

УДК 624:004.946

Е. Н. САВИНА¹

А. А. ЯКОВЛЕВ²

А. В. КУЛАН¹

Е. А. МОЙСЕЙЧИК¹, докт. техн. наук, доцент

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

²ООО «СимТех» (Минск, Беларусь)

ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ, С ТЕХНОЛОГИЯМИ ДОПОЛНЕННОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ

Аннотация. В работе предложен комплексный метод формирования цифровых информационных моделей эксплуатируемых транспортных сооружений на основе облаков точек, получаемых наземным лазерным сканированием и фотограмметрией. Разработана методика интеграции полученных BIM-моделей в среду дополненной (AR) и виртуальной (VR) реальности, позволяющая визуализировать скрытые конструктивные элементы (арматуру, закладные детали) и сопоставлять фактическое состояние объекта с его цифровым двойником непосредственно на месте обследования. Экспериментальные исследования, выполненные на действующем мостовом сооружении, подтвердили высокую точность совмещения (до 99 %) и практическую эффективность предлагаемого подхода для оперативного выявления дефектов, контроля геометрических параметров и ведения цифрового технического паспорта. Применение AR-технологий позволяет снизить трудоемкость контрольных операций, повысить достоверность диагностики и обоснованность принимаемых решений по управлению техническим состоянием объектов инфраструктуры.

Ключевые слова: информационное моделирование (BIM), облака точек, дополненная реальность (AR) виртуальная реальность (VR), лазерное сканирование, диагностика транспортных сооружений, цифровой технический паспорт, неразрушающий контроль.

Введение. Современное развитие строительной отрасли и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры неразрывно связано с цифровизацией процессов сбора, обработки и анализа данных о техническом состоянии сооружений [1, 2]. Традиционные подходы к диагностике, основанные на визуальных осмотрах, выборочных инструментальных измерениях и ведении бумажной отчетности, не обеспечивают необходимой полноты и оперативности информации, что особенно критично для протяженных и конструктивно сложных объектов – мостов, путепроводов, тоннелей [3].

В последние годы активно развиваются технологии информационного моделирования (BIM), позволяющие интегрировать геометрические, атрибутивные и эксплуатационные данные в единую цифровую среду. Однако большинство существующих BIM-решений ориентированы на проектирование новых объектов и не учитывают фактических отклонений геометрии и дефектов, возникающих в процессе строительства и длительной эксплуатации. Устранить этот недостаток позволяет использование данных наземного лазерного сканирования, формирующих облака точек – высокоточные трехмерные слепки реального состояния сооружения [4, 5].

Вместе с тем, сама по себе BIM-модель, даже построенная по облаку точек, остается статичным цифровым продуктом, если она не интегрирована с современными средствами визуализации и взаимодействия. Наиболее перспективным направлением здесь является дополненная реальность (AR), которая обеспечивает наложение цифровой информации на реальный объект, создавая эффект «рентгеновского зрения» и позволяя специалисту

непосредственно на объекте сопоставлять проектное и фактическое исполнение, визуализировать скрытые элементы и фиксировать дефекты с привязкой к модели [6, 7].

Цель настоящей работы – разработка и экспериментальное обоснование методики создания цифровых информационных моделей транспортных сооружений на основе облаков точек и их последующей интеграции с технологией дополненной реальности для повышения эффективности диагностики и мониторинга технического состояния.

Методология построения цифровой модели на основе облака точек.

Предлагаемый метод включает несколько последовательных этапов, каждый из которых влияет на конечную точность и достоверность цифровой модели (рис. 1).



Рис. 1. Структура поэтапной разработки цифровой информационной модели на базе облака точек

На первом этапе используется комбинация наземного лазерного сканирования (сканер FARO Focus) и фотограмметрической съемки с беспилотных летательных аппаратов и мобильных устройств. Это позволяет обеспечить высокую детализацию конструктивных элементов и полноту покрытия даже в труднодоступных зонах. Плотность облака точек составляет не менее 5–10 мм на расстоянии 10 м, что соответствует требованиям для построения моделей с уровнем проработки LOD 300–400.

На втором этапе проводится фильтрация шумов, удаление нерелевантных объектов (транспорт, растительность), объединение отдельных сканов в единую систему координат с использованием итеративного алгоритма ближайших точек (ICP) и опорных маркеров. Контроль точности регистрации осуществляется по реперным точкам, измеренным тахеометром.

Третий этап включает сегментацию и классификацию элементов. Облако точек разделяется на логические группы, соответствующие конструктивным элементам сооружения: пролетные строения, опоры, балки, плиты проезжей части, ограждения. Используется комбинированный подход – геометрические методы (анализ нормалей, кривизны) в сочетании с ручной корректировкой для

сложных узлов. Это позволяет получить структурированный набор данных, готовый для параметрического моделирования (рис. 2).

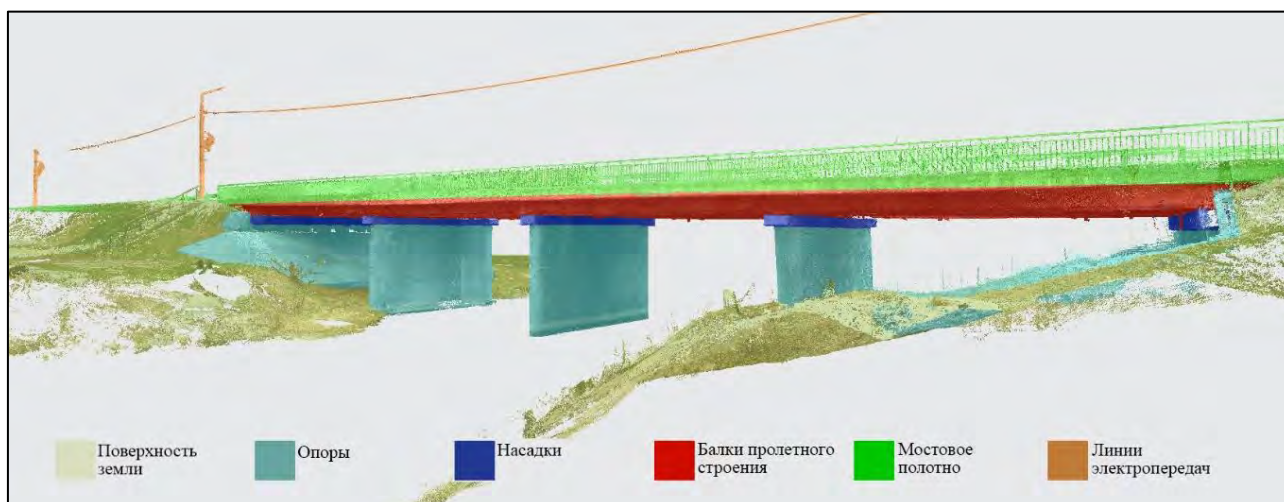


Рис.2. Классификация элементов мостового сооружения

На четвертом этапе создается параметрическая BIM-модель в среде Autodesk Revit. На основе сегментированных данных разрабатываются параметрические семейства элементов, при этом геометрические параметры (длины, сечения, уклоны) назначаются не по проекту, а по фактическим измерениям из облака точек. Для элементов регулярной геометрии применяется аппроксимация плоскостями и цилиндрическими поверхностями, для сложных форм – NURBS-поверхности. Важно отметить, что модель отражает фактические отклонения осей и поверхностей, что принципиально отличает ее от традиционных проектных моделей.

На пятом этапе модель наполняется атрибутивной информацией. Каждому BIM-объекту присваиваются данные о материале, классе бетона, армировании (по проекту и фактическому), а также результаты предыдущих обследований – дефекты, трещины, коррозия, с привязкой к конкретным элементам. Это превращает геометрическую модель в полноценный информационный банк данных о техническом состоянии сооружения.

Интеграция BIM-модели с дополненной и виртуальной реальностью.

Для практического использования созданной цифровой модели в задачах диагностики авторами статьи разработана методика ее интеграции с AR-технологией. В качестве программного инструмента выбрано специализированное приложение дополненной реальности «GAMMA AR», поддерживающее импорт IFC-форматов и обеспечивающее позиционирование модели в пространстве по визуальным маркерам или GPS-координатам.

Процесс интеграции включает следующие шаги:

1) Экспорт BIM-модели из Revit в формат IFC с сохранением всех атрибутов и уровней детализации.

2) Загрузка модели в AR-приложение на мобильное устройство (планшет или смартфон с поддержкой ARCore/ARKit).

3) Калибровка – совмещение цифровой модели с реальным объектом. Для этого используется либо система визуальных маркеров (QR-коды, специальные метки), либо привязка по характерным точкам сооружения. Обеспечивается точность наложения в пределах 5–10 мм, что достаточно для большинства диагностических задач.

4) Взаимодействие – пользователь, перемещая устройство, видит на экране совмещенное изображение реального объекта и его цифровой модели в заданном режиме отображения.

Особенностью разработанного подхода является возможность включать и выключать отображение отдельных слоев модели. Например, можно отобразить только несущие конструкции, или только арматурные каркасы (при уровне проработки LOD 400), или только инженерные сети. В режиме «рентген» визуализируются скрытые элементы, что крайне полезно при обследовании без вскрытия бетона.

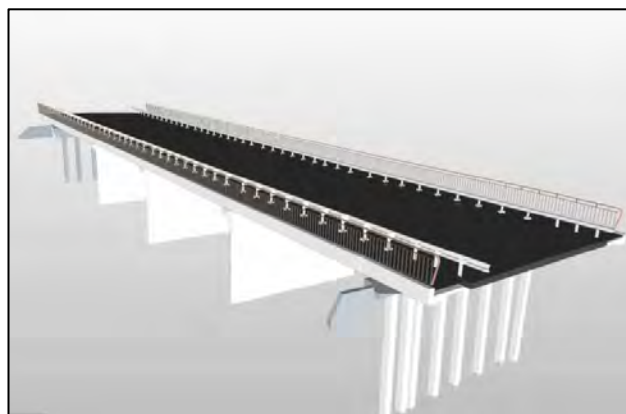
Дополнительно реализована функция «информационного меню»: при нажатии на любой элемент модели на экране появляется таблица с его атрибутами – материал, размеры, дата последнего осмотра, перечень зафиксированных дефектов, ссылки на фотографии и протоколы испытаний. Это превращает AR-систему в интерактивный цифровой технический паспорт сооружения.

Верификация методики. Апробация разработанной методики проведена на реальном объекте – железобетонном балочном мосту через р. Титовка в г. Марьина Горка (Республика Беларусь). Сооружение представляет собой четырехпролетную конструкцию с разрезным пролетным строением общей длиной 56 м на свайных опорах.

Выполнено наземное лазерное сканирование объекта. Полученные облака точек объединены и обработаны по описанной в [7] методологии (рис. 3, а). По результатам сегментации построена BIM-модель (рис. 3, б) с уровнем детализации LOD 300, включающая все балки, опоры, ригели и плиту проезжей части.



а)



б)

Рис. 3. Облако точек (а) и цифровая информационная модель (б) транспортного сооружения

В модель загружены атрибутивные данные: классы бетона (С20/25 для балок и свай, С16/20 для опор), диаметры и шаг арматуры по проекту, а также

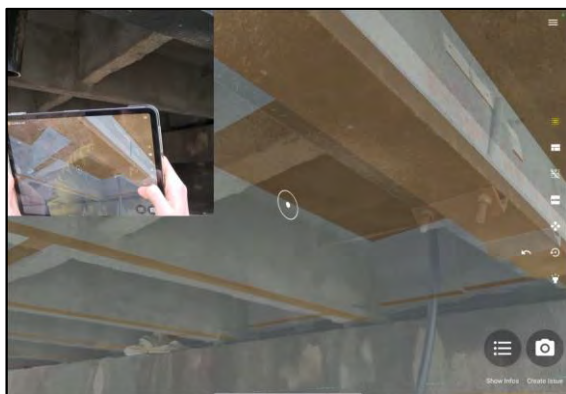
данные о коррозионных повреждениях, выявленных в ходе предварительного обследования.

Далее модель экспортирована в формат IFC и загружена на планшет с установленным приложением GAMMA AR [6, 7]. Калибровка выполнена по трем контрольным точкам на опорах. Сходимость наложения модели с реальным объектом оценена визуально и инструментально – отклонения не превысили 5 %, что вполне допустимо для диагностических целей.

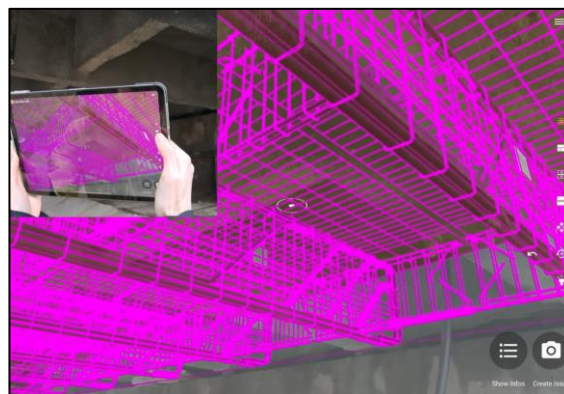
В ходе эксперимента специалист, перемещаясь вдоль моста, мог наблюдать на экране планшета:

- цифровой контур всех конструкций в реальном масштабе (рис. 4, а);
- при включении режима «армирование»;
- визуализацию арматурных стержней в балках (рис. 4, б).

Сопоставление с имеющейся проектной документацией показало, что геометрическое положение арматуры в модели (восстановленной по облаку точек) совпадает с фактическим расположением стержней (подтверждено контрольными вскрытиями) на 98–99 %, тогда как проектное расположение часто имеет отклонения из-за монтажных допусков и ошибок.



а)



б)

Рис. 4. Отображение армирования железобетонных балок с использованием дополненной реальности

Также были апробированы следующие сценарии в среде виртуальной реальности (рис. 5, а):

- отображение дефектов (трещин, сколов) в виде цветных маркеров, привязанных к конкретным зонам (рис. 5, б);
- сравнение текущей модели с проектной (унаследованной от генерального плана) для выявления геометрических отклонений (например, вертикальные смещения опор, неперпендикулярность стоек). Это позволило оперативно обнаружить несколько мест с превышением допустимых отклонений, которые ранее не были зафиксированы в отчетах.



а)



б)

Рис. 5. Общий вид (а) и цифровой технический паспорт (б) транспортного сооружения в среде виртуальной реальности

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что разработанный метод позволяет:

- сократить время на обследование объекта в 1,5–2 раза за счет быстрого доступа к полной информации и возможности online контроля;
- повысить достоверность диагностики, поскольку специалист видит цифровую модель, построенную по фактической геометрии, а не по упрощенным чертежам;
- минимизировать количество контрольных вскрытий, так как AR-визуализация скрытой арматуры дает достаточно точное представление о ее расположении;
- вести актуализированный цифровой технический паспорт, в который можно добавлять новые данные непосредственно в поле, без последующего переоформления бумажных документов.

Предложенная методика не требует дорогостоящего специализированного оборудования – используются стандартные электронные устройства (планшет) или смартфоны, а лазерное сканирование выполняется один раз во время детального обследования. При этом полученная BIM-модель может служить основой для последующих расчетов напряженно-деформированного состояния сооружения, планирования ремонтов и прогнозирования остаточного ресурса.

Заключение. В работе предложен и экспериментально обоснован комплексный подход к созданию и использованию цифровых информационных моделей транспортных сооружений, интегрированных с технологией дополненной реальности.

Основные научные результаты:

Разработана методология построения BIM-моделей на основе облаков точек, обеспечивающая достоверное отражение фактической геометрии и дефектов сооружения. Предложена методика интеграции BIM-моделей с AR-средой, позволяющая визуализировать скрытые конструктивные элементы и сопоставлять цифровой двойник с реальным объектом непосредственно в процессе обследования. Экспериментально подтверждена высокая точность совмещения (до 99 % для арматуры) и практическая эффективность подхода для задач диагностики, контроля качества и ведения цифрового технического паспорта.

Дальнейшие исследования планируется направить на автоматизацию процесса сегментации облаков точек с использованием нейросетевых алгоритмов и на разработку универсальной платформы для AR-сопровождения всех этапов жизненного цикла инфраструктурных объектов.

Список литературы

1. Volk, R. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs / R. Volk, J. Stengel, F. Schultmann // *Automation in Construction*. – 2014. – Vol. 38. – P. 109–127. – DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
2. Murphy, M. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image-based surveys / M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 76. – P. 89–102. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006.
3. Bosché, F. The value of integrating scan-to-BIM and scan-vs-BIM techniques / F. Bosché, M. Ahmed, Y. Turkan // *Automation in Construction*. – 2015. – Vol. 57. – P. 201–217. – DOI: 10.1016/j.autcon.2015.04.007.
4. Комиссаров, А. В. Методика использования BIM-технологий и лазерного сканирования для реконструкции и модернизации объектов / А. В. Комиссаров, А. В. Ремизов // *Вестник СГУГиТ*. – 2022. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-ispolzovaniya-bim-tehnologiy-i-lazernogo-skanirovaniya-dlya-rekonstruktsii-i-modernizatsii-obektov> (дата обращения: 11.06.2026).
5. Гасилов, А. В. Эвристический алгоритм сегментации облака точек / А. В. Гасилов, А. И. Фролов // *Научный результат. Информационные технологии*. – 2018. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evristicheskiy-algoritm-segmentatsii-oblaka-tochek> (дата обращения: 03.06.2026).
6. Савина, Е. Н. Экспериментальное исследование применения BIM-технологий, технологий дополненной и виртуальной реальности для транспортных сооружений / Е. Н. Савина, Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев, А. В. Кулан // *Автомобильные дороги и мосты*. – 2025. – № 2 (36). – С. 32–41.
7. Савина, Е. Н. 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, Е. А. Мойсейчик // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. – 2026. – № 1. – С. 42–49. – DOI: 10.52928/2070-1683-2026-44-1-42-49.

Контакты:

en713821@gmail.com (Савина Елена Николаевна)

ftkckp@mail.ru (Яковлев Александр Александрович)

kulan.al@yandex.ru (Кулан Алексей Валерьевич)

emoisseitchik@mail.ru (Мойсейчик Евгений Алексеевич)

УДК 620.179.16

М. П. САВИЧЕВ^{1,2}

В. В. АТРОЩЕНКО^{1,2}, *д-р техн. наук, проф.*

Ю. В. ЛОГАЧЁВ¹

А. Н. ПАУТОВ²

¹ООО «Головной аттестационно-сертификационный центр Республики Башкортостан» (Уфа, Россия)

²Уфимский университет науки и технологий (Уфа, Россия)