

УДК 624.04:69:004.94

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-42-49

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ В СОСТАВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЗДАНИЙ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОПОЛНЕННОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

*Е.Н. САВИНА, А.А. ЯКОВЛЕВ,
А.В. КУЛАН, д-р техн. наук, доц. Е.А. МОЙСЕЙЧИК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

В статье рассмотрены вопросы организации мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций зданий и транспортных сооружений в составе цифрового двойника с применением технологий виртуальной и дополненной реальности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эксплуатационной безопасности строительных объектов, значительная часть которых эксплуатируется в условиях превышения нормативных сроков службы, роста транспортных нагрузок и воздействия неблагоприятных природно-климатических факторов. Предложен подход к построению цифрового двойника, основанный на интеграции BIM-модели, расчетных моделей, реализованных методом конечных элементов, и экспериментальных данных автоматизированного мониторинга НДС. Обоснован выбор схемы мониторинга на основе результатов численного моделирования, позволяющего идентифицировать наиболее напряженные и ответственные зоны конструкций. Показано, что включение данных мониторинга в состав цифрового двойника обеспечивает актуализацию расчетных моделей с учетом фактических условий эксплуатации и накопленных повреждений. В качестве функционального слоя цифрового двойника реализована VR/AR-среда, обеспечивающая иммерсивную визуализацию геометрии сооружений, результатов мониторинга и расчетных данных. Использование виртуальной и дополненной реальности повышает наглядность анализа распределения напряжений и деформаций, снижает влияние человеческого фактора и способствует повышению эффективности принятия инженерных решений при обследовании и эксплуатации зданий и транспортных сооружений.

Результаты выполненных исследований и апробация на реальных объектах подтверждают перспективность применения цифровых двойников с интегрированным мониторингом НДС и VR/AR-технологиями для управления техническим состоянием и эксплуатационной надежностью строительных сооружений.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, мониторинг конструкций, цифровой двойник, BIM, метод конечных элементов, виртуальная реальность, дополненная реальность, транспортные сооружения.*

Введение. Актуальность организации мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций зданий и транспортных сооружений определяется совокупностью эксплуатационных, конструктивных и социально-экономических факторов. Значительная часть транспортной инфраструктуры, а также зданий и сооружений, эксплуатируется в условиях превышения нормативных сроков службы, увеличения интенсивности и массы транспортных нагрузок, а также воздействия природно-климатических факторов [1; 2]. Указанные условия приводят к накоплению повреждений, деградации материалов и изменению расчетных характеристик несущих элементов, что оказывает влияние на их несущую способность и существенно повышает риски достижения предельных состояний.

Традиционные методы оценки технического состояния, основанные на периодических визуальных обследованиях и локальных измерениях, не обеспечивают получения непрерывной и объективной информации о фактическом напряженно-деформированном состоянии конструкций [3; 4]. Такие подходы не позволяют в полной мере учитывать интенсивности нагрузок, развитие усталостных процессов и изменение жесткостных характеристик элементов в процессе эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость внедрения автоматизированных систем мониторинга, обеспечивающих регистрацию параметров напряженно деформированного состояния в режиме, близком к реальному времени [5].

Основная часть. Организация мониторинга НДС конструкций в рамках настоящего исследования основывалась на принципах системности и функциональной интеграции с цифровыми двойниками зданий и транспортных сооружений [6; 7]. При формировании системы мониторинга учитывались результаты анализа применяемых современных методов, опыт их применения, а также требования к достоверности и сопоставимости экспериментальных данных с результатами численного моделирования (рисунок 1).

Обоснование выбора схемы мониторинга основывалось на положениях механики деформируемого твердого тела [8; 9], теории надежности и долговечности строительных конструкций. Ключевым этапом являлась идентификация наиболее нагруженных и имеющих значительные напряжения зон конструкций, в которых возможно достижение предельных состояний по несущей способности или эксплуатационной пригодности. Для этого использовались результаты расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций по методу конечных элементов, позволяющие выявить зоны концентрации нормальных и касательных напряжений, определить места максимальных прогибов, а также элементы, воспринимающие переменные и циклические нагрузки. В состав системы

мониторинга включались тензометрические и деформационные датчики, а также средства регистрации динамических откликов конструкции. Автоматизированная система мониторинга НДС конструкций собирала данные с заданной периодичностью, обеспечивала их первичную обработку и передачу в информационную среду цифрового двойника. Такой подход позволил перейти от разрозненных измерений к формированию непрерывных потоков данных, отражающих фактическое поведение конструкций в реальных условиях эксплуатации. Для снижения влияния внешних факторов и случайных помех применялись процедуры фильтрации, нормализации и сопоставления экспериментальных данных с расчетными значениями. Это обеспечивало возможность выявления отклонений фактического НДС конструкций от проектных и нормативных показателей и формировало основу для уточнения расчетных моделей и оценки текущего технического состояния сооружения [10].



Борисоглебская (Коложская) церковь, памятник древнего православного зодчества XII века в Беларуси (г. Гродно)



Лабораторный корпус

а) – исследуемый объект; б) – облако точек

Рисунок 1. – Реализованные объекты

Реализация цифрового двойника зданий и транспортных сооружений осуществлялась как многоуровневая информационно-аналитическая система, предназначенная для интеграции геометрических, расчетных и экспериментальных данных, получаемых в процессе мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций. Цифровой двойник рассматривался как динамически обновляемая цифровая копия сооружения, отражающая его фактическое состояние и особенности работы в реальных эксплуатационных условиях [11; 12].

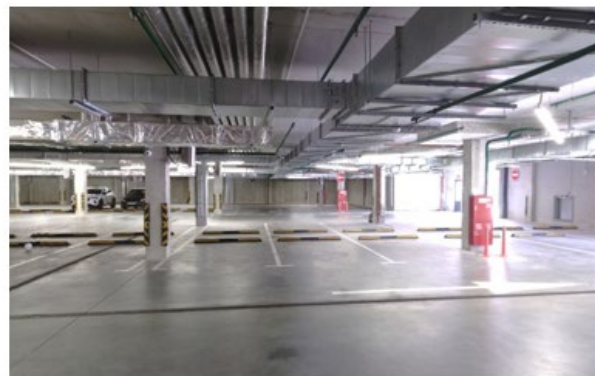
Базовым элементом цифрового двойника являлась BIM-модель транспортного сооружения, сформированная на основе проектной документации и уточненная по результатам инженерных обследований. Геометрическая актуализация BIM-модели выполнялась с использованием результатов сканирования, что обеспечило соответствие цифрового представления фактической геометрии конструктивных элементов, включая эксплуатационные отклонения и деформации (рисунок 2).

Интеграция данных мониторинга НДС конструкций в цифровой двойник осуществлялась путем пространственной и логической привязки измерительных каналов к соответствующим элементам BIM-модели. Каждому тензометрическому, деформационному или вибрационному датчику сопоставлялась конкретная зона или элемент сооружения, что позволяло интерпретировать экспериментальные данные с учетом реальной схемы работы конструкции.

Экспериментальные данные мониторинга аккумулировались в структурированной базе данных цифрового двойника и представлялись в виде цифровых значений контролируемых параметров с учетом времени их получения.



Общий вид транспортного сооружения



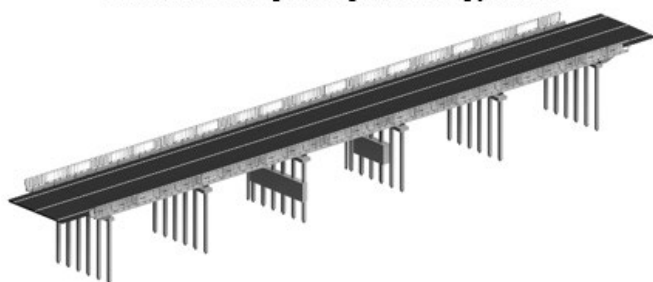
Общий вид паркинга



Облако точек транспортного сооружения



Облако точек паркинга



Цифровая модель транспортного сооружения



Цифровая модель паркинга

Рисунок 2. – Реализованные объекты

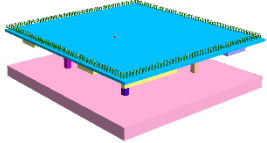
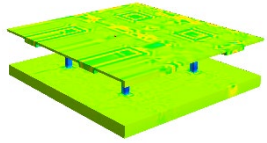
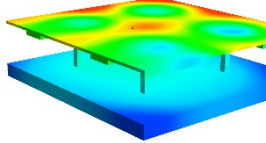
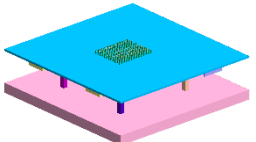
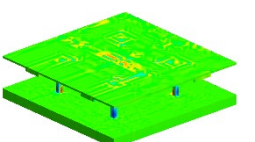
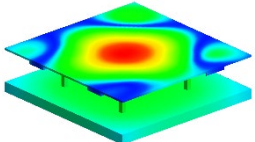
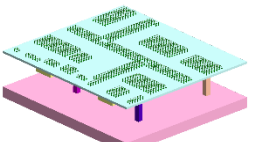
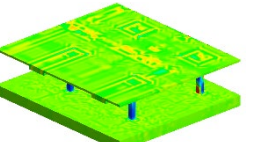
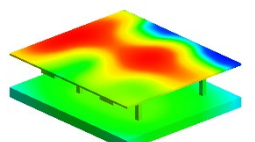
Расчетные модели сооружений, реализованные на основе метода конечных элементов, интегрировались в цифровой двойник в виде аналитического модуля. Параметры расчетных схем уточнялись на основе данных мониторинга, что позволяло учитывать фактические условия эксплуатации, изменение жесткостных характеристик элементов и влияние накопленных повреждений. Такой подход обеспечивал переход от проектных расчетных моделей к эксплуатационно-ориентированным моделям, соответствующим реальному состоянию транспортного сооружения (таблица 1).

В качестве функционального слоя цифрового двойника была реализована виртуальная и дополненная реальность (VR/AR-среда), предназначенная для иммерсивной визуализации геометрии сооружения, результатов мониторинга и расчетных данных. VR-среда обеспечивала пространственное представление BIM-модели с наложением информации о напряженно-деформированном состоянии конструкций, что позволяло выполнять интерактивный анализ распределения деформаций, перемещений и напряжений в объеме сооружения. AR-среда использовалась для совмещения цифровых моделей с реальным объектом, что обеспечивало наглядную интерпретацию результатов мониторинга непосредственно в процессе обследований и эксплуатации (рисунок 3).

Оценка эффективности применения цифрового двойника зданий и транспортных сооружений выполнялась на основе анализа его функциональных возможностей и эксплуатационных результатов, полученных при интеграции данных мониторинга напряженно деформированного состояния, численного моделирования и средств пространственной визуализации. В качестве основных критериев эффективности рассматривалась достоверность оценки НДС, оперативность обработки информации, чувствительность к изменению технического состояния и практическая применимость при строительстве и эксплуатации зданий и транспортных сооружений. Достоверность оценки напряженно-деформированного состояния конструкций обеспечивалась за счет сопоставления экспериментальных данных мониторинга с результатами численного моделирования в составе цифрового двойника. Аналогичный

подход реализован при создании цифрового двойника моста Хумбер (Великобритания), где данные тензометрического и динамического мониторинга использовались для актуализации расчетных моделей и уточнения напряженного состояния пролетных строений [16]. Результаты показали снижение расхождений между расчетными и экспериментальными значениями деформаций, что подтверждает эффективность интеграции мониторинга и расчетных моделей.

Таблица 1. – Результаты исследования технического состояния плиты перекрытия

Описание	Результаты исследования		
	Общий вид расчетной схемы	Напряжения, МПа	Перемещения, мм
техническое задание			
натурные испытания			
фактически смонтированное оборудование			

Оперативность получения и анализа информации достигалась за счет автоматизированного сбора данных и их структурированной обработки в цифровой среде. В ряде проектов, реализованных в Китае и Южной Корее на крупных мостовых сооружениях, применение цифровых двойников позволило сократить время анализа технического состояния с нескольких недель до нескольких часов за счет отказа от ручной обработки данных и перехода к круглосуточному мониторингу [17; 18]. Аналогичные эффекты наблюдаются и при использовании разработанной методологии. В реализованных проектах мониторинга вантовых и балочных мостов, описанных в работе [4], показано, что анализ получаемых значений в составе цифрового двойника позволяет выявлять ранние стадии изменения жесткости элементов, не фиксируемые традиционными методами обследования. Полученные в настоящем исследовании результаты подтверждают возможность выявления аналогичных эффектов.

Использование VR/AR-среды в составе цифрового двойника повысило эффективность интерпретации результатов мониторинга и расчетов. Примеры применения иммерсивных сред для анализа состояния мостовых сооружений представлены в работе [19], где показано, что пространственная визуализация распределения напряжений и деформаций снижает вероятность ошибок при экспертной оценке и повышает качество принятия инженерных решений. В рамках данного исследования VR/AR-среда использовалась для визуального анализа зон концентрации деформаций и сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Практическая эффективность применения цифрового двойника заключается в возможности обоснованного принятия решений при эксплуатации зданий и транспортных сооружений. Анализ зарубежного опыта показывает, что внедрение цифровых двойников позволяет оптимизировать объемы обследований, снизить затраты на внеплановые ремонтные работы и повысить уровень эксплуатационной безопасности [16–18]. Аналогичные выводы получены и по результатам выполненных исследований.

К основным преимуществам применения VR/AR-сред в составе цифровых двойников зданий и сооружений относятся:

1. **Повышение наглядности анализа НДС.** Пространственная визуализация распределения деформаций, напряжений и динамических характеристик позволяет интуитивно воспринимать сложные инженерные данные и выявлять зоны концентрации напряжений и аномального поведения конструкций.

2. **Интеграция разнородных данных в единой среде.** VR/AR-среда обеспечивает одновременное отображение данных мониторинга, BIM-модели, облаков точек и результатов численного моделирования, что соответствует современным концепциям цифровых двойников.

3. **Снижение влияния человеческого фактора.** Иммерсивное представление информации уменьшает вероятность ошибок при интерпретации результатов и повышает качество экспертных заключений, что подтверждено зарубежными исследованиями инспекционных систем.

4. **Поддержка дистанционного анализа и коллективной экспертизы.** Использование VR-сред позволяет выполнять виртуальные инспекции и совместный анализ состояния сооружения без физического присутствия на объекте, что особенно актуально для труднодоступных и опасных зон.

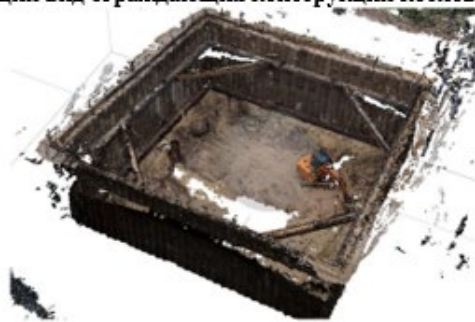
5. **Повышение эффективности принятия инженерных решений.** Визуальная привязка параметров НДС к реальным конструктивным элементам ускоряет процесс оценки технического состояния и обоснования ремонтных работ и эксплуатационных мероприятий.



Общий вид ограждающих конструкций котлована



Общий вид транспортного сооружения



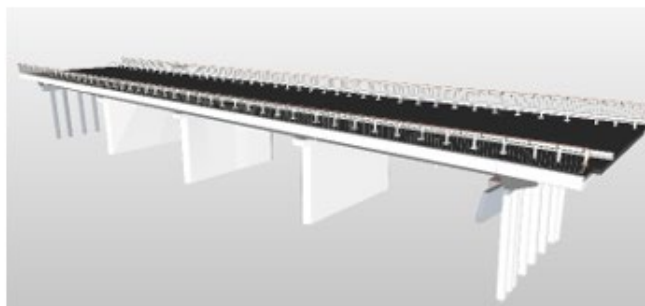
Облако точек ограждающих конструкций котлована



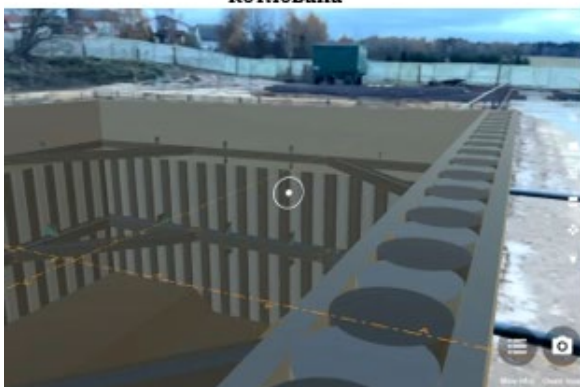
Облако точек транспортного сооружения



Цифровая модель ограждающих конструкций котлована



Цифровая модель транспортного сооружения



Дополненная реальность (AR) ограждающих конструкций котлована



Виртуальная реальность (VR) транспортного сооружения

Рисунок 3. – Реализованные объекты

Несмотря на значительный потенциал, анализ мирового опыта выявляет ряд ограничений и недостатков применения VR/AR-сред в мониторинге зданий и сооружений:

1. **Высокие требования к качеству исходных данных.** Эффективность AR/VR-визуализации напрямую зависит от точности BIM-моделей, данных сканирования и мониторинга. Ошибки на этапе формирования цифрового двойника могут приводить к искажению визуализируемой информации.

2. **Отсутствие единых стандартов интеграции.** В настоящее время отсутствуют унифицированные стандарты интеграции VR/AR-сред с системами мониторинга НДС и BIM-платформами, что затрудняет масштабирование и промышленное внедрение решений.

3. **Ограниченная формализация аналитических функций.** В ряде реализованных проектов VR/AR-среда используется преимущественно как инструмент визуализации, без глубокой интеграции с аналитическими и прогностическими модулями цифрового двойника.

4. **Технические и организационные барьеры внедрения.** Применение VR/AR-технологий требует специализированного оборудования, программного обеспечения и подготовки персонала, что ограничивает их использование в повседневной практике эксплуатирующих организаций.

Перспективы развития VR/AR-сред в составе цифровых двойников зданий и транспортных сооружений связаны с дальнейшей эволюцией интеллектуальных систем мониторинга и управления техническим состоянием. Наиболее перспективными направлениями являются:

- глубокая интеграция VR/AR-сред с аналитическими модулями цифрового двойника, включая автоматизированную идентификацию параметров расчетных моделей и прогнозирование развития повреждений;
- разработка стандартов и методических рекомендаций по использованию VR/AR-технологий в мониторинге НДС транспортных сооружений;
- использование технологий машинного обучения для автоматического выявления аномалий и их визуализации в иммерсивной среде;
- расширение функций AR-решений для полевых обследований, включая наложение расчетных и экспериментальных данных на реальное сооружение в режиме реального времени;
- переход от демонстрационных решений к промышленным системам, интегрированным в процессы эксплуатации и управления жизненным циклом зданий и транспортных сооружений.

Заключение. Результаты исследования подтверждают, что применение цифрового двойника зданий и транспортных сооружений обеспечивает повышение информативности и надежности контроля НДС конструкций. Использование данного подхода создает предпосылки для перехода к интеллектуальным системам управления техническим состоянием строительных объектов.

Реализованные цифровые двойники, включающие BIM-модель, данные мониторинга, VR/AR-среду, расчетные схемы и вспомогательные модули, обеспечили целостное представление о состоянии сооружения, анализ изменения напряженно-деформированного состояния конструкций, формирование информационной основы для управления эксплуатационной надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пастушков В.Г., Ботьяновский А.А., Костюкович О.В. Применение передовых технологий при оценке технического состояния автодорожного путепровода в г. Бресте // Автомобильные дороги и мосты. – 2021. – № 1(27). – С. 13–19.
2. Практика применения автоматизированной системы мониторинга строительных конструкций транспортных сооружений / В.Г. Пастушков, А.Н. Вайтович, О.В. Костюкович и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 4. – С. 77–90.
3. Костюкович О.В., Пастушков В.Г. Исследование НДС пролетных строений индивидуального проектирования и производства // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 1. – С. 40–47.
4. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 120 с.
5. Дрозд Я.И., Пастушков Г.П. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 208 с.
6. Medrano-Sánchez E., Martos E. Strategies for bridge maintenance using BIM: An analysis of methodologies and tools [Electronic resource] // *Frontiers in Built Environment*. – 2025. – Vol. 11. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2025.1693644/full> (дата обращения 11.01.2026).
7. Application of Building Information Modeling (BIM) in Bridge Design and Construction Management / M.R. Ferdous, M. Biswas, M.R. Jany et al. // *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 4, № 3. – P. 30–37.
8. Mohamed A.G., Khaled A., Abotaleb I.S. A Bridge Information Modeling (BrIM) framework for inspection and maintenance intervention in reinforced concrete bridges [Electronic resource] // *Buildings*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 11. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2798> (дата обращения 11.01.2026).
9. Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a Decision Support System (DSS) for digital twinning and asset management of bridge infrastructures [Electronic resource] / M. Mohammadi, M. Rashidi, Y. Yu et al. // *Computers in Industry*. – 2023. – Vol. 147. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523000313> (дата обращения 11.01.2026).
10. A Concise Review of State-of-the-Art Sensing Technologies for Bridge Structural Health Monitoring [Electronic resource] / X. Kang, B. Zhu, Y. Cai et al. // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, Iss. 17. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5460> (дата обращения 11.01.2026).
11. Савина Е.Н., Мойсейчик Е.А., Яковлев А.А. Социальные и технические аспекты применения БПЛА и облака точек на примере транспортного сооружения при создании BIM-модели // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 1(35). – С. 48–57.
12. Экспериментальное исследование применения BIM-технологий, технологий дополненной и виртуальной реальности для транспортных сооружений / Е.Н. Савина, Е.А. Мойсейчик, А.А. Яковлев и др. // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 2(36). – С. 32–41.

13. Ботьяновский А.А., Пастушков В.Г. Применение BIM-технологий и новейшего оборудования при исследовании фактического технического состояния мостового сооружения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – № 1. – С. 342–345.
14. Гинзбург А.В. BIM-технологии на протяжении жизненного цикла строительного объекта // Информационные ресурсы России. – 2016. – № 5(153). – С. 28–31.
15. Деменев А.В., Артамонов А.С. Информационное моделирование при эксплуатации зданий и сооружений // Интернет-журнал «Наукоедение». – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 21–29.
16. Digital twin-based framework for bridge structural health monitoring [Electronic resource] / C. Ye, J. Wang, H. Sun et al. // Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. – 2019. – URL: <https://www.dpi-proceedings.com/index.php/shm2019/article/view/32287> (дата обращения 11.01.2026).
17. Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge [Electronic resource] / T. Jirawattanasomkul, L. Hang, S. Srivaranun et al. // Resilient Cities and Structures. – 2025. – Vol. 4, № 3. – P. 48–66. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772741625000365> (дата обращения 11.01.2026).
18. Mehta K.P. Digital twins for bridge health monitoring: A review [Electronic resource] // International Journal of Research in Artificial Intelligence. – 2023. – URL: <https://ijrai.org/index.php/ijrai/article/view/39> (дата обращения: 11.01.2026).
19. Evolution of digital twin frameworks in bridge management: Review and future directions [Electronic resource] / V. Mousavi, M. Rashidi, M. Mohammadi et al. // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, № 11. – URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/11/1887> (дата обращения: 11.01.2026).

REFERENCES

1. Pastushkov, V.G., Botyanovsky, A.A., & Kostyukovich, O.V. (2021). Application of advanced technologies in assessing the technical condition of a road overpass in the city of Brest. *Avtomobilnye dorogi i mosty*, 1(27), 13–19. (In Russ.).
2. Pastushkov, V.G., Vaitovich, A.N., Kostyukovich, O.V., & Yankovsky, L.V. (2021). Practice of applying an automated monitoring system for structural components of transport facilities. *Transport. Transport Facilities. Ecology*, (4), 77–90. (In Russ.).
3. Kostyukovich, O.V., & Pastushkov, V.G. (2021). Study of the stress–strain state of span structures of individual design and production. *Transport. Transport Facilities. Ecology*, (1), 40–47. (In Russ.).
4. Vasilyev, A.I. (2021). *Monitoring of the technical condition of bridge structures (Study guide)*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). (In Russ.).
5. Drozd, Ya.I., & Pastushkov, G.P. (1984). *Prestressed reinforced concrete structures*. Minsk, Higher School. (In Russ.).
6. Medrano-Sánchez, E., & Martos, E. (2025). Strategies for bridge maintenance using BIM: An analysis of methodologies and tools. *Frontiers in Built Environment*, 11. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2025.1693644/full>.
7. Ferdous, M.R., Biswas, M., Jany, M.R., & Rakhsit, S. (2025). Application of Building Information Modeling (BIM) in bridge design and construction management. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*, 4(3), 30–37.
8. Mohamed, A.G., Khaled, A., & Abotaleb, I.S. (2023). A Bridge Information Modeling (BrIM) framework for inspection and maintenance intervention in reinforced concrete bridges. *Buildings*, 13(11). URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2798>.
9. Mohammadi, M., Rashidi, M., Yu, Y., & Samali, B. (2023). Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a decision support system for digital twinning and asset management of bridge infrastructures. *Computers in Industry*, 147. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523000313>.
10. Kang, X., Zhu, B., Cai, Y., Xiao, Y., Liu, N., Guo, Z., Wang, Q.-A., & Luo, Y. (2025). A concise review of state-of-the-art sensing technologies for bridge structural health monitoring. *Sensors*, 25(17). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5460>.
11. Savina, E.N., Moiseichik, E.A., & Yakovlev, A.A. (2025). Social and technical aspects of using UAVs and point clouds on the example of a transport facility when creating a BIM model. *Avtomobilnye dorogi i mosty [Highways and bridges]*, 1(35), 48–57 (In Russ.).
12. Savina, E.N., Moiseichik, E.A., Yakovlev, A.A., & Kulan, A.V. (2025). Experimental study of the application of BIM technologies, augmented and virtual reality technologies for transport facilitiesю *Avtomobilnye dorogi i mosty [Highways and bridges]*, 2(36), 32–41. (In Russ.).
13. Botyanovsky, A.A., & Pastushkov, V.G. (2015). Application of BIM technologies and the latest equipment in the study of the actual technical condition of a bridge structure. *Modernizacia i nauchnye issledovania v transportnom komplekse [Modernization and scientific research in the transport complex]*, 1, 342–345. (In Russ.).
14. Ginzburg, A.V. (2016). BIM technologies throughout the life cycle of a construction project. *Informacionnye resursy Rossii [Information resources of Russia]*, 5(153), 28–31. (In Russ.).
15. Demenev, A.V., & Artamonov, A.S. (2015). Information modeling in the operation of buildings and structures. *Internet-zhurnal Naukovedenie [Internet journal "Science Studies"]*, 7(3), 21–29. (In Russ.).
16. Ye, C., Wang, J., Sun, H., & Li, Z. (2019). Digital twin-based framework for bridge structural health monitoring. In *Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. URL: <https://www.dpi-proceedings.com/index.php/shm2019/article/view/32287>.
17. Jirawattanasomkul, T., Hang, L., Srivaranun, S., Likitlersuang, S., Jongvivatsakul, P., Yodsudjai, W., & Thammarak, P. (2025). Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge. *Resilient Cities and Structures*, 4(3), 48–66. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772741625000365>.
18. Mehta, K.P. (2023). Digital twins for bridge health monitoring: A review. *International Journal of Research in Artificial Intelligence*. URL: <https://ijrai.org/index.php/ijrai/article/view/39>.
19. Mousavi, V., Rashidi, M., Mohammadi, M., & Samali, B. (2024). Evolution of digital twin frameworks in bridge management: Review and future directions. *Remote Sensing*, 16(11). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/11/1887>.

Поступила 24.02.2026

**SYSTEMS FOR MONITORING THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES
AS PART OF A DIGITAL TWIN OF BUILDINGS AND TRANSPORT STRUCTURES
USING AUGMENTED AND VIRTUAL REALITY**

E. SAVINA, A. YAKOVLEV, A. KULAN, E. MOISEITCHIK
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article discusses the issues of organizing monitoring of the stress-strain state of building structures and transport structures as part of a digital twin using virtual and augmented reality technologies. The relevance of the study is due to the need to improve the reliability and operational safety of construction facilities, a significant part of which are operated in conditions of exceeding standard service life, increased transport loads and the impact of adverse natural and climatic factors. An approach to building a digital twin is proposed based on the integration of a BIM model, computational models implemented by the finite element method, and experimental data from automated stress-strain state monitoring. The choice of a monitoring scheme based on the results of numerical modeling is justified, which makes it possible to identify the most stressed and critical areas of structures. It is shown that the inclusion of monitoring data in the digital twin ensures that the calculated models are updated taking into account the actual operating conditions and accumulated damage. A VR/AR environment has been implemented as a functional layer of the digital twin, providing immersive visualization of the geometry of the structure, monitoring results and calculated data. The use of virtual and augmented reality increases the visibility of stress and strain distribution analysis, reduces the influence of the human factor, and improves the efficiency of engineering decision-making during the inspection and operation of buildings and transport facilities.

The results of the performed research and testing on real objects confirm the prospects of using digital twins with integrated VAT monitoring and VR/AR technologies to manage the technical condition and operational reliability of construction structures.

Keywords: *stress-strain state, monitoring of structures, digital twin, BIM, finite element method, virtual reality, augmented reality, transport facilities.*