осведомленность вместо ее повышения. В исследованиях 2026 г. в этой связи рассматривается переход к адаптивным системам, учитывающим не только состояние строительной площадки, но и когнитивную нагрузку работника [7]. Поэтому дальнейшее развитие XR целесообразно связывать с контекстно-зависимой визуализацией, при которой объем предоставляемых пользователю данных определяется характером выполняемой операции.

Не менее важен организационный аспект внедрения. Попытка распространить иммерсивные решения одновременно на все процессы повышает стоимость интеграции и затрудняет объективную оценку результата. Более рациональным представляется внедрение, связанное с конкретным производственным сценарием и заранее определенными измеримыми показателями: продолжительностью согласования решений, количеством повторных выездов специалистов, временем поиска оборудования, количеством выявленных до начала монтажа коллизий, продолжительностью обучения или долей замечаний, закрытых без повторного осмотра. При таком подходе технологический эффект отделяется от демонстрационного. Одновременно появляется возможность определить необходимую глубину интеграции. Для проектной сессии может оказаться достаточной периодическая выгрузка актуальной модели, тогда как контроль выполнения работ или эксплуатационное обслуживание требуют устойчивой синхронизации с общей средой данных и однозначной идентификации элементов. Следовательно, универсальная архитектура для всех XR-сценариев представляется нецелесообразной: состав данных, частота их обновления и требования к точности должны определяться той функцией, которую иммерсивная система выполняет в конкретном строительном процессе.

Современную парадигму интеграции иммерсивных технологий в строительной отрасли целесообразно определять как переход к связанному, контекстному и двустороннему взаимодействию человека с цифровым представлением объекта на протяжении его жизненного цикла. В данной системе BIM обеспечивает структурированное описание проектируемого объекта, цифровой двойник отражает его актуальное или динамическое состояние, общая среда данных поддерживает согласованность информации, а XR формирует пространственный канал взаимодействия пользователя с этими сведениями. Практическая ценность подобной архитектуры определяется не степенью визуальной реалистичности виртуальной среды, а возможностью сократить информационный разрыв между проектным решением, фактическим состоянием объекта и действиями участников строительного процесса.

Дальнейшее распространение иммерсивных технологий будет связано с их постепенным переходом из категории специализированных средств визуализации в состав стандартных цифровых рабочих процессов. Наиболее обоснованными представляются сценарии, в которых XR решает конкретную производственную задачу и основывается на актуальных данных: проверка проектных решений, технологическая подготовка, обучение персонала, контроль выполнения работ, фиксация дефектов, техническое обслуживание и удаленная экспертная поддержка. При этом критерием технологической зрелости следует считать не сам факт применения VR-гарнитуры или AR-устройства, а степень включенности получаемой с их помощью информации в общий контур управления объектом. Именно такая интеграция позволяет рассматривать иммерсивные технологии не как эффектное дополнение к цифровому строительству, а как один из инструментов формирования новой среды взаимодействия человека, информационной модели и физического объекта.

Литература

1. Sacks R., Perlman A., Barak R. Construction safety training using immersive virtual reality // *Construction Management and Economics*. — 2013. — Vol. 31, No. 9. — P. 1005–1017. — DOI: 10.1080/01446193.2013.828844.
2. Wang X., Kim M. J., Love P. E. D., Kang S.-C. Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research // *Automation in Construction*. — 2013. — Vol. 32. — P. 1–13. — DOI: 10.1016/j.autcon.2012.11.021.
3. Hilfert T., König M. Low-cost virtual reality environment for engineering and construction // *Visualization in Engineering*. — 2016. — Vol. 4. — Article 2. — DOI: 10.1186/s40327-015-0031-5.
4. Sidani A., Dinis F. M., Duarte J., Sanhudo L., Calvetti D., Baptista J. S., Martins J. P., Soeiro A. Recent tools and techniques of BIM-Based Augmented Reality: A systematic review // *Journal of Building Engineering*. — 2021. — Vol. 42. — Article 102500. — DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102500.
5. Opoku D.-G. J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M. Digital twin application in the construction industry: A literature review // *Journal of Building Engineering*. — 2021. — Vol. 40. — Article 102726. — DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102726.
6. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research // *Automation in Construction*. — 2020. — Vol. 114. — Article 103179. — DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
7. Xu Z., Feng Z., Jelodar M. B., Guo B. H. W. Augmented reality applications in construction productivity: A systematic literature review // *Advanced Engineering Informatics*. — 2024. — Vol. 62. — Article 102798. — DOI: 10.1016/j.aei.2024.102798.
8. AlBalkhy W., Karmaoui D., Ducoulombier L., Lafhaj Z., Linner T. Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges // *Automation in Construction*. — 2024. — Vol. 162. — Article 105368. — DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105368.
9. Saif W., RazaviAlavi S., Kassem M. Construction digital twin: A taxonomy and analysis of the application-technology-data triad // *Automation in Construction*. — 2024. — Vol. 167. — Article 105715. — DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105715.

10. Sornoza-Parrales D., Baque Vera G. O., Parrales Poveda M. L., Macías-Parrales T. M. Evolution and research trends in virtual reality and augmented reality technologies for the architecture, engineering, and construction (AEC) industry: a systematic review and science mapping approach // *Frontiers in Virtual Reality*. — 2025. — Vol. 6. — Article 1725875. — DOI: 10.3389/frvir.2025.1725875.
11. Marinho J., Sá F., Durães J., Fonseca I., Martins N. C. A Systematic Literature Review of Augmented Reality's Development in Construction // *Electronics*. — 2026. — Vol. 15, No. 1. — Article 225. — DOI: 10.3390/electronics15010225.
12. Wang Y., Rezaei A., Hicks S. J. Digital twins in the construction industry: A systematic review of current practices and future directions // *Journal of Information Technology in Construction*. — 2026. — Vol. 31. — P. 149–179. — DOI: 10.36680/j.itcon.2026.007.
13. СП 333.1325800.2020. **Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла**. — М.: Минстрой России, 2020. — Введ. 01.07.2021. Документ действует.
14. ГОСТ Р 57563-2017/ISO/TS 12911:2012. **Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений**. — М.: Стандартинформ, 2017. Документ действует.
15. ГОСТ Р 10.0.02-2019/ИСО 16739-1:2018. **Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных**. — М.: Стандартинформ, 2019.
16. ГОСТ Р 10.0.03-2019/ИСО 29481-1:2016. **Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Информационное моделирование в строительстве. Справочник по обмену информацией. Часть 1. Методология и формат**. — М.: Стандартинформ, 2019.
17. СП 471.1325800.2019. **Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ**. — М.: Минстрой России, 2019.
18. Постановление Правительства Российской Федерации от 17.05.2024 № 614 **«Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов»**. Документ вступил в силу 1 сентября 2024 г. и действует до 1 сентября 2030 г.

The modern paradigm of integrating immersive technologies in the construction industry

Plotnikov S.A., Ovcharenko E.E., Samosudov E.A., Sergeyeva P.S., Nazarova A.A.
NRU MGSU

JEL classification: L61, L74, R53

This article examines the evolving role of immersive technologies in the construction industry and substantiates the shift from their isolated use as 3D visualization tools to their integration into the unified digital environment of a facility's lifecycle. It demonstrates that virtual, augmented, and mixed reality (XR) yield the greatest practical value when integrated with information modeling technologies, digital twins, monitoring systems, and common data environments. The article analyzes the application of XR technologies across the design, construction, and operation stages, as well as the limitations hindering their scalability. It proposes viewing the immersive environment not as a standalone software product, but as a human-machine interface for accessing the facility's up-to-date information model and as a means of feeding data back into the project's digital ecosystem. This approach links the spatial perception of the construction object with management and production processes, laying the foundation for a transition to context-aware digital support for construction.

Keywords: immersive technologies, construction, virtual reality, augmented reality, mixed reality, XR, information modeling, BIM, digital twin.

References

1. Sacks R., Perlman A., Barak R. Construction safety training using immersive virtual reality // *Construction Management and Economics*. — 2013. — Vol. 31, No. 9. — P. 1005–1017. — DOI: 10.1080/01446193.2013.828844.
2. Wang X., Kim M. J., Love P. E. D., Kang S.-C. Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research // *Automation in Construction*. — 2013. — Vol. 32. — P. 1–13. — DOI: 10.1016/j.autcon.2012.11.021.
3. Hilfert T., König M. Low-cost virtual reality environment for engineering and construction // *Visualization in Engineering*. — 2016. — Vol. 4. — Article 2. — DOI: 10.1186/s40327-015-0031-5.
4. Sidani A., Dinis F. M., Duarte J., Sanhudo L., Calvetti D., Baptista J. S., Martins J. P., Soeiro A. Recent tools and techniques of BIM-Based Augmented Reality: A systematic review // *Journal of Building Engineering*. — 2021. — Vol. 42. — Article 102500. — DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102500.
5. Opoku D.-G. J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M. Digital twin application in the construction industry: A literature review // *Journal of Building Engineering*. — 2021. — Vol. 40. — Article 102726. — DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102726.
6. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research // *Automation in Construction*. — 2020. — Vol. 114. — Article 103179. — DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
7. Xu Z., Feng Z., Jelodar M. B., Guo B. H. W. Augmented reality applications in construction productivity: A systematic literature review // *Advanced Engineering Informatics*. — 2024. — Vol. 62. — Article 102798. — DOI: 10.1016/j.aei.2024.102798.
8. AlBalkhy W., Karmaoui D., Ducoulombier L., Lafhaj Z., Linner T. Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges // *Automation in Construction*. — 2024. — Vol. 162. — Article 105368. — DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105368.
9. Saif W., RazaviAlavi S., Kassem M. Construction digital twin: A taxonomy and analysis of the application-technology-data triad // *Automation in Construction*. — 2024. — Vol. 167. — Article 105715. — DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105715.
10. Sornoza-Parrales D., Baque Vera G. O., Parrales Poveda M. L., Macías-Parrales T. M. Evolution and research trends in virtual reality and augmented reality technologies for the architecture, engineering, and construction (AEC) industry: a systematic review and science mapping approach // *Frontiers in Virtual Reality*. — 2025. — Vol. 6. — Article 1725875. — DOI: 10.3389/frvir.2025.1725875.
11. Marinho J., Sá F., Durães J., Fonseca I., Martins N. C. A Systematic Literature Review of Augmented Reality's Development in Construction // *Electronics*. — 2026. — Vol. 15, No. 1. — Article 225. — DOI: 10.3390/electronics15010225.
12. Wang Y., Rezaei A., Hicks S. J. Digital twins in the construction industry: A systematic review of current practices and future directions // *Journal of Information Technology in Construction*. — 2026. — Vol. 31. — P. 149–179. — DOI: 10.36680/j.itcon.2026.007.
13. SP 333.1325800.2020. **Information Modeling in Construction. Rules for the Formation of an Information Model of Facilities at Various Stages of the Life Cycle**. — Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2020. — Effective from July 1, 2021. Currently in force.
14. GOST R 57563-2017/ISO/TS 12911:2012. **Building Information Modeling. Framework for the Development of Building Information Modeling Standards**. — Moscow: Standartinform, 2017. Currently in force.
15. GOST R 10.0.02-2019/ISO 16739-1:2018. **System of Standards for Building Information Modeling. Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing and Management in the Construction Industry. Part 1. Data Schema**. — Moscow: Standartinform, 2019.
16. GOST R 10.0.03-2019/ISO 29481-1:2016. **System of Standards for Building Information Modeling. Building Information Modeling. Information Delivery Manual. Part 1. Methodology and Format**. — Moscow: Standartinform, 2019.
17. SP 471.1325800.2019. **Information Modeling in Construction. Quality Control of Construction Works**. — Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2019.
18. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 614 of May 17, 2024. **"On Approval of the Rules for the Formation and Maintenance of an Information Model of a Capital Construction Facility, the Composition of Information, Documents and Materials Included in the Information Model of a Capital Construction Facility and Submitted in the Form of Electronic Documents, and Requirements for the Formats of Such Electronic Documents."** The Resolution entered into force on September 1, 2024 and remains in force until September 1, 2030. [in Russian].