

А. В. КУЛАН¹

Е. А. МОЙСЕЙЧИК¹, д-р. техн. наук, доц.

Е. Н. САВИНА¹

А. А. ЯКОВЛЕВ²

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

²ООО «СимТех» (Минск, Беларусь)

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ СТАЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОБЛАКОВ ТОЧЕК И BIM-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрена методика выявления геометрических дефектов конструктивных элементов зданий на основе сопоставления данных наземного лазерного сканирования с эталонной BIM-моделью методом Cloud-to-Mesh (C2M). Апробация выполнена на трёх типах реальных конструкций: стальной колонне двутаврового сечения, монолитной железобетонной колонне прямоугольного сечения (450×450 мм) и сборной железобетонной двухветвевой колонне (1300×500 мм). Получены цветные карты и количественные оценки геометрических отклонений.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование; облако точек; BIM; Revit; информационное моделирование; дефекты; C2M; CloudCompare.

Введение

Контроль геометрических параметров несущих конструкций является обязательным этапом как строительного контроля при возведении зданий, так и последующих обследований в процессе эксплуатации. Согласно ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [1] обследование технического состояния зданий и сооружений включает определение геометрических размеров конструкций и их отклонений от проектных значений, что напрямую влияет на оценку несущей способности и остаточного ресурса элемента.

Наряду с нормативной базой обследования эксплуатируемых конструкций существует отдельный, методологически самостоятельный объем требований – контроль геометрии конструкций непосредственно в процессе возведения и последующая приёмка. Эта область регулируется набором нормативных документов [2, 3] и формируется в виде последовательных действий: входной, операционный и приёмочный контроль качества. Результаты оформляются актами освидетельствования скрытых работ, актами промежуточной приёмки ответственных конструкций и исполнительной документацией.

В Республике Беларусь данная область регламентируется СН 1.03.01-2019 «Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений» [2]. Аналогичную по назначению, но более детализированную в части числовых допусков структуру, на сегодняшний день, имеет и российский СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» [3].

Технология наземного лазерного сканирования позволяет [4] получать плотные облака точек с полным охватом видимой поверхности конструкции, что принципиально меняет подход к геометрическому контролю. При этом вместо выборочных измерений становится возможным сплошной анализ отклонений по всей площади элемента. Для количественной оценки отклонений между эталонной и фактической геометрией конструкции используются алгоритмы сравнения облаков точек: облако-облако (C2C), облако-меш (C2M) и многомасштабное сравнение модель-модель (M3C2) [5]. Алгоритм C2M, применённый в настоящей работе, вычисляет расстояние от каждой точки сравниваемого облака до ближайшей грани референтного меша.

Наземное лазерное сканирование за последнее десятилетие закрепились как основной инструмент бесконтактного получения плотных и метрически точных геометрических данных о существующих конструкциях. В статье [6] отмечается, что использование данных облаков точек, полученных с помощью лазерного сканирования и фотограмметрии, является эффективным для оценки деформаций конструкций и последующего создания BIM-моделей, цифровых двойников сооружений.

В материалах [7-9] отмечается, что интеграция фотограмметрической съёмки и лазерного сканирования с BIM-технологией, позволяет создавать фактическую цифровую трехмерную модель объекта, а также выявлять места деформаций конструкций. В исследовании [10] на данных пяти последовательных сканирований реальной строительной площадки было продемонстрировано автоматическое извлечение 132 из 133 колонн с последующей проверкой соответствия геометрии проектной BIM-модели – результат, напрямую отражает применимость подхода для приёмоного контроля колонн в процессе строительства.

Цель исследования – апробация методики выявления геометрических дефектов конструктивных элементов на основе сопоставления данных наземного лазерного сканирования с эталонной BIM-моделью с использованием метода C2M.

Основные положения

Последовательность рабочего процесса включает 4 основных этапа, представленных на рис. 1.

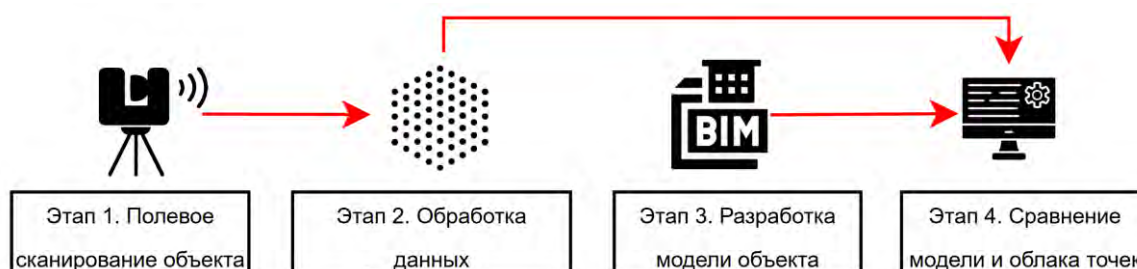


Рис. 1. Последовательного рабочего процесса

На первом этапе выполняется наземное лазерное сканирование (сканер FARO Focus) конструкций, с последующей регистрацией и обработкой полученных данных. На следующем этапе проводится обработка данных лазерного сканирования: регистрация и фильтрация облаков точек. Третий этап включает создание BIM-модели исследуемых объектов в программном комплексе Autodesk Revit. На четвертом этапе производится вычисление отклонений методом C2M, путем сравнения геометрии модели и данных облаков точек.

Метод C2M был выбран в качестве основного по следующим причинам:

- наличие эталонной BIM-модели, экспортированной из Autodesk Revit, позволяет вычислять знаковое расстояние от каждой точки облака до ближайшей грани модели с учётом нормали поверхности;

- знаковое расстояние (signed distance) позволяет однозначно интерпретировать направление отклонения.

Проверка методики выполнялась на несущих конструкциях реальных объектов: паркинг и производственные здания. Для анализа выбраны три типа колонн, различающихся материалом и поперечным сечением:

1. Монолитная железобетонная колонна с поперечным сечением 450x450 мм;

2. Сборная железобетонная двухветвевая колонна с поперечным сечением 1300x500 мм;

3. Стальной стержень (двутавр 40Ш2 ГОСТ Р 57837-2017).

Вычисление знаковых расстояний с помощью метода C2M выполнено в программном комплексе CloudCompare и изображены на рис. 2 – 4. Результаты представлены в форме карты цветов, на которых:

- зелёный цвет соответствует отклонениям, близким к нулю (геометрия факта совпадает с эталоном);

- красный – положительным отклонениям (выпуклость, утолщение);

- синий – отрицательным отклонениям (вогнутость, утончение, крен).

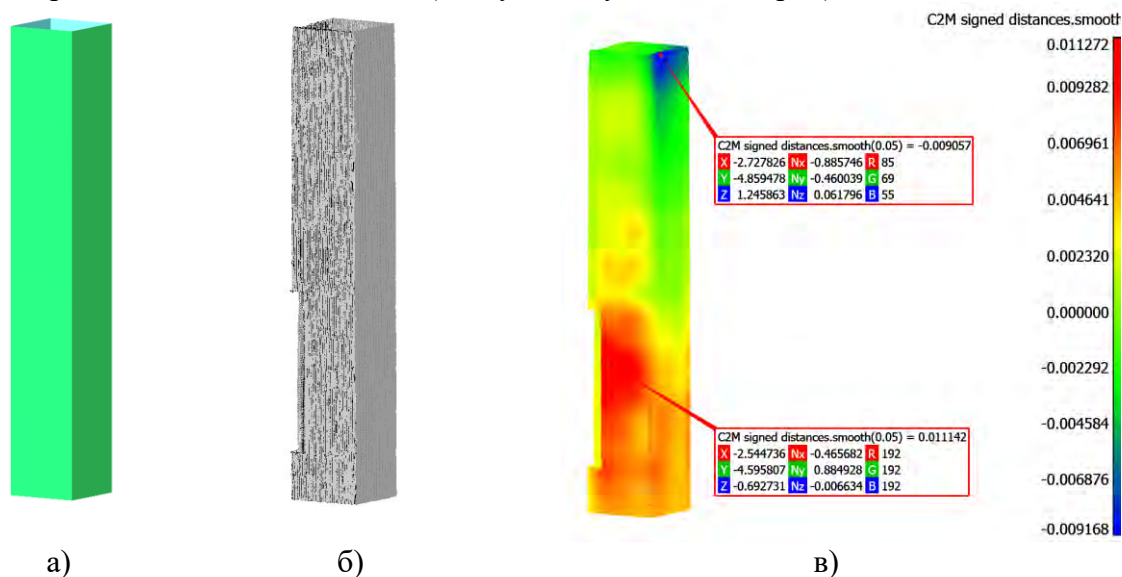


Рис. 2. Монолитная железобетонная колонна
(а – эталонная модель; б – облако точек; в – карта отклонений)

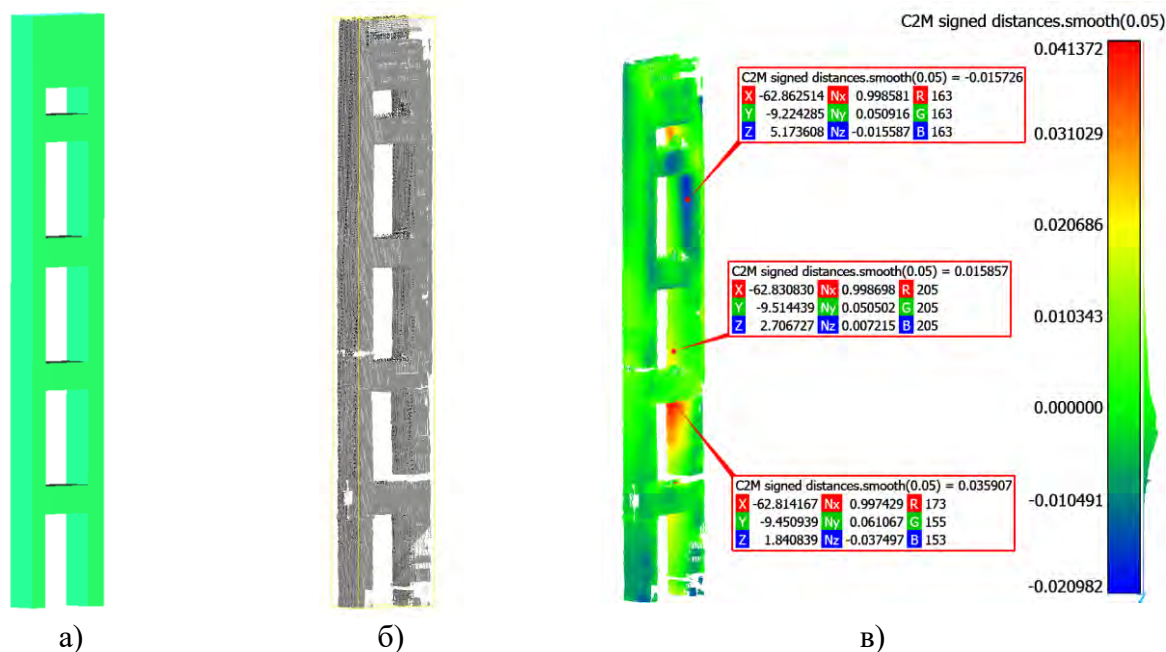


Рис. 3. Сборная железобетонная двухветвевая колонна
(а – эталонная модель; б – облако точек; в – карта отклонений)

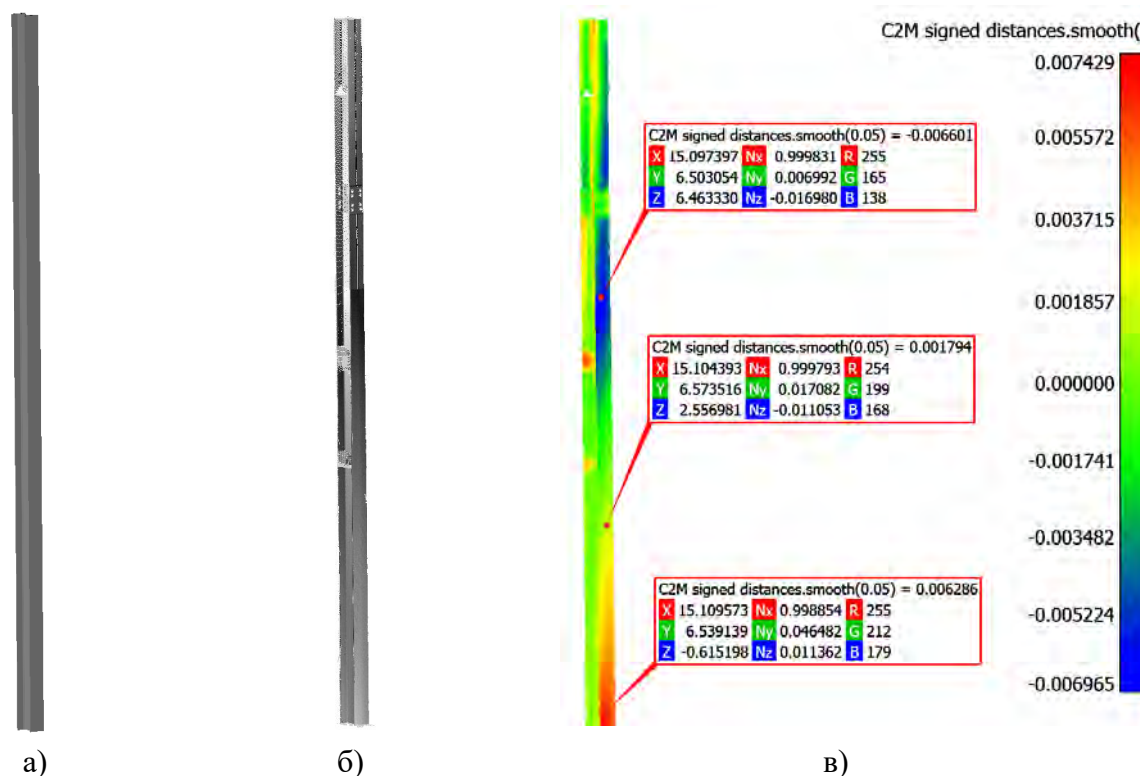


Рис. 4. Стальной стержень (двутавр 40Ш2 ГОСТ Р 57837-2017)
(а – эталонная модель; б – облако точек; в – карта отклонений)

Сопоставление результатов C2M-анализа с нормативными требованиями к геометрии конструкций выявило существенные различия в отклонениях исследуемых типов колонн (табл. 1).

Табл. 1. Статистические параметры C2M signed distances

Колонна	Количество точек	Среднее откл., мм	Стандартное откл., мм	Мин., мм	Макс., мм	Размах, мм
ЖБ прямоугольная монолитная	474 187	2,01	3,02	-9,17	+11,27	20,44
ЖБ двухветвевая сборная	137 158	0,45	7,45	-20,98	+41,37	62,35
Стальной двутавр	166 714	0,38	2,85	-6,97	+7,43	14,40

Стальной двутавр демонстрирует наименьший разброс отклонений (2,85 мм) и полностью укладывается в допуск на отклонение оси от вертикали (± 12 мм) согласно СН 1.03.01-2019.

Железобетонная прямоугольная колонна (монолит) при сопоставимом со сталью стандартном отклонении (3,02 мм) показывает превышение нормативного допуска местных неровностей класса А6 по СП 70.13330 (5 мм) в 2,25 раза по максимальному значению (+11,27 мм). Существенно, что среднее значение отклонения (+2,01 мм) значительно отличается от нуля – это указывает на систематическое, а не случайное превышение фактических габаритов сечения над проектными.

Железобетонная двухветвевая колонна (сборная) показывает максимальное отклонение от эталонной модели среди всех трёх типов конструкций. Максимальное положительное отклонение (+41,37 мм) локализовано в средней по высоте зоне одной из ветвей колонны и визуально соответствует локальному сужению сечения. Проверка по необработанным данным отдельных сканов (до объединения в общее облако) подтвердила, что деформация фиксируется независимо на каждой станции сканирования, что исключает брак регистрации или сшивки сканов и указывает на реальный геометрический дефект элемента.

Заключение

Предложенная методика контроля геометрии конструктивных элементов, основанная на сопоставлении данных наземного лазерного сканирования с эталонной BIM-моделью посредством метода (C2M) в CloudCompare, обеспечивает сплошной контроль геометрии поверхности элемента, на порядки превосходящий по плотности точечные измерения, предусмотренные действующими нормативными документами.

Апробация методики на трёх типах колонн выявила существенные различия в степени соответствия фактической геометрии проектной модели: от полного соответствия нормативным допускам (стальная колонна) до превышения допуска более чем в 13 раз (выявлены области на двухветвевой колонне).

Метод позволил выявить локальный геометрический дефект – сужение сечения ветви двухветвевой колонны величиной 41,37 мм, который не мог быть обнаружен традиционными методами точечного контроля и представляет

практическую значимость для последующей оценки несущей способности элемента.

Дальнейшие исследования направлены на интеграцию результатов С2М-анализа в BIM-модель посредством пользовательских параметров элементов Revit, что обеспечивает хранение данных геометрического контроля в едином информационном пространстве объекта и доступность результатов обследования для последующих этапов жизненного цикла конструкции.

Список литературы

1. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: ГОСТ 31937-2024. – Введ. 01.05.2024. – Минск : Госстандарт, 2024. – 82 с.
2. Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений = Узвядзенне будаўнічых канструкцый, будынкаў і збудаванняў: СН 1.03.01-2019. – Введ. 29.11.2019. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2019. – 127 с.
3. Несущие и ограждающие конструкции : СП 70.13330.2012 (актуализир. ред. СНиП 3.03.01-87, с изм. № 1, 3–7). – Введ 01.07.2012. – Москва : Госстрой, 2012. – 205 с.
4. Середович, В.А. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с
5. Rani, A., Ortiz-Arroyo, D., Durdevic, P. Advancements in Point Cloud-Based 3D Defect Detection and Classification for Industrial Systems: A Comprehensive Survey / A. Rani, D. Ortiz-Arroyo, P. Durdevic // Information Fusion. – 2024. – Vol.122 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253524003531> (дата обращения: 01.07.2026).
6. Брусов, В.А. Лазерное сканирование и фотограмметрия в реконструкции с применением BIM технологий / В.А. Брусов // Вестник науки. – 2025. – №5(86). – С. 1030–1037.
7. Ковтун, И. Лазерное сканирование при строительстве и реконструкции зданий / И. Ковтун // Строительство и образование. – 2023. – № 5-6. – С. 84-91.
8. Савина, Е. Н. Социальные и технические аспекты применения БПЛА и облака точек на примере транспортного сооружения при создании BIM-модели / Е. Н. Савина, Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 1 (35). – С. 48–57.
9. Liu, Z., Liu, Z., Sun, Z., Zhang, Q., Zhao, L. Intelligent detection method for construction quality of building structures based on point cloud data and BIM models / Z. Liu, Z. Liu, Z. Sun, Q. Zhang, L. Zhao // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 112 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225017292> (дата обращения: 01.07.2026).
10. Maalek, R.; Lichti, D.D.; Ruwanpura, J.Y. Automatic Recognition of Common Structural Elements from Point Clouds for Automated Progress Monitoring and Dimensional Quality Control in Reinforced Concrete Construction // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, iss. 9. – URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/12/7/260> (дата обращения: 01.07.2026).

Контакты:

kulan.al@yandex.ru (Кулан Алексей Валерьевич);
emoisseitchik@mail.ru (Мойсейчик Евгений Алексеевич);
en713821@gmail.com (Савина Елена Николаевна);
ftkckp@mail.ru (Яковлев Александр Александрович).