

*На правах рукописи*



**НАМ Галина Евгеньевна**

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА  
НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

2.10.3 Безопасность труда

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»).

Научный руководитель:

**Горбунова Ольга Владимировна**

кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

**Евтушенко Александр Иванович**

доктор технических наук (2.10.3), доцент, декан факультета «Промышленного и гражданского строительства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону;

**Шарманов Владимир Владимирович**

кандидат технических наук (05.26.01), начальник продуктивно-методологического отдела управления по инновациям и развитию продукта АО «ГК «Эталон», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород.

Защита состоится «29» января 2026 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.272.02 при ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» и на сайте <https://voenmeh.ru/nauka/dissertaczionnye-sovety/dissertaczionnyj-sovet-24-2-272-02/>

Автореферат разослан «28» ноября 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



В. К. Васильева

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Сегодня цифровая трансформация является неотъемлемой частью всех отраслей как во всем мире, так и Российской Федерации. В свете формирования стратегий и программ по цифровой трансформации в строительной отрасли наблюдается растущая тенденция к исследованиям и применению инновационных подходов.

В соответствии с изменениями статьи 48 Градостроительного Кодекса РФ начался ускоренный переход на работу в цифровой среде. Следующим шагом, для решения проблем в строительной отрасли, стала подготовка новой Стратегии «Агрессивное развитие инфраструктуры» РФ до 2030 года. Основная цель Стратегии заключается в создании необходимых условий для устойчивого социально-экономического развития страны путем внедрения современных инструментов и средств технического регулирования. Другими словами, Стратегия направлена на достижение национальных целей и задач, установленных Президентом РФ, используя инновационные решения.

По данным Роструда в 2023 году в результате несчастных случаев на производстве пострадало 3543 человек с тяжелыми последствиями и 1609 человек со смертельным исходом. 15,6% несчастных случаев с тяжелыми последствиями и 20% со смертельным исходом произошли в строительной отрасли.

Несмотря на предпринимаемые меры по повышению безопасности труда, строительная отрасль по-прежнему сталкивается с проблемами управления, связанными с неэффективностью мониторинга и контроля за условиями безопасности труда без соответствующей технологической поддержки.

На сегодняшний день использование технологий информационного моделирования (далее – ТИМ) в вопросах безопасности труда ограничивается статичной документацией, занесенной в информационную модель, которая, в процессе строительства объекта, частично или полностью устаревает. В дальнейшем использование такой информации приводит к несчастным случаям, авариям и инцидентам. Поэтому с помощью таких технологий, как цифровой двойник (далее – ЦД), возможно реализовать весь потенциал инженерно-технических данных объекта строительства, постоянно обновлять цифровой контекст, используя обмен данными в реальном времени, что позволит своевременно распознавать опасности и даст время на реализацию превентивных мероприятий.

Современные технологии информационного моделирования позволяют выполнить компоновку и проектирование строительных объектов в объемном виде с учетом всех ограничений и требований производственного процесса, а также требований безопасности. С их помощью можно создавать проектную модель той или иной установки и правильно размещать на ней технологические и технические компоненты без противоречий и коллизий.

В настоящее время результаты такого контроля достигаются на основе ручного труда, который является субъективным, недостоверным из-за квалификации специалиста и требующим значительных временных затрат.

**Степень разработанности темы исследования.** Сегодня ведутся активные исследования в вопросах интеграции ТИМ и безопасности труда, результаты которых рассмотрены в работах отечественных авторов В. В. Шарманова, М. А. Романович, Т. Л. Симанкиной, А. А. Агапова, В. Г. Веселкова, Р. С. Пярина, В. В. Зиновьева, С. Ю. Неклюдова, Н. А. Поляковой, Е. В. Троценко.

Зарубежные исследования в области применения ТИМ в обеспечении безопасности труда представлены в работах R. Oliveira Rey, D. Jones, C. Snider, Z. Liu, K. Xie, A. E. Oke и др.

Исследования и разработки авторов внесли большой вклад в развитие и совершенствование организации безопасного труда в строительной отрасли. Однако до сих пор не существует единой концепции интеграции СУОТ в процессе строительства с применением ТИМ. Повышение эффективности функционирования СУОТ является необходимостью в современном мире, что определило выбор темы, формулировку цели и задач диссертационного исследования.

**Научная гипотеза исследования** заключается в том, что внедрение технологий информационного моделирования на основе двойника служит основой для создания превентивной цифровой системы контроля безопасности труда для снижения времени реагирования на отклонения значений безопасности труда от допустимых и, как следствие, травматизма на строительной площадке.

**Цель исследования** обоснование применения ТИМ для создания цифровой системы контроля безопасности труда на строительной площадке и предупредительной (превентивной) сигнализации об опасностях.

Поставленная цель определила необходимость решения следующих **задач**:

1. Выбор и обоснование критериев для оценки уровня безопасности труда на строительной площадке.
2. Разработка математической модели системы информационной поддержки принятия решений для контроля безопасности труда на строительной площадке с учетом динамики производства работ.
3. Разработка алгоритма функционирования цифровой системы контроля безопасности труда на строительной площадке.
4. Обоснование применения цифрового двойника объекта строительства в целях создания предупредительной (превентивной) сигнализации об опасностях.
5. Оценка экономического обоснования эффективности и предотвращения ущерба от внедрения разработанной цифровой системы контроля безопасности труда с применением ТИМ.

### **Научная новизна исследования:**

1. Разработана математическая модель, демонстрирующая возможность принятия мер по опережающему управлению уровнем безопасности объекта.
2. Обосновано внедрение коэффициента опережающего предотвращения рисков ( $K_{опр}$ ) в качестве показателя обеспечения безопасности труда на строительной площадке.
3. Разработан алгоритм функционирования цифровой системы контроля безопасности труда на строительной площадке.
4. Обоснована концепция применения цифрового двойника объекта строительства для организации системы контроля безопасности труда.

### **Теоретическая значимость работы** заключается в:

- комплексном подходе оценки безопасности труда на строительной площадке на основе построенной математической модели для создания системы информационной поддержки принятия решений;
- создание теоретической основы для интеграции ТИМ в систему контроля безопасности труда.

### **Практическая значимость работы** заключается в:

- разработке математической модели для системы информационной поддержки принятия решений в управлении безопасностью труда на объекте строительства;
- разработке алгоритма функционирования цифровой системы контроля безопасности труда с применением цифрового двойника для объекта строительства.

**Объектом исследования** является система контроля безопасности труда для объектов гражданского строительства.

**Предметом исследования** является организация цифровой системы контроля безопасности труда с применением ТИМ для сигнализации об опасностях на строительной площадке.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности 2.10.3 – Безопасность труда в части пунктов:

- «Разработка методов и систем контроля, оценки и нормирования опасных и вредных факторов производства, автоматизированных систем сигнализации об опасностях»;
- «Оценка эффективности функционирования систем управления охраной труда на предприятиях и разработка научно обоснованных подходов для ее повышения, создание информационных систем для автоматизации задач обеспечения безопасности труда».

**Методология и методы исследования** базируются на научных и исследовательских трудах отечественных и зарубежных авторов в области безопасности строительного производства и охраны труда. В исследовании применялись методы научного поиска, методы моделирования, теория вероятности и теория нечетких множеств.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель системы информационной поддержки принятия решений для контроля безопасности труда на строительной площадке;
- алгоритм функционирования цифровой системы контроля безопасности труда с применением цифрового двойника объекта строительства;
- концепция применения цифрового двойника объекта строительства для организации системы контроля безопасности труда.

**Обоснованность и достоверность результатов исследований** основывается на анализе существующих подходов контроля за уровнем безопасности труда в строительной отрасли с применением информационных технологий. Теоретические результаты разработанного алгоритма функционирования системы контроля на основе ТИМ подтверждены апробацией на строительной площадке и показали, что время реагирования на проявления опасных и вредных факторов производства существенно сократилось, тем самым, позволяет осуществлять превентивные мероприятия.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты научно-квалификационной работы были доложены на следующих научно-практических конференциях: III Международная, IV Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Безопасность в строительстве» (СПбГАСУ, 2017, 2019); III Всероссийская конференция молодых ученых «ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА» (Севастополь, 2018); IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы охраны труда» (СПбГАСУ, 2018); 73-я, 75-я, 76-я научные конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета (СПбГАСУ, 2017, 2019, 2023), XII Международная конференция «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» (СПбГАСУ, 2020), Всероссийская научно-практическая конференция «BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры» (СПбГАСУ, 2018), II и III Международные научно-практические конференции «BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры» (СПбГАСУ, 2019, 2020), Всероссийский инженерный конкурс (НИЯУ МИФИ, 2022), Национальная (всероссийская) научно-практическая конференция «Инженерные системы и городское хозяйство» (СПбГАСУ, 2023), Грант на выполнение научно-исследовательских работ НПР СПбГАСУ (СПбГАСУ, 2023, 2024), LXXVII, LXXVIII Международная научно-практическая конференция «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика» (СПбГАСУ, 2023, 2024), III Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства» (СПбГАСУ, 2025).

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертационной работы представлены в 9 статьях, опубликованных в научных журналах и сборниках трудов конференций, в том числе в 7 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендуемых ВАК.

**Личный вклад автора** состоит в определении целей и задач исследования, анализе современных исследований применения ТИМ в вопросах охраны труда в строительстве, разработке математической модели оценивания состояния системы контроля для создания условий эффективного и безопасного труда, создании рекомендаций быстрого реагирования для снижения негативных последствий на строительной площадке, анализе результатов внедрения цифровой системы контроля на основе применения ЦД.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, списка использованной литературы из 128 наименований, содержит 30 рисунков, 9 таблицы и изложена на 136 страницах машинописного текста, в том числе приложения на 4 страницах.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**Во введении** обоснована актуальность, сформулированы задачи применения ТИМ для создания цифровой системы контроля безопасности труда на строительной площадке и предупредительной (превентивной) сигнализации об опасностях, определены цель, объект и предмет исследования, изложена методология исследования, указаны теоретическая значимость и прикладная ценность полученных результатов, приведены основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** произведён анализ современной системы контроля за состоянием условий труда в строительной отрасли России и Запада. В процессе анализа было установлено, что эффективность системы обеспечения безопасности остается на низком уровне.

Проанализированы действующие методы контроля безопасности труда, которые не справляются с уникальностью строительства из-за комплекса строительных работ, состоящих из большого количества технологических процессов в меняющихся условиях и интенсивного использования машин, оборудования и инструментов. В процессе анализа определены следующие причины неэффективности системы контроля:

1) Традиционное планирование безопасности основывается на частых ручных наблюдениях, является трудоемким процессом, требует много времени и, следовательно, крайне неэффективно. Поскольку такой подход основан лишь на опыте, получаемые результаты часто ошибочны из-за субъективных суждений лиц, принимающих решения.

2) Подходы к управлению безопасностью с использованием запаздывающих индикаторов.

3) Использование устаревших методов, основанных на традиционных инструктажах, обучении и неполном перечне идентифицированных опасностях.

4) Слабая и несвоевременная коммуникация между структурными организациями, такими как строительные заказчики, проектировщики и подрядчики, и, следовательно, слабая культура безопасности в организации.

5) Современное применения ТИМ в безопасности труда представляет собой в основном электронный документооборот.

На основании выявленных недостатков для улучшения системы контроля безопасности труда следует отметить важность применения ТИМ, т. к. по сравнению с ручным процессом необходимы более интеллектуальные подходы для обеспечения своевременного реагирования и предотвращения несчастных случаев.

Проанализированы актуальные разработки применения ТИМ в вопросах повышения уровня безопасности в строительстве (рис. 1).

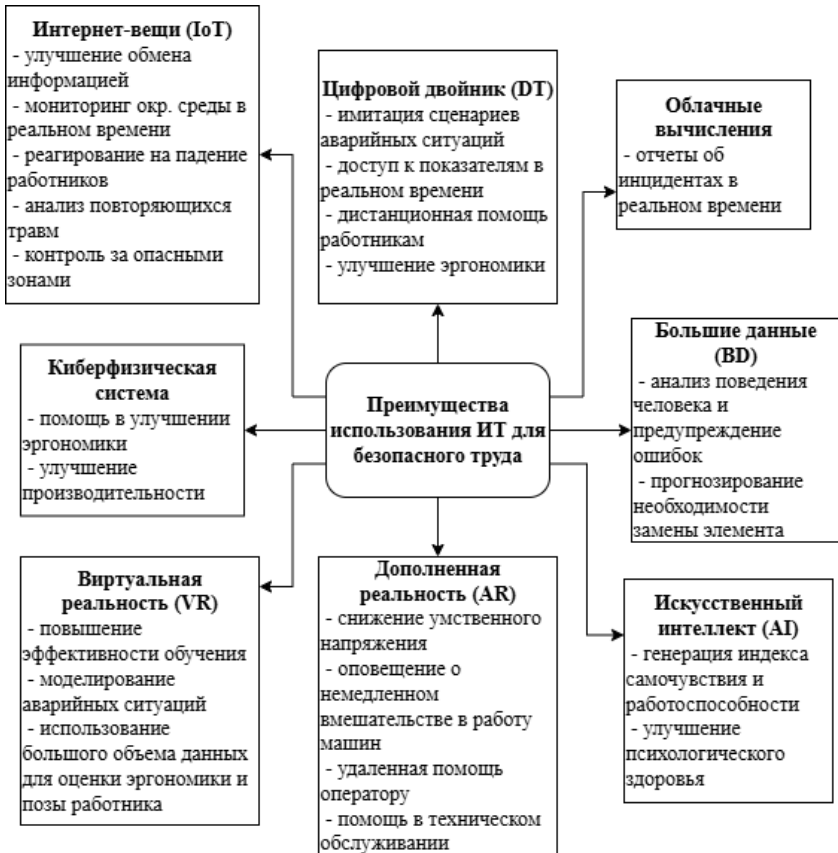


Рисунок 1 – Разработки в области безопасности труда с применением ТИМ



Вопрос обеспечения безопасности с помощью стандартной системы контроля рассматривается по частям, а не комплексно. Отсутствие оперативного отслеживания ситуации на строительной площадке с постоянно меняющимися факторами производственной среды не может работать на предупреждение. Такой подход не позволит полностью снизить риски. Эта проблема создает трудности для персонала по вопросам обеспечения безопасности при анализе «что, когда, почему и где» необходимы те или иные меры безопасности.

**Вторая глава** посвящена созданию и теоретическому исследованию возможностей цифровой системы контроля безопасности труда, выбору и обоснованию критериев оценки уровня безопасности труда, разработке математической модели системы информационной поддержки принятия решений.

Под цифровой системой контроля безопасности труда понимается механизм контроля, основанный на цифровых технологиях, направленный на сбор, анализ, оценку уровня безопасности труда на строительной площадке в режиме реального времени и предупредительные действия по повышению уровня безопасности до нормативных значений.

При разработке цифровой системы контроля безопасности труда возникает вопрос выбора критериев для оценки уровня безопасности на строительной площадке. Поэтому для обнаружения нарушений и предотвращения несчастных случаев при строительстве зданий на основе нормативно-правовых актов и проектной документации конкретного объекта строительства выделены и предложены шесть критериев для оценки уровня безопасности труда (рис. 2):

- 1) фактическое состояние рабочего места;
- 2) персонал;
- 3) фактическое состояние строительной площадки;
- 4) машины и оборудование;
- 5) средства защиты;
- 6) опасные виды работ.

В эти шесть критериев включены, в общей сложности, 35 факторов, детализирующих будущую модель.

Каждый критерий содержит ряд факторов, детализирующих будущую модель для более точной оценки состояния уровня безопасности.

Отклонение каждого критерия от требований нормативных документов представлен в виде «дерева отказов». Метод «дерево отказов», позволяющий проводить качественный и количественный анализ сложных систем на основе причинно-следственной связью отказов системы, ее составных частей, элементов и других событий, порождающих отказ. Для описания сложной системы следует разбить ее на подсистемы и создать «дерево отказов» для каждой подсистемы. Пример части «дерева отказов» критерия «Машины и оборудования» представлен на рисунке 3.

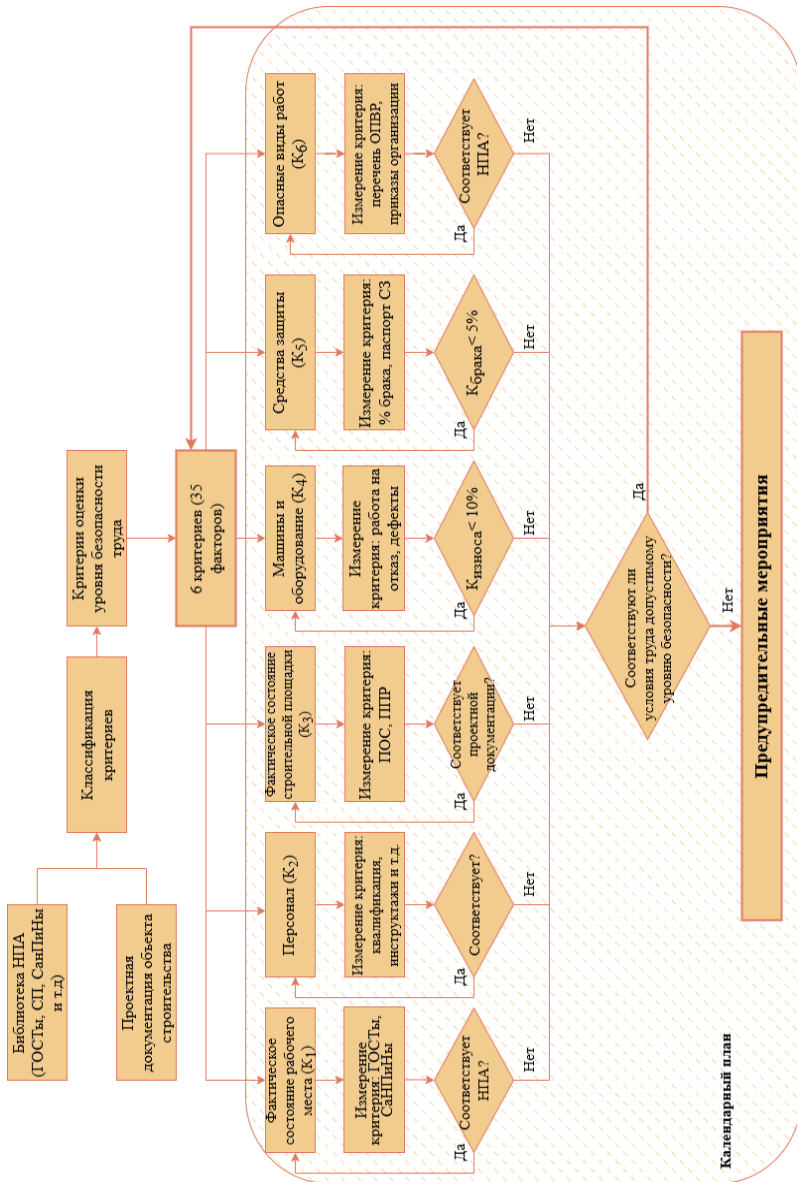


Рисунок 2 – Блок-схема критериев для оценки уровня безопасности труда на строительной площадке

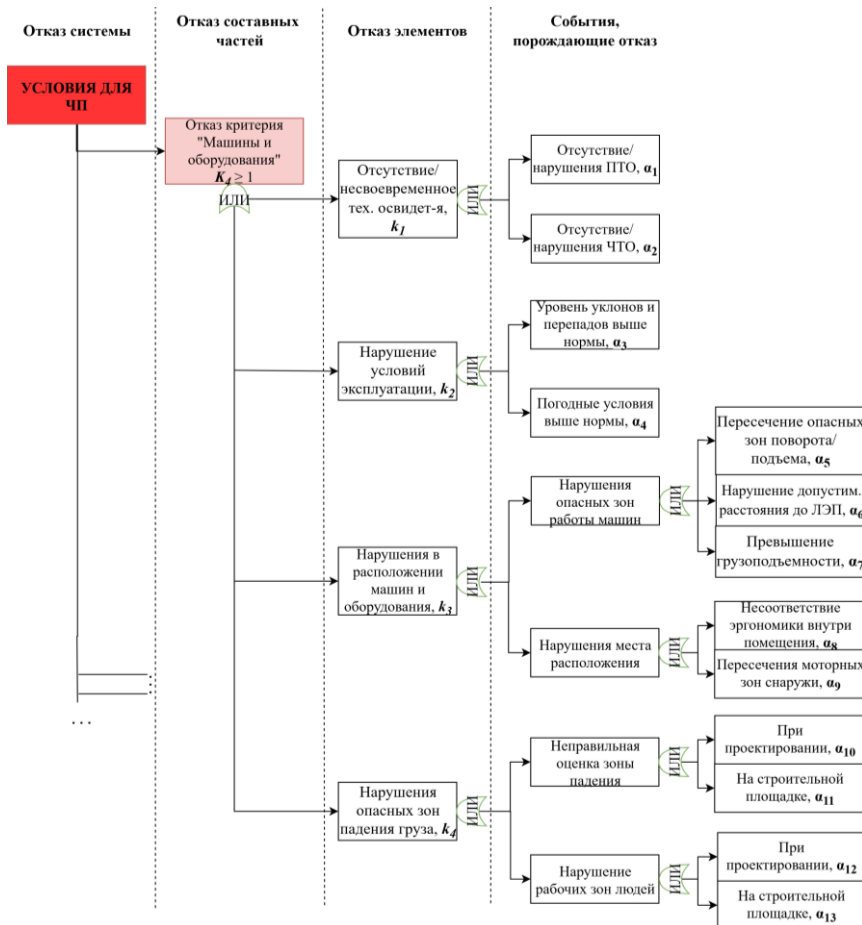


Рисунок 3 – «Дерево отказов» критерия «Машины и оборудования»

При возникновении предаварийного состояния одного или нескольких составных частей системы контроля безопасности труда строительства появляется необходимость в кратчайшее время разработать единое скоординированное решение с целью обеспечения необходимого уровня безопасности лиц, находящихся на территории строительной площадки, а также сохранения сроков выполнения календарного плана работ и поддержания бесперебойной работы технологических и организационных процессов. Другими словами, следует принимать все процессы на строительной площадке как единую человеко-машинную систему.

На основе вышеперечисленных требований разработана математическая модель системы информационной поддержки принятия решений для контроля безопасности труда на строительной площадке. В основе модели лежит теория марковских процессов, которая, с точки зрения возможностей анализа сложных систем, является наиболее подходящей.

Предложена усовершенствованная модель на основе полумарковских процессов, которая предполагает возможность превентивного вмешательства в процесс на переходной и предаварийной стадиях путем опережающего проведения комплекса соответствующих мероприятий по улучшению негативных показателей (улучшению состояния процесса). Другими словами, усовершенствованная модель представляет собой систему информационной поддержки принятия решений для предотвращения развития негативных событий на объекте строительства, т.к. решение о превентивном вмешательстве в процесс определяется лицом, принимающим решение (далее – ЛПР) (рис. 4).

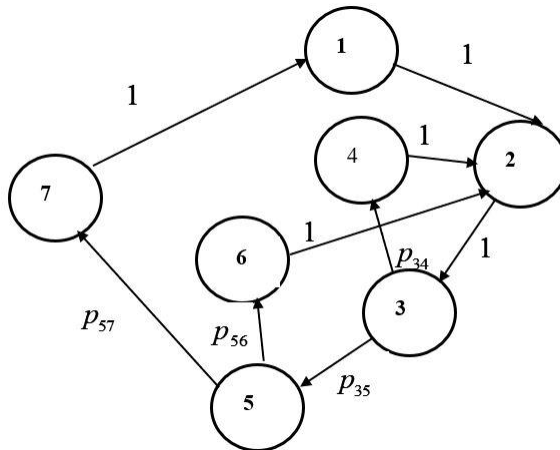


Рисунок 4 – Граф состояний объекта и вероятности переходов

На рисунке 4 показано:

1 состояние – идеальное, негативные факторы отсутствуют, условия обеспечения безопасности труда соблюдены, контролируемые показатели –  $K_{i-n}$  производственной среды находятся в допустимых пределах, установленных в нормативных правовых актах.

2 состояние – допустимое, негативные факторы присутствуют, но находятся в пределах нормативных значений, осуществляется контроль параметров  $K_{i-n}$  производственных процессов с фиксацией времени пребывания в данном состоянии.

3 состояние – переходное, негативные факторы присутствуют и переходят границу допустимых значений, незначительно превышая установленные пределы, на заданный интервал отклонений. Система информационной поддержки управления фиксирует время и/или скорость начала изменений контролируемых параметров из переходного 3 в 4 состояние (дополнительное), сообщая информацию об угрозе несчастного случая через систему оповещения.

4 состояние – дополнительное, в котором происходит применение мероприятий по снижению уровня опасных и вредных факторов до допустимого состояния 2. Переход из состояния 3 в 4 является управлением процессами обеспечения безопасности труда на объекте и, поэтому, должен быть регламентирован соответствующим образом (правилами, инструкциями и др.).

5 состояние – предаварийное, негативные факторы значительно превышают пределы допустимых величин на установленную заданную величину отклонения. Система информационной поддержки управления подает сигнал об угрозе жизни и здоровью работника, и выдает рекомендации, например, осуществить остановку процесса выполнения работ.

6 состояние – дополнительное, в котором происходит применение рекомендаций и мер по снижению уровня опасных и вредных факторов до допустимого состояния 2. Переход в состояние 7 недопустим для данной модели. Переход из состояния 5 в 6 также является управлением процессом обеспечения безопасности труда на объекте и, поэтому, должен быть регламентирован соответствующим образом (правилами, инструкциями и др.).

7 состояние – «отказ» (авария или ЧП) человеко-машинной системы. Система информационной поддержки управления сигнализирует в спасательные службы о происшествии и подает всеобщий сигнал «тревоги» через системы оповещения.

Процесс переходов из одного состояния в другое является марковским. В рассматриваемом случае речь идет о контроле и управлении процессом производства работ, в частности об оценке среднего времени до попадания в состояние 7 (авария, устранение последствий, восстановление и др.), которая в рамках данной математической модели будет считаться поглощающим. В этом конкретном случае более разумно использовать аппарат полумарковских процессов.

Переходы между состояниями, представленные на рис. 4 описаны с помощью вложенной матрицы переходов для полумарковского процесса  $P = (p_{ij})$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, 7$ , где  $p_{ij}$  – вероятность прямого перехода системы из состояния  $i$  в состояние  $j$ . А также матрицу условных времен пребывания системы в состояниях  $M = (m_{ij})$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, 7$ , где  $m_{ij}$  – среднее время пребывания системы в состоянии  $i$  при условии последующего прямого перехода системы в состояние  $j$ .

Используя формулу  $t_i = \sum_{j=1}^5 p_{ij} \cdot m_{ij}, i = 1, 2, \dots, 5$ , можем получить вектор значений средних времен пребывания в каждом из состояний:

$$t_1 = \frac{1}{\lambda_{12}}, \quad t_2 = \frac{1}{\lambda_{23}}, \quad t_3 = \frac{2}{(\lambda_{32} + \lambda_{34})}, \quad t_4 = \frac{2}{(\lambda_{43} + \lambda_{45})}, \quad (1)$$

где  $t_n$  – среднее времена пребывания в состоянии  $n$ ;  $\lambda_{ij}$  – интенсивность перехода из состояния  $i$  в  $j$ .

Для описания состояний вводится вектор средних времен до попадания системы в аварийное состояние  $\bar{T} = (T_1, T_2, T_3, T_4)$ :

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \left( \frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \left( \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} + 1 \right) + \frac{2}{\lambda_{45}} \\ T_2 &= \frac{1}{\lambda_{23}} + \left( \frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \left( \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} + 1 \right) + \frac{2}{\lambda_{45}} \\ T_3 &= \left( \frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \left( \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} + 1 \right) + \frac{2}{\lambda_{45}} \\ T_4 &= \frac{2}{\lambda_{45}} + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} \cdot \left( \frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Очевидно, что существенное влияние на время до аварии имеют во втором случае уже два отношения  $\frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}}$  и  $\frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}}$ , которые характеризуют интенсивность формирования воздействий по опережающему управлению уровнем безопасности труда для состояний 3 (переходного) и 4 (предаварийного).

Ввиду того, что для планирования управлением безопасностью целесообразно ориентироваться на значение среднего времени до наступления аварийного состояния (в целях возможного опережающего управления), составлена система уравнений для средних времен до попадания системы в состояние 5 (до аварии) при условии, что в настоящий момент времени система находилась в состоянии  $i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ).

Переходы из состояния 3 в 4 и из состояния 5 в 6 являются управлением процессом обеспечения безопасности труда на объекте и, поэтому, должны быть регламентированы соответствующим образом. Переход из состояния 3 в 4 является «мягкими», т.е. зависит от значений текущих параметров (практически отдано соответствующему ЛПР), поэтому использование интенсивности – правомерно.

Далее оценим предельные вероятности для вложенной марковской цепи. Вектор стационарных вероятностей  $\bar{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_7)$ ,  $\pi_i \geq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 7$  для вложенной марковской цепи, описываемой матрицей (1) или (2) можно найти из решения системы уравнений (3).

$$\begin{cases} \bar{\pi}P = \bar{\pi}; \\ \sum_{i=1}^7 \pi_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

На рисунке 5 представлен граф, характеризующий интенсивности переходов между состояниями.

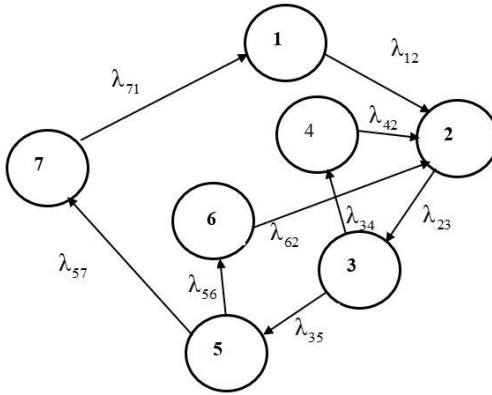


Рисунок 5 – Граф состояний и интенсивности переходов

В общем случае, исходя из вида графа, приведенного на рис. 4, коэффициенты опережающего предотвращения рисков –  $K_{\text{опр}}$  есть не что иное, как значения вероятностей  $p_{34}$  и  $p_{56}$ .

Коэффициентом опережающего предотвращения рисков ( $K_{\text{опр}}$ ) безопасности деятельности будем называть вероятность того, что процесс из данного состояния перейдет в состояние превентивного выполнения работ по улучшению негативных показателей (устранению выявленных недостатков в обеспечении безопасности трудовой деятельности).

Коэффициент отражает зависимость вероятности перехода из одного состояния в другое от среднего времени пребывания системы в определенных состояниях. Для нормального управления процессом предотвращения рисков необходимо проанализировать особенности предотвращения рисков в каждом из рассматриваемых состояний: состоянии 3 – переходном и состоянии 5 – предаварийном. Были заданы некоторые значения соответствующих коэффициентов опережающего предотвращения рисков  $K_3 = p_{34}$  и  $K_5 = p_{56}$  для дальнейшей формулировки предварительных рекомендаций. Для  $K_3$  значение должно быть в диапазоне от 0,1 до 0,4, для  $K_5$  – от 0,5 до 1,0.

Для случая «мягкого» управления, предполагая, что значение интенсивности  $\lambda_{35}$  известно (из статистики и/или на основе экспертных оценок специалистов), получено значение интенсивности для «мягкого» управления  $\lambda_{34} = \frac{K_3}{1-K_3} \cdot \lambda_{35}$ , что с учетом предположений означает выполнение условия двустороннего неравенства  $0,1 \cdot \lambda_{35} \leq \lambda_{34} \leq 0,25 \cdot \lambda_{35}$ , что немаловажно для определения среднего времени нахождения в состоянии.

В случае развития событий, характеризующих состояние системы как «пропуск» действий по превентивному предотвращению негативных последствий – «мягкое» управление, дальнейший переход из состояния 3 в состояние 5 предполагает принятие «жестких» мер управления, таких как запрет дальнейших работ, останов процессов производства, машин, механизмов и т. п.

В дальнейшем, следующим этапом перехода системы из состояния 5 – предаварийного будет состояние 7 – аварийное, которое характеризуется реализацией потоков негативных факторов высокой интенсивности (энерго-энтропийная концепция реализации опасностей в человеко-машинной системе). Поэтому, если  $K_5$  определяется на уровне от 0,5 до 0,7 и фиксируется изменение времени пребывания в данном состоянии, характеризуемое высоким уровнем интенсивности  $\lambda_{35}$ , то необходимо принимать «жесткие» меры управления, предотвращающие развитие аварии (отказа или инцидента).

Для рассматриваемого полумарковского процесса, описывающего состояния объекта с точки зрения безопасности труда, стационарные вероятности нахождения в состояниях, которые можно интерпретировать как долю времени нахождения в состояниях, можно вычислять по формуле:

$$p_i = \frac{\pi_i m_i}{\sum_{i=1}^7 \pi_i m_i}, \quad (4)$$

Также, на основе математической модели, разработан алгоритм функционирования цифровой системы контроля безопасности труда (рис. 6).

Представленный алгоритм действует на основе полученных данных, которые обрабатываются системой информационной поддержки принятия решений, далее происходит оценка состояния уровня безопасности труда. В зависимости от состояния, система создает рекомендации на основе нормативных требований и сигнализирует об опасности. Основное отличие функционирования данной системы в том, что оценка состояния производится в режиме реального времени с помощью ЦД.

Обосновано внедрение разработанной математической модели в ЦД объекта строительства. Дано определение и сформулированы основные требования к нему с точки зрения безопасности труда.



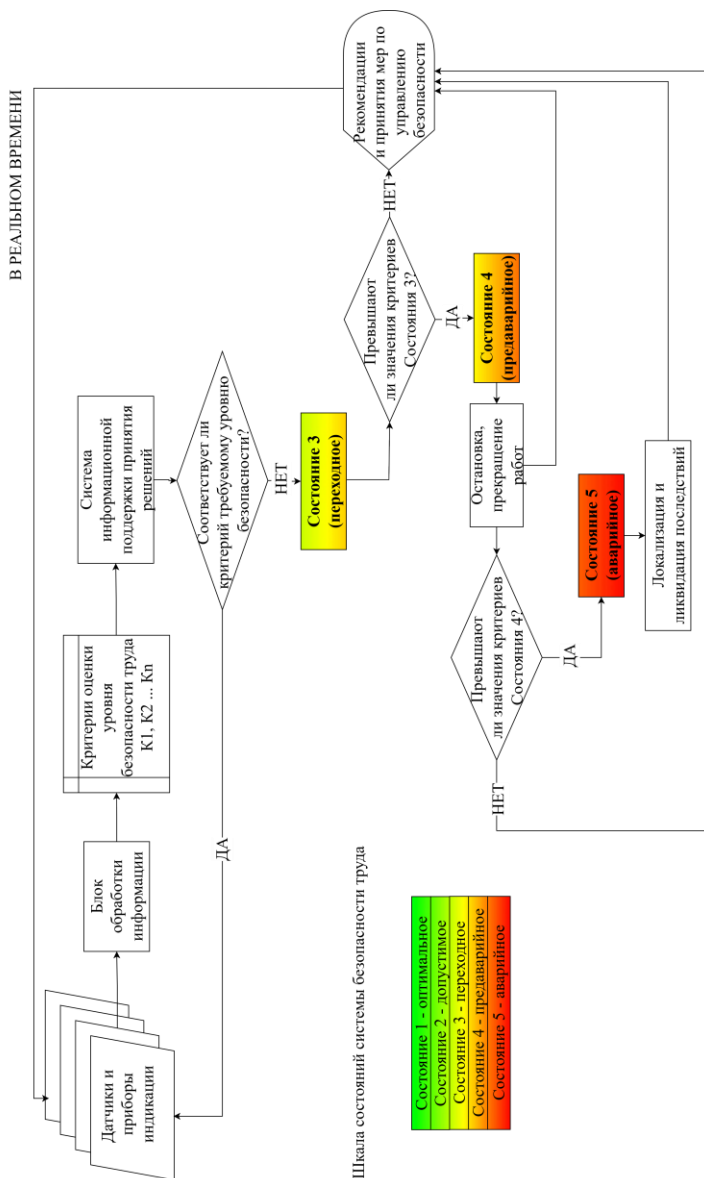


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования цифровой системы контроля безопасности труда

В контексте строительной отрасли под цифровым двойником в основном понимается создание моделей физических объектов строительства в цифровом виде и возможность имитации поведения физических объектов в реальной среде с помощью полученных данных в реальном времени.

Основываясь на преимуществах ЦД, его применение в области безопасности труда создает платформу для организации новой концепции уже цифровой системы контроля безопасности труда в строительстве.

Механизм ЦД подключается к физической среде с помощью датчиков, камер, дронов и проч. для обеспечения двусторонней передачи данных между двумя объектами. Это позволяет обновлять модель ТИМ данными в режиме реального времени, что способствует более эффективному принятию решений при организации безопасных условий труда и управлении ими (рис. 7).

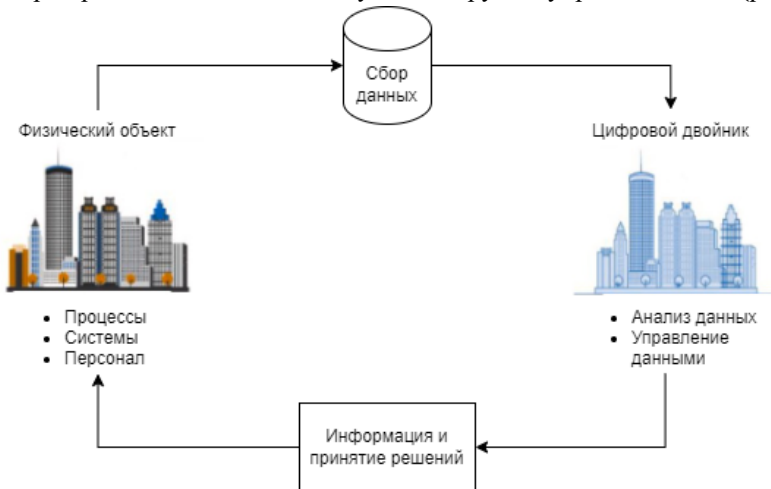


Рисунок 7 – Принцип работы реального физического объекта и цифрового двойника

На реальном физическом объекте фиксируются данные и передаются в цифровом формате в цифровой двойник, где идет анализ полученной информации и прогноз возможных будущих состояний объекта с точки зрения безопасности труда. Получение данных происходит в режиме реального времени. Анализ и прогнозирование производится с помощью цифровой системы контроля безопасности труда.

Основываясь на результатах проведенного исследования, дано определение цифрового двойника в области безопасности труда на строительной площадке. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта/системы/элемента с двусторонней передачей данных в режиме реального времени для контроля за уровнем безопасности и реализацией предупредительных мероприятий с целью снижения уровня травматизма на физическом объекте.

**Третья глава** посвящена экономической оценке от внедрения предлагаемой цифровой системы контроля на основе расчетов срока окупаемости и оценке предотвращенного ущерба от производственного несчастного случая на строительной площадке (табл. 1).

Таблица 1 – Предотвращенный ущерб от производственного несчастного случая

| № п/п                                                                         | Статьи расходов и потерь                                                                                                | Время, час | Стоимость, руб./час | Итого, руб. |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------|-------------|
| <b>1. Первоочередные затраты и потери</b>                                     |                                                                                                                         |            |                     |             |
| 1                                                                             | Зарплата пострадавшего в день несчастного случая                                                                        | 4          | 690                 | 2 760       |
| 2                                                                             | Оплата вынужденного простоя работникам участка (8 чел.)                                                                 | 12         | 690                 | 66 240      |
| 3                                                                             | Оплата вынужденного простоя руководителям участка (2 чел.)                                                              | 12         | 1 130               | 27 120      |
| <b>2. Затраты и потери, связанные с нарушением производственного процесса</b> |                                                                                                                         |            |                     |             |
| 4                                                                             | Зарплата работников, отвлеченных от работы на восстановление безопасности на месте происшествия (3 чел.)                | 16         | 690                 | 33 120      |
| <b>3. Ущерб, нанесенный предприятию</b>                                       |                                                                                                                         |            |                     |             |
| 5                                                                             | Упущенная прибыль предприятия                                                                                           | 12         | 6 250 000           | 50 000 000  |
| 6                                                                             | Ущерб вследствие поломки оборудования, инструментов и пр. (строп канатный четырехветвевой 4СК 12.5т/6.0м)               | –          | –                   | 38 000      |
| 7                                                                             | Ущерб вследствие разрушения, порчи используемых материалов, сырья, полуфабрикатов и пр. (балка двутавровая 12 м, 1 шт.) | –          | –                   | 122 000     |
| <b>4. Затраты на проведение расследования НС</b>                              |                                                                                                                         |            |                     |             |
| 8                                                                             | Оплата работы членов комиссии организации, где произошел НС (3 чел.)                                                    | 120        | 720                 | 259 200     |
| 9                                                                             | Оплата работы сторонних членов комиссии (4 чел.)                                                                        | 120        | 1 120               | 537 600     |
| 10                                                                            | Оплата работы экспертов и проведения экспертиз (2 чел.)                                                                 | 120        | 1 200               | 288 000     |
| 11                                                                            | Расходы на проведение экспертизы                                                                                        | –          | –                   | 60 000      |
| <b>5. Затраты на реализацию решений комиссии по расследованию</b>             |                                                                                                                         |            |                     |             |
| 12                                                                            | Затраты на проведение внепланового инструктажа работников                                                               | –          | –                   | 3 000       |

Окончание табл. 1

| № п/п                                  | Статьи расходов и потерь                                                    | Время, час | Стоимость, руб./час                      | Итого, руб.           |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------|
| 13                                     | Стоимость работ по устранению последствий НС (работа крана, экскаватора)    | 16         | 7 500 –<br>кран<br>5 000 –<br>экскаватор | 195 000               |
| 14                                     | Затраты на судебные издержки и услуги юристов                               | –          | –                                        | 400 000               |
| 6. Штрафы, компенсации и проч. расходы |                                                                             |            |                                          |                       |
| 15                                     | Штраф ГИТ                                                                   | –          | –                                        | 400 000               |
| 16                                     | Штраф Ростехнадзора                                                         | –          | –                                        | 300 000               |
| 17                                     | Единоразовая компенсация семье погибшего на погребение                      | –          | –                                        | 8 370,20              |
| 18                                     | Пособия по потере кормильца на одного ребенка с учетом ИПК на момент смерти | –          | –                                        | 8 134 + 50%<br>от ИПК |
| 19                                     | Компенсация морального ущерба                                               | –          | –                                        | 250 000               |
| <i>Подлежит вычитанию</i>              |                                                                             |            |                                          |                       |
| 20                                     | Единовременная страховая выплата                                            | –          | –                                        | 2 000 000             |
| <b>ИТОГО:</b>                          |                                                                             | –          | –                                        | <b>52 988 544,2</b>   |

Предположительный ущерб от одиночного несчастного случая со смертельным исходом на 2024 г. составит 52 988 544,2 руб. + 50% от ИПК. Реальный ущерб может оказаться существенно выше на основе данных по исследованиям в области безопасности труда, а также с учетом ежегодной инфляции.

Стоимости оборудования, его монтажа и пуско-наладочных работ, обслуживания, программного обеспечения, обучения персонала составит около 350 тыс. руб.

Был произведен расчет полной окупаемости с учетом ставки дисконтирования. Для начала был рассчитан дисконтированный денежный поток при ставке дисконтирования 21%. В первый год прогнозируемый денежный поток равен 150 000 руб., во второй и третий года – 100 000 руб.

Для определения накопленных дисконтированных денежных потоков (DPBP) необходимо оценить, когда накопленные DCF превысят первоначальные инвестиции (табл. 2).

Таблица 2 – Накопленный дисконтированный денежный поток

| Год (n) | Дисконтированный CF (DCF), руб.      | Накопленный DCF, руб.         |
|---------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 0       | –350 000 (первоначальные инвестиции) | –350 000                      |
| 1       | 123 900                              | –350 000+123 900 = –226 100   |
| 2       | 102 450                              | –226 100 + 102 450 = –123 650 |
| 3       | 56 400                               | –123 650 + 56 400 = –67 250   |
| 4       | 46 700                               | –67250 +46 700 = –20 550      |
| 5       | 21 204                               | –20 550 + 21 204 = + 654      |

Из таблицы 2 видно, что к концу 5 года дисконтированные потоки положительны и составляют +654 руб. – это означает, что дисконтированная окупаемость происходит в период окончания 5 года.

Учитывая пониженную ставку коэффициента дисконтирования, которая составляет 3% в 2025 году, полная окупаемость цифровой системы контроля уровня безопасности займет 1 год и 9 месяцев.

**Четвертая глава** посвящена апробации полученных результатов исследования на строительной площадке ГК «Эталон» «Пулковский дом» в поселке Шушары, а также в учебный процесс кафедры техносферной безопасности СПбГАСУ.

Целью эксперимента являлась фиксация времени реагирования на нарушения требований безопасности труда, связанных с применением СИЗ на выбранном строительном участке. Оценка уровня безопасности труда проводилась по двум критериям «Персонал» и «СИЗ» при использовании смарт-видеокамеры с передачей информации в ЦД строящегося объекта.

В результате проведения эксперимента были зафиксированы нарушения требований безопасности труда 2 способами:

1. При личном визуальном обходе. Обход, как правило, осуществляет группа специалистов, включающая представителей отдела мониторинга, охраны труда и инженерно-технических работников на строительной площадке. Стандартный обход производится с периодичностью один раз в две недели.

2. При использовании смарт-камеры для видеофиксации нарушений требований безопасности труда (в течение всего рабочего дня).

При проведении эксперимента, важным результатом, полученным автором, была регистрация промежутка времени между фиксацией нарушения и временем реагирования ЛПР на данное нарушение. Следует отметить тот факт, что данный интервал времени принятия решения составлял в среднем 1–3 минуты. Сравнительные показатели представлены в таблице 3. Полученные показатели являются несомненным преимуществом перед стандартным методом обхода и осмотра.

Таблица 3 – Показатели ручного метода и с применением ТИМ

|                                                    | Ручной метод            | Применение ЦД                     |
|----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Период проведения мониторинга                      | Во время смены (2 часа) | В течение 8-часовой рабочей смены |
| Частота проведения проверок                        | 1 раз в 2 недели        | В течение рабочей смены           |
| Количество зафиксированных нарушений               | 4                       | 43                                |
| Время реагирования на нарушение с момента фиксации | По обстоятельствам      | В течение 1-3 минут               |

Превентивные действия ЛПР заключались в оповещении нарушившего нормы безопасности труда работника и его непосредственного руководителя, с предписанием немедленного устранения несоответствий.

Также результаты исследования были внедрены в учебный процесс кафедры «Техносферная безопасность» по направлениям подготовки 20.03.01 и 20.04.01 в следующие дисциплины: «Информационное моделирование в строительстве (ТИМ)», «Моделирование процессов и объектов для решения специальных задач», «Информационное моделирование в профессиональной сфере (ВИМ)», «Организация охраны труда в строительной отрасли», «Надзор и контроль в сфере охраны труда».

В рамках дисциплины «Информационное моделирование в строительстве (ТИМ)» проводится подготовка обучающихся к Межвузовскому конкурсу «ТИМ в охране труда» на базе Полигон «Умный труд» при поддержке строительной ГК «Эталон».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационного исследования в области контроля безопасности труда с применением ТИМ на строительной площадке была достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Выбраны и обоснованы критерии оценки уровня безопасности труда для системы контроля в строительной отрасли в результате сравнительного анализа действующей системы мониторинга с предложенной к усовершенствованию и апробированной на действующей строительной площадке ЖК «Пулковский дом» Группы «Эталон».

2. Разработана математическая модель системы информационной поддержки принятия решений в обеспечении контроля безопасности труда на строительной площадке с учетом динамики производства работ. Данная автоматизированная система контроля позволяет определить значения опасных и вредных производственных факторов в реальном времени для предотвращения производственного травматизма.

3. На основе модели разработан алгоритм функционирования системы контроля безопасности труда на строительной площадке, позволяющий идентифицировать уровень безопасности как по отдельному критерию, так и всего объекта в целом.

4. Обосновано применение ЦД объекта строительства для сигнализации об опасностях в целях превентивных мер для соблюдения нормативных требований при выполнении работ. Дано определение «цифровой двойник» с точки зрения безопасности труда, а также сформулированы требования к двойнику.

5. Проведена оценка экономического обоснования эффективности применения ТИМ в безопасности труда. Приведен расчет предотвращенного ущерба от несчастного случая на производстве, который показал уровень материальных потерь существенно превышающих уровень затрат на внедрение системы информационной поддержки принятия решений на основе ЦД.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

*Статьи в сборниках:*

1. Нам, Г. Е. Возможности информационного моделирования внедренного в систему управления охраной труда / Г. Е. Нам, В. В. Георгиади // Безопасность в строительстве : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–22 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 233-238. – EDN BVZBKZ.

2. Нам, Г. Е. Цифровая трансформация в системе управления охраной труда. Перспективы развития / Г. Е. Нам, О. В. Горбунова // Безопасность в строительстве : Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 111-119. – EDN UUNQK1.

*Статьи в журналах, входящих в Перечень ведущих  
научных журналов и изданий ВАК:*

3. Нам Г.Е. «Интеграция BIM-технологий и управления безопасностью в строительстве для минимизации травматизма» / Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, 2021. Т. 10. – № 1(53). – С. 174-179. (Перечень ВАК № 92 от 28.12.2020, K2).

4. Нам Г.Е., Субботина Н.А., Гончарук Т.Н. «Методологические подходы к снижению травматизма на строительной площадке по вине человеческого фактора» / Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный

технологический университет», г. Пенза, 2021. № 2(54). – С. 210-216. (Перечень ВАК № 92 от 01.03.2021, К2).

5. Нам Г.Е., Горбунова О.В. «Критерии контроля уровня безопасности труда для организации цифровой системы мониторинга на строительной площадке» / Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, 2023. № 1(61). – С. 90-97. (Перечень ВАК № 123 от 08.02.2023, К2).

6. Нам Г.Е., Горбунова О.В., Падерно П.И. «Математическая модель процесса мониторинга безопасности труда на предприятиях строительной отрасли с применением технологии информационного моделирования» / Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, 2023. – Т. 12, № 4(64). – С. 229-238. – EDN DJONTF. (Перечень ВАК № 150 от 19.12.2023, К2).

7. Горбунова, О. В. «Математическое моделирование системы контроля безопасности труда на строительной площадке для внедрения в технологии информационного моделирования / О. В. Горбунова, Г. Е. Нам, П. И. Падерно // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 8(284). – С. 17-26. – EDN JFPSIQ. (Перечень ВАК № 297 от 08.07.2024, К2).

8. Нам, Г. Е. «Цифровой двойник как инструмент для реализации цифровой системы контроля безопасности труда» / Г. Е. Нам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 4(68). – С. 224-229. – EDN DDRBDW. (Перечень ВАК № 168 от 09.12.2024, К2).

9. Горбунова, О. В. «Оценка экономической эффективности применения инновационных цифровых решений в системе управления безопасностью труда в строительной отрасли» / О. В. Горбунова, Г. Е. Нам, П. И. Падерно // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 14, № 3(71). – С. 203-212. – EDN AYWSFW. (Перечень ВАК № 169 от 01.07.2025, К2).

Компьютерная верстка В. С. Весниной

Подписано к печати 26.11.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 141.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.