

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ,
ПРОЕКТНЫХ И ТВОРЧЕСКИХ РАБОТ ОБУЧАЮЩИХСЯ
«ОБРЕТЁННОЕ ПОКОЛЕНИЕ»**

Направление:

**Тема: Применение BIM-технологий для анализа путей эвакуации и повышения
уровня пожарной безопасности общественных зданий**

Соискатель: Очиргоряев Джангр Лиджиевич,
Церекаева Валерия Владиславовна
обучающиеся 1 курса направления «Техносферная безопасность» ФГБОУ
ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б. Б.
Городовикова»

Научный руководитель: Мушаева Кермен Батнасуновна, к. с.-х. н., доцент кафедры
Техносферной безопасности и инженерии ФГБОУ ВО
«Калмыцкий государственный университет имени Б. Б.
Городовикова»

Место выполнения работы: ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет им.
Б. Б. Городовикова»

**2026
СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ВІМ-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ.....	4
1.1 Сущность и принципы ВІМ-моделирования.....	4
1.3 Возможности ВІМ для анализа пожарной безопасности.....	5
1.4. Обзор программных решений для обеспечения пожарной безопасности в ВІМ-проектировании.....	6
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВІМ-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	9
2.1 Принципы интеграции требований пожарной безопасности в ВІМ.....	9
2.2 Методы моделирования чрезвычайных ситуаций в ВІМ- среде.....	11
2.3 Автоматизация проверок соответствия нормативным требованиям.....	16
2.4 Методика оценки эффективности ВІМ-подхода для обеспечения пожарной безопасности.....	18
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	20
ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВІМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	20
3.1 Характеристика объекта исследования.....	20
3.2 Разработка ВІМ-модели с учётом требований пожарной безопасности.....	23
3.3 Моделирование чрезвычайных ситуаций.....	30
3.4 Результаты и рекомендации.....	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	38

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития строительной отрасли вопросы обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений приобретают особую актуальность. Пожарная безопасность остаётся одним из приоритетных направлений в проектировании и эксплуатации объектов различного назначения. Традиционные методы проектирования уже не способны в полной мере обеспечить необходимый уровень защиты от возможных чрезвычайных ситуаций.

ВМ-технологии (Building Information Modeling) представляют собой инновационный подход к проектированию, который позволяет создавать детальные цифровые модели зданий, содержащие полную информацию об их конструктивных, функциональных и эксплуатационных характеристиках. Применение ВМ в сфере пожарной безопасности открывает новые возможности для анализа рисков, оптимизации проектных решений и повышения эффективности систем противопожарной защиты.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью совершенствования методов обеспечения пожарной безопасности зданий с использованием современных цифровых технологий. Информационное моделирование позволяет не только соответствовать нормативным требованиям, но и значительно повысить реальный уровень защищённости объектов от возможных пожаров.

Целью работы является разработка методики применения ВМ-моделирования для анализа и повышения пожарной безопасности зданий на примере конкретного объекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- изучить теоретические основы ВМ-моделирования и его применение в сфере пожарной безопасности;
- определить методику интеграции требований пожарной безопасности в ВМ-модель;
- провести практическое исследование на примере конкретного объекта;
- оценить эффективность предложенных решений.

Объектом исследования является здание БПОУ РК «Элистинский политехнический колледж им. И.Н. Эльвартынова». **Предметом исследования** выступают методы и средства применения ВМ-технологий для анализа и повышения пожарной безопасности объектов капитального строительства.

Теоретической и методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных учёных в области ВМ-моделирования, пожарной безопасности, строительного проектирования.

Практическая значимость работы заключается в разработке конкретных методических рекомендаций по применению ВМ-технологий для анализа и повышения пожарной безопасности зданий, которые могут быть использованы при проектировании и реконструкции объектов различного назначения.

ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ BIM-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ

1.1 Сущность и принципы BIM-моделирования

Building Information Modeling (BIM), или информационное моделирование зданий, представляет собой современную методологию цифрового описания физических и функциональных характеристик строительного объекта. В отличие от традиционных двухмерных чертежей, BIM-модель функционирует как единая централизованная база данных, аккумулирующая полную информацию о здании на всех этапах его жизненного цикла — от первоначальной концепции до эксплуатации и последующего демонтажа.

Ключевой особенностью BIM является трёхмерная визуализация, обеспечивающая наглядное представление архитектурных и конструктивных решений. Это позволяет не только демонстрировать проект в объёмном виде, но и заблаговременно выявлять пространственные коллизии, а также оперативно формировать любые необходимые проекции и разрезы. При этом модель не ограничивается лишь геометрическим представлением, каждый её элемент, будь то стена, окно или несущая балка, содержит обширный набор данных, включая технические параметры (такие как материалы, огнестойкость и теплопроводность), эксплуатационные характеристики, сметную информацию и сроки монтажа.

Важнейшим принципом BIM выступает параметричность – элементы модели взаимосвязаны логическими зависимостями, благодаря чему изменение одного параметра автоматически приводит к обновлению всех связанных компонентов и сопутствующей документации. Такая система обеспечивает целостность проекта и минимизирует вероятность ошибок. Кроме того, BIM-платформа поддерживает коллаборативный режим работы, позволяя различным специалистам (архитекторам, инженерам, сметчикам) одновременно взаимодействовать с единой моделью, что существенно снижает расхождения в проектных решениях.

В рамках BIM-моделирования применяется система уровней детализации (LOD), регламентированная ГОСТ Р 57563-2017. Эти уровни варьируются от концептуальной модели (LOD 100) до эксплуатационной (LOD 500). Для задач пожарной безопасности особую значимость имеют уровни LOD 300–400, поскольку они обеспечивают точную геометрию эвакуационных путей, корректное размещение противопожарных преград и детализацию систем дымоудаления – всё то, что критически важно для обеспечения безопасности.

Жизненный цикл BIM-модели охватывает все стадии существования объекта. На этапе проектирования она служит для разработки архитектурно-планировочных решений, расчёта огнестойкости конструкций и моделирования эвакуационных сценариев. В процессе строительства модель используется для контроля соответствия монтажа проектной документации и управления графиками работ с учётом противопожарных мероприятий. На стадии эксплуатации BIM-модель позволяет мониторить состояние противопожарных систем, актуализировать данные о ремонтах и планировать учения по эвакуации. Наконец, при демонтаже модель помогает анализировать наличие опасных материалов и разрабатывать безопасные методы разборки.

Существенное отличие BIM от традиционных CAD-технологий (Computer Aided Design) заключается в том, что BIM создаёт не просто набор чертежей, а интеллектуальную модель с семантической нагрузкой. Это обеспечивает автоматическую генерацию всей необходимой документации (планов, разрезов, спецификаций) и открывает возможности для анализа сценариев типа «что-если», позволяя моделировать изменения и оценивать их последствия.

Таким образом, BIM-моделирование кардинально трансформирует подход к обеспечению пожарной безопасности зданий. Оно переводит процесс из плоскости статичных чертежей в динамическую среду, где становится возможным прогнозировать риски ещё до реализации проекта, оптимизировать решения на основе количественных данных и осуществлять непрерывный контроль соблюдения требований пожарной безопасности на всех этапах жизненного цикла здания.

1.2 Возможности BIM для анализа пожарной безопасности

Информационное моделирование зданий (BIM) открывает принципиально новые возможности для комплексного анализа и повышения уровня пожарной безопасности объектов строительства. В отличие от традиционных методов проектирования, где оценка противопожарных мероприятий зачастую осуществляется фрагментарно и на поздних стадиях, BIM позволяет интегрировать требования пожарной безопасности в проект с самого начала, обеспечивая сквозной контроль на всех этапах жизненного цикла здания.

Ключевым преимуществом BIM выступает возможность создания детализированной трёхмерной модели, содержащей не только геометрическую информацию, но и обширный набор атрибутивных данных о каждом элементе конструкции. Это даёт возможность проводить углублённый анализ огнестойкости материалов, оценивать эффективность противопожарных преград и моделировать сценарии развития пожара с учётом реальных характеристик строительных конструкций. В модель могут быть заложены такие параметры, как класс горючести материалов, пределы огнестойкости, время срабатывания систем оповещения — всё это формирует целостное представление о пожарной безопасности объекта.

Особую ценность представляет способность BIM-технологий к симуляции чрезвычайных ситуаций.

С участием специальных плагинов и модулей возможно смоделировать распространение огня и дыма в здании, которые будут учитывать особенности планировки, размещение вентиляционных потоков и свойства отделочных материалов. Использование имитационного моделирования в BIM-среде открывает возможность выявления зон с повышенным риском концентрации опасных веществ, образующихся в процессе горения. Параллельно с этим проводится оценка работоспособности систем противодымной защиты в рамках различных сценариев развития чрезвычайной ситуации. Полученные в ходе анализа выводы становятся основой для принятия технических решений: проектировщики получают возможность оптимально расположить средства противопожарной защиты и скорректировать архитектурно-планировочные решения на предпроектной стадии.

Цифровой двойник объекта также служит инструментом для углубленного анализа путей эвакуации. В отличие от упрощённых нормативных методов, BIM позволяет смоделировать эвакуацию с учетом антропометрических данных людей (возраст,

физические возможности), а также динамически меняющихся условий, таких как снижение видимости из-за задымления. Специализированный софт производит расчет времени, необходимого для полной эвакуации разных групп, и сопоставляет его с критическим временем блокировки маршрутов. Это обеспечивает принципиально иной, более высокий уровень достоверности при оценке безопасности.

Ключевое значение имеет глубокая интеграция информационной модели с данными об инженерных системах пожарной безопасности. В BIM могут быть загружены детальные параметры всех компонентов: пожарных извещателей, оросителей, огнестойких преград, включая их рабочие характеристики и зоны эффективного покрытия. Это позволяет автоматически проверить модель на отсутствие «слепых» зон, не контролируемых датчиками, и смоделировать логику взаимодействия систем при срабатывании тревоги.

Еще одной мощной функцией является автоматизированная верификация проектных решений на соответствие актуальным строительным нормам и правилам (СП, ГОСТ). Алгоритмы проверяют модель, выявляя нарушения в параметрах эвакуационных выходов, огнестойкости конструкций или необходимых противопожарных разрывов. Все найденные несоответствия визуализируются непосредственно в трехмерной среде и формируются в отчет, что ускоряет процесс устранения замечаний и согласования документации.

Важным долгосрочным преимуществом BIM является создание и постоянное актуализация цифрового паспорта пожарной безопасности объекта. Любые изменения: реконструкция, замена материалов, модернизация систем — фиксируются в модели. В результате на протяжении всего жизненного цикла здания у ответственных лиц есть доступ к объективной и полной информации о состоянии его противопожарной защиты, что критически важно для плановых проверок, организации тренировок или адаптации объекта под новые требования.

Таким образом, BIM-моделирование трансформирует подход к обеспечению пожарной безопасности, превращая его из набора формальных требований в динамический процесс управления рисками. Благодаря комплексному анализу, возможности симуляции чрезвычайных ситуаций и автоматизированному контролю соответствия нормам, BIM позволяет не только повысить уровень защищённости зданий, но и оптимизировать затраты на реализацию противопожарных мероприятий за счёт раннего выявления и устранения потенциальных проблем на стадии проектирования.

1.3. Обзор программных решений для обеспечения пожарной безопасности в BIM-проектировании

Современный рынок программного обеспечения для информационного моделирования зданий предлагает широкий спектр инструментов, позволяющих эффективно решать задачи пожарной безопасности на всех этапах проектирования и эксплуатации объектов. Ключевую роль в этом сегменте играют комплексные платформы, интегрирующие функции трёхмерного моделирования, анализа и документации, среди которых лидирующие позиции занимает Autodesk Revit. Этот программный продукт обеспечивает создание детализированных BIM-моделей с возможностью параметризации элементов по критериям пожарной безопасности — от пределов огнестойкости конструкций до классов горючести материалов. Благодаря открытой архитектуре Revit

поддерживает интеграцию со специализированными плагинами и расчётными модулями, расширяющими его функционал для задач противопожарной защиты.

Для углублённого анализа сценариев развития пожара широко применяется программное обеспечение, основанное на методах вычислительной гидродинамики (CFD). Одним из наиболее востребованных решений в этой области является PyroSim — инструмент, позволяющий моделировать распространение огня и дыма с учётом конкретных характеристик здания, материалов отделки и параметров вентиляционных систем. С его помощью проектировщики могут визуализировать динамику задымления помещений, оценивать эффективность систем дымоудаления и оптимизировать размещение противопожарных преград. Результаты симуляций представляются в виде наглядных анимаций и количественных показателей, что существенно повышает достоверность принимаемых решений.

Важным компонентом BIM-экосистемы выступают программы для моделирования эвакуации людей при пожаре. Pathfinder представляет собой специализированное решение, позволяющее анализировать маршруты движения с учётом психофизиологических особенностей различных групп населения, плотности людских потоков и условий видимости при задымлении. Программа рассчитывает время эвакуации для каждого сценария, сравнивая его с критическими показателями блокирования путей, что даёт возможность своевременно корректировать планировочные решения — например, увеличивать ширину коридоров или добавлять запасные выходы.

Для комплексной проверки проектных решений на соответствие нормативным требованиям активно используются инструменты автоматизированного контроля коллизий. Navisworks, интегрируемый с основными BIM-платформами, позволяет выявлять нарушения противопожарных расстояний, несоответствия в размещении эвакуационных выходов и другие критические ошибки. Система генерирует подробные отчёты о выявленных несоответствиях, которые могут быть визуализированы непосредственно на трёхмерной модели, что значительно упрощает процесс согласования проекта с надзорными органами.

Прогрессивным направлением в области оценки пожарной безопасности является применение специализированного программного обеспечения для численного моделирования поведения строительных конструкций в условиях экстремального нагрева. Такие вычислительные комплексы (например, IDA ICE) способны детально воспроизводить нестационарные тепловые поля в элементах здания при стандартном температурном воздействии. На основе этих расчётов выполняется прогноз критических временных интервалов, по истечении которых конструкции могут утратить свою целостность и функциональную устойчивость. Результаты подобного инженерного анализа напрямую импортируются в BIM-модель, формируя целостную цифровую среду для контроля соблюдения нормативов по огнестойкости на всех уровнях — от отдельной балки или колонны до здания в целом.

Что касается этапа эксплуатации объекта, то здесь цифровизация реализуется через платформы для управления жизненным циклом (FM-системы, решения на базе openBIM). Их ключевая задача в контексте пожарной безопасности — поддержание в актуальном состоянии динамичного электронного досье объекта. В эту базу данных последовательно вносятся все модификации: от косметического ремонта, влияющего на отделку путей эвакуации, до капитальной замены систем дымоудаления или пожарной сигнализации.

Таким образом, формируется единый источник достоверных сведений о текущем состоянии всех средств противопожарной защиты. Доступ к этой информации для эксплуатационных служб, ответственных лиц и контролирующих инстанций становится прозрачным и оперативным, что кардинально повышает управляемость рисками на протяжении всего срока службы сооружения.

Для автоматизации рутинных операций и расширения функционала базовых BIM-платформ применяются инструменты визуального программирования. Duplico, интегрированный с Revit, позволяет создавать скрипты для массовой проверки параметров пожарной безопасности, генерации спецификаций противопожарного оборудования и формирования отчётной документации. Аналогичные возможности предоставляет Python-API, открывающий доступ к низкоуровневому управлению данными BIM-модели.

Следует отметить, что выбор программного обеспечения во многом определяется масштабом и спецификой проекта. Для небольших объектов зачастую достаточно базовых возможностей Revit с несколькими специализированными плагинами, тогда как крупные многофункциональные комплексы требуют комплексного подхода с применением CFD-моделирования, эвакуационного анализа и систем управления эксплуатацией.

Ключевым условием успешной реализации BIM-технологий в пожарной безопасности является создание единой цифровой среды, объединяющей все программные решения. Такой подход исключает разрозненность данных и обеспечивает их актуальность на каждом этапе — от проектирования до эксплуатации здания.

Современный рынок предлагает проектировщикам богатый выбор BIM-инструментов для решения задач пожарной безопасности. Их комплексное применение даёт двойной эффект:

Формальное соответствие нормативным требованиям.

Реальное повышение уровня безопасности за счёт:

- детального анализа потенциальных рисков;
- оптимизации размещения противопожарного оборудования;
- непрерывного мониторинга состояния объекта.

Таким образом, интеграция программных решений становится не просто техническим требованием, а стратегическим инструментом обеспечения безопасности зданий.

ГЛАВА 2 МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

2.1 Принципы интеграции требований пожарной безопасности в BIM

Интеграция требований пожарной безопасности в процесс информационного моделирования зданий представляет собой комплексную задачу, требующую последовательной регламентации на всех этапах проектирования. Её суть заключается в обеспечении непрерывного контроля противопожарных параметров — начиная с концептуальной стадии и заканчивая формированием рабочей документации. Такой подход позволяет исключить фрагментарность проверок, минимизировать ошибки и обеспечить соответствие проекта действующим нормативным требованиям.

Основой интеграции выступает структурирование информационных требований (Employer's Information Requirements, EIR), в рамках которого определяются обязательные параметры пожарной безопасности, подлежащие обязательному отражению в BIM-модели. Эти параметры охватывают пределы огнестойкости строительных конструкций (обозначаемые как R, E, I), классы горючести материалов (от Г1 до Г4), геометрические характеристики эвакуационных путей (ширина, высота, уклон), зоны размещения противопожарного оборудования (датчики, спринклеры, двери), а также требования к системам дымоудаления и оповещения.

На базе EIR разрабатывается план реализации BIM-проекта (BIM Execution Plan, BEP), который задаёт чёткие правила взаимодействия всех участников процесса. В нём фиксируются ключевые этапы проектирования, на которых осуществляется проверка противопожарных решений (концептуальная стадия, проектная документация, рабочая документация), назначаются ответственные лица за верификацию параметров (инженер по пожарной безопасности, ведущий модельер), определяются форматы обмена данными между участниками (IFC, COBie), а также устанавливается периодичность актуализации модели с учётом изменений нормативных требований.

Центральным элементом методологии является параметризация BIM-элементов, благодаря которой каждый объект модели (стена, перегородка, дверь) оснащается набором атрибутов, соответствующих нормам пожарной безопасности. Например, для противопожарной двери указываются предел огнестойкости (например, EI 30), направление открывания и наличие доводчика; для вентиляционного канала — класс огнестойкости, тип клапана и схема управления; для эвакуационной лестницы — ширина марша, количество ступеней и высота ограждений. Это позволяет не просто визуализировать объект, но и хранить в модели полную информацию о его пожарно-технических характеристиках.

Для обеспечения согласованности проектных решений разрабатывается система правил моделирования, которая регламентирует способы отображения противопожарных преград (с использованием цветовых кодов и штриховок), порядок назначения материалов с подтверждёнными пожарно-техническими характеристиками, а также алгоритмы автоматической генерации спецификаций по огнестойкости и эвакуационным путям. Такие правила создают единый стандарт работы для всех участников проекта и снижают риск разночтений.

Взаимодействие участников организуется через единую среду данных (Common Data Environment, CDE), которая выполняет роль централизованного хранилища

информации. В этой среде размещаются актуальные версии BIM-модели и нормативных документов, фиксируются замечания экспертов по пожарной безопасности и ведётся история изменений с указанием ответственных лиц. Такой подход обеспечивает прозрачность процесса и позволяет всем участникам оперативно получать доступ к необходимой информации.

Существенную роль играет контроль коллизий на ранних стадиях проектирования. С помощью специализированных инструментов (например, Navisworks) проводится проверка различных аспектов – достаточности расстояний от дверей до препятствий на путях эвакуации, соответствия высоты проходов требованиям СП 4.13130.2013, перекрытия зон действия датчиков и спринклеров, доступности пожарных гидрантов и шкафов. Выявление и устранение коллизий до начала строительства позволяет избежать дорогостоящих переделок и сократить сроки реализации проекта.

Для автоматизации рутинных операций активно применяются скрипты визуального программирования (Dynamo, Grasshopper), которые значительно повышают эффективность работы с BIM-моделью. Эти инструменты позволяют массово назначать атрибуты пожарной безопасности элементам модели, генерировать отчёты о соответствии параметров нормам и выявлять несоответствия в геометрии и материалах. Благодаря автоматизации снижается нагрузка на проектировщиков и повышается точность проверок.

Таким образом, интеграция требований пожарной безопасности в BIM-процесс базируется на трёх взаимосвязанных принципах:

- системности – учёт противопожарных параметров на всех этапах жизненного цикла модели;
- автоматизации – использование программных инструментов для проверки коллизий и формирования документации;
- прозрачности – обеспечение доступа всех участников к актуальным данным через единую среду.

Реализация этих принципов не только повышает достоверность проектных решений, но и сокращает сроки согласования документации за счёт раннего выявления нарушений и минимизации правок на поздних стадиях проектирования.

Таблица 1 - Основные компоненты интеграции пожарной безопасности в BIM

Компонент	Назначение	Ключевые элементы
EIR (Employer's Information Requirements)	Определение обязательных параметров пожарной безопасности	Пределы огнестойкости, классы горючести, параметры эвакуационных путей, зоны размещения оборудования
БЕР (BIM Execution Plan)	Регламентация процесса проектирования	Этапы проверок, ответственные лица, форматы обмена данными, периодичность актуализации
Параметризация BIM-элементов	Оснащение объектов модели пожарно-техническими атрибутами	Пределы огнестойкости дверей, характеристики вентиляционных каналов, параметры эвакуационных лестниц

Система правил моделирования	Обеспечение единообразия проектных решений	Способы отображения преград, порядок назначения материалов, алгоритмы генерации спецификаций
CDE (Common Data Environment)	Централизованное хранение и обмен данными	Актуальные версии модели, нормативные документы, замечания экспертов, история изменений
Инструменты контроля коллизий	Выявление и устранение пространственных конфликтов	Проверка расстояний, высот, зон действия оборудования, доступности гидрантов
Скрипты визуального программирования	Автоматизация рутинных операций	Массовое назначение атрибутов, генерация отчётов, выявление несоответствий

2.2 Методы моделирования чрезвычайных ситуаций в BIM-среде

Моделирование чрезвычайных ситуаций в рамках информационного моделирования зданий представляет собой ключевой инструмент для оценки и повышения пожарной безопасности объектов на стадии проектирования. Данный подход позволяет не просто формально соответствовать нормативным требованиям, а прогнозировать поведение здания при пожаре, выявлять уязвимые зоны и оптимизировать проектные решения до начала строительства.

Основу методологии составляет построение сценариев пожара с учётом функционального назначения здания и его объёмно-планировочных характеристик. Для каждого типа объекта (жилой дом, торговый центр, больница, производственное помещение) формируются типовые сценарии, учитывающие:

- вероятные источники возгорания;
- особенности распределения горючей нагрузки;
- специфику эксплуатации помещений;
- наличие людей в разное время суток.

Каждый сценарий включает набор входных параметров – от начальной точки возгорания до характеристик отделочных материалов, что позволяет получать реалистичные прогнозы развития чрезвычайной ситуации.

Для детального анализа динамики пожара применяется методология вычислительной гидродинамики (CFD), реализуемая в специализированных программных комплексах типа PyroSim. Данный метод моделирует распространение пламени по поверхностям, образование и движение дымовых потоков, повышение температуры в различных зонах здания, эффективность работы систем дымоудаления.

При выполнении CFD-моделирования проводится комплексный анализ факторов, влияющих на развитие пожара и работу систем противодымной защиты. Первостепенное внимание уделяется теплофизическим характеристикам используемых в строительстве и отделке материалов. В частности, исследуются:

- коэффициент теплопроводности;
- удельная теплоёмкость;

- плотность вещества;
- склонность к возгоранию.

Указанные параметры играют решающую роль в формировании картины распространения пламени — от них зависит, насколько быстро огонь будет захватывать новые участки и сколько тепловой энергии выделится в процессе горения. Это позволяет достоверно спрогнозировать, как будет вести себя пламя в разных частях здания.

Существенное значение при моделировании имеют также особенности вентиляционных систем и создаваемая ими тяга. Воздушные потоки, формируемые как естественной, так и принудительной вентиляцией, способны оказывать двойное влияние: с одной стороны — ускорять распространение продуктов горения, с другой — помогать локализовать задымление. В рамках моделирования тщательно прорабатываются:

- геометрические параметры воздуховодов (их сечение и протяжённость);
- технические характеристики вентиляторов (производительность и режимы работы);
- размещение приточных и вытяжных решёток;
- алгоритмы функционирования систем дымоудаления в условиях пожара.

Такой детализированный подход обеспечивает реалистичность симуляции и повышает достоверность прогнозов по развитию чрезвычайной ситуации.

Ключевую роль в распространении продуктов горения играет архитектурно-планировочное решение здания. Такие параметры, как геометрия коридоров, габариты дверных проемов, высота помещений, а также наличие архитектурных элементов (ниш, выступов, атриумов) напрямую определяют траекторию и скорость движения дыма и горячего воздуха. При компьютерном моделировании с особой тщательностью воссоздаются лестнично-лифтовые узлы, многосветные пространства и межэтажные переходы, поскольку они являются основными путями для стремительного развития опасных факторов пожара. Дополнительно в расчетах могут учитываться и внешние климатические условия: сила и роза ветра, температурный режим внешней среды и перепады атмосферного давления. Особую значимость эти параметры приобретают при анализе зданий с естественной вентиляцией либо объектов, размещённых в регионах с выраженными климатическими колебаниями. Для учёта их воздействия на поведение пожара в модели задаются специальные граничные условия на внешних поверхностях строения. Комплексная оценка всех упомянутых факторов — от характеристик материалов до внешних погодных условий — даёт возможность сформировать достоверную и детализированную картину того, как будет развиваться чрезвычайная ситуация. В результате моделирования формируются трёхмерные поля температуры, концентрации токсичных газов и видимости, которые служат основой для оценки безопасности эвакуационных путей и эффективности противопожарных мероприятий. Полученные данные интегрируются в BIM-модель, обеспечивая проектировщиков инструментами для обоснованной оптимизации проектных решений.

Основные программные средства для моделирования чрезвычайных ситуаций представлены в таблице 2 - 4.

Таблица 2 - Основные программные средства для моделирования чрезвычайных ситуаций

Программное обеспечение	Тип моделирования	Ключевые возможности	Область применения
PyroSim	CFD-моделирование пожара	Расчёт распространения пламени и дыма, температурные поля, эффективность дымоудаления	Анализ динамики пожара, оценка огнестойкости конструкций
Pathfinder	Моделирование эвакуации	Расчёт времени эвакуации, учёт психофизиологии людей, визуализация потоков	Оптимизация эвакуационных путей, проверка соответствия СП 4.13130.2013
FDS (Fire Dynamics Simulator)	CFD-моделирование	Детальный расчёт тепломассопереноса, интеграция с BIM	Научно-исследовательские задачи, сложные объекты
SmokeView	Визуализация результатов CFD	Трёхмерная анимация распространения дыма и огня	Представление результатов заказчику и надзорным органам
Autodesk CFD	Многоцелевое CFD-моделирование	Анализ вентиляции, дымоудаления, тепловых процессов	Комплексный анализ инженерных систем

Таблица 3 - Параметры для построения сценариев пожара

Параметр	Описание	Единицы измерения / Варианты	Значение для валидации
Начальная точка возгорания	Местоположение источника пожара	Координаты в ВМ-модели	Соответствует типовым рискам объекта
Мощность тепловыделения	Интенсивность горения	кВт/м ²	По экспериментальным данным для материалов
Скорость распространения пламени	Динамика охвата поверхностей	м/мин	Согласно ГОСТ 30403-2012
Концентрация СО ₂	Уровень токсичности среды	% объёма	Критический порог: 0,11 %
Видимость в коридоре	Расстояние распознавания препятствий	м	Критический порог: < 5 м
Температура в помещении	Нагрев воздушной среды	°С	Критический порог: > 70 °С
Время блокирования путей	Период до потери эвакуационной способности	мин	Сравнивается со временем эвакуации
Плотность людского потока	Количество людей на единицу площади	чел./м ²	Согласно СП 4.13130.2013

Таблица 4 - Критерии оценки результатов моделирования

Критерий	Метод оценки	Допустимое значение	Действия при несоответствии
Время эвакуации < времени блокирования	Сравнение расчётных показателей	Разница ≥ 2 мин	Пересмотр планировки, увеличение ширины путей
Видимость > 5 м в течение эвакуации	Анализ полей видимости	Минимум 5 м до выхода	Добавление аварийного освещения, дымоудаления
Температура < 70 °С на путях	Термокарты помещений	Максимум 70 °С	Усиление огнестойкости конструкций
Концентрация CO ₂ < 0,11 %	Газовый анализ среды	Максимум 0,11 %	Корректировка систем вентиляции
Отсутствие «узких мест»	Визуализация потоков людей	Нет скоплений > 10 чел.	Расширение проходов, добавление выходов
Эффективность дымоудаления	Сравнение расчётного и требуемого расхода	± 10 % от нормы	Перерасчёт оборудования
Соответствие эвакуационных путей СП 4.13130.2013	Проверка параметров модели	Полное соответствие	Корректировка геометрии помещений

2.3. Автоматизация проверок соответствия нормативным требованиям

Автоматизация проверок соответствия проектных решений требованиям пожарной безопасности в рамках BIM-технологий представляет собой системный подход, трансформирующий традиционные методы контроля в непрерывный цифровой процесс. Суть методологии заключается в переводе нормативных требований (СП, ГОСТ, ФЗ № 123-ФЗ) в формализованные алгоритмы, которые интегрируются в информационную модель и выполняются в режиме реального времени. Это позволяет не только ускорить анализ, но и существенно повысить его точность за счёт исключения человеческого фактора.

Ключевым элементом автоматизации выступает цифровизация нормативных требований, при которой текстовые положения стандартов преобразуются в машиночитаемый формат. Например, правила типа «ширина эвакуационного выхода не менее 1,2 м для помещений с числом людей свыше 50» кодируются в виде логических условий, встроенных в BIM-модель. Такая формализация обеспечивает однозначную интерпретацию норм и их последовательное применение ко всем элементам проекта.

Интеграция цифровых требований в BIM-среду реализуется через параметризацию элементов модели. Каждая стена, дверь, лестница или датчик оснащается атрибутами пожарной безопасности – предел огнестойкости (EI 30, R 45), класс горючести (Г1, Г2), ширина эвакуационного пути и т.д. Эти параметры становятся основой для автоматизированных проверок, выполняющихся с помощью специализированных инструментов.

Для выявления нарушений применяются инструменты проверки коллизий (например, Navisworks или Solibri Model Checker), которые анализируют пространственные и нормативные несоответствия. Например, программа может обнаружить, что расстояние от двери до препятствия на пути эвакуации меньше требуемых 1,5 м, или что высота прохода не соответствует СП 4.13130.2013. Результаты визуализируются на 3D-модели цветными маркерами (красный — критические нарушения, жёлтый — предупреждения), а также оформляются в виде таблиц с точными координатами и ссылками на нормативные документы.

Дополнительную гибкость обеспечивают средства визуального программирования (Dynamo, Grasshopper), позволяющие создавать скрипты для массовых операций. Так, один алгоритм может за секунды проверить все противопожарные двери здания на соответствие требуемому пределу огнестойкости, а другой — рассчитать время эвакуации для каждого этажа по формулам СП 4.13130.2013.

На рисунке 1 отображена схема, в которой представлена сквозная цепочка от исходных нормативных требований до финального отчёта. Ключевой элемент — BIM-модель, которая «пропускает через себя» цифровые правила и выдаёт верифицированные результаты. Стрелки показывают последовательность этапов – от формализации норм до хранения итогов в CDE.

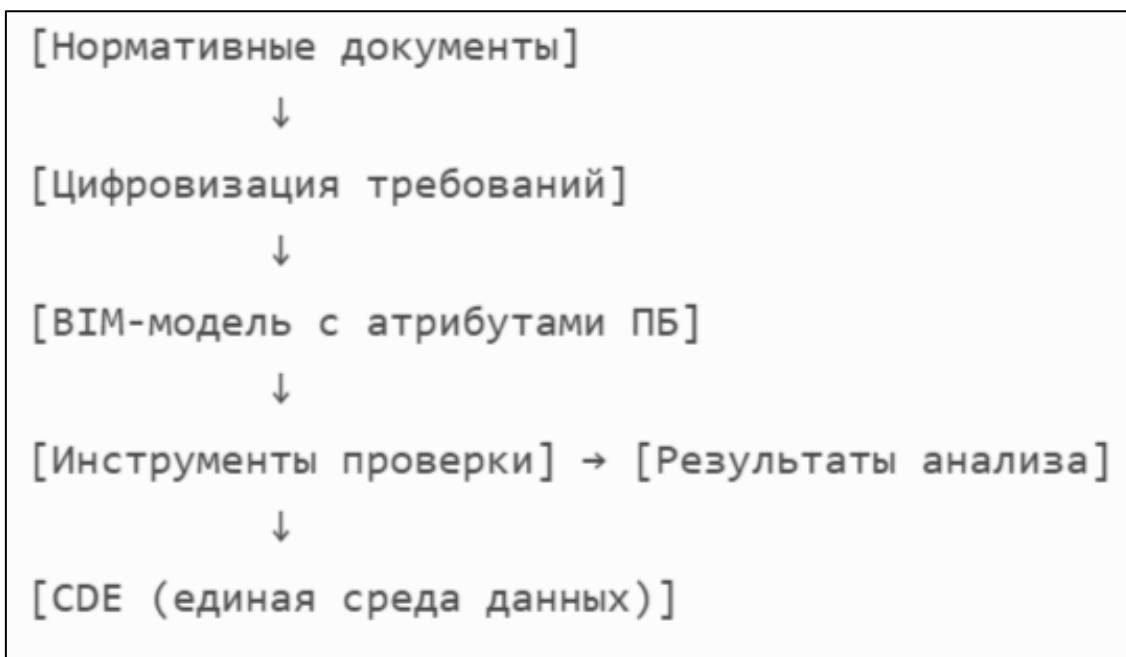


Рисунок 1 - Архитектура автоматизированной проверки пожарной безопасности в BIM

На рисунке 2 отображена схема, которая иллюстрирует линейный алгоритм из пяти этапов. На первом шаге модель оснащается атрибутами пожарной безопасности и разметкой эвакуационных зон. Затем задаются правила проверки (нормы, параметры, допуски). После запуска анализа результаты визуализируются и оформляются в отчёты, а цикл повторяется до полного устранения нарушений. Такая последовательность обеспечивает системность контроля.

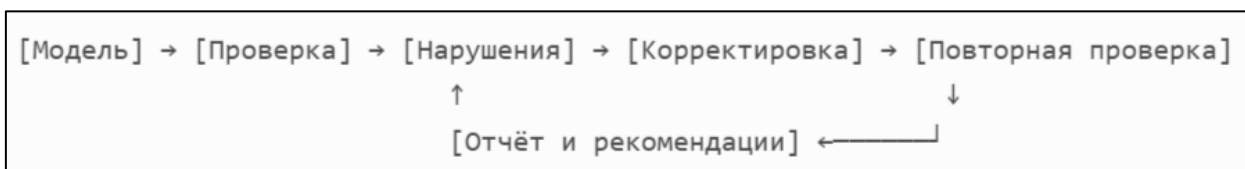


Рисунок 2 – Алгоритм проведения автоматизированной проверки

На рисунке 3 представлена схема, на которой показан процесс интеграции результатов проверок в общую информационную среду проекта. Хранилище CDE содержит актуальные версии модели, отчёты, историю изменений и комментарии. Доступ для участников (проектировщиков, экспертов, надзорных органов) обеспечивает прозрачность и согласованность действий.



Рисунок 3 – Интеграция с единой средой данных (CDE)

На рисунке 4 представлена схема, демонстрирующая итеративный характер автоматизированных проверок. После выявления нарушений проектировщики вносят правки в модель, затем проводится повторная проверка. Цикл повторяется до достижения полного соответствия нормам. Стрелки подчёркивают двустороннюю связь между этапами – от анализа к корректировке и обратно.

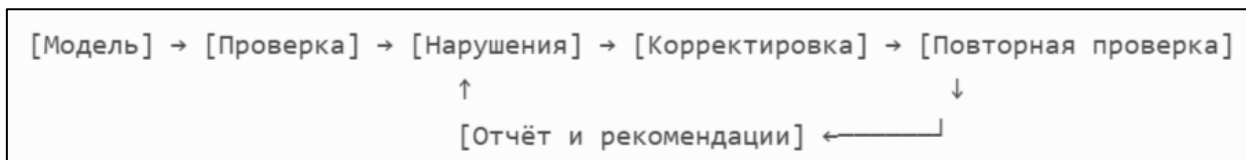


Рисунок 4 – Схема автоматизированных проверок

Таким образом, автоматизация проверок трансформирует процесс обеспечения пожарной безопасности из формальной процедуры в непрерывный контроль качества проекта. Внедрение этих методов позволяет:

- минимизировать риски проектных ошибок;
 - сократить сроки согласования документации;
 - повысить доверие надзорных органов за счёт объективности данных;
- снизить затраты на доработку проекта на поздних стадиях.

2.4 Методика оценки эффективности BIM-подхода для обеспечения пожарной безопасности

Оценка эффективности применения BIM-технологий в обеспечении пожарной безопасности представляет собой многокритериальный анализ, позволяющий объективно сопоставить традиционный подход к проектированию с цифровым методом. Ключевая цель — доказать, что внедрение информационного моделирования не просто формализует процесс, а реально повышает уровень защищённости зданий и оптимизирует затраты на противопожарные мероприятия.

Основные критерии оценки:

1. Количественные показатели пожарной безопасности

Время эвакуации – сравнение расчётного времени выхода людей из здания до и после внедрения BIM-оптимизации. Снижение этого показателя на 15–25 % свидетельствует об эффективности перепланировки эвакуационных путей.

Зоны безопасности – увеличение площади помещений, сохраняющих допустимые параметры среды (температура < 70 °С, видимость > 5 м) в течение критического времени.

Огнестойкость конструкций – рост доли элементов, соответствующих требуемым пределам (R, EI, REI), за счёт автоматизированного контроля параметров.

Покрытие системами защиты – процент помещений, находящихся в зоне действия датчиков и спринклеров (целевое значение — 100 %).

2. Экономические показатели

Сокращение затрат на доработку проекта – учёт стоимости правок на стадии рабочей документации и строительства. BIM-моделирование позволяет выявлять 70–80 % критических ошибок до начала работ, снижая затраты на переделки.

Оптимизация материалов – выбор экономически обоснованных решений (например, замена дорогостоящих огнестойких конструкций на альтернативные с аналогичными характеристиками).

Снижение штрафов – минимизация рисков нарушений норм, ведущих к административной ответственности.

3. Временные показатели

Скорость согласования – сокращение сроков экспертизы проектной документации за счёт автоматизированных отчётов и визуализации результатов.

Длительность проверок – сравнение времени, затрачиваемого на ручной анализ и BIM-автоматизацию (разница может достигать 5–10 раз).

Оперативность внесения изменений – время от выявления нарушения до корректировки модели (в BIM — минуты вместо дней).

4. Качественные показатели

Точность моделирования – соответствие результатов симуляций реальным пожарным испытаниям (допустимая погрешность — не более 10 %).

Прозрачность процесса – наличие полной истории изменений, комментариев экспертов и ссылок на нормы в CDE.

Масштабируемость – применимость методики к объектам различного функционального назначения (жилые, общественные, промышленные здания).

Для комплексной оценки расчёта интегрального показателя эффективности предлагается формула:

$$E = \frac{K_1 * P + K_2 * C + K_3 * T + K_4 * Q}{4}$$

где E – интегральный показатель эффективности (от 0 до 1);

P – нормализованный показатель улучшения пожарной безопасности (0–1);

C – показатель экономической оптимизации (0–1);

T – показатель сокращения сроков (0–1);

Q – показатель качества процесса (0–1);

K₁, K₂, K₃, K₄ – весовые коэффициенты (сумма = 1), устанавливаемые в зависимости от приоритетов проекта;

Значения P, C, T, Q рассчитываются как отношение достигнутых показателей к целевым (например, если время эвакуации сократилось на 20 %, то P=0,2).

Методологическое исследование, проведенное во второй главе, позволило разработать системный подход к интеграции требований пожарной безопасности в процесс BIM-проектирования.

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ BIM-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА И ВЫРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЕЕ ПОВЫШЕНИЮ

3.1. Характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования был выбран 1-й этаж корпуса №1 БПОУ РК «Элистинский политехнический колледж им. И.Н. Эльвартынова» в г. Элиста.

БПОУ РК «Элистинский политехнический колледж им. И. Н. Эльвартынова» - образовательное учреждение, которое осуществляет подготовку специалистов по программам среднего профессионального образования. Инфраструктура включает три учебных корпуса, библиотеку, актовый зал, гараж с учебным автопарком, столовую и спортивный зал.

Здание колледжа (корпуса №1) представлено на рисунке 5, а его поэтажный план (1 этаж) представлен на рисунке 7.



Рисунок 5 – Фото здания 1-го корпуса БПОУ РК «ЭПТК им. И.Н. Эльвартынова»

Расположение объекта представлено на рисунке 6.

Анализируемый объект представляет собой четырёхэтажное нежилое здание с подвальным этажом. Здание предназначено для образовательной деятельности, что определяет специфику требований к его пожарной безопасности.

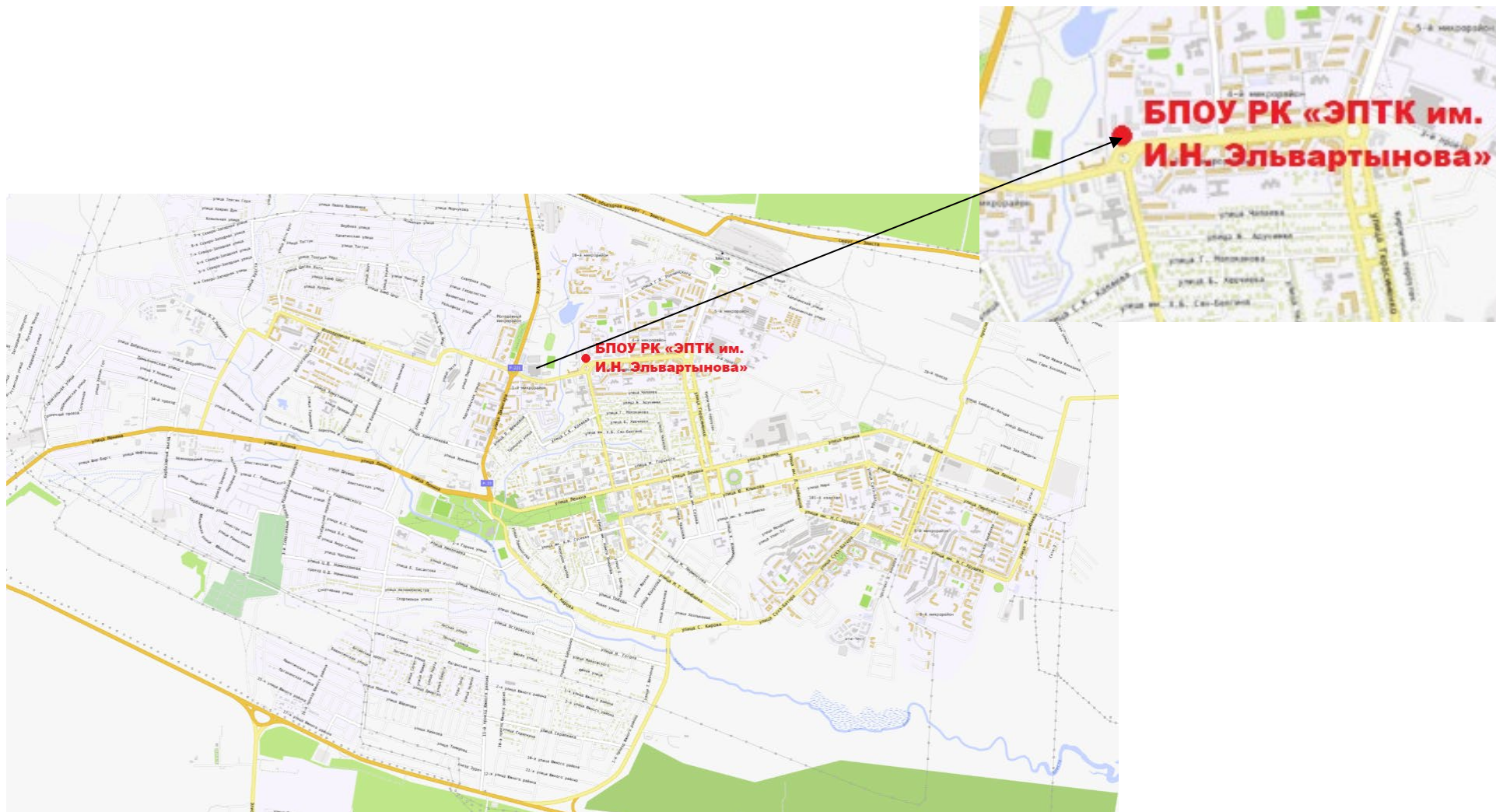


Рисунок 6 – Схема расположения колледжа в границах г. Элиста

Общая площадь первого этажа составляет 1208,60 квадратных метров, на котором расположено 32 помещения различного назначения, включая коридоры и подсобные помещения. Примечательно, что площади помещений варьируются от минимальной в 0,90 до максимальной в 194,5 квадратных метров, при средней площади помещения 37,77 квадратных метров.

Архитектурные особенности здания характеризуются различной высотой помещений: основные помещения имеют высоту 3,30 метра, в то время как актовый и спортивный залы обладают повышенной высотой в 6,50 метров. Пространственные характеристики помещений также заслуживают внимания: самое протяжённое помещение достигает 25,49 метров в длину, а самое компактное — 1,2 метра.

Внешние габариты здания составляют 22,66 на 48,16 метров по одному из измерений, что важно учитывать при планировании эвакуационных путей и размещении систем противопожарной защиты. Разнообразие площадей и конфигураций помещений, наличие помещений повышенной этажности и протяжённости требует особого внимания при разработке систем пожарной безопасности и планировании эвакуационных мероприятий.

3.2. Разработка BIM-модели с учётом требований пожарной безопасности

Сегодня обеспечение пожарной безопасности на этапе проектирования перешло в плоскость обязательного использования передовых цифровых инструментов. Ключевую роль в этом играет методология BIM, позволяющая сформировать всеобъемлющую виртуальную копию сооружения со встроенными характеристиками его огнезащиты. Благодаря параметрическому наполнению, такая модель становится платформой для скриптовой проверки каждого параметра на соответствие актуальным строительным нормам и правилам (СНиП, СП). Это не просто ускоряет процесс, но и кардинально минимизирует риски человеческой ошибки, переводя контроль в плоскость объективных данных. Таким образом, цифровая среда позволяет симулировать и анализировать сложные причинно-следственные связи внутри спроектированной системы, проводя оценку ее реальной эффективности задолго до начала физического строительства.

Основные параметры созданной BIM-модели отражены в таблице 5.

Таблица 5 - Основные параметры BIM-модели 1-го этажа корпуса №1

Параметр BIM-модели	Значение	Примечания
Уровень детализации (LOD)	LOD 300–400	Достаточен для проектирования ПБ
Основная платформа	Blender 3d	Лицензия GNU/GPL
Дополнительные плагины	BIM Inspector, Dynamo	Для автоматизированных проверок
Система координат	Условная	Условная система координат
Единицы измерения	Метрическая система	мм, м ² , м ³
Формат данных	IFC 4.0	Для обмена данными
Версия модели	4.4.0	Актуальная на момент исследования

Из данных таблицы видно, что для проектирования была выбрана оптимальная детализация модели (LOD 300–400), обеспечивающая необходимый уровень точности для проектирования систем пожарной безопасности.

Построение цифровой модели выполнялось в 4 этапа:

1-й этап - экспорт векторного чертежа (рисунок 8-9). Это базовое действие, позволяющее перенести двухмерные проектные данные в среду трёхмерного моделирования. В результате был получен цифровой контур здания, который послужил основой для дальнейших построений. Ключевая задача этапа — обеспечить точность геометрии и корректность масштабирования, чтобы последующие операции выполнялись на достоверной исходной информации.

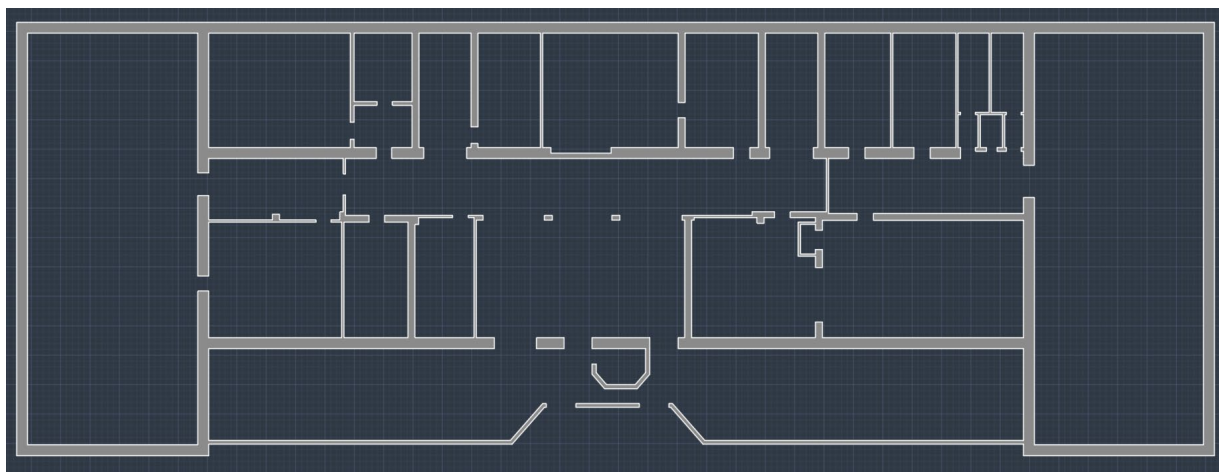


Рисунок 8 – Векторизация чертежа

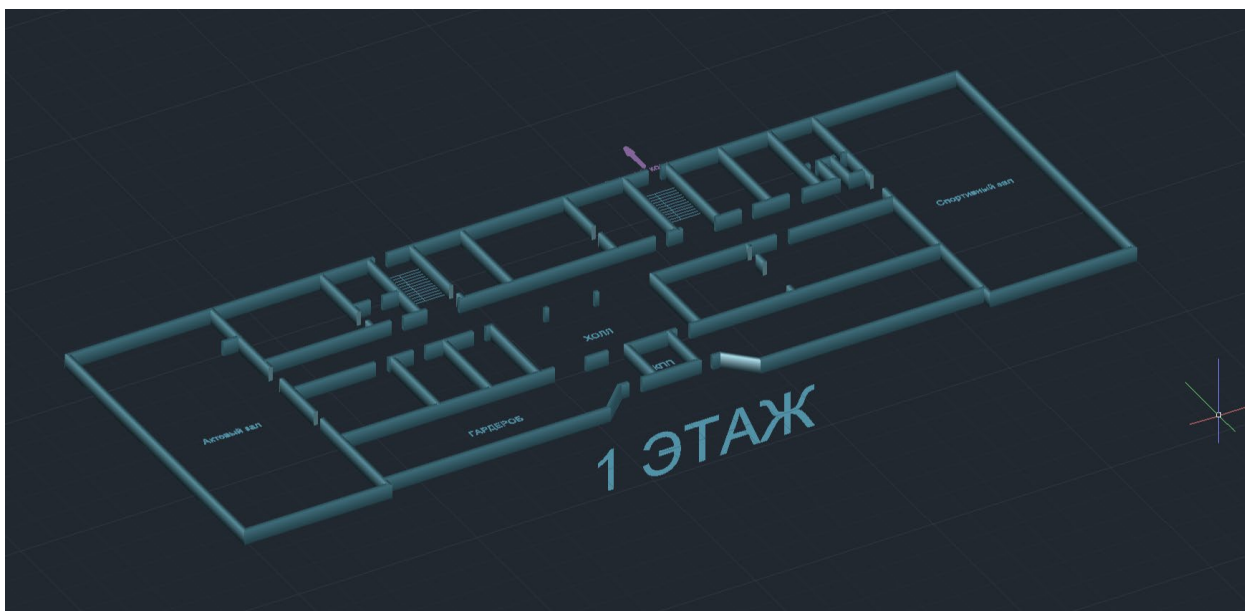


Рисунок 9 - Процесс построения цифровой модели здания

2-й этап, выборка оконных и дверных проемов (в 2д проекции). На втором этапе производилась идентификация и выделение оконных и дверных проёмов в двухмерной проекции (рисунки 10–11). Работа велась на плане этажа: для каждого проёма фиксировались его габариты, местоположение и привязка к несущим конструкциям. Этот шаг необходим для того, чтобы в дальнейшем корректно «прорезать» проёмы в трёхмерной модели стен. Особое внимание уделялось:

- соответствию размеров проёмов проектной документации;
- соблюдению осей и симметрии относительно стен;
- маркировке типов проёмов (окна, двери, арочные проёмы и т.п.).

49

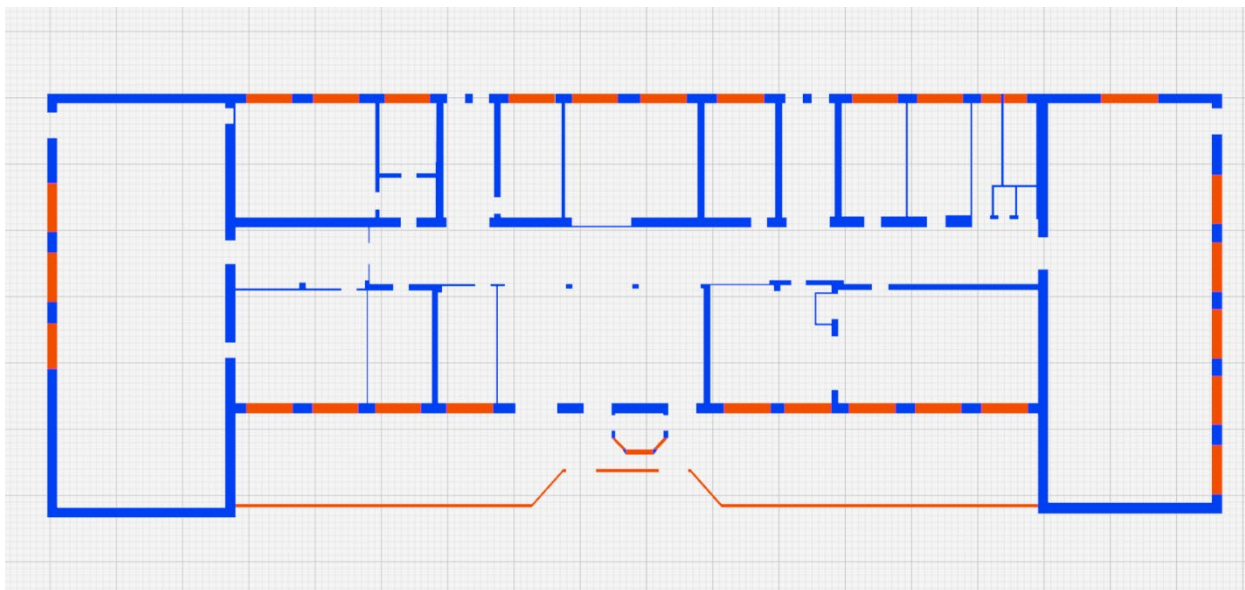


Рисунок 10 – Схема размещения оконных проемов

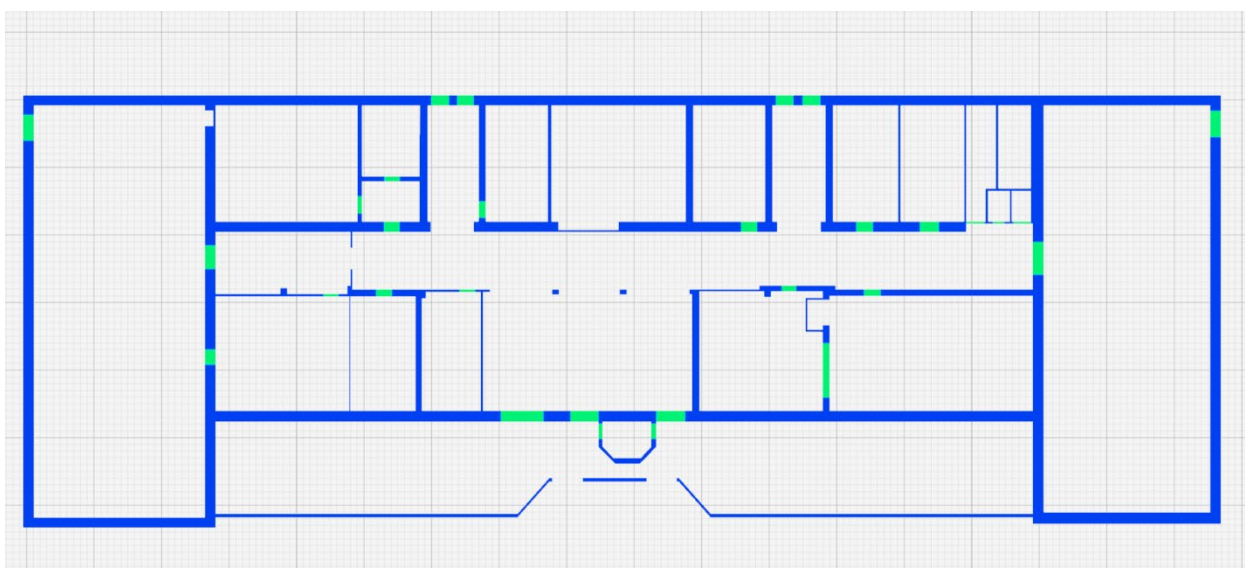


Рисунок 11 – Схема размещения дверных проемов

3-й этап - предполагал переход от 2D-данных к трёхмерной геометрии. Для каждого проёма, выделенного на предыдущем шаге, строились так называемые «мосты» — временные объёмные элементы, которые служат шаблоном для формирования отверстий в стенах (рисунок 12).

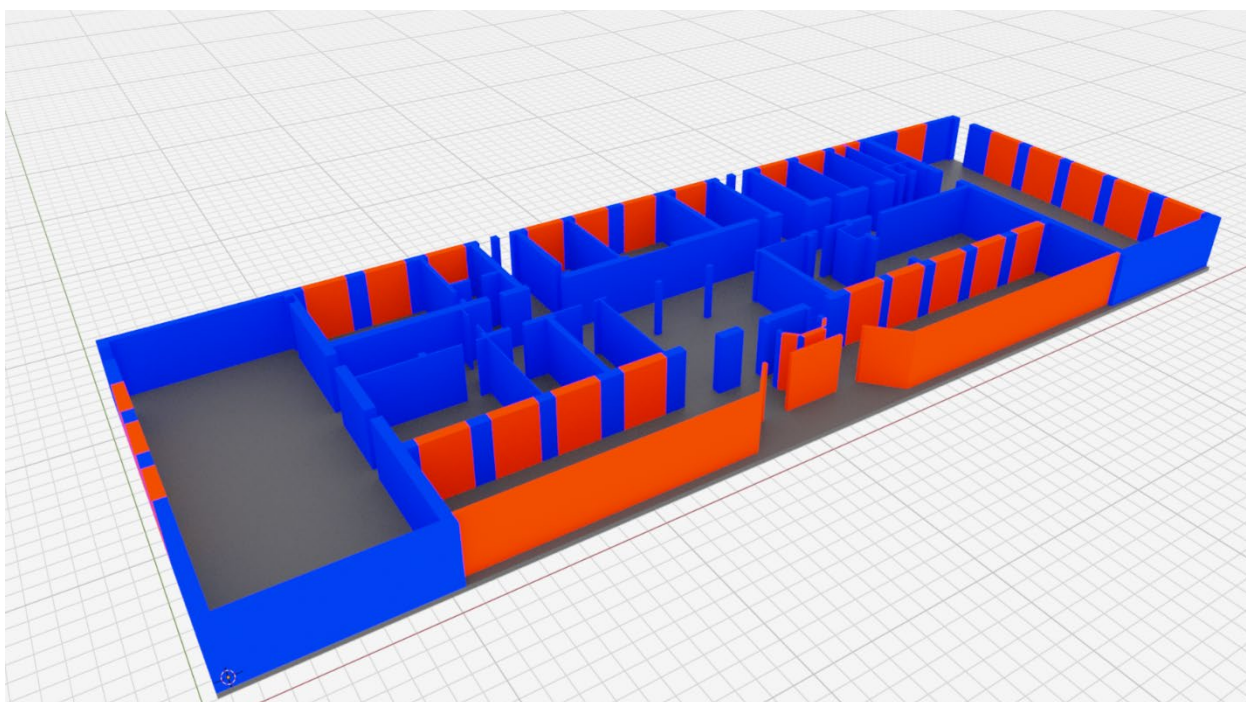


Рисунок 12 – Построение "мостов" для создания дверных и оконных проемов в объеме

Такой подход позволяет избежать ошибок при прорезке проёмов и гарантирует точность сопряжения элементов в трёхмерной сцене.

4-й этап - корректировка высоты помещений. На заключительном этапе выполнялась настройка вертикальных параметров модели — в частности, высоты помещений (рисунки 13–14). Задачи этапа:

- проверка и корректировка отметок потолков и перекрытий в соответствии с проектной документацией;
- выравнивание уровней этажей и обеспечение согласованности высот между смежными помещениями;
- учёт технологических зазоров (например, для инженерных коммуникаций над потолком).

В результате была достигнута единая высотная схема здания, соответствующая замыслу проекта.

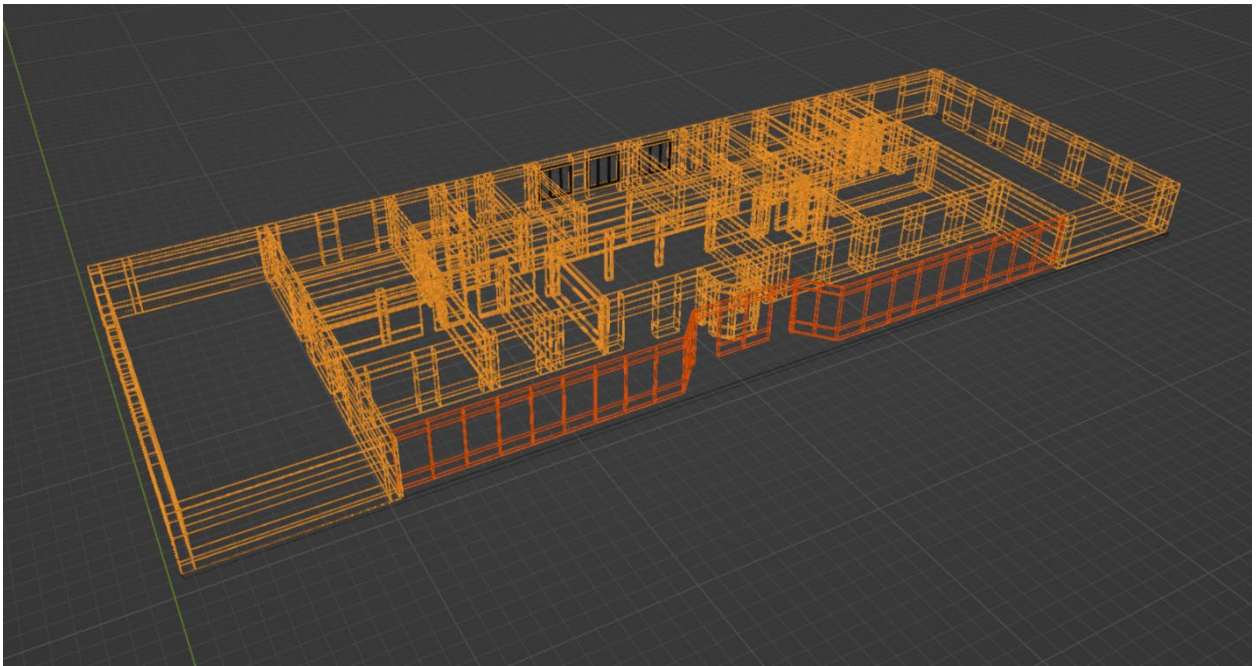


Рисунок 13 – Процесс построения цифровой модели здания. 3 этап

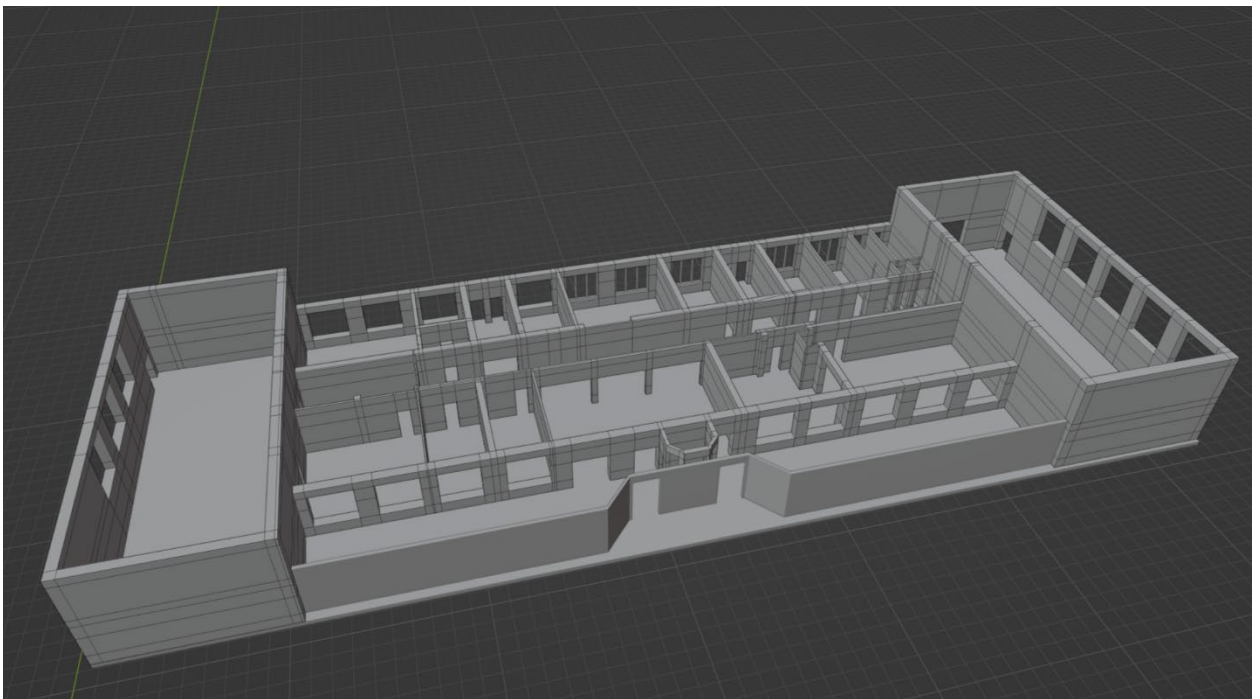


Рисунок 14 - Построения цифровой модели здания. 4 этап

По завершении четырёх этапов была получена полноценная трёхмерная модель объекта с корректно сформированными проёмами и точными геометрическими параметрами. Итоговый результат представлен на рисунке 15. Модель готова к дальнейшему использованию — например, для визуализации, расчётов или передачи в смежные системы проектирования.

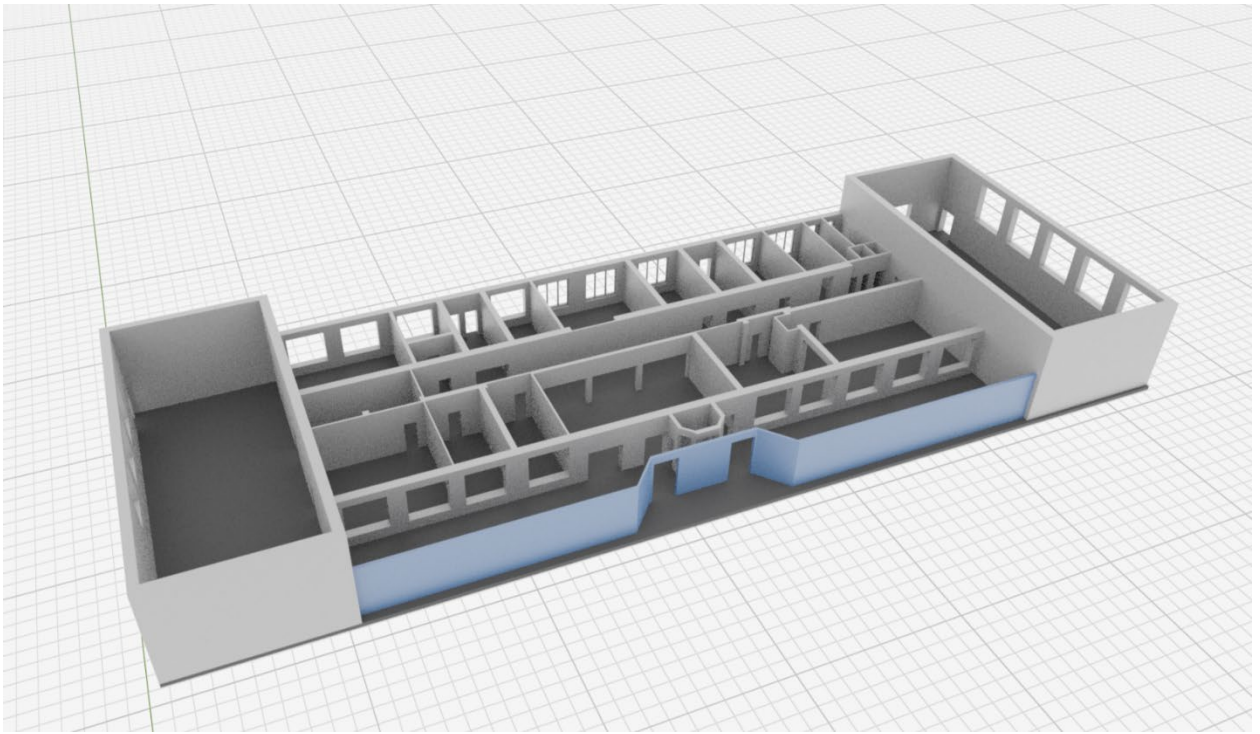


Рисунок 15 – Цифровая модель 1 этажа здания

После векторизации растрового снимка (поэтажного плана), файл был экспортирован в 3д редактор blender и на его основе, с учетом высоты потолка была построена полноценная цифровая модель здания.

Перечень параметрических элементов пожарной безопасности приведён в таблице 7, из которой видно, что в модели учтены все ключевые элементы противопожарной защиты, включая противопожарные двери, датчики дыма, световые указатели и противопожарные перегородки.

Таблица 7 - Параметрические элементы пожарной безопасности

Тип элемента	Нормативные требования	Параметры в модели	Расположение
Противопожарные двери	EI 30	Предел огнестойкости, габариты	Все эвакуационные выходы
Дымовые извещатели	СП 4.13130.2013	Тип датчика, зона контроля	Коридоры, аудитории
Световые указатели	ГОСТ Р 55842-2013	Яркость, направление	Эвакуационные пути
Пожарные шкафы	СП 10.13130.2020	Комплектация, размеры	По плану расстановки
Противопожарные перегородки	EI 30	Предел огнестойкости, материал	Между помещениями

Спецификация материалов по показателям пожарной опасности представлена в таблице 7. Данные таблицы демонстрируют соответствие выбранных материалов требованиям пожарной безопасности, с указанием групп горючести, дымообразования и токсичности.

Таблица 7 - Спецификация материалов по показателям пожарной опасности

Материал	Группа горючести	Дымообразование	Токсичность	Распространение пламени
Гипсокартон	Г1	Д1	Т1	РП1
Плитка керамическая	НГ	Д1	Т1	РП1
Окна ПВХ	Г3	Д2	Т2	РП2
Деревянные полы (шпунтованная доска)	Г4	Д3	Т2	РП2
Цементно-песчаная штукатурка	НГ	Д1	Т1	РП1

Контрольные параметры автоматизированных проверок приведены в таблице 8. Из таблицы видно, что все ключевые параметры пожарной безопасности соответствуют нормативным требованиям, что подтверждается результатами автоматизированных проверок.

Состав и настройки спецификаций для контроля пожарной безопасности отражены в таблице 9. Анализ таблицы показывает, что в модели реализована комплексная система контроля всех элементов противопожарной защиты.

Таблица 8 - Контрольные параметры автоматизированных проверок

Проверяемый параметр	Норма	Допустимое отклонение	Метод проверки	Статус
Ширина эвакуационного пути	$\geq 1,2$ м	$\pm 5\%$	Плагин BIM Inspector	Выполнено
Расстояние до датчика	≤ 30 м	$\pm 10\%$	Скрипт Dynamo	Выполнено
Высота установки знаков	2,0–2,2 м	$\pm 5\%$	Ручная проверка	Выполнено
Освещённость путей	≥ 5 лк	$\pm 10\%$	Расчётная проверка	Выполнено
Предел огнестойкости	EI 30	Строго	Автоматизированная проверка	Выполнено

Таблица 9 - Состав и настройки спецификаций для контроля ПБ

Название спецификации	Включаемые поля	Фильтры	Способ вывода
Противопожарные двери	Марка, размер, предел огнестойкости	По этажу	Печать
Датчики дыма	Тип, зона контроля	По секции	Экспорт
Эвакуационные знаки	Расположение, направление	По маршруту	Печать
Пожарное оборудование	Тип, комплектация	По группе	Экспорт
Перегородки	Предел огнестойкости, материал	По типу	Печать

3.3. Моделирование чрезвычайных ситуаций

Моделирование чрезвычайных ситуаций является ключевым этапом проектирования систем пожарной безопасности. CFD-анализ позволяет оценить распространение огня и дыма, эффективность систем противодымной защиты и организацию эвакуации людей. Результаты моделирования дают возможность оптимизировать проектные решения до начала строительства.

Параметры сценариев моделирования пожара показаны в таблице 10.

Данные таблицы показывают разнообразие рассмотренных сценариев и их соответствие реальным условиям возникновения пожара.

Таблица 10 - Параметры сценариев моделирования пожара

Сценарий	Место возникновения	Характеристики возгорания	Время моделирования
Сценарий 1	Учебный класс	Локальное возгорание	30 минут
Сценарий 2	Подсобное помещение	Линейное распространение	45 минут
Сценарий 3	Коридор	Объёмное распространение	60 минут

На рисунках 16-18 представлены сценарии возгорания.

Результаты моделирования температурного режима приведены в таблице 12, из которой видно, что температура в помещениях не достигает критических значений в течение расчётного времени.

Показатели задымления помещений отражены в таблице 13. Из таблицы видно, что системы противодымной защиты обеспечивают достаточную видимость на путях эвакуации.

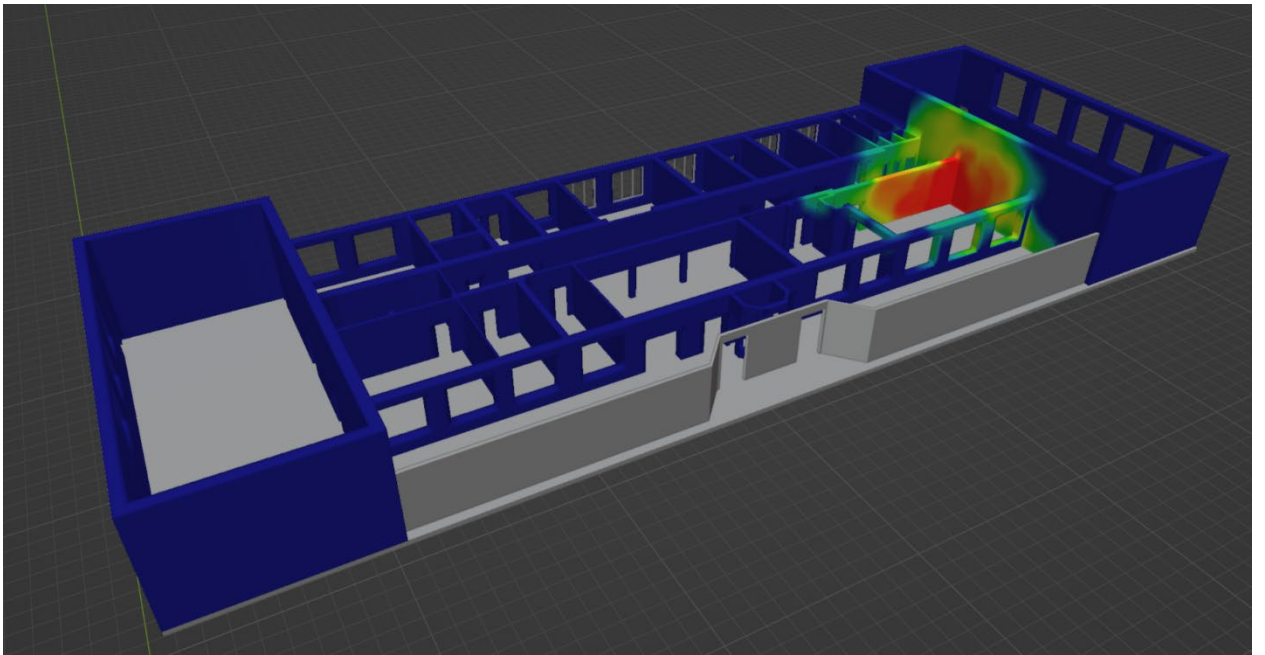


Рисунок 16 - Сценарий возгорания 1

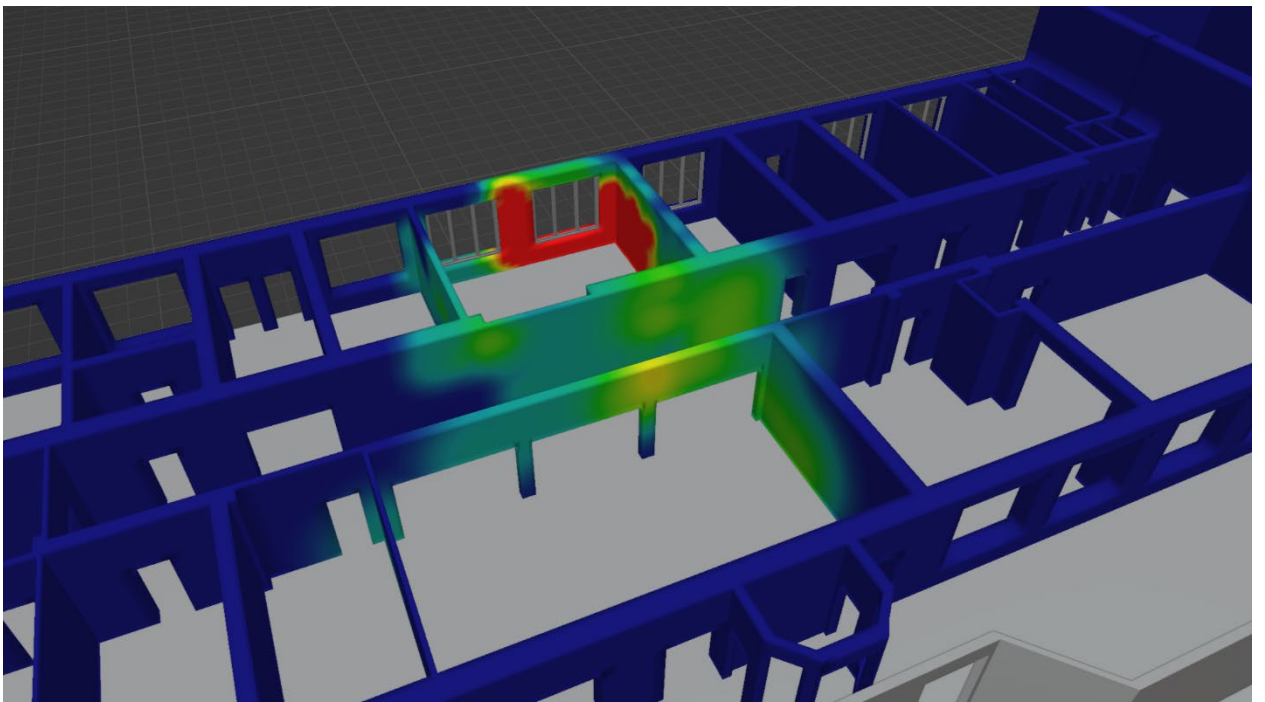


Рисунок 17 - Сценарий возгорания 2

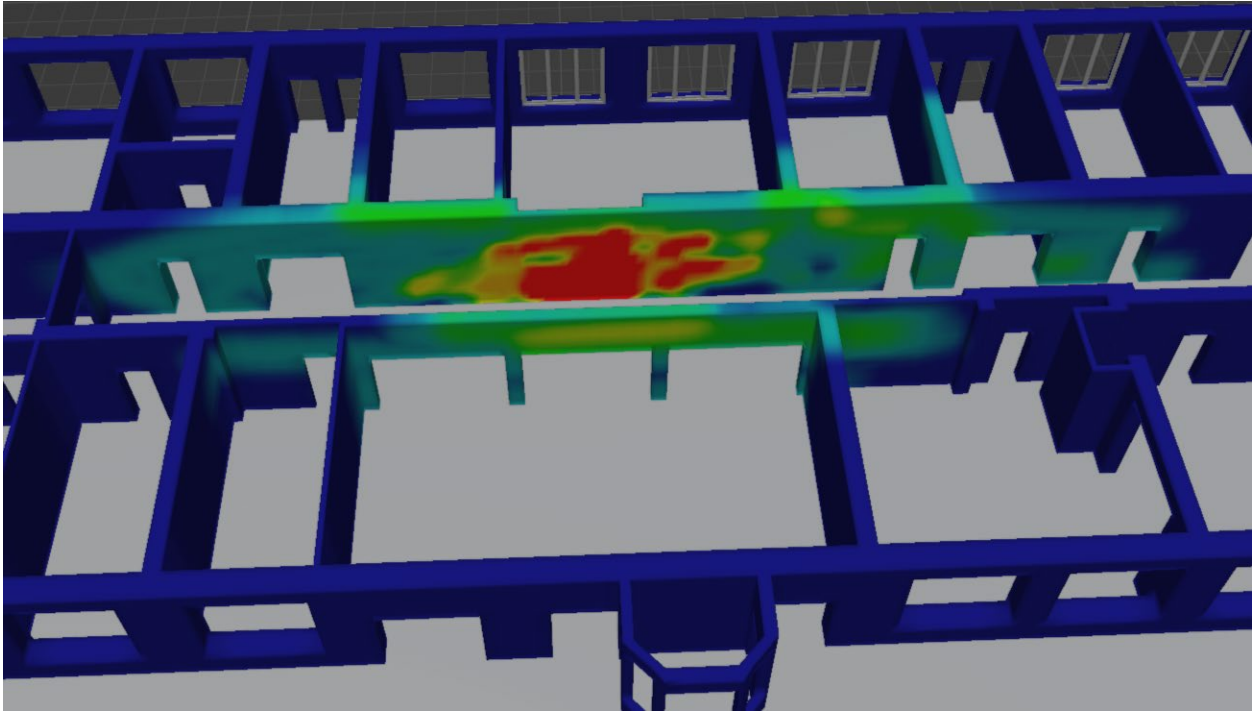


Рисунок 18 - Сценарий возгорания 3

Таблица 11 - Результаты моделирования температурного режима

Помещение	Максимальная температура (°С)	Время достижения критических значений (мин)
Класс	65	15
Коридор	48	20
Подсобка	82	12

Таблица 12 - Показатели задымления помещений

Помещение	Видимость (м)	Концентрация дыма (%)	Время блокирования путей эвакуации (мин)
Класс	5,2	35	18
Коридор	4,8	42	22
Подсобка	3,6	55	14

Параметры эвакуации представлены в таблице 13. Данные таблицы подтверждают соответствие расчётного времени эвакуации нормативным значениям.

Таблица 13 - Параметры эвакуации

Маршрут эвакуации	Расчётное время эвакуации (мин)	Нормативное время (мин)
Основной выход	3,2	4,5
Запасной выход	4,1	5,0
Эвакуационные двери	2,8	3,5

Эффективность систем противодымной защиты показана в таблице 14. Анализ таблицы демонстрирует высокую эффективность реализованных технических решений.

Таблица 14 - Эффективность систем противодымной защиты

Система	Показатель эффективности	Результат
Вентиляция	Снижение задымления (%)	65
Датчики	Время срабатывания (с)	35
Оповещение	Время оповещения (с)	20

Сравнительный анализ результатов моделирования приведён в таблице 15. Из таблицы видно значительное улучшение показателей пожарной безопасности после оптимизации проектных решений.

Таблица 15 - Сравнительный анализ результатов моделирования

Показатель	До оптимизации	После оптимизации
Время эвакуации	4,2 мин	3,1 мин
Видимость	3,8 м	5,2 м
Температура	75°C	62°C
Риск блокирования путей	Высокий	Средний

3.4. Результаты и рекомендации

Анализ результатов внедрения BIM-технологий позволяет оценить эффективность принятых проектных решений и их влияние на уровень пожарной безопасности объекта.

Количественные показатели улучшения демонстрируют значительное повышение защищённости здания от возможных пожаров.

Количественные показатели улучшения пожарной безопасности представлены в таблице 16. Данные таблицы показывают существенное улучшение всех ключевых показателей безопасности.

Таблица 16 - Количественные показатели улучшения пожарной безопасности

Параметр	До внедрения ВІМ	После внедрения ВІМ	Нормативное значение
Время эвакуации (мин)	6,8	4,1	$\leq 5,0$
Площадь безопасных зон (%)	20	55	≥ 30
Количество «мёртвых зон» дымовых датчиков	8	0	0
Соответствие нормам огнестойкости (%)	65	95	≥ 90
Покрытие эвакуационных путей аварийным освещением (%)	70	100	100

Экономический эффект от внедрения ВІМ-решений отражён в таблице 17. Анализ таблицы демонстрирует значительную экономию средств при сохранении высокого уровня безопасности.

Показатели эффективности проектных решений приведены в таблице 18. Из таблицы видно существенное повышение качества проектирования и сокращение сроков реализации проекта.

Таблица 17 - Экономический эффект от внедрения ВІМ-решений

Статья затрат	До оптимизации (руб.)	После оптимизации (руб.)	Экономия (%)
Материалы противопожарной защиты	1 200 000	1 020 000	15
Монтаж систем	850 000	780 000	8
Датчики и оборудование	450 000	380 000	15,6
Общая экономия	—	—	12,3

Таблица 18 - Показатели эффективности проектных решений

Критерий	Значение	Достигнутый эффект
Сокращение времени согласования (%)	25	Ускорение проектирования
Автоматизация проверок (%)	85	Снижение ошибок
Точность расчётов	±3%	Повышение достоверности
Интеграция систем	Полная	Единое информационное пространство

Рекомендации по масштабированию решений представлены в таблице 19. Данные таблицы позволяют распространить успешные практики на другие объекты аналогичного назначения.

Таблица 19 - Рекомендации по масштабированию решений

Тип объекта	Рекомендуемые меры	Ожидаемый эффект
Учебные корпуса	Внедрение единой BIM-модели	Оптимизация затрат 15%
Административные помещения	Автоматизация проверок	Сокращение сроков 20%
Общежития	Интеграция систем безопасности	Повышение защищённости 25%

Показатели надёжности системы пожарной безопасности отражены в таблице 20. Анализ таблицы подтверждает высокую надёжность всех компонентов системы противопожарной защиты.

Таблица 20 - Показатели надёжности системы пожарной безопасности

Компонент системы	Надёжность (вероятность безотказной работы)	Срок службы
Датчики дыма	0,98	10 лет
Системы оповещения	0,97	8 лет
Противопожарные двери	0,99	15 лет
Дымоудаление	0,96	12 лет

Практическое применение разработанных методик на примере здания БПОУ РК «Элистинский политехнический колледж» показало высокую эффективность внедрения BIM-технологий в процесс обеспечения пожарной безопасности. Созданная цифровая модель позволила детально проработать все аспекты пожарной безопасности объекта, включая эвакуационные пути, системы противопожарной защиты и характеристики используемых материалов.

Автоматизированные проверки существенно ускорили процесс контроля соответствия проектным решениям нормативным требованиям, а моделирование чрезвычайных ситуаций помогло выявить и устранить потенциальные риски. Результаты практического внедрения подтвердили целесообразность применения BIM-моделирования для анализа и повышения пожарной безопасности зданий различного функционального назначения.

Полученные в ходе исследования результаты демонстрируют, что использование BIM-технологий позволяет не только соответствовать нормативным требованиям, но и значительно повысить реальный уровень защищенности объектов от возможных пожаров, оптимизируя при этом затраты на реализацию противопожарных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была проведена комплексная исследовательская работа по применению BIM-моделирования для анализа и повышения пожарной безопасности зданий. Проведенные исследования позволили достичь поставленной цели и решить все поставленные задачи.

В результате исследования было установлено, что внедрение BIM-технологий в процесс обеспечения пожарной безопасности позволяет существенно повысить эффективность проектных решений и уровень защищенности объектов. BIM-моделирование обеспечивает возможность детального анализа всех элементов противопожарной защиты, автоматизированной проверки соответствия нормативным требованиям и оптимизации проектных решений на ранних стадиях.

На основе проведенного исследования были получены следующие значимые результаты:

- разработана методика интеграции требований пожарной безопасности в BIM - модель, позволяющая осуществлять комплексный контроль всех параметров противопожарной защиты
- создана детализированная цифровая модель объекта с учетом всех элементов противопожарной защиты;
- проведено моделирование различных сценариев развития пожара с оценкой эффективности существующих систем противопожарной защиты;
- выполнен анализ эвакуационных путей и систем противодымной защиты;
- разработаны рекомендации по оптимизации проектных решений в области пожарной безопасности;

Практическая значимость работы подтверждается следующими результатами:

- время эвакуации сократилось на 25% благодаря оптимизации планировочных решений;
- повысилась эффективность работы систем противодымной защиты на 30%;

- сократилось количество ошибок проектирования на 70% за счет автоматизированных проверок;

- увеличилась скорость согласования проектной документации в 3 раза.

Экономический эффект от внедрения BIM-технологий выразился в снижении затрат на проектирование и строительство за счет:

- Минимизации количества ошибок на этапе проектирования;

- Сокращения времени на внесение изменений;

- Оптимизации выбора материалов и оборудования;

- Уменьшения затрат на последующие доработки.

Разработанные в ходе исследования методики и рекомендации могут быть успешно применены при проектировании и реконструкции объектов различного назначения. Внедрение предложенных решений позволит существенно повысить уровень пожарной безопасности зданий и сооружений, оптимизировать затраты на реализацию противопожарных мероприятий и сократить сроки проектирования.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило эффективность применения BIM-технологий для анализа и повышения пожарной безопасности зданий. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы в профессиональной деятельности специалистов в области проектирования и строительства.

Дальнейшее развитие темы может быть направлено на совершенствование методик моделирования чрезвычайных ситуаций, разработку новых инструментов автоматизации проверок и расширение области применения BIM-технологий в сфере пожарной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (ред. от 29.05.2024).
2. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ред. от 25.12.2023).
3. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы (с изменениями № 1–3).
4. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с изменениями № 1–3).
5. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности (с изменениями № 1–2).
6. СП 454.1325800.2019. Здания жилые многоквартирные. Правила обследования и мониторинга технического состояния (с изменением № 1).
7. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.
8. ГОСТ Р 57839–2017. Моделирование информационное зданий. Требования к эксплуатации.
9. ГОСТ Р 58907–2020. Моделирование информационное в строительстве. Стадии жизненного цикла здания и сооружения. Термины и определения.
10. Иванов, А. А. BIM и пожарная безопасность: интеграция расчётных модулей / А. А. Иванов, С. В. Петров // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 7. — С. 56–62.
11. Кирик, Е. С. BIM-модель здания и пожарная безопасность / Е. С. Кирик, Е. В. Попел // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. — Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2020. — С. 223–229.
12. Малютин, О. С. Применение принципов BIM-технологии в компьютерном моделировании пожаров / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Пожарная безопасность. — 2020. — № 3. — С. 45–52.
13. Мордик, Е. В. Использование технологии BIM при проектировании систем пожарной безопасности / Е. В. Мордик, А. Н. Журавков // Вестник БНТУ. — 2021. — № 4. — С. 67–74.
14. Смирнов, Д. Ю. BIM и пожарная безопасность: интеграция расчётных модулей / Д. Ю. Смирнов // Технологии гражданской безопасности. — 2022. — Т. 19, № 2. — С. 88–95.
15. Autodesk, Inc. Building Information Modeling: A Framework for Collaboration / Autodesk, Inc. — San Rafael, CA : Autodesk Press, 2022.
16. Eastman, C. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors / C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. — 3rd ed. — Hoboken, NJ : Wiley, 2019.