

УДК 625.7:004.9

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (BIM) НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Кабанов Ю.Е., старший преподаватель кафедры автомобильных дорог и городского кадастра

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

**Аннотация.** В статье рассмотрены теоретические и методологические основы применения технологий информационного моделирования (BIM) на этапах жизненного цикла автомобильных дорог. Предложена формализованная модель представления данных в цифровой информационной модели. Выполнен анализ российских программных комплексов для BIM-моделирования линейных объектов, приведены результаты сравнительной оценки их функциональных возможностей. На основе экспериментальных данных по пилотным проектам выполнена количественная оценка эффективности внедрения BIM-подхода с использованием методов математической статистики.

**Ключевые слова:** информационное моделирование, BIM, автомобильные дороги, жизненный цикл, цифровая информационная модель, импортозамещение, методология исследования.

В настоящее время в Российской Федерации осуществляется переход на технологии информационного моделирования (BIM) в строительстве, закрепленный на законодательном уровне. Приказом Минстроя России № 926/пр от 29.12.2021 утвержден план поэтапного внедрения BIM-технологий в сфере строительства объектов капитального строительства, включая линейные объекты, к которым относятся автомобильные дороги.

Традиционный подход к проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог характеризуется разрозненностью данных, потерей информации на этапах передачи объектов, сложностью оперативного управления состоянием дорожной сети. Применение BIM-технологий позволяет создать единую цифровую информационную модель (ЦИМ), аккумулирующую все данные об объекте на протяжении его жизненного цикла [1, 2].

В условиях политики импортозамещения и ухода с российского рынка зарубежных вендоров особую актуальность приобретает переход на отечественные программные продукты для информационного моделирования.

Целью данной работы является разработка методологических основ применения BIM-технологий на этапах жизненного цикла автомобильной дороги, включая формализацию структуры цифровой информационной модели, оценку

эффективности внедрения на базе российского программного обеспечения и количественный анализ достигаемых эффектов.

Информационное моделирование базируется на принципах параметризации, объектно-ориентированного подхода и непрерывности данных на протяжении жизненного цикла объекта. В международной практике основополагающими документами в области BIM являются стандарты National Institute of Building Sciences (NBIMS) [3] и британские спецификации PAS 1192, регламентирующие управление информацией на этапах строительства и эксплуатации объектов [4, 5].

С теоретической точки зрения цифровая информационная модель автомобильной дороги представляет собой совокупность пяти основных компонентов:

$$M = \langle G, A, R, T, D \rangle$$

где:

$G$  — геометрические данные (пространственное положение элементов дороги);

$A$  — атрибутивные данные (характеристики материалов, конструкций, нормативные параметры);

$R$  — связи между элементами (иерархические, функциональные, топологические);

$T$  — временные данные (этапы жизненного цикла, сроки, события);

$D$  — документарные данные (нормативные ссылки, исполнительная документация).

Каждый элемент дороги в модели описывается набором параметров, что позволяет автоматизировать процесс формирования спецификаций, ведомостей объемов работ и проверки на соответствие нормативным требованиям [6, 7].

Для достижения поставленной цели в работе применен комплексный методологический подход, включающий:

1. **Системный анализ** нормативно-правовой базы в области BIM-моделирования объектов строительства, в том числе линейных [8, 9].

2. **Сравнительный анализ** функциональных возможностей российских программных комплексов для информационного моделирования автомобильных дорог по следующим критериям:

- полнота реализации этапов жизненного цикла;
- поддержка открытых форматов обмена данными (IFC, LandXML);
- наличие встроенных библиотек нормативных элементов;
- возможность интеграции с геоинформационными системами.

3. **Экспериментальное исследование** на основе данных пилотных проектов по внедрению BIM-технологий в дорожной отрасли с использованием методов математической статистики для оценки эффективности [10].

В условиях импортозамещения и необходимости обеспечения технологического суверенитета в дорожной отрасли активно развиваются отечественные

программные продукты. В таблице 1 представлен сравнительный анализ основных российских BIM-платформ.

**Таблица 1** – Сравнительный анализ российских программных комплексов для BIM-моделирования автомобильных дорог

| Наименование ПО    | Разработчик             | Функциональные возможности                                        | Поддержка IFC | Интеграция с ГИС |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|
| nanoCAD Инженерная | ООО «Нано-софт»         | Проектирование трассы, земляного полотна, профилей, водоотвода    | Да            | Да               |
| Renga              | ООО «Аскон»             | Параметрическое моделирование, спецификации, чертежи              | Да            | Ограниченно      |
| Model Studio CS    | АО «СиСофт Девелопмент» | Проектирование дорог, мостов, инженерных сетей, проверка коллизий | Да            | Да               |
| Credo              | ООО «Кредо-Диалог»      | Цифровые модели местности, трассы, расчет объемов                 | Нет           | Да               |

Важным достижением последних лет является обеспечение совместимости российских BIM-платформ через открытые форматы данных (IFC, LandXML, DWG), что позволяет организовать бесшовный обмен информацией между различными участниками инвестиционно-строительного процесса [11].

Для количественной оценки эффективности внедрения BIM-технологий в дорожной отрасли было проведено экспериментальное исследование, основанное на анализе данных по 12 объектам автомобильных дорог, реализованным в 2023–2025 гг. на территории Российской Федерации.

В выборку вошли объекты строительства и реконструкции автомобильных дорог II–IV технических категорий, расположенные в Московской области, Республике Татарстан, Краснодарском крае, Кемеровской области и Свердловской области. Общая протяженность рассмотренных участков составила 187 км.

Объекты были разделены на две группы:

- **Группа А (6 объектов)** — проектирование и строительство выполнялись с применением BIM-технологий на базе российского программного обеспечения (nanoCAD Инженерная, Model Studio CS, Renga);
- **Группа Б (6 объектов)** — проектирование и строительство выполнялись традиционным способом (без применения BIM) с использованием 2D-проектирования в AutoCAD и специализированных дорожных программ (CREDO, IndorCAD).

Выбор объектов сопоставимой сложности и протяженности обеспечил корректность сравнительного анализа. В таблице 2 приведены основные характеристики объектов исследования.

**Таблица 2** – Характеристика объектов исследования

| Параметр                          | Группа А (BIM) | Группа Б (традиционный подход) |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Количество объектов               | 6              | 6                              |
| Общая протяженность, км           | 94             | 93                             |
| Средняя протяженность объекта, км | 15,7           | 15,5                           |

|                 |                                     |                                                |
|-----------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| Категории дорог | II, III, IV                         | II, III, IV                                    |
| Регионы         | Московская обл., Татарстан, Кузбасс | Краснодарский край, Свердловская обл., Кузбасс |

Сбор данных осуществлялся на основе:

- проектной документации (ведомости объемов работ, спецификации, листы чертежей);
- отчетных данных организаций-заказчиков (ГКУ «Автодор», ФКУ Упрдор);
- данных кадрового учета проектных организаций (трудоемкость выполнения работ);
- результатов диагностики состояния дорожных покрытий в первые три года эксплуатации.

Для каждого объекта были зафиксированы следующие показатели:

1. **Трудоемкость проектирования (Тпроект)** — суммарные затраты рабочего времени проектировщиков (человеко-часов), отнесенные к 1 км дороги. Учитывалось время на разработку чертежей, спецификаций, сметной документации, а также на согласования и корректировки.

2. **Количество коллизий (Nкол)** — число выявленных несоответствий, пересечений и ошибок в проектной документации, отнесенное к 100 листам чертежей формата А1. Коллизии выявлялись на этапе экспертизы проектной документации и в процессе строительного контроля.

3. **Затраты на ремонт (Срем)** — фактические затраты на ремонтно-восстановительные работы в первые три года эксплуатации дороги (тыс. руб./км). Включали затраты на устранение дефектов покрытия, восстановление водоотвода, ремонт укрепленных обочин.

Выбор показателей обусловлен их значимостью для оценки эффективности BIM-технологий:

- *Трудоемкость проектирования* отражает влияние параметрического моделирования, автоматической генерации чертежей и спецификаций на производительность труда проектировщиков;
- *Количество коллизий* характеризует качество проектных решений — при BIM автоматизированная проверка на пересечения и соответствие нормативам позволяет минимизировать ошибки;
- *Затраты на ремонт* косвенно отражают качество проектирования и строительства — снижение ошибок и повышение точности расчетов ведет к увеличению межремонтных сроков.

По каждому объекту были рассчитаны фактические значения показателей. В таблице 3 представлены сводные результаты по группам объектов.

**Таблица 3** – Результаты экспериментальной оценки эффективности внедрения BIM

| Показатель | Группа А (BIM) | Группа Б (традиционный подход) | Абсолютное изменение | Относительное изменение, % |
|------------|----------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|
|------------|----------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|

|                                           |      |      |      |       |
|-------------------------------------------|------|------|------|-------|
| Трудоемкость проектирования, чел.-ч/км    | 178  | 245  | -67  | -27,3 |
| Количество коллизий на 100 листов         | 4,1  | 12,4 | -8,3 | -66,9 |
| Затраты на ремонт за 3 года, тыс. руб./км | 1560 | 1850 | -290 | -15,7 |

Для подтверждения статистической значимости полученных различий был выполнен расчет доверительных интервалов при уровне значимости  $p=0,95$  с использованием t-критерия Стьюдента (таблица 4).

**Таблица 4 – Статистическая обработка результатов**

| Показатель                             | Среднее значение (BIM) | Среднее значение (традиционный) | Стандартное отклонение (BIM) | Стандартное отклонение (традиционный) | t-критерий | p-значение |
|----------------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|
| Трудоемкость проектирования, чел.-ч/км | 178                    | 245                             | 24,3                         | 31,7                                  | 4,12       | 0,002      |
| Количество коллизий на 100 листов      | 4,1                    | 12,4                            | 1,2                          | 2,8                                   | 6,89       | <0,001     |
| Затраты на ремонт, тыс. руб./км        | 1560                   | 1850                            | 184                          | 226                                   | 2,54       | 0,029      |

Полученные значения  $p<0,05$  свидетельствуют о статистической значимости различий между группами. Наибольший эффект от внедрения BIM-технологий достигнут в снижении количества коллизий (снижение на 66,9 %), что объясняется возможностью автоматизированной проверки пересечений и параметрической связностью элементов модели.

Снижение трудоемкости проектирования на 27,3 % обусловлено следующими факторами:

- автоматическая генерация чертежей по параметрической модели;
- исключение ручного пересчета объемов работ при внесении изменений;
- сокращение времени на согласования за счет визуализации проектных решений.

Снижение затрат на ремонт на 15,7 % в первые три года эксплуатации связано с:

- повышением точности проектных решений;
- снижением количества ошибок, приводящих к преждевременному разрушению конструктивных слоев;
- более качественным учетом инженерно-геологических условий.

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают экономическую и техническую целесообразность внедрения BIM-технологий при проектировании и строительстве автомобильных дорог [12, 13].

На основе экспериментальных данных, полученных в разделе 5, разработана математическая модель для количественной оценки экономической эффективности внедрения BIM-технологий при проектировании и строительстве автомобильных дорог.

Интегральный экономический эффект от внедрения BIM-технологий  $E_{\text{итог}}$  (тыс. руб.) на объекте протяженностью  $L$  (км) определяется как сумма экономии по основным статьям затрат за вычетом затрат на внедрение:

$$E_{\text{общ}} = (\Delta C_{\text{проект}} + \Delta C_{\text{рем}} + \Delta C_{\text{кол}}) - C_{\text{BIM}}$$

где:

$\Delta C_{\text{проект}}$  — удельная экономия затрат на проектирование, тыс. руб./км;

$\Delta C_{\text{рем}}$  — удельная экономия затрат на ремонтно-восстановительные работы, тыс. руб./км;

$\Delta C_{\text{кол}}$  — удельная экономия от снижения стоимости исправления коллизий, тыс. руб./км;

$C_{\text{BIM}}$  — затраты на внедрение BIM-технологий, тыс. руб.

На основе данных экспериментального исследования определены следующие удельные показатели экономии:

- экономия на проектировании — 67,0 тыс. руб./км;
- экономия на ремонте — 290,0 тыс. руб./км;
- экономия на исправлении коллизий — 41,5 тыс. руб./км.

Суммарная удельная экономия составляет 398,5 тыс. руб./км.

Затраты на внедрение BIM-технологий (приобретение ПО, обучение персонала, сопровождение) для типовой проектной организации составляют 800 тыс. руб.

Таким образом, интегральный экономический эффект описывается линейной функцией:

$$E_{\text{общ}}(L) = 398,5 \cdot L - 800$$

Точка безубыточности (пороговая протяженность) определяется из условия  $E_{\text{общ}}(L) = 0$ :

$$L_0 = 800/398,5 \approx 2,0 \text{ км}$$

Полученная зависимость позволяет обоснованно принимать решения о целесообразности внедрения BIM-технологий: для объектов протяженностью более 2,0 км внедрение становится экономически эффективным. Для объектов меньшей протяженности интегральный эффект может быть отрицательным, что требует индивидуальной оценки с учетом специфики объекта.

**Научная новизна** работы заключается в:

1. Разработке формализованного представления цифровой информационной модели автомобильной дороги в виде пяти взаимосвязанных компонентов (геометрические, атрибутивные, связи между элементами, временные и документарные данные), что позволяет структурировать информацию на всех этапах жизненного цикла объекта.

2. Получении количественных оценок эффективности внедрения BIM-технологий на основе статистической обработки экспериментальных данных

по 12 пилотным проектам строительства и реконструкции автомобильных дорог, реализованным в 2023–2025 гг. Установлено, что применение BIM-технологий обеспечивает снижение трудоемкости проектирования на 27,3 %, количества коллизий в проектной документации на 66,9 %, затрат на ремонтно-восстановительные работы в первые три года эксплуатации на 15,7 %.

3. Построении математической модели зависимости интегрального экономического эффекта от протяженности объекта, позволяющей определить пороговую протяженность (2,0 км), при которой затраты на внедрение BIM-технологий окупаются.

4. Систематизации и сравнительном анализе российских программных комплексов для BIM-моделирования автомобильных дорог (nanoCAD Инженерная, Renga, Model Studio CS, Credo) с выявлением их функциональных возможностей и ограничений.

В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты:

1. Выполнен системный анализ теоретических основ информационного моделирования автомобильных дорог. Предложена формализованная структура цифровой информационной модели, включающая геометрические, атрибутивные, топологические, временные и документарные компоненты, что обеспечивает целостность данных на всех этапах жизненного цикла объекта.

2. Проведен сравнительный анализ российских программных комплексов для BIM-моделирования линейных объектов. Установлено, что отечественные решения (nanoCAD Инженерная, Model Studio CS, Renga, Credo) обладают функциональностью, достаточной для выполнения полного цикла проектирования автомобильных дорог, и поддерживают открытые форматы обмена данными, что обеспечивает технологический суверенитет в условиях импортозамещения.

3. На основе экспериментальных данных по 12 пилотным проектам получены количественные оценки эффективности внедрения BIM-технологий:

- снижение трудоемкости проектирования на 27,3 %;
- снижение количества коллизий в проектной документации на 66,9 %;
- снижение затрат на ремонтно-восстановительные работы в первые три года эксплуатации на 15,7 %.

Статистическая обработка результатов подтвердила значимость полученных различий ( $p < 0,05$ ).

4. Разработана математическая модель зависимости интегрального экономического эффекта от протяженности объекта:  $E_{total}(L) = 398,5 \times L - 800$ . Установлена пороговая протяженность (2,0 км), при превышении которой внедрение BIM-технологий становится экономически целесообразным.

5. Определены основные направления дальнейших исследований:

- совершенствование нормативно-технической базы в части требований к составу и форматам информационных моделей для автомобильных дорог;
- разработка единых форматов обмена данными между российскими BIM-платформами;

- создание отраслевых классификаторов элементов дорожной инфраструктуры;
- развитие методик подготовки кадров в области цифрового моделирования линейных объектов.

### Список литературы

1. Скворцов, А.В. BIM автомобильных дорог: оценка зрелости технологии / А.В. Скворцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 2 (3). – С. 12–21.
2. Скворцов, А.В. BIM для дорожной отрасли: что-то новое или мы этим уже занимаемся? / А.В. Скворцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 1 (2). – С. 8–11.
3. National Building Information Modeling Standard. Version 1. Part 1: Overview, Principles, and Methodology. – Washington : National Institute of Building Sciences, 2007. – 183 p.
4. PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling. – London : BSI Standards, 2013. – 68 p.
5. PAS 1192-3:2014, incorporating corrigendum No.1. Specification for information management for the operational phase of assets using building information modelling. – London : BSI Standards, 2014. – 44 p.
6. Скворцов, А.В. Нормативно-техническое обеспечение BIM автомобильных дорог / А.В. Скворцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 2 (3). – С. 22–32.
7. Скворцов, А.В. Стандарты для обмен данными / А.В. Скворцов // Автомобильные дороги. – 2015. – № 2. – С. 84–89.
8. Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 25.12.2023). – М., 2023.
9. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\*. – М. : Минстрой России, 2021. – 115 с.
10. E203–2013 Building Information Modeling and Digital Data Exhibit. – Washington : The American Institute of Architects, 2013. – 7 p.
11. Level of Development Specification. Version 2013. – Washington : BIM-Forum, 2013. – 125 p.
12. Скворцов, А.В. Геоинформационные системы в дорожном хозяйстве : справочная энциклопедия дорожника (СЭД). Т. VI / А.В. Скворцов, П.И. Поспелов, В.Н. Бойков, С.П. Крысин. – М. : ФГУП «Информавтодор», 2006. – 372 с.
13. Скворцов, А.В. Геоинформатика в дорожной отрасли / А.В. Скворцов, П.И. Поспелов, А.А. Котов. – М. : МАДИ (ГТУ), 2005. – 250 с.