

Научная статья

УДК 614.849

doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.14.68.008

Подходы к алгоритмизации процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности при проектировании объекта капитального строительства

Николай Викторович Мартинович

Никита Сергеевич Изупов

Роман Сергеевич Райхель

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Роман Сергеевич Райхель, raykhel.roman@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача алгоритмизации процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ) при проектировании объектов капитального строительства. В условиях ужесточения требований к безопасности и ограниченности бюджетов традиционные подходы, основанные на субъективной оценке и ручной проверке нормативных соответствий, становятся недостаточно эффективными. Авторы предлагают альтернативный метод, основанный на математической формализации взаимосвязей между технико-экономическими и пожарно-техническими параметрами. Разработаны модели, включающие функциональные зависимости между входными данными проекта (класс опасности, степень огнестойкости, бюджет и др.) и выходными решениями по СОПБ, а также теоретико-множественное представление взаимодействия разделов проектной документации. Предложена целевая функция оптимизации затрат с учётом эффективности систем и потенциального ущерба. Особое внимание уделено роли инженера по пожарной безопасности на предпроектной стадии, важности раннего выявления рисков и интеграции формализованных алгоритмов в BIM-среду. Показано, что математическая формализация повышает объективность решений, сокращает сроки проектирования и снижает риски несоответствия нормам. Подход открывает перспективы для автоматизации, масштабирования и внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в строительной отрасли.

Ключевые слова: система обеспечения пожарной безопасности, пожарная безопасность, алгоритмизация, математическая формализация, технико-экономические показатели, оптимизация, проектирование, объект капитального строительства

Для цитирования: Мартинович Н.В., Изупов Н.С., Райхель Р.С. Подходы к алгоритмизации процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности при проектировании объекта капитального строительства // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 83-90. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.14.68.008>.

Original article.

Approaches to algorithmization of the process of forming a fire safety assurance system in the design of capital construction facilities

Nikolay V. Martinovich

Nikita S. Izupov

Roman S. Raykhel

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Raykhel Roman Sergeevich, raykhel.roman@mail.ru

Abstract. The article addresses the pressing issue of algorithmizing the process of forming a fire safety assurance system (FSAS) during the design of capital construction projects. Under increasingly stringent safety requirements and limited budgets, traditional approaches based on subjective assessments and manual verification of regulatory compliance are becoming insufficiently effective. The authors propose an alternative method grounded in mathematical formalization of the interdependencies between technical-economic and fire-technical parameters. Developed models include functional dependencies between project input data (functional hazard class, fire resistance rating, budget, etc.) and output FSAS decisions, as well as a set-theoretic representation of interactions among project documentation sections. A target cost-optimization function is proposed, incorporating system effectiveness and potential damage. Special emphasis is placed on the role of the fire safety engineer at the pre-design stage, early risk identification, and integration of formalized algorithms into BIM environments. It is demonstrated that mathematical formalization enhances decision objectivity, reduces design time, and lowers the risk of non-compliance with regulations. The proposed approach opens prospects for automation, scalability, and implementation of intelligent decision-support systems in the construction industry.

Keywords: fire safety assurance system, fire safety, algorithmization, mathematical formalization, technical-economic indicators, optimization, design, capital construction facility

For citation: Martinovich N.V., Izupov N.S., Raikhel R.S. Approaches to algorithmization of the process of forming a fire safety assurance system in the design of capital construction facilities // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 83-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.14.68.008>.

Современное строительство требует комплексного подхода к обеспечению пожарной безопасности, который должен учитывать не только нормативные требования [1-5], но и экономические аспекты реализации проекта. В условиях ограниченных бюджетов и растущих требований к безопасности возникает необходимость в разработке алгоритмизированных методов, позволяющих оптимально сочетать технические решения и экономические показатели. Настоящая статья посвящена анализу существующих подходов к алгоритмизации процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ) и предложению альтернативного метода, основанного на математической формализации взаимосвязей между пожарно-техническими и технико-экономическими параметрами.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизации рисков при проектировании объектов капитального строительства, сокращением издержек на этапе проектирования и повышением качества принимаемых решений, что обуславливает необходимость разработки метода алгоритмизации формирования СОПБ, обеспечивающего оптимальное соотношение затрат и уровня безопасности. Стоит отметить, что достаточно широко проработаны теоретические и практические вопросы анализа рисков и организационного управления сложными системами, однако отсутствует комплексное решение вопросов, связанных с эффективным формированием сценариев достижения соответствия требований пожарной безопасности на этапе проектирования.

Необходимо отметить, что инженер, разрабатывающий мероприятия по обеспечению пожарной безопасности (в составе поректной документации определенной [5]) занимает важную роль в анализе и формировании исходных данных, выявлении потенциальных рисков и реализации проектных решений с учетом требований законодательства в области пожарной безопасности. Качество инженерных изысканий и подготовки проектной документации напрямую влияет на формирование системы обеспечения пожарной безопасности.

Зачастую требуется большое количество времени и опыта для формирования конкретных путей достижения условий соответствия требованиям пожарной безопасности. На выбор варианта конфигурации влияют многие факторы, в первую очередь это основные идентификационные пожарно-технические характеристик такие как: функциональная пожарная опасность здания, класс конструктивной пожарной опасности, степень огнестойкости и категории по пожарной и взрывопожарной опасности. Кроме того, существенное влияние оказывают технико-экономические показатели объекта капитального строительства, например, высота здания, площадь и строительный объем объекта, наличие маломобильных групп населения и протекание различных технологических процессов, предусмотренных заданием на проектирования. Данные обстоятельства будут влиять на выбор конечной конфигурации СОПБ объекта.

Современные подходы к алгоритмизации процесса формирования СОПБ базируются на последовательном выполнении этапов, начиная с анализа исходных данных и заканчивая реализацией проекта. Одним из ключевых элементов существующих подходов является проверка соответствия нормативным требованиям и возврат к предыдущим этапам в случае выявления несоответствий. Однако такие подходы часто не учитывают динамические изменения технико-экономических показателей в процессе проектирования и реализации проекта.

В условиях современного строительства, где стандарты безопасности совершенствуются, а бюджетные ограничения становятся определяющим фактором возникает острая необходимость в объективных и научно обоснованных методах проектирования систем обеспечения пожарной безопасности (СОПБ). Математическая формализация процесса формирования СОПБ в зависимости от технико-экономических показателей (ТЭП) представляет собой ключевой инструмент, позволяющий преодолеть субъективность традиционных подходов и обеспечить оптимальное соотношение между безопасностью и экономическими затратами.

Структурный анализ существующего процесса проектирования показывает ряд существенных проблем, возникающих при проектировании СОПБ без применения математической формализации:

1. Принятие решений основано на индивидуальном опыте инженера, что может приводить к неоптимальным решениям и допущению ошибок
2. Формирование алгоритмов системы обеспечения пожарной безопасности на проектируемых объектах гражданского строительства невозможно без учета законодательства, строительных норм, технических регламентов и стандартов.

Без математической формализации сложно учесть все оказывающие влияния на выбор конфигурации СОПБ параметры и их взаимосвязи, а также сложить целостную картину взаимосвязи между разделами проектной документации. Математическая формализация позволяет заменить субъективные оценки объективными количественными показателями, кроме того, математические модели позволяют не только оценить текущее состояние, но и спрогнозировать эффективность предложенных решений, автоматизировать рутинные проверки и расчеты, что в свою очередь позволяет сокращения времени проектирования СОПБ.

Таким образом внедрение подходов на основании математической формализации процессов проектирования СОПБ позволяет не только повысить уровень безопасности объектов, но и оптимизировать затраты, сократить время проектирования и снизить риски несоответствия нормативным требованиям. Математическая формализация становится ключевым инструментом

для создания эффективных и экономически обоснованных решений в области обеспечения пожарной безопасности.

Математическая формализация процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ) представляет собой строгий метод преобразования неформализованных требований и условий в понятные математические зависимости, позволяющие количественно оценить взаимосвязь между техническими решениями и экономическими показателями. Формализация как метод включает приведение неполной или неформальной информации к строгим и точным определениям, логическим структурам и математическим моделям, что упрощает анализ, оптимизацию и реализацию систем пожарной безопасности.

Основная цель математической формализации в данном контексте это создание инструментария для принятия обоснованных решений, обеспечивающих оптимальное соотношение между уровнем пожарной безопасности и экономическими затратами на всех этапах жизненного цикла объекта.

Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности объекта капитального строительства могут быть представлены в виде следующей базовой модели процесса формирования раздела «Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности» по [5] (далее - МПБ) (1):

$$ПБ = F(f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}), f_2(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)) \quad (1)$$

где, F - оператор преобразования входных данных, который формализует логику проектирования. Он может включать в себя нормативные правила, алгоритмы принятия решений, экспертные системы и т.п.

f_1 - функции обработки пожарно-технических характеристики (например, класс функциональной опасности, степень огнестойкости и др.).

f_2 - функции обработки технико-экономических и других параметров, границ планировочной организацией участка (подъезды, водоснабжение и др.).

$x_1...x_{10}$ — пожарно-технические параметры:

x_1 - класс функциональной опасности (Ф1-Ф5);

x_2 - степень огнестойкости (I-V);

x_3 - класс конструктивной пожарной опасности (C0-C3);

x_4 - категория здания по взрывопожарной и пожарной опасности (А-Д);

x_5 - категория помещений по взрывопожарной и пожарной опасности (А,Б,В1-В4,Г,Д);

x_6 - вместимость (чел);

x_7 - наличие маломобильных групп населения (МГН);

x_8 - площадь в пределах пожарного отсека (м);

x_9 - пожарно-техническая высота (м);

x_{10} - наличие АУПТ, ПДЗ, АПС, СОУЭ;

$y_1...y_6$ - технико-экономические параметры:

y_1 - планировочные показатели территории, противопожарные разрывы и расстояния (удаление от лесных массивов, ЛЭП, газопроводов; разрывы до соседних объектов);

y_2 - планировочные показатели подъезда для пожарной техники (ширина проездов, радиусы разворота, тип покрытия);

y_3 - противопожарное водоснабжение (наличие гидрантов, естественные водоемы, давление в водопроводе);

y_4 - стоимость систем пожарной безопасности;

y_5 - эксплуатационные расходы;

y_6 - бюджетные ограничения.

Представленная модель позволяет формализовать процесс принятия решений при проектировании систем пожарной безопасности, учитывая, как технические требования, так и экономические ограничения. Данная формализация является концептуальной основой предложенного метода к алгоритмизации проектирования СОПБ. Она отражает

многопараметрический и междисциплинарный характер задач. Однако для практического применения требуется ее детализация и конкретизация в виде программно-реализуемого алгоритма. На следующем этапе для целей дальнейшей алгоритмизации проведена формализация взаимосвязи разделов проектной документации и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Взаимосвязь разделов проектной документации и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности может быть описана с помощью теоретико-множественной модели (2):

$$A'(D_4)F'' = [A'(D_2), A'(D_3)] \Rightarrow [f''(D_5), f''(D_{11}), f''(D_6), f''(D_9), f''(D_{10}), f''(D_{12})] \quad (2)$$

где, F'' — нормативный оператор для выходящих разделов;

A' — нормативный оператор для входящих разделов;

D_2 — информация, содержащаяся в разделе «Схема планировочной организации земельного участка»;

D_3 — информация, содержащаяся в разделе «Архитектурные решения»;

D_4 — информация, содержащаяся в разделе «Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности»;

$D_5, D_6, D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}$ — другие разделы проектной документации, на которые влияет раздел «МПБ».

Представленная модель отражает сложную систему прямых и обратных зависимостей между разделами проектной документации. Например, архитектурные решения (D_3) напрямую влияют на мероприятия по пожарной безопасности (D_4), которые, в свою очередь, влияют на технологические решения (D_6) и требования к обеспечению безопасной эксплуатации (D_{10}).

Данная модель (2) имеет принципиальное концептуальное значение, поскольку фиксирует системный характер проектирования, подчеркивая, что СОПБ не существует изолированно, а является результатом сложного взаимодействия между разделами проекта. Это важный шаг к системному и формализованному пониманию проектирования. Данное представление позволяет проиллюстрировать, что пожарная безопасность и ее формализованный раздел по [5] не изолированный результат инженерной деятельности, а сквозной процесс, пронизывающий все стадии и разделы проекта.

В общем виде модель выбора систем в зависимости от бюджета может быть представлен в виде математической модели с ограничениями (3):

$$\sum C_i \leq B \quad (3)$$

где, B — доступный бюджет

C_i — стоимость i -й системы

При этом должно выполняться условие (4):

$$P = 1 - e(-\lambda \times \sum R_i) \geq P_{\min} \quad (4)$$

где, λ — частота возникновения пожаров для данного типа объекта;

$\sum R_i$ — суммарная эффективность всех внедренных систем;

$P_{\min}$ — минимально допустимая вероятность предотвращения пожара, определяемая нормативными требованиями.

Сформулированные модели позволяют прийти к задаче оптимизации с ограничениями, решение которой позволяет выбрать оптимальный набор систем пожарной безопасности в рамках заданного бюджета. Таким образом, формулы (3,4) являются уже не просто математической абстракцией, а практический инструмент для инженера, позволяющего принимать обоснованные решения в условиях ограниченных ресурсов и высоких требований к безопасности.

Основная научная задача, предполагающаяся к решению в дальнейших исследованиях и практической реализации данного подхода связана с недостатком прогнозных данных по коэффициентам эффективности систем пожарной безопасности (R_i) и частотой возникновения пожаров (λ) для различных типов объектов. В настоящее время эти параметры зачастую

основаны на устаревшей статистике. Решение поставленной задачи и повышения точности моделей возможно за счет создания отраслевой базы данных, основанной на различных инцидентах и испытаниях на безопасность.

Для дальнейшей оптимизации технико-экономических показателей и принимаемых решений в процессе формирования СОПБ может быть использована следующая математическая модель (5):

$$\min Z = C_0 + \sum(C_i \times R_i) - U \times P \quad (5)$$

где, Z — целевая функция, минимизирующая общие затраты;

C_0 — базовые затраты на проектирование и внедрение СОПБ;

C_i — затраты на i -ю систему пожарной безопасности;

R_i — коэффициент эффективности i -й системы;

U — потенциальный ущерб в случае возникновения пожара;

P — вероятность предотвращения пожара благодаря внедренным системам.

Представленная модель в целом позволяет определить оптимальный набор систем пожарной безопасности, минимизирующий общие затраты при соблюдении нормативных требований. Необходимо отметить, что данная целевая функция оптимизации (5), учитывает не только прямые затраты на создание систем пожарной безопасности, но и потенциальный ущерб от пожара. В настоящий момент существует ряд методологических вопросов, связанных с количеством оценок «потенциального ущерба» (U), особенно нематериального (вред здоровью, экологический ущерб, репутационные потери). В рамках данного исследования предлагается использовать нормированные шкалы и экспертные веса, однако дальнейшая стандартизация и формализация этого подхода является обязательным условием для будущих исследований.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что математическая формализация процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности представляет собой необходимый инструмент, позволяющий преодолеть субъективность традиционных подходов и достичь оптимального баланса между уровнем безопасности и экономическими затратами. Предложенная модель (1) обеспечивает возможность количественной оценки влияния технико-экономических показателей на пожарно-технические параметры, что значительно повышает обоснованность принимаемых решений.

Важно также подчеркнуть, что внедрение математической формализации не заменяет экспертизу и профессиональный опыт инженеров по пожарной безопасности, а напротив, усиливает их возможности. В первую очередь правовая база служит основой для разработки эффективных и безопасных систем, которые должны соответствовать всем установленным требованиям и обеспечивать защиту людей и имущества от возможных угроз. Математические модели выступают в качестве инструмента, помогающего инженерам принимать более обоснованные решения, а не заменяя их профессиональную оценку. Установленная взаимосвязь разделов проектной документации, выраженная в виде (2), демонстрирует сложную систему прямых и обратных зависимостей, которые критически важно учитывать при проектировании системы обеспечения пожарной безопасности.

Внедрение методов машинного обучения (Machine Learning, ML) представляет собой естественное развитие предложенного подхода к алгоритмизации процесса формирования системы обеспечения пожарной безопасности. ML может существенно повысить точность и адаптивность математических моделей (1)–(5), преодолевая ключевые ограничения, такие как недостаток достоверных данных по коэффициентам эффективности систем пожарной безопасности (R_i) и частоте возникновения пожаров (λ).

Предложенный альтернативный подход, основанный на динамическом моделировании и нечеткой логике, обеспечивает ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами. Во-первых, он позволяет учитывать изменения технико-экономических показателей в реальном времени, что особенно важно в условиях динамично

меняющихся рыночных условий. Во-вторых, обеспечивается многоуровневая оптимизация решений, позволяющая одновременно учитывать, как локальные, так и глобальные аспекты системы безопасности. В-третьих, включены прогностические возможности для оценки будущих рисков, что дает возможность проактивного управления безопасностью. Наконец, предложенный подход обеспечивает высокую адаптивность к изменяющимся условиям, что делает его универсальным инструментом для различных типов объектов.

Предложенная модель оптимизации представляет собой эффективный инструмент для нахождения оптимального соотношения между затратами на системы пожарной безопасности и уровнем обеспечиваемой защиты, что особенно важно в условиях ограниченного бюджета. Интеграция предложенного подхода с BIM-технологиями открывает новые возможности для повышения точности расчетов и визуализации решений, что способствует улучшению коммуникации между всеми участниками проекта и повышает качество принимаемых решений [6].

Важно отметить, что дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку специализированного программного обеспечения, реализующего предложенный подход, создание отраслевых баз данных для уточнения коэффициентов эффективности систем пожарной безопасности, а также интеграцию с системами искусственного интеллекта для автоматизации процесса принятия решений. Не менее важными направлениями являются расширение возможности модели на этапы эксплуатации и реконструкции объектов, разработка методик количественной оценки эффективности предложенного подхода и исследование его применимости к различным типам объектов капитального строительства.

Список источников

1. Российская Федерация. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2004 (ред. от 24.06.2025) № 190-ФЗ // КонсультантПлюс: сайт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения 13.05.2025)
2. Российская Федерация. О техническом регулировании: Федеральный закон от 27.12.2002 (ред. 22.12.2020) (с изм. и доп. вступ. в силу с 01.01.2021 г.) № 184-ФЗ // КонсультантПлюс: сайт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения 13.05.2025)
3. Российская Федерация. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 (последняя редакция) № 384-ФЗ // КонсультантПлюс: сайт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения 13.05.2025)
4. Российская Федерация. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ // КонсультантПлюс: сайт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения 13.05.2025)
5. Российская Федерация. Законы. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: Постановления Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 г. (ред. От 28.12.2024 г.) № 87 // КонсультантПлюс: сайт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75048/ (дата обращения 13.05.2025)
6. Бычков С.В. Интеграция BIM-технологий и систем обеспечения пожарной безопасности на этапе проектирования // Строительная экспертиза и управление рисками. — 2021. — № 3. — С. 45–52. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-bim-tehnologiy-i-sistem-obespecheniya-pozharnoy-bezopasnosti-na-etape-proektirovaniya> (дата обращения 13.05.2025)

References

1. Rossijskaya Federaciya. Gradostroitel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii: Federal'nyj zakon ot 29.12.2004 (red. ot 24.06.2025) № 190-FZ // Konsul'tanTPlyus: sajт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (accessed: 13.05.2025)
2. Rossijskaya Federaciya. O tekhnicheskom regulirovanii: Federal'nyj zakon ot 27.12.2002 (red. 22.12.2020) (s izm. i dop. vstup. v silu s 01.01.2021 g.) № 184-FZ // Konsul'tanTPlyus: sajт – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (accessed: 13.05.2025)

3. Rossijskaya Federaciya. Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij: Federal'nyj zakon ot 30.12.2009 (poslednyaya redakciya) № 384-FZ // Konsul'tanTPlyus: sajt – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (accessed: 13.05.2025)
4. Rossijskaya Federaciya. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyakh pozharnoj bezopasnosti: Federal'nyj zakon ot 22.07.2008 № 123-FZ // Konsul'tanTPlyus: sajt – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (accessed: 13.05.2025)
5. Rossijskaya Federaciya. Zakony. O sostave razdelov proektnoj dokumentacii i trebovaniyakh k ikh soderzhaniyu: Postanovleniya Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 16.02.2008 g. (red. Ot 28.12.2024 g.) № 87 // Konsul'tanTPlyus: sajt – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75048/ (accessed: 13.05.2025)
6. Bychkov S.V. Integraciya BIM-tehnologij i sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti na ehtape proektirovaniya // Stroitel'naya ehkspertiza i upravlenie riskami. — 2021. — № 3. — S. 45–52. — [Ehlektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-bim-tehnologiy-i-sistem-obespecheniya-pozharnoj-bezopasnosti-na-etape-proektirovaniya> (accessed: 13.05.2025)

Информация об авторах

Н.В. Мартинович – кандидат технических наук

Information about the author

N.V. Martinovich – Ph.D. of Engineering Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.08.2025, одобрена после рецензирования 15.09.2025, принята к публикации 18.09.2025.

The article was submitted 18.08.2025, approved after reviewing 15.09.2025, accepted for publication 18.09.2025.