

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Инженерно-строительный институт
Высшая школа техносферной безопасности

Пелех М.Т., Симонова М.А.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ
ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

МОНОГРАФИЯ

Санкт-Петербург

2025

Авторы:
М.Т. Пелех, М.А. Симонова

Современные подходы к обеспечению пожарной безопасности производственных объектов: монография / М.Т. Пелех, М.А. Симонова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2025. – 107 с.

Цель монографии — разработать и обосновать методику оценки пожарной опасности и риска на производственных объектах с учётом эффективности и износа защитных барьеров. В работе представлен барьерно-ориентированный подход, включающий анализ рисков, моделирование сценариев пожаров, расчёт уровня защищённости и количественную оценку пожарного риска с учётом деградации систем безопасности.

Рассмотрены основные элементы системы противопожарной защиты: технические и организационные барьеры, сценарии пожароопасных ситуаций, методы расчёта весовых коэффициентов защищённости. Показано, что методика позволяет объективно оценивать остаточный риск, выявлять уязвимые зоны и принимать обоснованные решения по повышению пожарной безопасности.

Монография предназначена для инженеров, экспертов, специалистов по безопасности, руководителей предприятий, а также для научных работников, преподавателей и студентов, занимающихся вопросами промышленной и пожарной безопасности.

© Пелех М.Т., Симонова М.А., 2025

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025

Оглавление

Оглавление	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Теоретические основы пожарной безопасности производственных объектов.....	7
1.1. Сравнительный анализ международных и российских документов в области пожарной безопасности	7
1.2. Методы оценки пожарного риска: используемые подходы и инструменты	22
1.3. Проблематика применения нормативных подходов и анализ современных исследований в области оценки эффективности защитных барьеров.....	48
Глава 2. Современные методы анализа эффективности защитных барьеров.	52
2.1. Современные подходы к количественной оценке эффективности защитных барьеров и анализ эксплуатационных факторов	53
2.2. Применение вероятностных методов в оценке эффективности защитных барьеров.....	55
2.3. Комбинированное воздействие защитных барьеров на снижение пожарных рисков.....	59
2.4. Интеграция методик оценки пожарного риска: направления и ограничения	62
Глава 3. Барьерно-ориентированный подход к оценке и снижению пожарного риска на производственных объектах.....	65
3.1. Анализ пожарной опасности промышленного объекта с использованием барьерно-ориентированного подхода	65
3.2. Методика количественной оценки пожарного риска с учетом барьеров защиты и деградации их эффективности.....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	100

ВВЕДЕНИЕ

Анализ пожарной безопасности на производственных объектах представляет собой крайне актуальную задачу, обусловленную тяжёлыми последствиями индустриальных пожаров. Особенно остро проблема стоит на опасных производственных объектах, где обращаются взрыво- и пожароопасные вещества, а даже единичный инцидент может привести к катастрофическим убыткам, угрозе жизни и здоровья людей. Современные промышленные предприятия характеризуются высокой технологической сложностью, широким применением новых материалов, плотной компоновкой оборудования и увеличением объёма хранения горючих веществ, что существенно повышает вероятность возникновения пожаров. Обеспечение пожарной безопасности в таких условиях требует комплексного, многопрофильного подхода, сочетающего инженерные, организационные и управленческие решения. Наряду с угрозой человеческим жизням, пожары на предприятиях вызывают серьёзные материальные потери, остановки производственных процессов, разрывы логистических цепочек и негативные экологические последствия, что подчёркивает высокую научную и практическую значимость темы.

Существующие статистические данные указывают на актуальность проблемы. В России за период с 2019 по 2023 годы было зафиксировано 14 690 пожаров в зданиях производственного назначения, что привело к гибели 327 человек, прямой материальный ущерб за 5 лет составил примерно 19 172 млн. руб. Наибольшее число пожаров произошло в 2021 году — 3 589 случаев, с максимальным числом погибших — 110 человек. Основными причинами пожаров на производственных зданиях и складах в 2023 году стали нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования (2416 пожаров), неосторожное обращение с огнем (479 пожаров), нарушения правил устройства и эксплуатации печей (415 пожаров) и возникшим по технологическим причинам (333 пожара).

Конкретные примеры крупных инцидентов на промышленных объектах последних лет подтверждают актуальность и остроту проблемы обеспечения пожарной безопасности. Так, 14 января 2020 года на химическом заводе компании IQOXE в Таррагоне, Испания, произошёл взрыв, вызвавший пожар, в результате которого три человека погибли и семь получили ранения. Причиной инцидента стала утечка этилена. Другой значительный случай произошёл 29 марта 2021 года на нефтеперерабатывающем заводе Balongan в Индонезии, принадлежащем государственной компании Pertamina. Пожар привёл к эвакуации около 1 000 местных жителей и ранениям нескольких человек; возможной причиной стала утечка топлива. В России также отмечены недавние происшествия: 11 января 2024 года в поселке Обухово Московской области пожар охватил цех по производству полимерной продукции, уничтожив крышу площадью 8 тысяч квадратных метров. Хотя пострадавших не было, инцидент продемонстрировал масштаб потенциального ущерба. Уже на следующий день, 12 января 2024 года, в городе Златоуст Челябинской области загорелось здание деревообрабатывающего цеха, и огонь распространился на 1 560 квадратных метров. Эвакуация 13 человек прошла успешно, пострадавших не зарегистрировано. Эти примеры иллюстрируют разнообразие источников и последствий пожаров на промышленных объектах, подчёркивая необходимость разработки эффективных методов оценки и управления пожарными рисками.

Мировая статистика также указывает на высокую частоту пожаров на промышленных объектах: согласно данным СТИФ за 2022 год, в отчетах из 55 стран отражено значительное количество подобных инцидентов, хотя конкретные цифры варьируются в зависимости от региона.

Эти данные подчеркивают значимость оценки пожарной безопасности и необходимость внедрения комплексных мер по обеспечению пожарной безопасности на производственных объектах, сочетающих инженерные, организационные и управленческие решения.

Цели и задачи исследования. Монография посвящена современным подходам к оценке и снижению пожарных рисков на производственных объектах. Основная цель монографии заключается в разработке моделей и алгоритмов поддержки принятия решений по обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях. Для достижения поставленной цели в монографии решаются следующие задачи:

- проведение сравнительного анализа международных и отечественных нормативных документов с целью выявления различий и общего направления развития подходов к оценке пожарного риска;
- исследование качественных, количественных и комбинированных методов анализа рисков с учётом специфики производственных процессов;
- разработка и обоснование барьерно-ориентированного подхода к снижению риска с использованием диаграмм типа «галстук-бабочка» как инструмента визуализации угроз, сценариев и защитных мероприятий.

Исследование основано на комплексной методологии анализа пожарных рисков, включающей качественные (экспертные и идентификационные методы), количественные (моделирование, расчет вероятностей и последствий) и комбинированные сценарные подходы. В работе использованы такие методики, как HAZID, QRA, BowTie-анализ, а также современные стандарты ISO, NFPA и национальные нормативные документы, включая Федеральный закон № 123-ФЗ и приказы МЧС России.

Монография опирается на системную нормативную основу и передовую методологию, объединяя лучшие практики анализа риска и управления безопасностью. Научная новизна работы заключается в комплексной интеграции барьерного анализа с методами количественной оценки, что позволяет точнее учитывать взаимодействие угроз, систем защиты и эксплуатационных условий. Результаты исследования имеют как теоретическую, так и практическую значимость для специалистов, участвующих в проектировании, модернизации и аудите систем пожарной безопасности на промышленных предприятиях.

Глава 1. Теоретические основы пожарной безопасности производственных объектов

В данной главе рассматриваются теоретические основы обеспечения пожарной безопасности на производственных объектах, включая современные подходы к оценке и управлению пожарными рисками. В условиях высокой технологической сложности, применения горючих и взрывоопасных веществ, а также плотной компоновки оборудования традиционные нормативные методы проектирования противопожарной защиты оказываются недостаточными. Это обуславливает необходимость перехода к риск-ориентированным подходам, учитывающим особенности объектов, вероятные сценарии пожаров и эффективность защитных барьеров.

Изложен обзор ключевых международных и отечественных нормативных документов, регламентирующих оценку пожарного риска, выявлены различия в подходах и критериях допустимости. Приведена классификация методов анализа риска — от качественных до количественных, включая комбинированные — с оценкой их применимости в контексте промышленной безопасности. Особое внимание уделено вопросам определения эффективности технических и организационных барьеров, их роли в снижении уровня остаточного риска.

Материалы главы формируют методологическую основу для последующего обоснования барьерно-ориентированного подхода, раскрытого во второй части монографии, и служат базой для разработки систем оценки и управления рисками на производственных объектах.

1.1. Сравнительный анализ международных и российских документов в области пожарной безопасности

Анализ нормативных документов, регламентирующих подходы к оценке пожарного риска, позволяет выявить как общие направления развития, так и существенные различия между международными и российскими стандартами.

В данном разделе представлено обобщенное описание ключевых документов, используемых в инженерной практике.

NFPA 551: Руководство по оценке пожарных рисков

Стандарт NFPA 551 представляет собой руководство по анализу и управлению пожарными рисками, разработанное Национальной ассоциацией противопожарной защиты США (National Fire Protection Association — NFPA). Этот документ предназначен для специалистов в области инженерной безопасности, проектировщиков, экспертов и аудиторов. Он охватывает весь жизненный цикл объекта — от проектирования и строительства до эксплуатации и вывода из эксплуатации. NFPA 551 предлагает системный подход к оценке и снижению рисков, обеспечивая гибкость применения и возможность адаптации под специфику конкретного объекта.

Документ содержит рекомендации по интеграции анализа пожарного риска в общую систему управления безопасностью предприятия. Особое внимание уделяется процедурам идентификации опасностей, установлению критериев допустимого риска, а также выбору сценариев пожара. В стандарте предлагается использовать как качественные, так и количественные методы анализа, включая HAZID (Hazard Identification), метод "что если?" (What-If), анализ последствий, анализ сценариев, построение деревьев событий (ETA), деревьев отказов (FTA) и количественную оценку риска (QRA).

NFPA 551 предоставляет структуру для систематизации данных об объекте, анализе уязвимостей, выявлении недостатков в существующих мерах защиты и принятии решений по модернизации противопожарных систем. Кроме того, документ предлагает методику по разработке отчетов об оценке риска, что особенно важно для целей надзорных проверок и международной экспертизы. Стандарт широко применяется на объектах с повышенной пожарной и взрывной опасностью, включая нефтехимические предприятия, склады ЛВЖ, производственные комплексы и критическую инфраструктуру.

Внедрение требований NFPA 551 требует наличия подготовленных специалистов и современного программного обеспечения для моделирования пожаров и оценки эффективности противопожарных мероприятий. Его применение обеспечивает высокий уровень обоснованности принимаемых решений и соответствует международным требованиям к управлению пожарной безопасностью.

ISO 16732-1:2012: Fire Safety Engineering — Fire Risk Assessment

ISO 16732-1:2012 представляет собой международный стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO), и регламентирует процедуры оценки пожарного риска на основе инженерного подхода. Основной целью стандарта является предоставление универсальной и гибкой методологии, применимой ко всем этапам жизненного цикла объекта — от проектирования до эксплуатации. Он охватывает широкий спектр объектов — от жилых и общественных зданий до промышленных и инфраструктурных комплексов, что делает его одним из наиболее универсальных инструментов для оценки пожарной безопасности.

ISO 16732-1 базируется на принципах системного анализа и ориентирован на интеграцию процессов идентификации опасностей, анализа сценариев, количественной оценки риска и управления остаточным риском. В рамках применения документа рекомендуется использовать такие методы, как HAZID (идентификация опасностей), анализ последствий (Consequence Analysis), количественная оценка риска (QRA), анализ сценариев, а также методы сопоставления полученных рисков с критериями допустимости. Важной составляющей является учёт неопределённостей, влияющих на достоверность оценки риска.

Стандарт подчёркивает необходимость формирования набора реалистичных и репрезентативных сценариев пожара, определяющих потенциальные угрозы для людей, имущества и окружающей среды. Анализ осуществляется с использованием как статистических данных, так и

инженерных моделей, что позволяет учитывать специфику объекта, параметры распространения опасных факторов и эффективность защитных мер.

Применение ISO 16732-1 требует высокой квалификации специалистов, способных не только проводить расчёты, но и формировать корректные исходные данные. Кроме того, для корректного использования методологии рекомендуется применение программного обеспечения для моделирования развития пожара, динамики эвакуации, оценки воздействия на конструкции и системы жизнеобеспечения.

При внедрении в национальную практику стандарт требует адаптации к действующей нормативно-правовой базе. Тем не менее, он может быть успешно интегрирован в существующие системы управления безопасностью и использоваться как основа для построения риск-ориентированных систем противопожарной защиты, в том числе на объектах промышленного и критического назначения.

ГОСТ Р ИСО 16732-1-2024

ГОСТ Р ИСО 16732-1-2024 представляет собой национальный стандарт Российской Федерации, разработанный на основе международного документа ISO 16732-1. Он адаптирован к условиям российской нормативной среды и ориентирован на использование в системе управления пожарной безопасностью предприятий. Основная цель стандарта заключается в применении структурированного и обоснованного подхода к управлению пожарными рисками на всех стадиях жизненного цикла объекта.

Документ регламентирует процедуры идентификации опасностей, выбора расчетных сценариев, оценки вероятности и последствий возникновения пожара, а также установления критериев допустимого уровня риска. В методологической части ГОСТ предусматривает использование таких инструментов, как анализ последствий, HAZID, QRA, построение деревьев событий и отказов, сценарное моделирование и сравнительный

анализ эффективности барьеров защиты. Особое внимание уделяется описанию процесса формирования входных данных для оценки риска и необходимости учета неопределенностей.

В отличие от исходного международного стандарта, ГОСТ Р ИСО 16732-1-2024 дополнен пояснениями, отражающими российскую практику, и предлагает примеры, более приближенные к реалиям отечественной промышленности. Это делает его применение удобным для специалистов, работающих на объектах с повышенной пожарной опасностью, включая предприятия нефтегазового сектора, химической промышленности, энергетики и транспортной инфраструктуры.

Стандарт может применяться как в целях проектирования новых объектов, так и при модернизации существующих, а также в рамках проведения независимой экспертизы промышленной безопасности. Он особенно актуален для организаций, переходящих на риск-ориентированный подход при выполнении требований Федерального закона № 123-ФЗ и других регламентов МЧС России.

ГОСТ способствует унификации российских методик оценки пожарного риска с международной практикой, обеспечивая сопоставимость результатов анализа и формируя основу для применения интегрированных систем управления рисками на производственных объектах.

ISO 16733-1: Fire Safety Engineering — Selection of Design Fire Scenarios and Design Fires

ISO 16733–1 представляет собой международный стандарт, направленный на регламентацию процесса выбора расчётных сценариев пожара и соответствующих параметров огня, необходимых для выполнения инженерных расчётов по оценке пожарной безопасности. Документ применяется преимущественно при проектировании сложных объектов, где требуется учёт множества факторов, влияющих на развитие и последствия пожара.

Стандарт основывается на комплексной методике анализа потенциальных источников возгорания, физических и химических характеристик горючих материалов, особенностей архитектурной и инженерной планировки, а также поведения людей и защитных систем в случае аварийной ситуации. ISO 16733-1 предлагает использовать качественные и полуколичественные подходы к выбору сценариев, которые служат базой для дальнейших вычислительных моделей — таких как CFD-моделирование (Fire Dynamics Simulator и др.).

Методы, упоминаемые в рамках ISO 16733-1, включают сценарный анализ, HAZID, анализ тепловыделения, моделирование распространения дыма и тепловых потоков. Применение стандарта позволяет установить репрезентативные сценарии, охватывающие наиболее вероятные и наихудшие варианты развития событий, что повышает обоснованность проектных решений.

Включение ISO 16733-1 в процесс проектирования даёт возможность систематизировать выбор сценариев пожара, обеспечить их воспроизводимость в расчётах и повысить прозрачность обоснований перед надзорными органами. В российской практике его использование возможно в рамках инженерных обоснований при отклонении от требований СП, а также при проектировании уникальных и технически сложных объектов.

BS 7974:2019: Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings

BS 7974 представляет собой британский стандарт, разработанный с целью внедрения инженерных методов в проектирование противопожарной защиты зданий. Он служит основой для разработки обоснованных решений в области обеспечения пожарной безопасности, опираясь на научный подход, моделирование и оценку эффективности защитных мер в контексте конкретного объекта. Стандарт позволяет выйти за рамки традиционных нормативных требований, обеспечивая гибкость и адаптивность проектных

решений, особенно при строительстве уникальных, многофункциональных и технически сложных зданий.

Центральным элементом BS 7974 является использование инженерного моделирования для анализа опасных факторов пожара, огнестойкости строительных конструкций, функционирования систем автоматического пожаротушения и взаимодействия между ними. В рамках анализа широко применяются методы CFD-моделирования (Computational Fluid Dynamics), позволяющие прогнозировать распространения пожара и опасных факторов в реальном времени.

Важным преимуществом стандарта является внимание к эвакуации людей. BS 7974 включает оценку параметров эвакуации на основе геометрии здания, количества и поведения людей, функционирования систем оповещения и освещения, а также времени достижения предельно допустимых значений опасных факторов. Моделирование эвакуации осуществляется с использованием специализированных программных комплексов, таких как Pathfinder, Simulex и других.

Кроме инженерных расчётов, BS 7974 предполагает интеграцию активных и пассивных систем защиты. Активные меры включают спринклерные и дренчерные установки, системы дымоудаления и пожарной сигнализации. Пассивные меры — это огнестойкие перегородки, противопожарные двери, изоляционные материалы и конструкционные элементы, препятствующие распространению огня.

Стандарт особенно актуален для этапа проектирования новых объектов и реконструкции зданий, подлежащих индивидуальному подходу в части обеспечения пожарной безопасности. Однако его использование для ретроспективной оценки зданий, построенных без учёта инженерного подхода, ограничено, так как требует полного набора исходных данных и возможности адаптации проектных решений. Несмотря на это, BS 7974 широко применяется как основа для разработки альтернативных технических

решений при отклонении от нормативных требований в рамках процедуры технического обоснования.

NFPA 101: Life Safety Code

NFPA 101 (Life Safety Code) — один из наиболее широко применяемых нормативных документов США в области обеспечения безопасности людей при пожаре. Основное внимание в стандарте уделяется проектированию, оценке и эксплуатации зданий и сооружений с точки зрения защиты жизни и здоровья людей, особенно в условиях чрезвычайных ситуаций, таких как пожар. В отличие от многих других стандартов, NFPA 101 не сосредоточен исключительно на предотвращении и тушении пожара, а фокусируется на безопасной эвакуации и защите людей от воздействия опасных факторов.

Документ охватывает широкий спектр объектов — от образовательных, медицинских и жилых зданий до гостиниц, торговых центров, вокзалов и театров. Он включает детализированные требования к путям эвакуации, ширине коридоров и выходов, освещению, системе оповещения и сигнализации, а также к конструктивным элементам зданий, обеспечивающим необходимый уровень огнестойкости. NFPA 101 устанавливает критерии для безопасного времени эвакуации и методы расчета, позволяющие прогнозировать, насколько быстро и безопасно люди смогут покинуть здание в случае пожара.

В стандарте применяется поведенческий подход, учитывающий реакцию человека на чрезвычайную ситуацию, что позволяет адаптировать проектные решения под особенности целевой аудитории объекта (например, маломобильные группы населения, дети, пожилые люди). Также большое внимание уделяется организационным мерам: подготовке персонала, планам эвакуации, тренировкам, доступности информации и функционированию аварийных систем.

NFPA 101 активно используется как основа для национального и регионального законодательства в ряде стран. Однако в промышленной сфере

его применение ограничено, поскольку документ в большей степени предназначен для зданий общественного и жилого назначения. Несмотря на это, подходы, изложенные в стандарте, могут быть полезны при проектировании и эксплуатации любых объектов, где безопасность людей является приоритетом.

Федеральный закон № 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"

Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» является ключевым нормативно-правовым актом Российской Федерации, регламентирующим принципы обеспечения пожарной безопасности на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Принятый в 2008 году и с тех пор многократно актуализированный, он устанавливает обязательные требования к конструкции, инженерным системам, средствам противопожарной защиты, эвакуации и порядку проведения расчетов пожарного риска.

Закон охватывает широкий спектр объектов — от жилых и общественных зданий до промышленных предприятий и транспортной инфраструктуры. Он устанавливает систему классификации объектов по функциональной пожарной опасности, определяет перечень обязательных мероприятий по защите от пожара, нормирует огнестойкость строительных конструкций, требования к путям эвакуации, автоматическим системам пожаротушения и противопожарному водоснабжению.

В отличие от многих международных стандартов, таких как ISO 16732–1 или NFPA 551, 123-ФЗ носит директивный характер и предполагает строгое следование установленным предписаниям без значительного пространства для инженерных интерпретаций. Это означает, что отступление от требований возможно только при наличии технического обоснования и при условии, что уровень безопасности не будет снижен.

Закон также содержит положения о расчетных величинах пожарного риска и допускает проведение как количественной, так и качественной оценки риска, однако эти положения реализуются только в рамках утвержденных методик МЧС России. Примерами таких методик являются Приказ № 1140 и Приказ № 533, разработанные для зданий различного назначения и производственных объектов соответственно.

Контроль за соблюдением 123-ФЗ осуществляется государственными органами, включая МЧС России и Ростехнадзор, что гарантирует высокий уровень ответственности при реализации требований. Закон также определяет процедуры надзора, сертификации продукции, оценки соответствия и административной ответственности.

Несмотря на свою жесткость, 123-ФЗ постепенно движется в сторону риск-ориентированного регулирования, в том числе через интеграцию инженерных методов обоснования решений. Это делает его актуальным как для традиционного нормативного проектирования, так и для внедрения современных подходов, основанных на анализе риска.

Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140

Приказ МЧС России № 1140 от 14 ноября 2022 года «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности» представляет собой один из ключевых нормативных документов, реализующих положения Федерального закона № 123-ФЗ в части оценки пожарных рисков. Документ разработан в целях стандартизации подходов к количественной оценке риска и внедрения единых алгоритмов для расчета показателей пожарной безопасности на объектах различного назначения.

Методика, утвержденная приказом, ориентирована на применение риск-ориентированного подхода. Она включает математические модели для определения вероятности наступления опасных факторов пожара, расчета

времени безопасной эвакуации людей, а также анализа воздействия высокой температуры, задымления и токсичности продуктов горения. В частности, в документе описаны алгоритмы расчёта таких показателей, как время начала эвакуации, скорость перемещения людей, допустимые параметры среды (температура, видимость, концентрация токсичных веществ) и сравнение этих значений с критическими порогами.

Ключевым элементом методики является определение допустимого уровня индивидуального и социального риска, при превышении которого объект считается не соответствующим требованиям пожарной безопасности. Для проведения расчетов требуется наличие исходных данных об объекте, включая его геометрию, характеристики материалов, параметры инженерных систем и сценарии пожара.

В приказе предусмотрено использование современных программных средств для численного моделирования — в том числе средств CFD-моделирования (например, FDS) и специализированных эвакуационных программ. Кроме того, документ требует учёта различных сценариев возникновения пожара, включая наиболее опасные и вероятные, что соответствует международным практикам, представленным в стандартах ISO 16732-1 и NFPA 551.

Приказ № 1140 применяется как на стадии проектирования, так и при техническом обследовании существующих объектов. Он используется в целях проведения экспертизы, оценки соответствия, обоснования технических решений и формирования отчетов по оценке риска. Внедрение данной методики способствует повышению прозрачности, объективности и сопоставимости результатов анализа пожарной опасности.

Таким образом, приказ № 1140 обеспечивает интеграцию количественных методов оценки риска в российскую нормативную практику, формируя переход к гибкой и научно обоснованной системе обеспечения пожарной безопасности, соответствующей международным тенденциям.

Приказ МЧС России от 26 июня 2024 года № 533

Приказ МЧС России № 533 от 26 июня 2024 года «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» разработан в рамках реализации риск-ориентированного подхода в обеспечении пожарной безопасности и представляет собой специализированный нормативный документ, ориентированный на особенности промышленных предприятий. Он дополняет общую методологию, изложенную в Приказе № 1140, с учётом специфики технологических процессов, инженерных систем и производственной среды.

Документ устанавливает формализованные алгоритмы количественной оценки пожарного риска, применимые к опасным производственным объектам (ОПО), объектам химической, нефтеперерабатывающей, металлургической, деревообрабатывающей и других отраслей промышленности. Методика охватывает все стадии жизненного цикла объекта: от проектирования до эксплуатации и технического перевооружения, включая периодическое переоценивание уровня риска в зависимости от изменений условий.

Особое внимание в методике уделяется идентификации опасных факторов, анализу источников воспламенения, учёту пожарной нагрузки, конструкции зданий и схем размещения оборудования. Приказ регламентирует использование расчетных моделей, описывающих процессы воспламенения, теплового и дымового распространения, токсичных выбросов, а также моделирование поведения людей и эффективности систем эвакуации.

Расчёт рисков выполняется как по индивидуальным, так и по групповым (социальным) показателям, с обязательным сравнением полученных значений с установленными нормативными критериями допустимости. В качестве инструментария допускается использование сертифицированного программного обеспечения, включая средства моделирования динамики

пожара и эвакуации, что делает методику максимально адаптируемой к различным условиям.

Приказ № 533 также предусматривает формирование набора расчетных сценариев развития аварий, включая наихудшие и наиболее вероятные, что позволяет учитывать реальные эксплуатационные риски. Методика включает оценку защитных барьеров — как инженерных (огнезащитные системы, локализация взрывов), так и организационных (инструктажи, дежурства, системы мониторинга), а также обоснование корректирующих мер, направленных на снижение риска до допустимого уровня.

Внедрение данной методики предоставляет предприятиям инструмент для объективной оценки текущего уровня пожарной безопасности и принятия управленческих решений по модернизации систем защиты. Таким образом, Приказ № 533 существенно расширяет возможности применения риск-ориентированных подходов в промышленности и способствует переходу от формального соблюдения норм к реальному управлению рисками на основе данных, моделирования и оценки уязвимостей объекта.

Общие черты и различия нормативных документов в области оценки пожарных рисков

Анализ международных и отечественных нормативных документов в области оценки пожарных рисков позволяет выявить как общие тенденции, так и специфические отличия, определяющие их практическое применение. Во всех рассмотренных подходах прослеживается единая направленность на управление пожарными рисками, предполагающее не только реактивные, но и упреждающие меры, направленные на предотвращение развития пожароопасных ситуаций. В основе методологий лежит использование инженерных методов и современных инструментов моделирования, что обеспечивает высокий уровень обоснованности проектных решений. Немаловажным является также стремление к адаптации требований и расчетных процедур под особенности конкретных объектов, включая их

функциональное назначение, конструктивные особенности и эксплуатационные условия. Все документы акцентируют внимание на построении сценариев развития пожара и прогнозировании его последствий, что позволяет перейти от формального соблюдения норм к реальному управлению рисками.

В то же время, между стандартами и нормативными актами существуют существенные различия. Документы NFPA 551, ISO 16732-1 и его отечественная адаптация ГОСТ Р ИСО 16732-1-2024 являются универсальными по своей структуре и ориентированы на системный анализ пожарных рисков, охватывающий все стадии жизненного цикла объекта. Эти стандарты применимы как при проектировании, так и при эксплуатации, модернизации и экспертизе объектов. Стандарт ISO 16733-1, напротив, разработан с прицелом на выбор и обоснование расчетных сценариев пожара, которые в дальнейшем используются при инженерных расчетах параметров опасных факторов и эффективности защитных систем. Он представляет собой важное звено в системе инженерного обеспечения пожарной безопасности.

Документ BS 7974 отличается акцентом на инженерное проектирование систем противопожарной защиты, включая моделирование развития пожара, поведения конструкций и эвакуации. Его основное назначение — обеспечение научной обоснованности проектных решений, что особенно актуально при проектировании новых зданий. Стандарт NFPA 101, в свою очередь, ориентирован на защиту жизни и здоровья людей в условиях пожара. Его содержание сфокусировано на организационных и конструктивных аспектах эвакуации, включая расчётное время безопасного пребывания, ширину выходов, освещённость путей эвакуации и функциональность систем оповещения. Он применяется, прежде всего, на объектах с массовым пребыванием людей.

Федеральный закон № 123-ФЗ, в отличие от упомянутых международных стандартов, представляет собой директивный нормативно-правовой акт, обязательный к применению на территории Российской

Федерации. Он строго регламентирует технические, конструктивные и организационные меры по обеспечению пожарной безопасности, устанавливает требования к системам защиты, эвакуации, порядку проектирования и проведения расчетов риска. При этом отклонение от установленных норм допускается лишь в исключительных случаях при наличии обоснования, подтвержденного расчетами и экспертизой.

Приказ МЧС России № 1140 определяет методику количественной оценки пожарного риска для зданий различного функционального назначения. В нем представлены алгоритмы расчета времени эвакуации, предельно допустимых параметров среды и критерии допустимого уровня риска. Этот документ реализует идеи риск-ориентированного подхода в нормативной практике и используется как на этапе проектирования, так и при обследовании существующих объектов.

Приказ МЧС России № 533 ориентирован на специфику производственных объектов, где необходимо учитывать особенности технологических процессов, размещение оборудования, инженерную инфраструктуру и вероятные сценарии аварий. В отличие от Приказа № 1140, данный документ более тесно интегрирован с задачами промышленной безопасности и позволяет разрабатывать адаптированные меры снижения риска, основываясь на фактических данных об объекте.

Обобщая представленные подходы, можно заключить, что ни один из стандартов не обладает универсальностью, способной охватить весь спектр задач и условий, встречающихся в практике проектирования и эксплуатации. Только комбинированное применение нескольких документов с учетом целей анализа, специфики объекта и нормативного контекста позволяет сформировать надежную и обоснованную систему обеспечения пожарной безопасности.

1.2. Методы оценки пожарного риска: используемые подходы и инструменты

В данном разделе рассматриваются основные методы, применяемые для оценки пожарного риска на объектах различного назначения. Анализ включает описание современных инструментов, используемых как в международной, так и в отечественной практике, с учётом их применимости в системе обеспечения пожарной безопасности производственных предприятий. Методы оценки условно классифицируются на три группы: качественные, количественные и комбинированные. Каждый из подходов раскрывается с точки зрения его методологических основ, области применения, а также преимуществ и возможных ограничений. Такое структурированное рассмотрение позволяет определить оптимальные сочетания методов в зависимости от задач анализа, стадии жизненного цикла объекта и доступных исходных данных.

Качественные методы оценки пожарного риска: принципы, инструменты и область применения

На начальных этапах анализа пожарной безопасности применяются методы качественной оценки, которые направлены на выявление потенциальных угроз, уязвимых элементов в конструкции зданий, технологических процессах и системах противопожарной защиты. Несмотря на отсутствие количественных показателей, эти методы играют ключевую роль в формировании общей картины риска и позволяют определить направления для последующего моделирования, расчётов и принятия управленческих решений. Их применение особенно актуально в ситуациях, когда недостаточно статистических данных или требуется быстрая экспертная оценка.

Одним из наиболее распространённых методов качественного анализа является процедура HAZID, представляющая собой структурированный экспертный подход к идентификации опасностей. Суть данного метода

заключается в систематическом выявлении возможных источников возникновения пожара, анализе факторов, способных привести к его развитию, и определении условий, при которых эти факторы реализуются. Работа по методу HAZID, как правило, проводится с участием специалистов различных профилей, включая инженеров, технологов, специалистов по охране труда и экспертов в области пожарной безопасности. Обсуждение сопровождается анализом проектной и эксплуатационной документации, схем размещения оборудования, технологических процессов и данных о ранее произошедших инцидентах. Метод позволяет комплексно охватить объект и выявить широкий спектр угроз. Его сильной стороной является ориентация на практический опыт участников и гибкость применения на объектах разного типа. В то же время, к числу ограничений можно отнести высокую зависимость от компетентности экспертов, возможность упущения маловероятных, но критичных сценариев, а также отсутствие численной оценки уровня риска.

Дополнением к HAZID выступает метод анализа гипотетических ситуаций, известный под названием "Что будет, если...". Он основывается на рассмотрении потенциальных аварийных или нестандартных ситуаций, возникающих при отклонении от штатного режима работы оборудования, ошибках персонала или внешних воздействиях. Эксперты последовательно задают вопросы о возможных сбоях и анализируют последствия каждого из них. Подобный подход позволяет заранее предвидеть развитие событий, минимизировать последствия возможных нарушений и улучшить систему управления рисками. Метод прост в реализации и не требует сложного программного обеспечения. Вместе с тем он может быть недостаточно полным, так как не опирается на формализованные алгоритмы, а значит, существует риск упустить значимые сценарии, особенно в условиях ограниченного времени или при низком уровне подготовки участников.

Третьим методом, широко применяемым на практике, является использование проверочных листов. Эта процедура заключается в

последовательной проверке объекта на соответствие заранее сформулированным требованиям пожарной безопасности. Проверочные листы разрабатываются на основе нормативной документации и содержат перечень контрольных вопросов, охватывающих технические, организационные и эксплуатационные аспекты обеспечения безопасности. Метод особенно удобен для проведения инспекций, предварительных обследований, аудитов и подготовки объектов к проверкам. Он обеспечивает единообразие подхода к оценке, повышает прозрачность анализа и может быть легко адаптирован к специфике конкретного предприятия. Преимущество заключается также в возможности автоматизации оценки с использованием цифровых инструментов. Однако данный метод ограничен рамками заложенных в него критериев и не позволяет выявить нестандартные или специфические угрозы, не отражённые в нормативной базе. Кроме того, он не учитывает взаимодействие между факторами и может дать неполную картину, если применяется изолированно.

Применение этих методов позволяет сформировать начальное представление о пожарных рисках на объекте, выявить критические зоны и обосновать необходимость более глубокого анализа. Качественная оценка, в свою очередь, служит фундаментом для построения количественных моделей, выбора сценариев пожара и разработки системы защитных мероприятий. В условиях отсутствия статистических данных, высокой неопределённости или на ранних стадиях проектирования именно качественные подходы становятся основой для обеспечения адекватного уровня пожарной безопасности.

Подходы сценарного и логического анализа в оценке пожарного риска

В практике оценки пожарного риска важное место занимают методы, находящиеся между качественным описанием угроз и строгим количественным анализом. Эти подходы относятся к категории полуколичественных и сценарных методов. Их главной задачей является

формализация логических взаимосвязей между событиями и последствиями, а также структурирование причинно-следственных связей, лежащих в основе развития пожароопасных ситуаций. При этом применение сложных математических расчётов не требуется, что делает данные методы удобными для оперативного анализа и принятия инженерных решений на различных стадиях жизненного цикла объекта — от проектирования до эксплуатации.

Один из базовых инструментов этой группы — сценарный анализ, который заключается в разработке и описании возможных сценариев развития пожара. Сценарий в данном контексте представляет собой логически обоснованную последовательность событий, начиная от инициации пожара (например, короткого замыкания или утечки газа) до реализации различных последствий, включая воздействие опасных факторов на людей, имущество и инфраструктуру. Метод сценарного анализа применяется для построения набора наиболее вероятных или критически опасных ситуаций с учётом характеристик здания, типа технологического процесса, состава горючих веществ, степени защищённости объекта и поведенческих моделей персонала.

Основным достоинством сценарного подхода является его высокая гибкость и адаптация к особенностям конкретного объекта. Сценарии могут разрабатываться для различных условий — дневное и ночное время, будни и выходные, штатная и аварийная работа систем. Это позволяет учитывать широкий спектр факторов и заранее подготовиться к развитию как типовых, так и маловероятных, но катастрофических событий. Кроме того, сценарии могут включать этапы взаимодействия с системами противопожарной защиты: например, срабатывание сигнализации, активацию автоматического пожаротушения, эвакуацию и т.д. В то же время недостатком метода является отсутствие формализованной шкалы для оценки вероятностей и последствий, что может затруднять сравнение различных сценариев между собой. Кроме того, слишком большая зависимость от опыта и суждений экспертов иногда приводит к упрощённым или, наоборот, чрезмерно сложным моделям, не отражающим реальную опасность.

В целях повышения формализации сценарного анализа широко применяется метод дерева событий (Event Tree Analysis, ETA). Он представляет собой графическое разветвлённое дерево, в котором исходным является некое начальное событие — например, возгорание электрокабеля или выброс горючего газа. От этого события отходят ветви, каждая из которых соответствует возможному развитию ситуации в зависимости от того, сработала ли или не сработала определённая система защиты. Таким образом, дерево строится на основе двоичных (да/нет) исходов, связанных с работой сигнализации, автоматических установок пожаротушения, систем вентиляции, эвакуации и т.п. На каждой развилке определяются возможные исходы — от полного локализованного тушения до масштабного пожара с поражением людей.

Преимуществом ETA является визуальная наглядность, логическая чёткость и возможность пошагового анализа эффективности каждой меры защиты. Метод позволяет выявить уязвимые места в системе и оценить, какие комбинации отказов могут привести к наиболее тяжёлым последствиям. Кроме того, при наличии статистических данных возможна оценка вероятностей развития каждого сценария, что делает дерево событий хорошей основой для последующего количественного анализа. Среди недостатков метода следует отметить ограниченность в определении начальных условий: он не исследует причины возникновения пожара, а только анализирует последствия после уже случившегося инцидента. Поэтому его желательно дополнять другими методами, направленными на выявление исходных причин.

Для выявления первопричин и логической структуры аварийных ситуаций применяется метод дерева отказов (Fault Tree Analysis, FTA). В отличие от ETA, который строится от начального события к последствиям, FTA анализирует события в обратном порядке — от конечного (нежелательного) результата к его возможным причинам. Исследование начинается с постановки верхнего события — например, "неспасение людей

при пожаре" — и далее разветвляется на различные факторы, приведшие к такому исходу: отказ системы оповещения, неработающая эвакуация, отсутствие доступа к выходам и т.д. Затем каждый из этих факторов также разлагается на более элементарные причины, включая технические отказы, организационные ошибки, человеческий фактор.

FТА позволяет создать иерархическую схему причинно-следственных связей, с помощью которой можно выявить наиболее критичные элементы системы, устранение которых даст наибольший эффект в снижении риска. Применение данного метода даёт возможность не только понять, почему произошёл пожар или авария, но и определить, какие сбои на ранних стадиях наиболее опасны. Преимуществом метода является глубина и системность, охват сложных технических и организационных взаимосвязей. Однако к его ограничениям относится сложность построения при большом числе факторов, высокая трудоёмкость анализа, а также потребность в значительном опыте и наличии достаточного объёма исходных данных.

Совместное использование сценарного анализа, дерева событий и дерева отказов даёт возможность получить полную картину развития пожара, оценить не только последствия, но и условия их возникновения. Эти методы хорошо комбинируются между собой: например, дерево отказов может применяться для построения причин возникновения начального события, а дерево событий — для анализа последующего развития. В условиях высокой неопределённости, нехватки статистики или ограниченных ресурсов такие полуколичественные методы становятся надёжной основой для принятия обоснованных решений в области проектирования, модернизации или эксплуатации систем противопожарной защиты.

Количественные методы оценки риска: расчетные подходы и статистическое обоснование

Наиболее формализованной и доказательной группой инструментов анализа пожарной безопасности являются методы количественной оценки

риска. Эти подходы ориентированы на получение численных показателей, выражающих вероятность возникновения пожара и масштаб его последствий. В отличие от качественных и полуколичественных методов, количественные позволяют не только объективизировать оценку опасности, но и использовать результаты для обоснования нормативных решений, разработки компенсирующих мероприятий и установления допустимых уровней риска. Такие методы находят широкое применение в государственной экспертизе, в промышленной безопасности, в проектировании объектов с высоким уровнем потенциальной опасности.

Ключевым методом в данной категории является Quantitative Risk Assessment, или QRA — количественная оценка риска. Этот методический подход базируется на расчетах вероятностей различных событий, частот их возникновения и тяжести возможных последствий. Оценка проводится на основе статистических данных о происшествиях, инженерных моделей распространения опасных факторов, а также сценариев функционирования защитных систем и поведения людей в условиях пожара. QRA включает несколько этапов: идентификацию угроз, формирование сценариев, количественное определение вероятности каждого из них и оценку ущерба. Конечным результатом является получение интегрального показателя риска, выраженного в терминах допустимого уровня воздействия на человека, имущество или окружающую среду.

Сильными сторонами метода QRA являются высокая точность, воспроизводимость результатов, возможность использования при сравнении альтернативных проектных решений. Он также позволяет проводить сравнительную оценку эффективности различных мер безопасности и адаптировать систему защиты под конкретные условия эксплуатации объекта. Кроме того, QRA интегрируется с современными программными средствами — моделированием пожара (например, Fire Dynamics Simulator), эвакуации, токсичного заражения и т. д., что расширяет диапазон применения. Однако, одной из сложностей при реализации QRA является необходимость большого

массива достоверной статистической информации и наличие квалифицированных специалистов, способных интерпретировать результаты и корректно задать параметры моделей. Кроме того, трудоёмкость расчетов, особенно при работе с множеством сценариев, требует автоматизации и хорошо отлаженной процедуры верификации исходных данных.

Особое место в российской практике занимают методики расчета индивидуального и социального риска, закреплённые в нормативных документах — Приказе МЧС России № 1140 и Приказе № 533. Эти документы устанавливают порядок оценки вероятности возникновения пожаров на объектах различного функционального назначения, включая производственные здания и сооружения. Под индивидуальным риском понимается вероятность гибели конкретного человека при воздействии опасных факторов пожара на определённой точке территории объекта. Социальный риск отражает вероятность того, что в результате одного происшествия пострадает определённое число людей. Методика включает расчёт интенсивности воздействия, времени эвакуации, плотности людских потоков, скорости распространения огня и токсичных продуктов горения, а также сравнение полученных значений с предельно допустимыми критериями.

К достоинствам указанных методик относится их нормативная легитимность: они утверждены на федеральном уровне и обязательны к применению при проектировании и экспертизе. Кроме того, методики ориентированы на учёт реальных условий объекта, включая его архитектурные, инженерные, технологические и эксплуатационные особенности. Благодаря этому они позволяют проводить индивидуализированную оценку, а не использовать усреднённые показатели. Однако, как и в случае с QRA, полное и корректное применение этих методов требует наличия исходных данных, включая планы этажей, характеристики систем защиты, параметры эвакуации и статистику отказов. В условиях дефицита информации или ограниченного доступа к проектной документации

точность расчетов может снижаться, что делает актуальной необходимость регулярного обновления базы данных и развития цифровых инструментов поддержки.

Количественные методы анализа пожарных рисков представляют собой наиболее строгий и обоснованный подход, позволяющий перейти от экспертных суждений к численно измеримым показателям. Они являются фундаментом для современного риск-ориентированного регулирования, обеспечения соответствия нормативным требованиям и повышения устойчивости объектов к чрезвычайным ситуациям. Несмотря на высокие требования к качеству данных и компетенциям специалистов, внедрение количественных методик неизбежно в контексте развития цифровой инженерии, автоматизации проектных решений и интеграции систем управления рисками в структуру промышленной безопасности.

Матричные и ранжирующие подходы к классификации пожарных рисков на промышленных объектах: систематизация угроз и приоритетизация мер безопасности

В структуре методов оценки пожарного риска особое место занимают матричные и ранжирующие подходы, относящиеся к классу полуколичественных инструментов. Они широко применяются при анализе опасностей на производственных объектах, где требуется быстрая и структурированная оценка выявленных угроз без использования трудоёмких математических моделей. Эти методы особенно актуальны в случаях, когда отсутствует достаточное количество исходных данных для проведения полной количественной оценки риска, либо когда необходимо принять предварительные решения о приоритетности защитных мероприятий в условиях ограниченного времени и ресурсов.

Применение матричных и ранжирующих методов позволяет формировать так называемую «карту рисков» объекта — визуализированную модель, в которой каждая угроза получает свою позицию в системе координат,

отражающих вероятность её реализации и уровень возможного ущерба. Такая систематизация облегчает восприятие информации и способствует более эффективному управлению безопасностью, особенно в рамках комплексных производственных систем, где количество потенциальных опасностей велико, а степень их взаимовлияния сложно поддаётся формализации.

Одним из базовых инструментов в этой категории является матричный метод оценки риска. Он основывается на построении таблицы, в которой по одной оси откладывается вероятность или частота возникновения пожара, а по другой — тяжесть его последствий. Каждая ячейка таблицы обозначает уровень риска, которому может быть присвоен числовой или цветовой код (например, низкий — зелёный, средний — жёлтый, высокий — красный). Такой подход позволяет быстро выявить участки с недопустимым риском, требующие немедленного вмешательства, а также зоны, где угрозы находятся в пределах допустимого уровня.

Для производственных объектов данный метод удобен своей адаптивностью: можно разрабатывать матрицы различной размерности и степени детализации, с учётом отраслевой специфики (например, особенности химического производства, деревообработки, металлургии и т. д.). Матричный подход позволяет классифицировать риски, связанные с конкретными видами оборудования, технологическими участками или типами деятельности (сварка, хранение горючих веществ, техническое обслуживание), и принимать целенаправленные меры управления на основе этой классификации.

Однако следует отметить, что эффективность матричного метода напрямую зависит от корректности выбора шкал вероятности и последствий. Слишком грубая градация может привести к потере чувствительности, тогда как избыточная детализация затруднит интерпретацию данных. Кроме того, оценка часто носит субъективный характер, особенно при отсутствии достоверной статистики или опыта у экспертов. Метод также не учитывает динамику изменения состояния объекта, взаимодействие между угрозами и

влияние барьеров защиты, что ограничивает его применимость в условиях высокой неопределённости.

В дополнение к матричному анализу применяется метод ранжирования рисков, при котором каждая выявленная угроза получает оценку по заранее установленным критериям — таким как частота возникновения, масштаб возможного ущерба, степень воздействия на персонал и оборудование, потенциальные экологические последствия, уровень социального резонанса и другие показатели. Эти критерии могут иметь различную значимость, что позволяет использовать систему весовых коэффициентов. После оценки всех факторов формируется интегральный показатель, по которому угрозы выстраиваются в порядке убывания приоритетности.

Ранжирование представляет собой более гибкий инструмент, так как допускает индивидуальную настройку под конкретные цели анализа. Например, в случае необходимости экстренного выбора мероприятий на объекте с ограниченным бюджетом ранжирование позволяет сосредоточить усилия на наиболее критичных участках, временно отложив действия по угрозам с низким уровнем значимости. Такой подход также полезен при проведении сравнительного анализа между объектами или технологическими линиями, а также в рамках внутренних аудитов системы управления пожарной безопасностью.

В контексте промышленных объектов метод ранжирования особенно эффективен при оценке остаточного риска — то есть того уровня опасности, который сохраняется после внедрения всех запланированных мер защиты. Он также может быть использован при анализе исторических данных о происшествиях, для выявления тенденций и уточнения приоритетов в дальнейшем управлении.

Тем не менее, данный метод также не лишён ограничений. Его результаты в значительной степени зависят от выбора критериев и формулы агрегации, которые могут исказить реальную картину, если построены некорректно. Кроме того, в случае недостаточной прозрачности методики

оценки результаты могут быть трудно объяснимы для заинтересованных сторон — например, для надзорных органов или инвесторов. Поэтому рекомендуется сопровождать ранжирование описанием используемой методологии, логики присвоения баллов и применяемых весов.

В производственных условиях наибольший эффект достигается при интеграции матричных и ранжирующих подходов с другими методами оценки риска — такими как HAZID, сценарный анализ, ETA или QRA. В совокупности они позволяют не только выявить и классифицировать угрозы, но и обосновать выбор защитных мероприятий, оптимизировать затраты на безопасность и повысить уровень защищённости объекта. В условиях ограниченности ресурсов и необходимости принятия быстрых управленческих решений применение таких методов становится не только целесообразным, но и практически незаменимым инструментом в арсенале специалиста по пожарной безопасности.

Комплексные методы анализа риска: интеграция причинно-следственных связей и эффективности защитных барьеров в системах обеспечения пожарной безопасности

В современных условиях обеспечения пожарной безопасности на производственных объектах всё большую актуальность приобретают методы комплексного анализа, ориентированные на интеграцию различных аспектов оценки риска — от идентификации первичных причин и построения сценариев развития событий до анализа эффективности барьеров защиты и прогнозирования остаточного риска. Эти методы позволяют не только систематизировать информацию, но и наглядно представить логические взаимосвязи между источниками опасности, механизмами развития аварийных ситуаций, функционированием защитных систем и масштабом возможных последствий. Комплексный подход особенно востребован при работе с объектами высокой степени сложности, где простое разделение методов на качественные или количественные оказывается недостаточным для обоснованного принятия решений.

Одним из наиболее распространённых методов в данной категории является метод BowTie, или диаграмма «галстук-бабочка». Он получил широкое распространение благодаря своей способности объединять элементы анализа причин и последствий с визуализацией защитных мер. Центральным элементом диаграммы является так называемое «топ-событие» — ключевой аварийный сценарий, например, возгорание или утечка горючего вещества. Слева от него отображаются угрозы и первопричины, ведущие к его реализации, а справа — возможные последствия. Между угрозами и топ-событием располагаются превентивные барьеры (меры, предотвращающие развитие события), а между топ-событием и последствиями — защитные барьеры (меры, минимизирующие ущерб).

Преимущество BowTie-анализа заключается в его наглядности, универсальности и возможности гибкой настройки под специфику объекта. Он хорошо подходит как для обучения персонала, так и для формирования документации по управлению рисками. Метод позволяет одновременно оценивать полноту системы защиты, выявлять уязвимости, а также отслеживать деградацию барьеров во времени. Однако его применение требует аккуратного подхода к формированию исходных данных и не всегда даёт количественные результаты, достаточные для нормативного обоснования решений.

Развитием идей, заложенных в BowTie, является метод анализа защитных барьеров (Barrier Analysis). В его основе лежит представление о системе безопасности как о совокупности технических, организационных и поведенческих мер, направленных на прерывание цепочки развития аварийных событий. Каждый барьер рассматривается не только с точки зрения его наличия, но и эффективности, надежности, степени независимости от других элементов системы. В рамках анализа производится классификация барьеров на активные (например, системы автоматического пожаротушения), пассивные (огнестойкие конструкции) и управленческие (регламенты, инструкции, обучение персонала).

Метод позволяет провести аудит текущего состояния противопожарной защиты, выявить неработающие или дублирующие элементы, определить зоны с недостаточным уровнем защиты и принять решения о необходимости усиления конкретных направлений. Он широко применяется в нефтегазовой, химической и энергетической промышленности, а также в рамках экспертиз промышленной безопасности. Ключевым ограничением метода является его ограниченная применимость без интеграции с другими методами, позволяющими оценить вероятность отказа барьеров и последствия нарушений.

Более формализованный подход к анализу защитных мер реализован в методе Layer of Protection Analysis (LOPA), который используется для количественной оценки надёжности слоёв защиты. В отличие от визуального BowTie или качественного Barrier Analysis, LOPA предполагает численную оценку вероятностей реализации сценариев аварий при наличии определённого набора независимых барьеров. Метод начинается с построения сценария на основе HAZID или HAZOP, далее оценивается инициирующее событие и вероятность его реализации, после чего для каждого защитного слоя рассчитывается коэффициент надёжности (Protection Layer Effectiveness). Итоговая вероятность реализации опасного исхода позволяет сравнить полученный уровень риска с допустимыми критериями.

Метод LOPA рекомендуется использовать в тех случаях, когда необходимо принять решение о целесообразности внедрения новых защитных систем, модернизации существующих или приоритезации мер безопасности. Он особенно полезен при наличии статистических данных об отказах и надёжности оборудования. Однако применение LOPA требует высокой квалификации специалистов и, как правило, сопровождается использованием специализированных программных инструментов.

Современное развитие методов комплексного анализа связано с внедрением динамических и байесовских сетей, позволяющих учитывать неопределённость, деградацию барьеров во времени и сложные

вероятностные зависимости между элементами системы. Байесовские сети представляют собой графовую модель, в которой узлы обозначают события (например, отказ оборудования, срабатывание системы тушения), а дуги — причинно-следственные связи. Каждому узлу приписывается априорная вероятность, которая может обновляться по мере поступления новых данных. Это позволяет адаптировать модель к изменяющимся условиям эксплуатации и более точно прогнозировать риск.

Применение динамических байесовских сетей и стохастических процессов позволяет моделировать изменение надёжности систем во времени, учитывать эффекты старения, технического обслуживания, воздействия внешней среды и человеческого фактора. Эти методы активно развиваются в сфере управления критически важными объектами — от промышленных производств до энергетики и транспорта. В контексте пожарной безопасности они позволяют не только прогнозировать вероятность аварий, но и оптимизировать профилактические мероприятия, режимы тестирования оборудования, алгоритмы эвакуации и реагирования.

Несмотря на высокую точность и адаптивность, методы на основе байесовских сетей требуют значительного объёма исходных данных и вычислительных ресурсов. Кроме того, построение корректной модели требует участия экспертов, владеющих как предметной областью, так и методологией вероятностного анализа.

Комплексные методы анализа риска играют ключевую роль в современных системах обеспечения пожарной безопасности на производственных объектах. Они позволяют интегрировать данные различных источников, визуализировать цепочки событий, анализировать эффективность защитных барьеров и учитывать динамику изменений. Их применение особенно ценно при построении риск-ориентированных систем управления, разработке стратегии модернизации защиты, обосновании инвестиций в безопасность и подготовке обоснований для надзорных и регулирующих органов. В совокупности с качественными,

полуколичественными и количественными методами комплексный подход формирует основу для надёжного и устойчивого функционирования промышленных предприятий в условиях постоянно меняющейся производственной и нормативной среды.

Математическое моделирование и цифровые инструменты в оценке пожарных рисков: современные технологии и перспективы применения

Современные методы обеспечения пожарной безопасности неразрывно связаны с использованием цифровых инструментов и математического моделирования. Особенно актуальными они становятся при анализе объектов повышенной сложности, где необходимо учитывать множество факторов: архитектурные и планировочные решения, плотность и характер загрузки помещений, специфику технологических процессов, взаимодействие систем защиты и поведение людей в условиях чрезвычайной ситуации. Программные средства позволяют не только прогнозировать развитие пожара, но и анализировать сценарии эвакуации, моделировать работу инженерных систем, интегрировать данные в реальном времени и формировать цифровые модели объектов. Этот блок охватывает ключевые направления применения моделирования в контексте оценки и управления пожарными рисками.

Одним из наиболее широко применяемых направлений является CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics), позволяющее анализировать динамику развития пожара, распространение дыма, температуры, концентрации токсичных газов и воздействие на конструкции. Наиболее известным программным продуктом является Fire Dynamics Simulator (FDS), разработанный Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST). Он основан на решении уравнений движения и тепломассообмена в трёхмерном пространстве, что позволяет с высокой точностью моделировать поведение опасных факторов пожара в сложных архитектурных условиях.

Применение FDS позволяет оценить эффективность систем дымоудаления, скорость прогрева конструкций, развитие очагов возгорания и

поведение огня при наличии вентиляционных потоков. Особенно важно использование таких моделей при проектировании противопожарных систем в зданиях с атриумами, многоэтажных сооружениях, производственных цехах с высокой плотностью оборудования и объектах с массовым пребыванием людей. В сочетании с другими средствами инженерного анализа CFD-моделирование предоставляет данные, необходимые для расчета безопасного времени эвакуации, выбора стратегий тушения и анализа последствий отказа систем.

Другим важным направлением является моделирование эвакуации людей, которое позволяет прогнозировать поведение персонала и посетителей объекта в случае возникновения пожара. Наиболее популярными программами в этой области являются Pathfinder, Simulex, MassMotion, BuildingEXODUS. Эти модели учитывают геометрию помещений, скорость движения людей, плотность потока, поведенческие реакции, влияние препятствий, интенсивность задымления и наличие сигналов оповещения. Анализ эвакуации позволяет определить узкие места, где возможны заторы и скопления, оценить влияние организации путей выхода и время, необходимое для безопасного покидания здания.

Особую ценность моделирование эвакуации представляет при проектировании объектов с высокой плотностью пребывания людей, таких как театры, стадионы, вокзалы, торговые центры и производственные корпуса с ограниченными маршрутами выхода. Также данные модели применяются при проверке соответствия проектных решений требованиям нормативов по эвакуации, а в ряде случаев — при судебных разбирательствах по фактам происшествий.

Третьим направлением, активно развивающимся в последние годы, является интеграция моделей пожарной безопасности в цифровую архитектуру зданий, прежде всего через технологии информационного моделирования (BIM — Building Information Modeling) и цифровых двойников (Digital Twin). BIM-технологии позволяют создавать подробные цифровые

модели зданий и сооружений, содержащие информацию не только о геометрии, но и о функциональных характеристиках, инженерных системах, используемых материалах, расписаниях обслуживания и сценариях эксплуатации. Интеграция моделей FDS и Pathfinder в BIM-платформы (например, Autodesk Revit, ArchiCAD) позволяет автоматизировать анализ проектных решений, выявлять конфликты между системами, моделировать пожарные сценарии на этапе концептуального проектирования.

Концепция цифрового двойника позволяет идти ещё дальше — она предполагает постоянное обновление цифровой модели в режиме реального времени на основе данных от датчиков, установленных на объекте. Такие модели могут отслеживать техническое состояние оборудования, загрузку помещений, работоспособность систем противопожарной защиты, погодные условия, и при этом прогнозировать развитие аварийных ситуаций с учетом текущих параметров. В условиях промышленных объектов это особенно ценно для оценки остаточного ресурса барьеров, своевременного выявления сбоев в системе защиты и принятия решений по профилактике.

Внедрение цифровых двойников позволяет перейти от статической оценки риска к динамическому управлению безопасностью, что соответствует современным тенденциям в промышленной и противопожарной инженерии. При наличии развитой инфраструктуры интернета вещей (IoT), систем диспетчеризации и автоматизации, цифровой двойник может выполнять функции предиктивной диагностики, раннего предупреждения и визуализации критических параметров, интегрируясь с системами принятия решений и ситуационными центрами предприятий.

Однако несмотря на очевидные преимущества цифровых технологий, их внедрение сопровождается рядом сложностей. Прежде всего это высокая стоимость программного обеспечения и аппаратных средств, необходимость обучения персонала, сложность интерпретации результатов моделирования и ограничения верификации сложных моделей. Кроме того, для эффективного использования цифровых инструментов требуется наличие достоверных

исходных данных, включая характеристики материалов, вентиляционных систем, сценариев поведения персонала, параметров загруженности и логистики на объекте.

Тем не менее, использование математического моделирования и цифровых инструментов становится неотъемлемой частью современной системы оценки пожарных рисков, особенно в условиях перехода к риск-ориентированному проектированию. Они позволяют повысить точность анализа, минимизировать неопределённости, своевременно выявлять уязвимости и адаптировать систему защиты под реальные условия эксплуатации. Применение таких технологий в сочетании с экспертными методами и нормативными процедурами формирует основу для эффективного и научно обоснованного управления пожарной безопасностью на промышленных объектах.

Многоэкспертные процедуры и методы экспертной оценки пожарного риска

В условиях недостатка достоверной статистики, ограниченного объема эмпирических данных и высокой степени неопределенности, характерной для уникальных, вновь проектируемых или модернизируемых производственных объектов, значительную роль в оценке пожарных рисков приобретают экспертные методы. Эти подходы позволяют получать обоснованные и структурированные суждения о вероятности и последствиях пожароопасных событий при невозможности применения точных расчетных моделей.

Одним из наиболее широко используемых инструментов в этой области является метод Дельфи. Его суть заключается в проведении серии анонимных опросов независимых экспертов с последовательной обратной связью, уточнением и пересмотром ранее высказанных оценок. Такой подход способствует снижению влияния авторитетов, минимизации эффекта группового давления и позволяет приблизиться к консенсусу в условиях неопределенности. Применение метода Дельфи особенно эффективно при

формировании сценариев пожара, оценке степени надежности защитных барьеров, определении допустимых уровней риска и выборе приоритетных направлений снижения угроз.

Помимо метода Дельфи, используются и другие многоэкспертные процедуры, включающие ранжирование угроз по степени их потенциальной опасности, построение матриц предпочтений, оценку веса факторов, влияющих на вероятность и тяжесть последствий. Для повышения объективности полученных данных применяются статистические методы обработки экспертных мнений, включая расчет коэффициента конкордации Кендэлла, индекса согласия, коэффициента вариации и других показателей согласованности. Это позволяет количественно оценивать уровень консенсуса и учитывать различия в восприятии риска между представителями различных профессиональных групп (например, инженерами, технологами, специалистами по охране труда, пожарными аудиторами и др.).

Многоэкспертные процедуры являются важным инструментом на этапе предварительной оценки риска, особенно в случаях, когда недоступны стандартизированные данные или требуется быстрая ориентировочная оценка при принятии управленческих решений. Они позволяют идентифицировать критические зоны объекта, сформировать перечень наиболее вероятных сценариев пожара, выявить слабые места в системе защиты, а также определить приоритеты по внедрению защитных мер.

К числу достоинств экспертных методов можно отнести относительную простоту реализации, универсальность и адаптивность, возможность использования в полевых условиях, в том числе в процессе технических обследований и аудитов. Кроме того, они позволяют интегрировать знания и опыт специалистов с различными профилями, что повышает качество и полноту оценки.

Однако применение этих методов требует соблюдения определённых условий. Ключевыми ограничениями являются высокая зависимость результатов от компетентности и квалификации экспертов, потенциальная

субъективность оценок, а также необходимость верификации полученных данных посредством альтернативных подходов, таких как количественное моделирование или анализ инцидентов. В ряде случаев может потребоваться калибровка экспертных мнений с учётом их точности в прошлом или с использованием доверительных весов. Эффективное применение многоэкспертных процедур возможно лишь при чётко организованной методике сбора, обработки и интерпретации результатов, а также при наличии профессиональной модерации процесса.

В рамках системного анализа пожарных рисков на производственных объектах экспертные методы могут применяться как самостоятельный инструмент, так и в качестве дополнения к другим методам оценки, включая BowTie, QRA, FTA и моделирование сценариев. Их включение в общий контур управления рисками обеспечивает повышение обоснованности проектных решений и позволяет учитывать те аспекты безопасности, которые сложно формализовать в числовой форме.

Подходы к оценке допустимости риска и поддержке принятия решений в области пожарной безопасности

После проведения количественной или комбинированной оценки пожарных рисков важнейшим этапом становится формулирование вывода о приемлемости полученных значений риска. На этом этапе осуществляется переход от аналитических расчётов к практическим решениям в области проектирования, модернизации или эксплуатации объекта. Ключевая задача заключается не только в интерпретации результатов моделирования, но и в сопоставлении их с установленными критериями безопасности и нормативными порогами допустимого риска.

Одним из наиболее распространённых и признанных на международном уровне подходов к оценке допустимости риска является концепция ALARP (As Low As Reasonably Practicable), которая означает, что риск должен быть снижен до настолько низкого уровня, насколько это практически осуществимо

с учетом соотношения затрат и выигрыша в области безопасности. В рамках этой концепции предполагается наличие трёх зон: зона недопустимого риска, зона ALARP (допустимого при обосновании) и зона пренебрежимо малого риска. Если уровень риска попадает в зону ALARP, необходимо продемонстрировать, что дальнейшее снижение риска потребовало бы несоразмерных затрат и не привело бы к значимому повышению безопасности.

В ряде стран установлены количественные нормативные пределы индивидуального риска. Наиболее часто встречающимися являются значения 1×10^{-6} в год для третьих лиц (населения) и 1×10^{-4} в год для персонала, находящегося в контролируемой зоне риска. Такие критерии применяются, в частности, при лицензировании опасных производственных объектов, планировании градостроительных зон и оценке допустимости ввода новых производств. В российской практике эти подходы находят отражение в нормативных методиках, включая приказы МЧС № 1140 и № 533, а также в рамках независимой экспертизы промышленной безопасности.

Для принятия обоснованных решений используется совокупность методов, в том числе сравнительный анализ альтернативных сценариев развития событий, построение матриц риска, в которых сопоставляются частота и тяжесть последствий, а также оценка остаточного риска после внедрения проектных или организационных защитных мероприятий. Эти подходы позволяют оценить эффективность уже реализованных или планируемых мер и определить, остаётся ли риск в пределах допустимого уровня.

Значительное внимание уделяется также вопросам документирования выводов о допустимости риска. Это включает обоснование выбранных сценариев анализа, описание допущений и ограничений расчётов, фиксацию критериев приемлемости и изложение логики выбора конкретных решений. Такая прозрачность необходима как для внутреннего контроля, так и в случае взаимодействия с надзорными и экспертными органами. Кроме того,

обоснованная позиция по допустимости риска является основой для обоснования проектных решений, инвестиций в модернизацию систем безопасности и планирования мероприятий по техническому перевооружению объекта.

Процедура оценки допустимости риска является неотъемлемым элементом системы управления пожарной безопасностью и служит связующим звеном между аналитическими методами оценки и практическими действиями по снижению риска. Рациональное применение этой процедуры позволяет обоснованно принимать решения, обеспечивая при этом соблюдение принципов нормативной достаточности, экономической эффективности и соответствия требованиям законодательства.

Аудит систем пожарной безопасности

Обеспечение надежной защиты объектов от пожаров требует не только разработки и внедрения соответствующих мер, но и регулярного контроля их эффективности и соответствия установленным стандартам. Аудит систем пожарной безопасности представляет собой комплексную процедуру оценки состояния противопожарной защиты объекта, направленную на выявление потенциальных рисков, проверку соответствия нормативным требованиям и разработку рекомендаций по повышению уровня безопасности.

Внутренний аудит проводится силами самой организации с целью самостоятельной оценки состояния пожарной безопасности. Внутренние проверки помогают своевременно выявлять и устранять недостатки, обеспечивая непрерывный мониторинг и улучшение системы безопасности. Такие аудиты способствуют повышению осведомленности сотрудников о требованиях пожарной безопасности и укрепляют культуру безопасности внутри организации.

Внешний аудит осуществляется независимыми экспертами или специализированными организациями, обладающими соответствующей аккредитацией. Внешняя оценка обеспечивает объективность и может

выявить проблемы, не замеченные внутренними специалистами, а также предоставить рекомендации, основанные на передовом опыте и знаниях в области пожарной безопасности. Такие аудиты часто используются для подготовки к государственным проверкам или сертификации.

Регламентный аудит, проводимый в соответствии с требованиями надзорных органов, таких как МЧС России, представляет собой обязательную проверку соблюдения нормативных требований в области пожарной безопасности. Эти проверки, являясь частью государственного пожарного надзора, осуществляются с определенной периодичностью или в случае выявления нарушений, и направлены на защиту жизни и здоровья граждан, их имущества, а также государственного и муниципального имущества от пожаров и ограничения их последствий.

Результаты таких проверок могут существенно влиять на возможность продолжения деятельности предприятия, поскольку выявленные несоответствия могут привести к приостановке эксплуатации объектов или наложению штрафных санкций. Поэтому руководство организаций должно уделять особое внимание подготовке к таким аудитам и обеспечению соответствия всех аспектов деятельности установленным требованиям пожарной безопасности.

Основными задачами государственного пожарного надзора являются: контроль за соблюдением требований пожарной безопасности, проведение профилактической работы по предупреждению пожаров, а также принятие мер по привлечению к ответственности лиц, нарушающих установленные нормы и правила.

В рамках реформирования надзорной деятельности и профилактической работы, МЧС России проводит работу по снижению административных барьеров для предпринимательской деятельности, внедряя институт независимой оценки пожарного риска, что позволяет применять риск-ориентированный подход к организации надзорных функций.

Инициативный аудит проводится по инициативе руководства организации для оценки текущего состояния системы пожарной безопасности, подготовки к официальным проверкам или в рамках программы улучшения корпоративной безопасности. Инициативные аудиты позволяют проактивно выявлять и устранять потенциальные угрозы, способствуя повышению общей устойчивости предприятия к чрезвычайным ситуациям.

Основными этапами проведения аудита выступают:

1. Анализ документации. На данном этапе проверяется полнота и актуальность всей документации, связанной с пожарной безопасностью: приказы, инструкции, планы эвакуации, журналы учета проверок и обучения персонала. Особое внимание уделяется соответствию документов действующим нормативным требованиям и их практической применимости. Например, проверяется наличие утвержденных планов эвакуации в каждом помещении и актуальность инструкций по пожарной безопасности. Данный этап позволяет выявить документальные несоответствия и определить области, требующие корректировки.

2. Обследование объекта. Физический осмотр помещений и территорий объекта с целью оценки состояния путей эвакуации, наличия и исправности противопожарных преград, соответствия материалов отделки требованиям пожарной безопасности, а также проверки наличия и состояния первичных средств пожаротушения. Специалисты оценивают условия хранения и использования материалов, работу систем пожаротушения, оповещения и эвакуации, состояние электрооборудования и другие критически важные элементы. Этот этап позволяет выявить физические недостатки и потенциальные источники возгорания.

3. Проверка инженерных систем. Тестирование работоспособности автоматических установок пожаротушения, систем пожарной сигнализации, оповещения и управления эвакуацией, противодымной защиты и внутренних противопожарных водопроводов. Проверка проводится в соответствии с установленными регламентами, определяющими периодичность и методы

контроля таких систем. Например, оценивается исправность пожарной сигнализации, наличие и работоспособность средств индивидуальной защиты, а также состояние путей эвакуации. Этот этап критически важен для обеспечения готовности инженерных систем к эффективному реагированию в случае пожара.

4. Оценка квалификации персонала. Проверка уровня подготовки сотрудников, их осведомленности о действиях в случае пожара, наличия необходимых инструктажей и тренингов. Эффективность системы пожарной безопасности во многом зависит от грамотных и своевременных действий персонала в чрезвычайных ситуациях. Оценивается знание инструкций по действиям в случае возникновения пожара, уровень ответственности и способность сотрудников действовать в стрессовых условиях. Этот этап помогает выявить потребности в дополнительном обучении и повышении квалификации персонала.

5. Моделирование аварийных ситуаций. Проведение стресс-тестов и имитация различных сценариев возникновения пожара для оценки готовности системы и персонала к чрезвычайным ситуациям. Это позволяет выявить слабые места в существующей системе и разработать меры по их устранению. Например, могут проводиться учебные тревоги, позволяющие оценить скорость и эффективность эвакуации, а также взаимодействие различных подразделений при возникновении пожара. Результаты моделирования используются для корректировки планов реагирования и улучшения координации действий.

По завершении всех этапов аудита составляется подробный отчет, включающий выявленные несоответствия, оценку текущего состояния системы пожарной безопасности, а также рекомендации по устранению недостатков и повышению уровня защиты объекта. Регулярное проведение таких аудитов способствует не только соблюдению нормативных требований, но и созданию безопасной среды для сотрудников и посетителей, снижению вероятности возникновения пожаров и минимизации возможных ущербов.

Внедрение систематического подхода к аудиту пожарной безопасности является неотъемлемой частью эффективного управления рисками и обеспечения устойчивой работы предприятия.

1.3. Проблематика применения нормативных подходов и анализ современных исследований в области оценки эффективности защитных барьеров

Современные подходы к обеспечению пожарной безопасности производственных объектов в значительной степени опираются на нормативно закреплённые методики, определяющие порядок идентификации угроз, расчёта вероятностей возникновения пожаров и оценки последствий. Однако на практике реализация этих методик сталкивается с рядом методологических и информационных ограничений, существенно снижающих точность и применимость прогнозных моделей. Одной из наиболее существенных проблем, возникающих при использовании существующих нормативных документов, является дефицит достоверных статистических данных, необходимых для корректного количественного анализа пожарных рисков. В Российской Федерации отсутствует централизованная и регулярно обновляемая база данных, в которой бы систематически отражались сведения о частоте возникновения пожаров, характере их развития, масштабах ущерба, а также эффективности применённых мер реагирования.

Данный пробел затрудняет проведение калибровки вероятностных моделей, которые лежат в основе большинства методик оценки риска. Вследствие этого прогнозирование пожароопасных событий нередко оказывается недостаточно обоснованным, а управленческие решения — основанными на предположениях, а не на верифицированных эмпирических данных. Дополнительной трудностью является отсутствие в нормативной базе полноценных математических моделей, способных учитывать совокупное воздействие нескольких защитных барьеров, их взаимодействие в условиях

аварийных сценариев и влияние деградации технических систем на уровень безопасности. В ряде случаев это может привести либо к переоценке, либо к недооценке эффективности реализованных противопожарных мероприятий, что, в свою очередь, увеличивает остаточный риск.

В условиях обозначенных ограничений всё большую актуальность приобретает научный анализ, направленный на систематизацию и совершенствование существующих подходов к оценке функционирования защитных барьеров. Рассмотрение актуальных исследовательских работ в данной области позволяет выявить как теоретические достижения, так и пробелы в понимании механизмов обеспечения устойчивости объектов к воздействию опасных факторов пожара.

Так, в ряде фундаментальных исследований представлены результаты систематического анализа существующих подходов к классификации и оценке защитных барьеров, преимущественно на примере химической и перерабатывающей промышленности. Особое внимание уделяется активным, пассивным и организационным мерам защиты, их структуре и взаимодействию. Комплексный характер этих обзоров позволяет получить целостное представление о структуре современных систем обеспечения промышленной безопасности, определить границы применимости различных барьерных стратегий и сформировать основу для построения более универсальных моделей оценки эффективности.

Существенным направлением в рамках современных исследований является количественная оценка работоспособности защитных барьеров с применением метода Layer of Protection Analysis (LOPA). Этот метод позволяет структурировать уровень защищённости объекта, выделяя независимые уровни защиты (Independent Protection Layers), и оценивать их надёжность с учётом вероятностных характеристик отказов. Преимуществом LOPA является возможность сопоставления рисков различных аварийных сценариев с функциональностью систем защиты и их резервированием. Вместе с тем, стоит отметить, что реализация данного метода требует наличия

детализированных технических данных, в том числе по отказоустойчивости оборудования, регламенту техобслуживания и качеству исполнения процедур. При их отсутствии применение LOPA может быть затруднено или привести к недостаточно точным результатам.

Другим значимым направлением исследований являются работы, посвящённые моделированию домино-эффектов при пожарах. Домино-эффект представляет собой каскадную эскалацию инцидентов, когда первичный пожар провоцирует последующие аварийные события на близлежащих установках или технологических узлах. В современных работах предлагаются математические модели, учитывающие пространственное расположение оборудования, тепловое воздействие, наличие защитных преград, а также надёжность их функционирования. Интеграция таких моделей в систему оценки рисков позволяет перейти от анализа локального инцидента к комплексной оценке всей производственной среды.

Особое значение в данных исследованиях приобретает использование параметров надёжности защитных систем, выраженных через коэффициенты технической готовности, интенсивность отказов, среднее время восстановления и степень автоматизации процессов. Тем не менее, большинство из рассматриваемых моделей опираются на статические допущения, что ограничивает их применимость в условиях изменяющейся эксплуатации. В реальных производственных условиях эффективность барьеров может снижаться под воздействием агрессивных сред, коррозии, износа компонентов, нарушений регламентов технического обслуживания. Кроме того, в ряде случаев отсутствует учёт организационных факторов, таких как квалификация персонала, регулярность проведения инструктажей и соблюдение регламентных процедур.

Несмотря на существенный прогресс в теоретической проработке вопросов оценки защитных барьеров, в том числе с использованием количественных и вероятностных методов, остаются нерешёнными задачи, связанные с интеграцией реальных эксплуатационных факторов в расчётные

модели. Кроме того, сохраняется потребность в разработке универсальных, адаптивных методик, способных учитывать как технические параметры систем защиты, так и организационные аспекты функционирования производственного объекта. Решение этих задач предполагает объединение результатов фундаментальных исследований с инструментами прикладного анализа, что требует междисциплинарного подхода и активного взаимодействия между научным сообществом, проектными организациями и эксплуатирующими предприятиями.

Глава 2. Современные методы анализа эффективности защитных барьеров

В современных условиях обеспечения пожарной безопасности на производственных объектах на первый план выходит необходимость объективной и комплексной оценки эффективности защитных барьеров. Если нормативные и методические документы формируют общую рамку допустимых решений, то именно методы анализа эффективности барьеров позволяют перейти от декларативных требований к практическому управлению остаточным риском. Защитные барьеры, включая технические, организационные и управленческие меры, являются ключевыми элементами системы противодействия пожарам, и их способность функционировать в условиях деградации, отказов или сложных внешних воздействий определяет общий уровень защищённости объекта.

В данной главе рассматриваются современные подходы к количественной и качественной оценке функционирования барьеров, методы вероятностного анализа, сценарные и комбинированные методики, позволяющие выявить слабые места в системе защиты и определить приоритеты её модернизации. Особое внимание уделяется применению методов BowTie, Barrier Analysis, LOPA, а также математическим моделям, позволяющим учитывать влияние эксплуатационных факторов и неопределённостей. В рамках системного анализа описаны способы интеграции различных методов, ориентированные на достижение согласованной оценки остаточного риска.

Рассматриваемые подходы составляют методологическую основу для разработки барьерно-ориентированных моделей управления пожарной безопасностью и применяются как при проектировании новых объектов, так и при оценке действующих систем защиты.

2.1. Современные подходы к количественной оценке эффективности защитных барьеров и анализ эксплуатационных факторов

Актуальной задачей обеспечения пожарной безопасности на промышленных объектах является разработка и внедрение инструментов, позволяющих количественно оценивать не только вероятность возникновения пожароопасных событий, но и их возможное развитие по сценарию домино-эффекта. Домино-эффекты, характеризующиеся каскадным распространением аварий с вовлечением смежных участков и технологических блоков, представляют собой серьёзную угрозу для крупных предприятий, особенно в условиях плотной производственной застройки и высокой концентрации горючих материалов.

Особую значимость в этом контексте приобретает построение многоступенчатых сценариев развития аварий, при которых один инцидент может последовательно инициировать серию новых событий, усложняющих процесс ликвидации последствий. Применение количественных моделей, способных учитывать взаимосвязанные этапы эскалации, позволяет более точно прогнозировать не только вероятность первичных событий, но и степень вовлечения дополнительных участков, а также объёмы возможного ущерба. Одним из ключевых преимуществ таких подходов является интеграция данных о надёжности защитных барьеров — как технических, так и организационных — с вероятностным анализом сложных многозвенных инцидентов.

Однако стоит отметить, что эффективность подобных методик существенно ограничивается качеством исходной информации. Расчётные процедуры демонстрируют высокую чувствительность к погрешностям в данных, в частности к неполноте сведений об эксплуатационном состоянии оборудования, а также к неопределённостям, связанным с воздействием внешних условий. Например, непредсказуемое поведение пожарных факторов в условиях сильного ветра, осадков или экстремальных температур может существенно исказить результаты моделирования.

Одним из примеров подходов, ориентированных на системный анализ угроз и оптимизацию мероприятий по снижению рисков, являются модели, позволяющие формировать первичную оценку пожарной опасности и определять приоритетные направления вмешательства. Несмотря на высокую прикладную ценность и удобство использования в качестве инструмента экспресс-анализа, такие методы обладают ограниченной способностью к моделированию сложных сценариев пожаров, особенно в части учёта человеческого фактора и поведенческих реакций персонала. Для повышения достоверности прогнозов рекомендуется интеграция этих моделей с детерминированными алгоритмами, способными описывать динамику распространения огня, функционирование эвакуационных маршрутов, а также особенности поведения людей в чрезвычайных ситуациях. Такое объединение позволяет повысить точность оценки последствий и обоснованность предложенных мер реагирования.

Наряду с разработкой количественных моделей оценки рисков важное место занимает исследование влияния эксплуатационных условий на работоспособность систем противопожарной защиты. На практике эффективность защитных барьеров может существенно снижаться в зависимости от внешней среды, износа оборудования и отсутствия регулярного технического обслуживания. Эксплуатационные факторы, такие как повышенная влажность, резкие перепады температур, воздействие химически агрессивных сред или высокая запылённость, оказывают прямое влияние на техническое состояние инженерных систем и снижают их способность выполнять заданные функции в условиях пожара.

Особое внимание при анализе защищённости производственных объектов должно уделяться моделированию деградации защитных барьеров во времени. Традиционные статические модели, как правило, не учитывают снижение надёжности систем по мере их старения, что приводит к ошибочной переоценке их эффективности. Альтернативой служат динамические подходы, основанные на использовании многослойных вероятностных сетей,

позволяющих учитывать широкий спектр параметров: возраст оборудования, интенсивность эксплуатации, частоту отказов, своевременность и качество технического обслуживания. Такие модели обладают способностью адаптироваться к изменениям эксплуатационной среды и обеспечивают более реалистичную картину остаточного ресурса защитных систем.

Ключевым преимуществом динамических моделей является возможность интеграции разнородных данных — от технических характеристик и правил эксплуатации до экспертных заключений и результатов визуальных осмотров. Это позволяет использовать как количественные, так и качественные источники информации, компенсируя дефицит формализованных статистических данных. Однако применение таких моделей требует тщательной настройки и наличия обширной базы данных по техническому состоянию оборудования, что может быть затруднительно для объектов с ограниченным объёмом документированной информации.

Анализ проведённых исследований свидетельствует о необходимости формирования комплексных методик, сочетающих в себе возможности количественного анализа, адаптивность к условиям эксплуатации и способность учитывать как инженерные, так и организационные аспекты функционирования системы безопасности. Только интеграция всех указанных компонентов позволяет выстроить полноценную модель оценки пожарных рисков, отражающую реалии функционирования современных промышленных предприятий и способную обеспечить надёжную основу для принятия управленческих решений.

2.2. Применение вероятностных методов в оценке эффективности защитных барьеров

Одним из наиболее перспективных направлений в современной практике анализа техногенных рисков является использование вероятностных методов для количественной оценки надёжности функционирования защитных систем, направленных на предотвращение и локализацию

пожароопасных ситуаций. Данные подходы позволяют учитывать широкий спектр неопределённостей, присущих сложным инженерным системам, а также динамически адаптировать оценки по мере накопления новой информации об изменениях состояния оборудования, эксплуатационных условиях и организационных факторах.

Современные исследования в этой области акцентируют внимание на необходимости интеграции анализа рисков с механизмами адаптивного управления защитными мерами. Основное преимущество подобных методик заключается в способности учитывать изменяющиеся характеристики производственных объектов, параметры технологических процессов, степень физического износа оборудования и снижение эффективности технических и организационных барьеров. В отличие от традиционных детерминированных моделей, в которых параметры считаются фиксированными и независимыми от условий эксплуатации, вероятностные подходы обеспечивают большую гибкость и адаптивность, особенно в условиях высокой неопределённости.

Ключевой особенностью данных методик является возможность регулярного пересчёта вероятностных характеристик защитных барьеров с учётом текущего состояния систем, внешней среды, а также накопленных статистических или экспертных данных. Такой подход особенно актуален для отраслей с высокой степенью риска, например, в нефтегазовой и химической промышленности, где условия эксплуатации могут существенно изменяться в течение жизненного цикла оборудования. Дополнительным преимуществом является возможность комплексного анализа взаимодействия различных типов барьеров – активных, пассивных и организационных – что способствует более точному моделированию их совокупного вклада в общий уровень безопасности.

Несмотря на широкие аналитические возможности, существует ряд ограничений, которые затрудняют практическое внедрение подобных моделей. Одним из них является ограниченная применимость адаптивных вероятностных моделей в отраслях, отличных от тех, для которых они

изначально разрабатывались. Например, методики, ориентированные на управление рисками в нефтегазовой отрасли, могут требовать существенной модификации при применении в сферах гражданского строительства, энергетики или машиностроения. Кроме того, ряд существующих моделей не учитывает влияние внешних факторов, таких как климатические условия, коррозионные процессы, абразивный износ, что может существенно снижать точность оценки надежности и долговечности защитных барьеров.

Особое внимание в последние годы уделяется применению байесовских методов и моделей для прогнозирования технических отказов и оценки остаточного ресурса функционирования защитных систем. Преимуществом байесовских сетей является их способность моделировать сложные причинно-следственные связи между элементами системы безопасности, а также корректировать оценки риска на основе поступающих обновлённых данных. Динамический характер этих моделей позволяет учитывать не только текущее состояние оборудования, но и его возраст, частоту технических обслуживаний, выявленные неисправности, условия эксплуатации и другие параметры, влияющие на вероятность отказа.

Дополнительную ценность представляет возможность интеграции различных источников информации – от технической документации до экспертных заключений и эмпирических наблюдений. Это позволяет построить более полное и реалистичное представление о функционировании защитных барьеров в реальных условиях. Кроме того, байесовские сети обладают высокой степенью адаптивности, позволяя учитывать как технологические, так и организационные аспекты, включая поведение персонала, регламенты эксплуатации и качество оперативного реагирования.

В перспективе развитие данного направления может включать интеграцию байесовских моделей с другими методами анализа, в частности с марковскими цепями и стохастическими моделями надёжности, что позволит описывать процессы деградации оборудования во времени с учётом вероятностных переходов между состояниями. Это, в свою очередь, откроет

возможности для более точного прогнозирования не только технических отказов, но и последствий, которые могут наступить вследствие недостаточной эффективности системы защиты.

Тем не менее, применение вероятностных моделей также сталкивается с определёнными трудностями, связанными с необходимостью наличия достоверных и репрезентативных данных. Построение надёжных байесовских сетей требует больших массивов статистической информации, включая частоту отказов, время наработки на отказ, параметры внешней среды, и их изменения во времени. На практике подобные данные часто оказываются либо недоступными, либо недостаточно точными, что снижает надёжность прогнозов.

Особую актуальность приобретает вопрос автоматизации сбора данных и использования систем технического мониторинга для оперативного обновления информации о состоянии оборудования. Интеграция методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных с вероятностными моделями, такими как байесовские сети, может существенно повысить точность оценки рисков и обеспечить возможность предиктивной диагностики потенциальных угроз. Такое объединение позволяет создать интеллектуальные системы управления безопасностью, способные не только оценивать текущий уровень защищённости, но и своевременно предлагать корректирующие действия по повышению надёжности функционирования объектов.

Применение вероятностных методов, в том числе с использованием байесовских сетей, представляет собой перспективное направление в области оценки пожарной опасности и управления промышленными рисками. Эти подходы позволяют перейти от статических и универсальных решений к адаптивным моделям, способным учитывать специфику конкретного объекта, динамику изменения параметров и комплексное воздействие внутренних и внешних факторов на функционирование системы противопожарной защиты.

2.3. Комбинированное воздействие защитных барьеров на снижение пожарных рисков

Современная практика обеспечения промышленной безопасности всё чаще требует перехода от фрагментарного анализа отдельных элементов защиты к интегральной оценке комбинированного воздействия различных барьеров на общее снижение уровня риска. Комбинированное применение технических, организационных и конструктивных мер позволяет создать многоуровневую систему, способную эффективно противодействовать как первичным угрозам, так и их эскалации, включая домино-эффекты и распространение пожара между функциональными зонами объекта.

Комбинированное воздействие барьеров рассматривается как совокупность мер, реализуемых в рамках стратегий активной, пассивной и конструктивной защиты. Активные меры, включающие автоматические системы пожаротушения, аварийного отключения технологического оборудования и системы раннего обнаружения возгораний, направлены на быстрое реагирование при возникновении инцидента. Пассивные меры предполагают физическое разделение опасных установок, применение огнестойких конструкций, огнепреградителей, противопожарных клапанов и других элементов, препятствующих распространению огня. Концепция внутренне безопасного проектирования дополняет систему за счёт проектных решений, минимизирующих потенциальную пожароопасность уже на стадии создания объекта (например, выбор менее горючих материалов, сокращение объёмов хранения ЛВЖ, замена опасных процессов на менее опасные аналоги).

При построении эффективной системы защиты важно не только наличие этих барьеров, но и их взаимодействие, взаимозаменяемость, дублирование и способность к автономному функционированию в условиях нарушения штатного режима. Недостаточная координация между барьерами, а также неправильная оценка их совокупного влияния могут привести к ложной

уверенности в надёжности системы, в то время как отдельные звенья могут обладать высокой уязвимостью, особенно при отказе ключевых компонентов.

Методологическая база для анализа комбинированного воздействия барьеров включает в себя различные инструменты: дерево отказов (FTA), дерево событий (ETA), концепцию ALARP, байесовские сети, а также более современные методы комплексного количественного анализа рисков, объединяющие технические и организационные компоненты. В частности, методы на основе деревьев отказов и событий позволяют проследить логические связи между возможными причинами инцидента и их последствиями, определив критические барьеры, нарушение которых с наибольшей вероятностью приведёт к эскалации аварийной ситуации.

Дополнительным шагом в эволюции анализа стала разработка методик, ориентированных на определение взаимодействий между барьерами и динамики изменения их эффективности во времени. Такие подходы дают возможность выявить, какие элементы системы можно модернизировать или временно вывести из эксплуатации без значительного повышения риска, а какие являются незаменимыми с точки зрения общей защищённости. Однако на практике подобные методы часто применяются в отрыве от реальных эксплуатационных условий, что снижает их применимость в динамично изменяющейся производственной среде.

Также представляют интерес методики количественной оценки эффективности пассивных барьеров на основе принципа допустимости остаточного риска. Подобные подходы позволяют соотнести достигнутый уровень снижения риска с затратами на реализацию мероприятий, обеспечивая оптимизацию финансовых ресурсов при планировании системы защиты. Тем не менее, если пассивные барьеры рассматриваются без учёта синергетического взаимодействия с активными мерами, это может привести к недооценке их совокупного воздействия на безопасность объекта.

Одним из перспективных направлений является применение адаптивных вероятностных моделей, в частности байесовских сетей, для

анализа взаимосвязей между барьерами и прогнозирования их эффективности в реальном времени. Эти модели позволяют учитывать стохастические взаимозависимости между элементами защиты, проводить сценарный анализ с учётом деградации оборудования, эксплуатационных факторов и поведения персонала. Однако, при всей эффективности таких моделей, их применимость ограничивается необходимостью сбора большого массива достоверных данных, что на практике встречает трудности из-за отсутствия централизованных баз статистики по отказам и инцидентам.

Развитие комбинированных подходов к анализу защитных барьеров предполагает интеграцию методик количественного анализа рисков с инструментами инженерной диагностики, оперативного мониторинга и интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Такие интегрированные методы позволяют не только количественно оценивать эффективность каждого барьера в отдельности, но и выявлять ключевые зоны взаимодействия и взаимовлияния между ними. Особую ценность в этом контексте представляет визуализация системы барьеров в виде блок-схем, диаграмм взаимосвязей и цифровых двойников объектов, что упрощает анализ, аудит и планирование мероприятий по модернизации системы противопожарной защиты.

Комбинированное воздействие защитных барьеров представляет собой основу современной концепции управления пожарными рисками на производственных объектах. Эффективность системы зависит не только от технического совершенства отдельных компонентов, но и от того, насколько скоординировано и последовательно они взаимодействуют в рамках общей архитектуры безопасности. Перспективным направлением является развитие гибких, адаптивных моделей оценки, позволяющих учитывать не только текущее состояние защитных систем, но и прогнозировать последствия их отказов с учётом изменений в технологической и организационной среде.

2.4. Интеграция методик оценки пожарного риска: направления и ограничения

Современные вызовы в области промышленной безопасности и стремление к повышению надёжности систем защиты от пожаров стимулируют развитие интегративных подходов, ориентированных на объединение различных методик анализа рисков. Применение единичных инструментов, таких как сценарный анализ, байесовские сети, методы количественной оценки надёжности или детерминированные модели, зачастую оказывается недостаточным для получения объективной и всесторонней картины пожарной опасности. Это обусловлено многофакторной природой риска, наличием большого количества взаимосвязанных переменных, а также высокой степенью неопределённости эксплуатационных условий. В этой связи интеграция существующих методик оценки пожарного риска становится необходимым условием для построения более точных, адаптивных и практико-ориентированных моделей управления техногенной безопасностью.

Одним из направлений интеграции является применение критериального анализа, в рамках которого осуществляется выявление наиболее значимых факторов, влияющих на вероятность возникновения пожаров и на динамику их развития. Такой подход позволяет формировать обоснованные стратегии управления рисками, концентрируясь на тех элементах системы, отказ которых способен спровоцировать наибольшие последствия. Однако его реализация часто ограничивается рассмотрением лишь статических характеристик объектов, без учёта времени, деградации защитных систем, а также эксплуатационных отклонений от проектных условий.

Интересным направлением, имеющим потенциал для дальнейшего развития, является использование методов структурного анализа, таких как интерпретативное структурное моделирование. Этот подход позволяет идентифицировать и ранжировать взаимосвязи между элементами системы

безопасности, выделяя наиболее уязвимые компоненты. Моделирование на основе матрицы взаимозависимостей позволяет определить, как отдельные риски влияют друг на друга, и какие из них являются ключевыми триггерами развития пожароопасной ситуации. Однако такие модели в основном направлены на выявление логических связей и не содержат инструментов для количественного прогнозирования надёжности защитных барьеров, что ограничивает их применимость для расчёта остаточного риска и принятия конкретных инженерных решений.

Анализ существующих разработок позволяет выделить общий недостаток: ограниченная адаптивность применяемых методик к специфике различных типов производственных объектов. Большинство методических подходов разрабатываются в отрыве от условий реальной эксплуатации, не учитывая такие важные аспекты, как климатические воздействия, темпы старения оборудования, частота и качество технического обслуживания, а также уровень квалификации обслуживающего персонала. Это приводит к снижению точности прогнозов и к невозможности корректной оценки степени риска для конкретных участков объекта.

Эффективная интеграция подходов к оценке пожарной опасности требует включения в методологию динамических моделей, способных учитывать временные изменения состояния защитных барьеров и их реакцию на внешние воздействия. Одним из направлений совершенствования методик может стать объединение структурных и вероятностных моделей, в рамках которых логические связи между рисками подкрепляются количественными оценками их вероятности и последствий. Такой синтез позволяет не только визуализировать структуру системы безопасности, но и производить прогноз надёжности элементов с учётом исторических данных, текущего состояния оборудования и прогнозируемых условий эксплуатации.

Особое внимание при интеграции следует уделять разработке универсальных адаптивных модулей, способных к автоматизированному обновлению входных параметров на основе мониторинга технического

состояния систем защиты, результатов аудитов и инспекций, а также цифровых двойников оборудования. Это обеспечит возможность своевременного выявления отклонений, формирования предупредительных мер и адаптации моделей к изменяющимся условиям.

Перспективным направлением является формирование гибких, многоуровневых систем оценки риска, основанных на комбинации методов логического, структурного, вероятностного и сценарного анализа, адаптированных под реальные условия функционирования производственных объектов. Применение таких систем позволит существенно повысить точность оценки пожарных рисков, своевременно выявлять уязвимости, а также разрабатывать эффективные, экономически обоснованные стратегии повышения надёжности защиты.

Глава 3. Барьерно-ориентированный подход к оценке и снижению пожарного риска на производственных объектах

Глава посвящена практической реализации барьерно-ориентированного подхода к оценке и снижению пожарного риска на производственных объектах. В условиях деградации технических систем, изменения эксплуатационных факторов и нарастания совокупной пожарной нагрузки требуется не только количественная оценка риска, но и учёт эффективности функционирующих защитных барьеров.

В рамках главы рассматриваются методы анализа пожароопасности на основе построения сценариев, использования диаграмм типа «галстук-бабочка», оценки остаточного риска и расчёта уровня защищённости с учётом снижения надёжности барьеров. Применение данных подходов позволяет выявить уязвимые зоны, спрогнозировать развитие пожароопасных ситуаций и обосновать меры по оптимизации систем противопожарной защиты.

Содержательные положения главы служат переходом от общетеоретических оснований к практико-ориентированной методике расчёта и анализа, применимой в условиях конкретных производственных объектов с различным уровнем риска.

3.1. Анализ пожарной опасности промышленного объекта с использованием барьерно-ориентированного подхода

Обеспечение эффективной системы управления пожарной безопасностью на объектах производственного назначения требует не только глубокого понимания потенциальных источников опасности и уязвимых элементов инфраструктуры, но и всесторонней оценки воздействия различных защитных механизмов на снижение вероятности возникновения пожара, а также на ограничение масштабов возможного ущерба. Значительное значение в этом процессе приобретают как технические компоненты — например, надёжность оборудования и функционирование инженерных систем, — так и организационные факторы, включая уровень подготовки персонала и

особенности среды, в которой осуществляется производственная деятельность. В совокупности указанные элементы формируют устойчивую основу для построения комплексной и адаптивной системы противопожарной защиты, ориентированной на специфику функционирования конкретного предприятия.

Исходная научная гипотеза настоящего исследования базируется на предположении, что использование интегрированного подхода к оценке пожарных рисков, включающего как технические, так и управленческие барьеры, обеспечивает более точное выявление опасностей и уязвимых зон. Системное применение методов качественного анализа, таких как процедура идентификации опасностей (HAZID), разработка вероятных сценариев развития пожароопасных ситуаций и оценка эффективности защитных мер, позволяет не только повысить достоверность выявления рисков, но и разработать мероприятия, способствующие снижению вероятности чрезвычайных ситуаций и минимизации их последствий.

Комплексный анализ, учитывающий совокупность факторов, воздействующих на уровень пожарной опасности, представляет собой основу для принятия обоснованных управленческих решений в области обеспечения промышленной безопасности.

В целях обеспечения объективной и всесторонней оценки пожарной опасности производственных объектов в настоящем исследовании применён комплексный методический подход, основанный на сочетании качественного анализа, математической обработки и экспертных процедур. Центральной задачей являлась интеграция технических и организационных элементов противопожарной защиты с последующей количественной интерпретацией их влияния на снижение вероятности возникновения пожара и минимизацию последствий.

На первом этапе проводилась идентификация потенциальных пожароопасных ситуаций. Для этой цели использовалась методика HAZID, зарекомендовавшая себя как один из наиболее надёжных инструментов

экспертной диагностики рисков. Применение данного метода позволило составить систематизированный перечень опасностей, включая внешние и внутренние факторы, способные инициировать или способствовать распространению пожара. На основе полученных данных осуществлялся сценарный анализ, направленный на моделирование вероятных путей развития пожароопасных событий. В рамках анализа учитывались такие параметры, как характеристики горючих материалов, степень защищённости систем, поведение персонала и специфика архитектурно-планировочных решений.

Особое внимание в исследовании уделялось оценке эффективности реализованных барьеров безопасности. Для этого применялась оригинальная система индикаторов контроля и защиты, разработанная с целью количественной оценки уровня защищённости конкретного технологического блока. В рамках этой системы каждому барьеру присваивались баллы в зависимости от его наличия, технического состояния и степени надёжности. Расчёт веса индикатора осуществлялся как отношение суммы фактически реализованных баллов к максимально возможному значению (1):

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S_{max}}, \quad (1)$$

где: W – вес индикатора защиты, S_i – фактический балл для каждого существующего барьера, S_{max} – максимальный возможный балл для каждого барьера, n – количество барьеров защиты.

На последующих этапах производился расчёт потенциального ущерба в рамках каждого помещения. Для этого использовалась методика, основанная на произведении весов контрольных и защитных барьеров. Для каждого технологического блока вычислялось агрегированное значение (2):

$$W_{общ} = W_{контр} \times W_{защ}, \quad (2)$$

где: $W_{общ}$ — произведение весов барьеров контроля и защиты для технологического блока; $W_{контр}$ — суммарный вес барьеров контроля; $W_{защ}$ — суммарный вес барьеров защиты.

Для получения интегральной оценки защищённости всего помещения использовалось среднее геометрическое произведений весов по всем блокам (3):

$$W_{\text{пом}} = \left(\prod_{i=1}^n W_{\text{общ},i} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

где: $W_{\text{пом}}$ — итоговый вес для помещения; $W_{\text{общ},i}$ — произведение весов для i -го технологического блока; n — количество технологических блоков в помещении.

Данный подход был выбран ввиду его чувствительности к низким значениям весов: он позволяет акцентировать внимание на участках с недостаточным уровнем защиты, нивелируя искажения, характерные для традиционного среднего арифметического.

Для количественного обоснования предельных значений возможного ущерба от пожара на производственных объектах в настоящем исследовании была реализована процедура экспертной оценки, направленная на установление порогов воздействия с учётом различных уровней защищённости. В рамках этой процедуры был проведён опрос квалифицированных специалистов, обладающих подтверждённой компетенцией в области оценки пожарных рисков и проектирования систем противопожарной защиты. В исследовании приняли участие десять экспертов, каждый из которых имеет более десятилетнего практического опыта в сфере обеспечения пожарной безопасности производственных предприятий.

Отбор участников осуществлялся из числа представителей научно-исследовательских организаций, проектных институтов и эксплуатационных подразделений промышленных предприятий. Это обеспечило широкий спектр профессиональных точек зрения и учёт специфики различных отраслей. В процессе экспертной сессии специалистам были предложены типовые модели развития пожароопасных ситуаций, построенные на основе анализа статистики реальных инцидентов, произошедших на объектах различного

функционального назначения. Каждый сценарий содержал подробное описание условий возникновения пожара, характера распространения огня, функционирования систем защиты, поведения персонала, а также предполагаемые последствия.

Экспертам было предложено классифицировать потенциальный ущерб в соответствии с четырьмя градациями: критический, высокий, значительный и умеренный. Основными критериями для ранжирования служили масштаб разрушений конструктивных элементов и оборудования, длительность приостановки технологического процесса, трудоёмкость восстановительных мероприятий, а также возможность полного или частичного восстановления производственной функции объекта. Полученные данные представлены в таблице 1, где отражены индивидуальные границы уровней ущерба, выраженные через интегральные показатели защищённости помещений, основанные на весах реализованных барьеров контроля и защиты.

Таблица 1. Результаты экспертной оценки порогов ущерба на основе весов барьеров контроля и защиты

Эксперт	Минимальный порог (критический)	Верхняя граница (высокий)	Верхняя граница (значительный)	Верхняя граница (умеренный)
1	0,15	0,35	0,55	0,8
2	0,1	0,4	0,6	0,85
3	0,2	0,45	0,65	0,9
4	0,12	0,38	0,58	0,82
5	0,18	0,42	0,62	0,88
6	0,1	0,4	0,6	0,85
7	0,2	0,44	0,63	0,9
8	0,14	0,37	0,57	0,8
9	0,17	0,41	0,61	0,87
10	0,16	0,39	0,59	0,84
Среднее	0,15	0,4	0,6	0,85

Сопоставление экспертных мнений позволило определить средние значения порогов и провести анализ степени согласованности суждений. Полученные усреднённые границы были использованы для калибровки шкалы уровней ущерба, применяемой в модели расчёта пожарного риска. На следующем этапе была проведена интерпретация полученных порогов в

терминах типовых описаний последствий для производственных процессов (см. таблицу 2).

Таблица 2. Результаты экспертной оценки порогов ущерба на основе весов барьеров контроля и защиты

Диапазон $W_{\text{пом}}$	Уровень ущерба (баллы)	Описание ущерба
< 0,2	4	Критический (полное разрушение)
0,2 – 0,4	3	Высокий (длительная остановка)
0,41 – 0,6	2	Значительный (повреждение оборудования)
0,61 – 1	1	Умеренный (локальные повреждения)

Анализ показал, что ключевым фактором, способствующим снижению ущерба, является наличие резервных и дублирующих барьеров безопасности, особенно автоматических систем пожарной сигнализации, оповещения и тушения. Даже при частичном отказе отдельных элементов системы другие её компоненты продолжают выполнять защитную функцию, компенсируя потенциальный рост риска.

Дополнительно установлено, что общая защищённость помещений, определяемая через агрегированные веса барьеров, может быть недостаточной для точной оценки ущерба в случаях, когда объект включает оборудование или процессы с критическим значением для всей производственной системы. В таких ситуациях необходимо учитывать не только уровень реализации защитных мер, но и функциональную значимость конкретных технологических элементов. В этой связи рекомендуется предоставлять специалисту, осуществляющему оценку, возможность корректировки шкалы весов в соответствии с приоритетами объекта. Такая адаптация позволяет более адекватно отразить реальный уровень потенциальных потерь и повысить точность прогноза при разработке компенсирующих мероприятий.

Разработка методики оценки пожарной опасности: поэтапный подход

Разработанная в ходе исследования методика оценки пожарной опасности производственных объектов основана на последовательном,

структурированном анализе факторов риска и защитных барьеров. Она позволяет не только идентифицировать и классифицировать угрозы, но и количественно оценить степень защищённости объектов на основе эффективности существующих технических и организационных решений. В основу положен принцип поэтапной детализации анализа — от декомпозиции объекта до конкретных сценариев возникновения пожаров и оценки ущерба.

1. Структурное разбиение объекта на технологические блоки

Первоначальным этапом реализации методики является выделение на объекте функционально обособленных зон — технологических блоков. Каждый блок представляет собой часть производственной среды, объединённую по признаку технологической однородности или общности функций оборудования. Такой подход позволяет локализовать анализ, детализировать его до уровня конкретных рисков, характерных для отдельных участков, и упростить формирование обоснованных решений. Декомпозиция объекта обеспечивает более точное сопоставление технических характеристик оборудования, специфики технологических операций и условий эксплуатации с потенциальными сценариями возникновения пожара, тем самым, создаётся основа для комплексной оценки как локального, так и совокупного уровня пожарной безопасности.

2. Анализ пожарной опасности применяемых веществ и материалов

После структурирования объекта проводится оценка пожарной опасности веществ, используемых в каждом технологическом блоке. Данный этап предусматривает систематизацию сведений о физико-химических свойствах материалов: горючести, взрывоопасности, температуре воспламенения, плотности паров, скорости распространения огня, а также условиях хранения и транспортировки. Полученные параметры позволяют сформировать матрицу опасностей, отражающую вклад каждого материала в общую пожароопасность производственной среды. Такая классификация необходима для последующего моделирования сценариев и формирования

обоснованных мер контроля и защиты, с учётом характера используемых веществ.

3. Моделирование возможных сценариев пожароопасных ситуаций

На основании проведённого анализа веществ и материалов формируются вероятные сценарии пожароопасных ситуаций, специфичных для каждого технологического блока. При построении сценариев учитываются как внутренние, так и внешние факторы, способные инициировать возгорание: нарушение технологического регламента, сбой в работе оборудования, перегрев, искрообразование, утечки, короткие замыкания и прочие триггеры. Основной задачей является выявление наиболее реалистичных и потенциально критических траекторий развития событий. Каждый сценарий описывается набором условий возникновения, последовательностью развития инцидента и ожидаемыми последствиями.

Пример: в сушильной камере деревообрабатывающего производства возможно развитие пожара при следующих условиях — неисправность системы контроля температуры, скопление древесной пыли, износ вентиляционного оборудования. Перегрев двигателя вентилятора может привести к искре, которая при наличии высокой концентрации пыли создаёт предпосылки для быстрого воспламенения и распространения огня. Данный сценарий иллюстрирует важность интеграции технического контроля, регулярного обслуживания и своевременной модернизации оборудования. Его детальный разбор позволяет не только спрогнозировать развитие пожара, но и определить конкретные точки внедрения барьеров — например, установку искрогасителей, датчиков температуры с функцией автоматического отключения питания и регламентов технической очистки вентиляционных систем.

4. Определение сценариев развития неблагоприятных ситуаций.

Следующим логическим этапом разработанной методики является построение сценариев возможного развития неблагоприятных ситуаций, обусловленных отсутствием или неэффективностью барьеров контроля. Этот

этап имеет принципиальное значение для оценки остаточного риска, а также для обоснования необходимости внедрения дополнительных или резервных средств противопожарной защиты. На основе информации, полученной в процессе анализа контроля (в том числе выявленных уязвимостей и пробелов в системе мониторинга), осуществляется моделирование цепочек событий, которые могут привести к пожару или его быстрому распространению.

Моделирование осуществляется с использованием сценарного подхода, при котором прослеживается причинно-следственная последовательность развития инцидента: от первичного инициирующего события (например, утечки горючего вещества или перегрева оборудования) до реализации опасных факторов пожара и возникновения ущерба. Основной акцент при этом делается на условиях, при которых отсутствует оперативный контроль либо нарушена его функциональность. Это позволяет выявить критические зоны, где технические и организационные барьеры контроля нуждаются в усилении или модернизации.

Например, в условиях отсутствия автоматических систем температурного мониторинга возможно запаздывание с реакцией на перегрев оборудования. В случае, если аварийное отключение питания не предусмотрено, даже кратковременное превышение допустимого температурного диапазона может привести к возгоранию. Таким образом, моделирование сценариев при нарушении контроля позволяет обосновать внедрение превентивных мер, направленных на сдерживание эскалации происшествия на ранних стадиях его развития.

В результате данного этапа формируется перечень потенциальных путей развития пожара при отказе средств контроля, оценивается скорость распространения опасных факторов, выявляются зоны, в которых недостаточный уровень контроля может привести к серьёзным последствиям. Полученные данные используются для выработки корректирующих действий, направленных на предотвращение инцидентов либо снижение тяжести их последствий.

5. Выявление и систематизация барьеров защиты.

После анализа сценариев развития пожара в условиях отсутствия контроля осуществляется формирование перечня барьеров защиты, то есть инженерных и организационных решений, предназначенных для локализации очага возгорания, ограничения распространения пожара, а также обеспечения безопасности персонала и минимизации материального ущерба. Барьеры защиты рассматриваются как второй эшелон системы обеспечения пожарной безопасности, призванный сдерживать последствия уже инициированных инцидентов.

К основным категориям защитных барьеров, рассматриваемым в рамках настоящего исследования, в том числе относятся: автоматические установки пожаротушения; аварийные вентиляционные системы, обеспечивающие удаление продуктов горения и предотвращение распространения дыма; эвакуационные выходы и системы оповещения, позволяющие минимизировать потери среди персонала и обеспечить своевременную эвакуацию; противопожарные преграды и огнепреградители, препятствующие распространению пламени между функциональными зонами; резервные источники электропитания, обеспечивающие работоспособность систем безопасности при отключении электроэнергии и др.

Анализ каждого из указанных элементов проводится с учётом их наличия, технического состояния, степени автоматизации и интеграции в общую систему противопожарной защиты объекта. Также учитываются факторы надёжности и времени срабатывания, от которых напрямую зависит способность барьера эффективно выполнять свою функцию в условиях развивающегося инцидента.

Выявленные барьеры классифицируются по степени значимости и охвата защищаемой территории. На основании собранной информации составляется полный перечень действующих барьеров защиты по каждому технологическому блоку и объекту в целом. Это позволяет сформировать

целостную картину текущего уровня защищённости и подготовить основу для последующего количественного анализа.

6. Определение весовых коэффициентов эффективности барьеров защиты.

Оценка эффективности систем локализации и ликвидации пожаров на производственных объектах требует чётко структурированной методологии, позволяющей не только выявить наличие защитных механизмов, но и количественно определить их вклад в обеспечение общей пожарной безопасности. В этом контексте особое значение приобретает процедура определения весов барьеров защиты, которая позволяет представить уровень защищённости технологического блока в виде объективного численного показателя для сравнительного анализа и последующей оптимизации.

Под барьерами защиты понимаются элементы системы, функционирование которых направлено на предотвращение распространения пожара, снижение интенсивности воздействия опасных факторов, а также обеспечение условий для успешной эвакуации персонала и минимизации ущерба имуществу. К числу таких элементов относятся, в частности, автоматические установки пожаротушения, системы аварийной вентиляции и дымоудаления, противопожарные клапаны, огнепреградительные устройства, аварийные выходы и системы оповещения о пожаре.

С целью формализации оценки эффективности данных барьеров используется система индикаторов, основанная на шкальном подходе. Каждый барьер оценивается по заданной шкале, которая может быть представлена как бинарной, так и расширенной, в зависимости от степени детализации, требуемой для анализа. В базовом варианте применяется бинарная модель, в рамках которой наличие полностью функционирующего защитного элемента получает значение «1», а его отсутствие или неисправность — значение «0». В случаях, когда требуется учесть частичную эффективность (например, наличие устаревшего оборудования, ограниченную

зону покрытия, низкую скорость реагирования и т. п.), шкала может быть расширена до 2 или 3 уровней.

Количество баллов, присвоенное каждому защитному барьеру, используется для расчёта агрегированного весового коэффициента, характеризующего суммарный уровень защиты конкретного технологического блока. Расчёт производится по формуле (1).

Следует подчеркнуть, что расчёт весов барьеров защиты выполняется отдельно от оценки контрольных барьеров (т.е. систем, направленных на предупреждение или раннее выявление угроз), однако оба показателя в дальнейшем интегрируются в единую модель расчёта уровня защищённости технологического блока. Такая модульная структура методики позволяет проводить независимый анализ эффективности систем контроля и защиты, а также формировать приоритеты в реализации мероприятий, направленных на снижение рисков.

Отдельного внимания заслуживает тот факт, что весовые коэффициенты могут корректироваться с учётом специфики производственного процесса, критичности оборудования и возможности возникновения вторичных опасных факторов (например, распространения токсичных продуктов горения, риска взрыва, блокировки эвакуационных путей и т. д.). Таким образом, использование весов не только повышает точность оценки, но и обеспечивает адаптивность модели к реальным условиям эксплуатации объекта.

7. Интегральная оценка уровня защищённости.

Следующим этапом применения предлагаемой методики количественной оценки пожарной опасности на производственных объектах является расчёт интегрального показателя защищённости помещения и соответствующая оценка потенциального ущерба в случае реализации пожароопасного сценария. На этом этапе проводится комплексный анализ, включающий агрегирование результатов оценки барьеров контроля и защиты для отдельных технологических блоков с последующим формированием целостного представления об уровне безопасности помещения в целом.

Расчёт интегрального показателя позволяет не только объективно представить текущее состояние защищённости, но и провести сравнительный анализ между различными зонами объекта, выявить слабые звенья в системе обеспечения пожарной безопасности и обосновать приоритетность внедрения дополнительных технических и организационных мероприятий.

Для расчета интегрального уровня защищённости каждого технологического блока используется произведение весов двух ключевых компонентов: барьеров контроля, направленных на предупреждение возникновения пожароопасной ситуации, и барьеров защиты, обеспечивающих её локализацию и минимизацию последствий. Это рассчитывается по формуле (2).

Полученные значения для каждого блока затем агрегируются с использованием среднего геометрического, что позволяет учесть влияние на общую защищённость даже тех блоков, которые демонстрируют низкие показатели. Такой подход обеспечивает более чувствительную оценку и исключает эффект усреднения, характерный для арифметического метода. Расчёт интегрального показателя для помещения в целом производится по формуле (3).

На данном этапе проводится комплексная оценка защищенности технологических блоков и прогнозирование возможного ущерба от пожароопасных ситуаций.

Для наглядной демонстрации применения разработанной методики оценки пожарной опасности рассмотрим помещение, содержащее два технологических блока. Оценка проводится на основе барьеров контроля и защиты, каждому из которых присваиваются баллы, отражающие их эффективность. На основе этих баллов рассчитываются веса барьеров контроля и защиты, которые затем интегрируются для определения уровня защищённости технологического блока.

Для иллюстрации практической реализации данной методики рассмотрим условное производственное помещение, состоящее из двух

технологически обособленных блоков, каждый из которых имеет собственную конфигурацию барьеров контроля и защиты.

В первом технологическом блоке реализованы следующие меры контроля: визуальный осмотр оборудования и хранимых материалов (1 балл из максимально возможных 3), автоматические температурные датчики (2 балла из 3), датчики давления (2 из 3) и система автоматического отключения питания при превышении температурного порога (2 из 3). Суммарная оценка контрольных барьеров составляет 7 баллов из 12 возможных, что позволяет рассчитать весовой коэффициент контроля как:

$$W_{\text{контр}} = \frac{7}{12} \approx 0,58.$$

С точки зрения защитных мер в этом блоке функционируют две системы: автоматическое пожаротушение и аварийная вентиляция. Огнепреградители на коммуникациях отсутствуют. Из 3 возможных баллов реализованы 2, что соответствует:

$$W_{\text{защ}} = \frac{2}{3} \approx 0,67.$$

Произведение этих коэффициентов определяет итоговую защищённость блока:

$$W_{\text{общ,1}} = 0,58 \times 0,67 = 0,39.$$

Во втором технологическом блоке реализованы следующие барьеры контроля: визуальный осмотр оборудования и материалов — 1 балл из 3 возможных; автоматические датчики температуры, обеспечивающие непрерывный мониторинг и передача данных о параметрах среды, — 2 балла из 3 возможных; автоматическая система контроля влажности, способная автоматически корректировать параметры среды, — 2 балла из 3 возможных. Контроль давления в данном блоке отсутствует, что оценивается в 0 баллов. Суммарная оценка барьеров контроля составляет 5 баллов из 12 возможных. Вес барьеров контроля определяется как отношение фактически набранных баллов к максимально возможному количеству баллов и равен 0,42.

Во втором технологическом блоке предусмотрен только один барьер защиты: система автоматического пожаротушения, которая обеспечивает базовые меры локализации и ликвидации пожара. Система аварийной вентиляции отсутствует, что снижает уровень общей защищённости. Согласно бинарной системе оценки барьеров защиты, фактическая сумма баллов для данного блока составляет 1 балл из максимально возможных 2 баллов. Вес барьеров контроля определяется как отношение фактически набранных баллов к максимально возможному количеству баллов составит 0,5.

Произведение весов барьеров контроля и защиты для второго блока составит: $W_{\text{общ},2} = 0,42 \times 0,5 = 0,21$.

Для определения общего уровня защищенности всего помещения рассчитывается среднее геометрическое произведений весов всех технологических блоков:

$$W_{\text{пом}} = \sqrt{W_{\text{общ},1} \times W_{\text{общ},2}} = \sqrt{0,39 \times 0,21} \approx 0,29.$$

Согласно разработанной системе классификации, такое значение интегрального показателя соответствует высокому уровню потенциального ущерба. Это означает, что в случае возникновения пожара возможно не только повреждение оборудования, но и длительная приостановка производственного процесса, значительные финансовые потери, а также потенциальная угроза жизни и здоровью персонала.

Полученные результаты указывают на необходимость срочного пересмотра стратегии обеспечения пожарной безопасности на данном объекте. В частности, следует рассмотреть возможность внедрения дополнительных защитных барьеров в наиболее уязвимых участках, прежде всего во втором блоке. В качестве приоритетных мероприятий можно предложить установку аварийной вентиляции, внедрение системы раннего обнаружения задымления и модернизацию имеющихся противопожарных преград.

Приведённый пример демонстрирует не только алгоритм применения методики количественной оценки защищённости, но и её практическую

значимость для выявления слабых мест, структурирования управленческих решений и повышения устойчивости производственного объекта к пожароопасным ситуациям.

8. Идентификация и обоснование внедрения дополнительных барьеров защиты на производственных объектах.

Заключительным и не менее важным этапом оценки пожарной опасности производственных объектов в рамках предлагаемой методики является формирование перечня дополнительных барьеров защиты, направленных на дальнейшее снижение остаточного риска. После проведения интегральной оценки уровня защищённости помещений и анализа потенциального ущерба, обоснованное предложение дополнительных технических и организационных решений становится ключевым условием достижения приемлемого уровня пожарной безопасности.

Дополнительные барьеры защиты представляют собой совокупность инженерных, архитектурно-планировочных, организационных и управленческих мер, которые не были реализованы на объекте на момент проведения анализа, но могут быть внедрены в целях устранения выявленных уязвимостей или компенсации недостаточной эффективности существующих средств защиты. Такие барьеры могут включать как модернизацию существующих противопожарных систем, так и установку новых технических решений — например, систем локального пожаротушения, автономных модулей газового подавления, автоматизированных установок дымоудаления, резервного электропитания для критически важных узлов, а также пассивных конструктивных элементов, способствующих сдерживанию распространения огня.

Процедура выбора дополнительных барьеров осуществляется на основе соотнесения рассчитанного интегрального показателя защищённости с установленными пороговыми значениями, отражающими различные уровни потенциального ущерба. В случае, если значение показателя указывает на высокий или критический уровень риска, необходимо незамедлительное

внедрение дополнительных барьеров, направленных на срочное повышение защищённости помещения. При промежуточных значениях целесообразно рассматривать сценарии поэтапной модернизации систем защиты, при этом внедрение дополнительных мер может быть запланировано в рамках долгосрочной программы технического переоснащения. При условно допустимом уровне риска мероприятия профилактического характера могут быть реализованы в плановом порядке без нарушения производственного цикла.

Критически важно, что приоритетность внедрения тех или иных барьеров должна определяться не только на основе формальных расчётов, но и с учётом специфики объекта: технологических процессов, режимов эксплуатации, плотности размещения оборудования, состава находящегося персонала, а также доступности путей эвакуации и резервных источников ресурсов. Таким образом, даже при близких интегральных значениях защищённости два объекта с различной производственной спецификой могут потребовать различных по характеру и срочности решений.

Реализация дополнительных барьеров защиты не только снижает вероятность реализации сценариев с тяжёлыми последствиями, но и способствует общему повышению устойчивости производственной системы к внешним и внутренним возмущающим воздействиям. Кроме того, включение дополнительных барьеров в структуру обеспечения пожарной безопасности повышает степень доверия со стороны надзорных и страховых органов, упрощает прохождение проверок и аудитов, а также может способствовать снижению страховых взносов.

Формирование чек-листа как инструмента документирования барьеров контроля и защиты.

на производственных объектах целесообразно внедрение систематизированного инструмента фиксации информации о выявленных угрозах, существующих и предлагаемых мерах по снижению рисков. Таким

инструментом выступает **чек-лист пожарной безопасности**, который служит универсальным средством для документирования состояния защищённости объекта, структурирования информации о реализованных барьерах и обоснования необходимости дополнительных мер.

Разработанный чек-лист представляет собой структурированный формат представления результатов анализа, ориентированный не только на специалистов в области техносферной безопасности, но и на управленческий персонал предприятия. Его основная функция заключается в фиксации конкретных пожароопасных ситуаций, идентифицированных на каждом технологическом участке, с указанием предложенных барьеров контроля и защиты, сопровождаемых обоснованием их необходимости, а также приоритетности внедрения.

Такой подход позволяет систематизировать аналитические данные, полученные в ходе предыдущих этапов оценки, в удобной и наглядной форме, что существенно облегчает процесс принятия управленческих решений в области обеспечения пожарной безопасности. Чек-лист обеспечивает возможность:

- отслеживания уже реализованных мероприятий и оценки их эффективности;
- идентификации пробелов в системе защиты;
- обоснования приоритетов по модернизации и усилению существующих мер;
- координации действий между различными подразделениями организации.

Каждая строка чек-листа содержит информацию о конкретном технологическом блоке или участке производства, описание характерной для него пожароопасной ситуации, перечень рекомендуемых барьеров контроля и защиты, аргументацию их необходимости, а также присвоенный уровень приоритета внедрения (высокий, средний или низкий). Такой подход

обеспечивает логическую связность между характером угрозы, предлагаемыми мерами и степенью их актуальности.

Применение чек-листа способствует внедрению риск-ориентированного подхода в управлении противопожарной защитой, поскольку позволяет наглядно сопоставить существующие риски и степень готовности предприятия к их нейтрализации. Более того, благодаря своей гибкости и адаптивности чек-лист может использоваться как в процессе технического аудита, так и при подготовке к внешним проверкам надзорных органов, а также в рамках процедур внутреннего контроля качества систем безопасности.

Следует подчеркнуть, что форма чек-листа позволяет легко адаптировать его под специфику конкретного объекта или отрасли. В него могут быть включены дополнительные параметры: тип используемого оборудования, частота технического обслуживания, уровень квалификации персонала, наличие дублирующих систем и т.д. Таким образом, чек-лист становится не просто сводной таблицей, а динамическим инструментом анализа и управления безопасностью, способствующим целенаправленному и обоснованному снижению пожарных рисков.

В таблице 3 представлен пример заполнения чек-листа для различных технологических блоков производственного объекта, отражающий подход к формализации результатов анализа и выработке рекомендаций по совершенствованию противопожарной защиты.

Внедрение чек-листа в систему управления пожарной безопасностью на производственном объекте способствует созданию единого информационного пространства, обеспечивающего прозрачность и управляемость всех мероприятий, направленных на снижение риска возникновения пожара. Этот инструмент особенно эффективен в условиях ограниченных ресурсов, поскольку позволяет сконцентрировать усилия на наиболее уязвимых зонах и повысить результативность планирования защитных мероприятий.

Таблица 3. Пример чек-листа оценки пожарной опасности

№	Технологический блок	Пожароопасная ситуация	Предложенные барьеры контроля	Причины предложения барьеров контроля	Предложенные барьеры защиты	Причины предложения барьеров защиты	Приоритет
1	Сушильная камера	Перегрев оборудования	Датчики температуры и давления	Предотвращение перегрева и искрообразования	Система автоматического пожаротушения	Локализация и тушение возгорания на ранней стадии	Высокий
...	Склад готовой продукции	Самовозгорание материалов	Системы термометрии и контроля влажности	Поддержание безопасных условий хранения для предотвращения самовозгорания	Спринклерная система пожаротушения	Автоматическое тушение для предотвращения распространения огня	Средний
n	Станок по обработке металла	Искрообразование при обработке	Система контроля искрообразования	Снижение риска образования искр во время работы	Защитные экраны и огнетушители	Локализация искр и предотвращение возгорания	Низкий

Итоговый алгоритм оценки пожарной опасности на производственных объектах: логическая структура и обоснование подхода

Разработка и внедрение эффективной системы оценки пожарной опасности на производственных объектах требует не только применения единичных аналитических методов, но и создания целостного подхода, охватывающего весь цикл управления рисками — от идентификации угроз до принятия обоснованных управленческих решений. В рамках данного исследования была предложена методика, которая интегрирует различные аспекты анализа пожарной безопасности, включая учёт технических и организационных барьеров, моделирование сценариев пожаров, расчет уровня защищённости, а также оценку потенциального ущерба.

Ключевым преимуществом разработанного подхода является его комплексный и системно-ориентированный характер, что обеспечивает высокую степень адаптивности методики к условиям конкретных объектов защиты. Методика позволяет учитывать как технические особенности

оборудования и материалов, так и организационные аспекты функционирования предприятия, включая уровень подготовки персонала и качество эксплуатационной документации. Благодаря этому удаётся сформировать более точную и реалистичную картину существующих рисков и уязвимостей.

Предложенный подход основан на поэтапном анализе, охватывающем следующие ключевые элементы:

- декомпозиция производственного объекта на технологические блоки;
- идентификация и ранжирование пожароопасных веществ и материалов;
- построение типовых сценариев развития чрезвычайных ситуаций;
- анализ наличия и эффективности барьеров контроля и защиты;
- расчёт интегрального показателя уровня защищённости объекта;
- прогнозирование возможных последствий и определение приоритетных мер реагирования.

Для обеспечения наглядности и систематизации процедур оценки был разработан алгоритм анализа пожарных рисков, представленный в виде логической схемы (см. рисунок). Данный алгоритм отражает последовательность действий, необходимых для всестороннего анализа состояния пожарной безопасности на объекте и формирования обоснованных выводов о допустимости уровня риска.

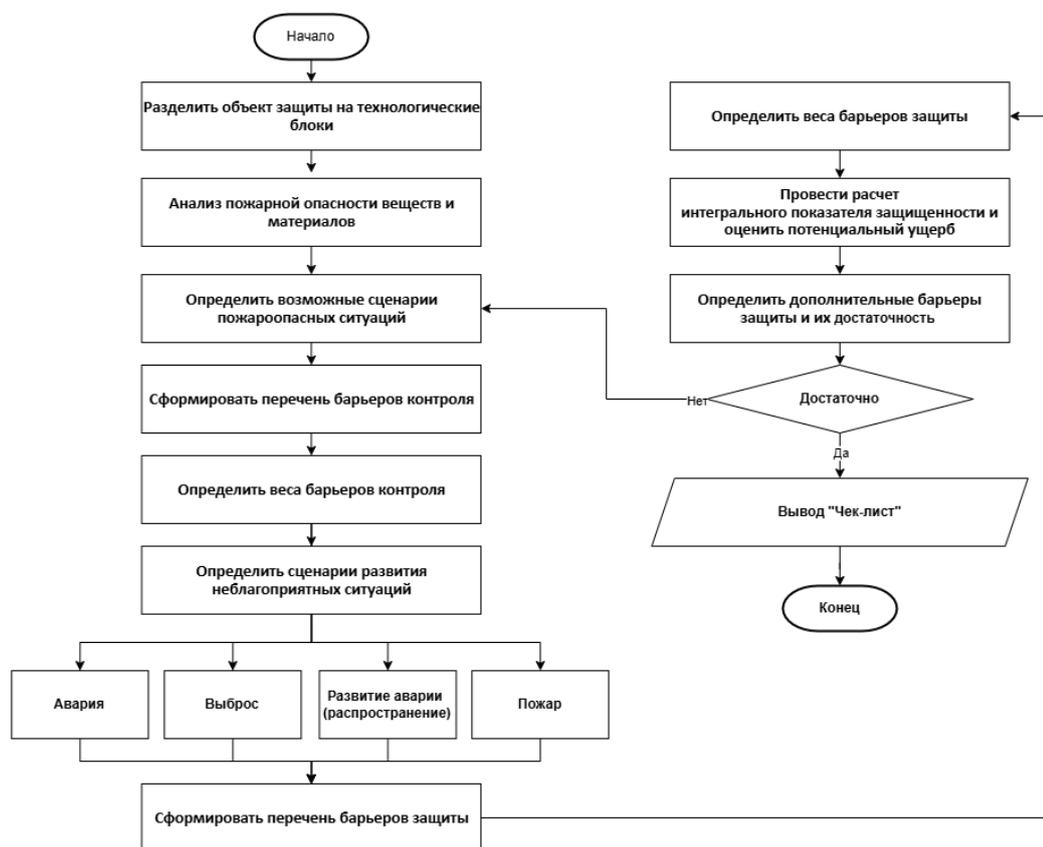


Рис. Алгоритм оценки пожарного риска с учетом применяемых на объекте барьеров защиты.

Разработанный алгоритм организует процесс оценки пожарного риска в виде последовательности взаимосвязанных этапов, каждый из которых направлен на формирование обоснованных выводов о степени защищённости производственного объекта. Особое внимание в алгоритме уделяется структурированному выявлению потенциальных источников опасности, моделированию развития инцидентов и анализу функционирования существующих и необходимых барьеров — как на стадии предотвращения пожара, так и на этапе реагирования. Такой подход позволяет перейти от фрагментарного анализа к целостной системе управления пожарной безопасностью, основанной на логике «причина — барьер — следствие».

Важным достоинством предлагаемого алгоритма является его высокая гибкость и адаптивность. Алгоритм позволяет учитывать широкий спектр переменных — от характеристик технологических процессов и физических свойств горючих материалов до особенностей архитектурно-планировочных решений и уровня квалификации обслуживающего персонала. Благодаря

этому возможна персонификация оценки пожарного риска под конкретные условия производственного объекта, что делает алгоритм применимым в самых различных отраслях промышленности — от деревообработки и машиностроения до химического производства и нефтегазового сектора.

Обобщённый анализ существующих методологических и прикладных подходов к управлению пожарными рисками показал, что ключевым направлением повышения эффективности систем противопожарной защиты является переход от фрагментарных и нормативно ориентированных схем к более гибким и адаптивным моделям, основанным на оценке надежности защитных барьеров и сценарном прогнозировании.

Учитывая выявленные ограничения традиционных методик, становится очевидной необходимость разработки подхода, обеспечивающего количественную оценку пожарного риска с учётом совокупного воздействия технических и организационных барьеров. Такой подход должен позволить объективно оценивать уровень защищённости объектов, идентифицировать критические уязвимости, а также обосновывать приоритетность внедрения дополнительных мер безопасности.

В связи с этим в следующем разделе рассматривается авторская методика оценки пожарного риска на производственных объектах, в основе которой лежит барьерно-ориентированный подход. Особое внимание уделено последовательному выявлению и количественной оценке эффективности существующих и проектируемых барьеров защиты, их интеграции в систему анализа и прогнозирования последствий потенциальных пожаров.

3.2. Методика количественной оценки пожарного риска с учетом барьеров защиты и деградации их эффективности

Оценка пожарного риска на производственных и общественных объектах представляет собой фундаментальный элемент системы обеспечения техносферной безопасности, поскольку позволяет не только выявить потенциальные угрозы, но и определить приоритеты в выборе и реализации противопожарных мероприятий. Эффективное управление рисками невозможно без точной оценки вероятности возникновения пожароопасных событий, их возможных последствий и уровня готовности инженерных систем и персонала к реагированию на чрезвычайные ситуации.

Существующие нормативно-методические подходы, включая положения, регламентированные в действующих руководящих документах, в частности в Приказе МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533, предполагают определение величины пожарного риска на основе вероятностной модели, включающей частоты реализации сценариев пожара и вероятность поражения человека при каждом из этих сценариев. Согласно данной методике, расчет индивидуального пожарного риска для конкретного помещения осуществляется по следующему выражению (4):

$$P_i = \sum_{j=1}^J Q_j \cdot Q_{dij}, \quad (4)$$

где: J – количество рассматриваемых сценариев пожара, Q_j – частота реализации j -го сценария пожара в течение года (год⁻¹), Q_{dij} – условная вероятность поражения человека в i -ом помещении при реализации j -го сценария пожара.

Условная вероятность поражения человека определяется как совокупный эффект от недостаточности эвакуационных мероприятий и несрабатывания инженерных систем противопожарной защиты (5):

$$Q_{dij} = (1 - P_{эij}) \cdot (1 - D_{ij}), \quad (5)$$

где: $P_{\text{Э}ij}$ – вероятность успешной эвакуации при реализации j -го сценария пожара, D_{ij} – вероятность эффективной работы технических средств защиты.

Несмотря на практическую применимость указанных расчетных схем, их ограниченность заключается в том, что они не учитывают эффективности и степени реализации защитных барьеров, а также не отражают деградиационные процессы, которые существенно снижают работоспособность систем защиты в течение срока их эксплуатации. Для устранения этих недостатков предлагается усовершенствованная методика оценки, учитывающая параметры функционирования защитных барьеров и динамику их состояния.

Модифицированное уравнение пожарного риска включает коэффициенты предотвращения возникновения пожара B_F , коэффициента локализации последствий B_S , а также коэффициент деградации $D_{\text{Э}}$. В результате уравнение для расчета пожарного риска модифицируется следующим образом (6):

$$P_i = \sum_{j=1}^J \frac{Q_j}{B_{Fij}} \cdot (1 - P_{\text{Э}ij}) \cdot (1 - B_{Sij}). \quad (6)$$

Коэффициент B_{Fij} характеризует совокупную эффективность реализованных мер, направленных на предотвращение возникновения пожара, а коэффициент B_{Sij} — степень сдерживания его распространения и минимизации последствий. Оценка данных коэффициентов проводится на основе балльной шкалы, учитывающей техническую реализацию, своевременность обслуживания и функциональное состояние каждого барьера. Значения определяются следующим образом (7):

$$B_{Fij} = \frac{\sum_{k=1}^n F_k}{\sum_{k=1}^n F_{\text{max},k}}, B_{Sij} = \frac{\sum_{m=1}^n S_m}{\sum_{m=1}^n S_{\text{max},m}}, \quad (7)$$

где: F_k, S_m – фактические баллы i -го барьера предотвращения и защиты, $F_{max,k}, S_{max,m}$ – максимально возможные значения баллов, n – количество защитных барьеров.

Ключевым компонентом методики выступает учёт снижения работоспособности защитных систем по мере их эксплуатации. В качестве математической модели деградации используется экспоненциальное выражение, определяющее коэффициент снижения эффективности (8):

$$D_э = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

где: λ – коэффициент интенсивности отказов, t – время эксплуатации системы без капитального ремонта.

Значения коэффициента $D_э$ классифицируются в зависимости от срока эксплуатации и условий технического обслуживания (таблица 4).

Таблица 4. Классификация коэффициента снижения эффективности $D_э$ в зависимости от состояния системы

Состояние системы		Время эксплуатации, лет	Коэффициент $D_э$
Новая система		0–1	0,05
Регулярное обслуживание	техническое	1–5	0,15
Нерегулярное обслуживание	техническое	5–10	0,35
Высокая изношенность		10–15	0,6
Полная утрата функциональности		>15	0,85

С учетом деградации системы значение коэффициента локализации корректируется по формуле (9):

$$B_{Sij} = B_{Sij}^{HOM} \cdot (1 - D_э), \quad (9)$$

где $D_э$ — коэффициент характеризует степень снижения работоспособности системы, B_{Sij}^{HOM} — номинальное значение коэффициента предотвращения, представляет собой исходную эффективность барьера в его номинальном (неизношенном) состоянии.

С учетом всех факторов финальная формула оценки пожарного риска принимает вид (10):

$$P_i = \sum_{j=1}^J \frac{Q_j}{B_{Fij}} \cdot (1 - P_{Эij}) \cdot (1 - B_{Sij}^{НОМ} \cdot (1 - D_{Э})). \quad (10)$$

Реализация данного подхода требует комплексного сбора информации, включающей:

- идентификацию множества пожароопасных сценариев;
- частоты реализации каждого из них;
- характеристики инженерных систем и эффективность функционирующих барьеров;
- состояние средств эвакуации и параметры эвакуационного времени;
- данные о техобслуживании и возраст оборудования.

При проведении анализа противопожарной защиты выделяются три типа барьеров:

Активные — автоматические установки пожаротушения, системы дымоудаления, сигнализация и др.;

Пассивные — огнезащитные покрытия, противопожарные перегородки и двери, и др.;

Организационные — обучение персонала, регламентные проверки, планы эвакуации, и др.

Для каждого барьера оцениваются его наличие, эффективность и износ. Результаты позволяют определить наименее защищённые зоны, обосновать необходимость модернизации систем защиты и рассчитать вероятностную оценку риска, учитывающую как текущие условия эксплуатации, так и прогнозируемую деградацию систем в перспективе.

В отличие от традиционных подходов, разработанная модель обеспечивает более высокую точность прогнозирования и позволяет учитывать реальные условия функционирования противопожарных систем. Это делает методику актуальной для объектов, эксплуатируемых в агрессивных средах, с ограниченным доступом к регулярному обслуживанию или высокой степенью технологической нагрузки. Внедрение предлагаемой

системы расчёта риска способствует формированию адаптивной и научно обоснованной политики в сфере пожарной безопасности.

Предложенный подход к количественной оценке пожарного риска представляет собой существенный шаг к формированию более точной и адаптивной системы управления пожарной безопасностью на объектах различного назначения. Методика учитывает не только наличие и номинальную эффективность противопожарных барьеров, но и их текущее техническое состояние, особенности эксплуатации, уровень износа, а также возможность взаимного влияния активных, пассивных и организационных защитных мер. Такой комбинаторный подход позволяет комплексно охватить совокупность факторов, определяющих уровень защищенности, и обеспечивает более реалистичное прогнозирование рисков.

Преимущество предложенного метода особенно очевидно при сравнении с традиционными расчетами, где защитные меры рассматриваются в изолированном, статичном контексте, без учета динамики их надежности. Важным аспектом является возможность адаптации методики под конкретные условия эксплуатации объекта, в том числе с учетом различных сценариев технического обслуживания, состояния оборудования и периодичности проведения регламентных работ.

Анализ расчетных данных, представленных в таблице 5, демонстрирует значительное снижение величины пожарного риска при переходе от нормативной схемы к предложенной модели. Так, для сценариев с регулярным техническим обслуживанием защитных систем риск снижается почти на 41 %, что свидетельствует о высокой эффективности мероприятий по поддержанию систем в исправном состоянии. Даже в условиях эксплуатации новых систем наблюдается снижение риска более чем на четверть, что обусловлено более точным учетом взаимодействия барьеров и характеристик сценариев пожара. Вместе с тем, для объектов с высокой степенью износа снижение составляет лишь около 7 %, что подчёркивает ограниченную эффективность

компенсирующих мер при отсутствии своевременного технического обслуживания и модернизации систем безопасности.

Таблица 5. Сравнение результатов расчета пожарного риска

Сценарий пожара	Традиционная методика P_i , год ⁻¹	Предложенная методика P_i , год ⁻¹	Снижение риска, %
Сценарий 1 (новые системы)	$7,193 \times 10^{-6}$	$5,245 \times 10^{-6}$	27,1
Сценарий 2 (регулярное обслуживание)	$7,193 \times 10^{-6}$	$4,250 \times 10^{-6}$	40,9
Сценарий 3 (высокая изношенность)	$7,193 \times 10^{-6}$	$6,680 \times 10^{-6}$	7,1

Для подтверждения универсальности и практической применимости предложенного метода был проведен сравнительный анализ расчетов для различных типов объектов — от общественных зданий до промышленных комплексов. Результаты, представленные в таблице 6, показывают, что при применении усовершенствованной методики происходит существенное снижение расчетного риска, особенно в тех случаях, когда на объекте реализованы комбинированные технические и организационные меры. Например, на химическом заводе снижение составило 13,4 %, что обусловлено высокой степенью технологической сложности и необходимостью многоуровневой защиты. На складе горючих материалов риск уменьшился на 11,5 %, подтверждая критическую роль пассивных барьеров и точного учета эксплуатационных условий.

Таблица 6. Сравнительный анализ расчётов пожарного риска для разных объектов

Объект	Традиционная методика P_i , год ⁻¹	Предложенная методика P_i , год ⁻¹	Снижение риска, %
Торговый центр	$5,32 \times 10^{-5}$	$4,85 \times 10^{-5}$	-8,8%
Химический завод	$4,25 \times 10^{-4}$	$3,68 \times 10^{-4}$	-13,4%
Склад горючих материалов	$6,68 \times 10^{-4}$	$5,91 \times 10^{-4}$	-11,5%

Выводы, сделанные на основе анализа приведённых данных, позволяют утверждать, что традиционные методы, не учитывающие техническое состояние барьеров и особенности их эксплуатации, как правило, либо переоценивают риск в условиях высокой защищённости, либо недооценивают его при наличии скрытых уязвимостей и деградации систем. В результате создается искажённая картина риска, которая не всегда соответствует фактическому состоянию безопасности объекта.

Практическое значение предложенной методики заключается не только в возможности более точного количественного анализа, но и в обеспечении инструментов для принятия обоснованных решений в области распределения ресурсов, планирования профилактических мероприятий, модернизации и технического обслуживания систем защиты. Методика может стать основой для внедрения программных комплексов, автоматизирующих процесс оценки риска, подбора конфигураций систем безопасности, формирования регламентов технического обслуживания и управления данными мониторинга в реальном времени.

Несмотря на продемонстрированные преимущества, предложенный подход требует дальнейшего развития, особенно в части адаптации к различным отраслям и условиям эксплуатации. Необходимость в сборе детализированной информации о состоянии систем защиты, квалификации персонала, истории отказов и отказоустойчивости оборудования повышает требования к качеству исходных данных. Тем не менее, эти ограничения могут быть преодолены за счёт расширения базы статистической информации, развития технологий мониторинга и цифровых двойников, а также внедрения автоматизированных экспертных систем.

В перспективе методика может быть дополнена средствами машинного обучения и предиктивной аналитики, что позволит прогнозировать поведение системы в зависимости от внешних воздействий и деградации оборудования, обеспечивая ещё более высокую точность оценки пожарных рисков и устойчивость к неопределённости. Таким образом, представленный подход

формирует основу для гибкой, адаптивной и научно обоснованной системы управления противопожарной безопасностью, соответствующей современным требованиям промышленной и общественной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка эффективных методик оценки пожарного риска на производственных объектах требует комплексного подхода, сочетающего научную обоснованность, инженерную реализуемость и адаптивность к реальным условиям эксплуатации. В рамках настоящего исследования предложен барьерно-ориентированный алгоритм оценки пожарной опасности, позволяющий структурировать процесс анализа и обеспечить объективную оценку рисков. Методика основана на всестороннем учёте технических и организационных мер защиты, их текущего состояния, степени износа и взаимного влияния.

Следует особо подчеркнуть, что гибкость предложенной методики не означает произвольность интерпретаций или снижение научной строгости. Напротив, логика построения алгоритма опирается на принципы системного анализа, формализацию экспертных оценок, структурированный подход к анализу барьеров контроля и защиты, а также на обязательную верификацию полученных результатов. Ключевым элементом является интегральная оценка уровня защищённости, основанная на весах реализованных барьеров, что позволяет с высокой объективностью выявлять уязвимые зоны, уточнять прогноз последствий пожара и обосновывать приоритетность мероприятий по модернизации систем безопасности.

Методика демонстрирует устойчивость к недостаточности статистической информации, что делает её особенно полезной на этапе проектирования новых объектов, реконструкции производственных участков или экспресс-аудита систем безопасности. Даже при ограниченности данных алгоритм позволяет построить полуструктурированную модель рисков, основанную на экспертных знаниях, наблюдениях и нормативных требованиях.

Методологическая основа разработанного подхода заключается в интеграции качественного, полуколичественного и количественного анализа. Использование системы индикаторов контроля и защиты в сочетании с

барьерно-ориентированной логикой позволяет оценить уровень защищённости по каждому технологическому блоку, а также сформировать обоснованные рекомендации по снижению остаточного риска.

К числу преимуществ предложенного подхода можно отнести его комплексность, поскольку в рамках анализа учитываются все уровни риска — начиная с физико-химических свойств используемых веществ и особенностей технологических процессов, заканчивая оценкой технического состояния оборудования и архитектурно-планировочных решений. Важной характеристикой является структурированность и воспроизводимость: алгоритм оценки, дополненный чек-листом, обеспечивает прозрачность выполнения процедур, сопоставимость полученных результатов и возможность их ретроспективной проверки. Значительным достоинством является также формализация оценки уровня защищённости, основанная на расчёте весовых коэффициентов для барьеров контроля и защиты, что позволяет количественно оценивать степень защищённости, проводить сравнение между различными участками объекта и выявлять наиболее уязвимые зоны. Предложенная методика способствует повышению экономической эффективности управления рисками, поскольку позволяет рационально распределять ресурсы и принимать обоснованные решения с учётом оптимального соотношения затрат и достигнутого уровня безопасности. Особую значимость подход приобретает благодаря своей прикладной направленности: он может использоваться при проектировании, планировании, проведении технического аудита, а также в рамках системы промышленного контроля и разработки документации в области обеспечения пожарной безопасности.

Ключевым результатом настоящего исследования стало дополнение предложенной методики оценки пожарной опасности усовершенствованным механизмом расчёта пожарного риска, учитывающим деградацию защитных барьеров. Интеграция динамических коэффициентов предотвращения, локализации и снижения эффективности позволила более точно отражать

реальное состояние противопожарной инфраструктуры и формировать адаптивную модель риска, способную учитывать изменения в техническом состоянии систем защиты.

В результате были получены следующие научные и прикладные результаты:

разработан алгоритм, объединяющий анализ эффективности, износа и взаимодействия технических и организационных барьеров.

предложена система весовых коэффициентов и расчёт остаточного риска для ранжирования технологических блоков по степени уязвимости.

подтверждена применимость метода к различным объектам, включая те, где отсутствуют достоверные данные о частоте пожаров.

показана экономическая целесообразность применения подхода при модернизации и оптимизации систем противопожарной защиты.

верификация на реальных объектах доказала согласованность результатов с фактическими характеристиками функционирования систем безопасности.

Практическая реализация алгоритма была подтверждена примерами расчётов на объектах различного назначения — от складских и торговых комплексов до объектов химической промышленности. Это свидетельствует о высокой универсальности метода и его потенциале как инструмента повседневного управления пожарной безопасностью.

Предложенная методика требует дальнейшего совершенствования и адаптации. Перспективными направлениями её развития являются расширение базы данных, содержащей информацию об отказах и степени износа защитных барьеров, что позволит повысить точность оценки надёжности систем безопасности. Немаловажным шагом станет цифровизация алгоритма и создание специализированного программного обеспечения, обеспечивающего автоматизацию процессов анализа и расчёта. Важным направлением является интеграция методики с системами мониторинга в реальном времени, что позволит оперативно учитывать изменения в состоянии

оборудования и среды. Также необходимо расширение модели за счёт включения организационных и человеческих факторов, оказывающих существенное влияние на эффективность функционирования систем защиты. Кроме того, требуется адаптация методики к условиям конкретных отраслей и типов производств с учётом их технологической специфики и уровня потенциальной опасности.

В заключение следует отметить, что разработанный подход представляет собой современный, научно обоснованный и практико-ориентированный инструмент, обеспечивающий более точную, адаптивную и воспроизводимую оценку пожарных рисков. Его применение позволяет не только снизить вероятность возникновения пожара, но и обосновать инженерные и управленческие решения, направленные на повышение общей устойчивости производственных объектов к чрезвычайным ситуациям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Научные публикации

1. Ahmad, A., Hassan, S.A., Ripin, A., Ali, M.W., Haron, S. A risk-based method for determining passive fire protection adequacy. *Fire Safety Journal*. 2013. 58. Pp. 160–169. DOI:10.1016/J.FIRESAF.2013.01.020.
2. Ahmad, M. Modified Swiss Cheese Model to Analyse the Accidents / M. Ahmad, M. Pontiggia // *Chemical engineering transactions*. – 2015.
3. Akashah, F. Quantitative Risk Assessment for Performance-Based Building Fire Regulation / F. Akashah, B. Kayan, N. Ishak. – 2013.
4. Alizadeh, S. S. The Bowtie method in safety management system: A literature review / S. S. Alizadeh, P. Moshashaei // *Scientific Journal of Review*. – 2015.
5. Argenti, F., Landucci, G. Quantitative evaluation of the safety barriers to prevent fired domino effect. *Chemical engineering transactions*. 2015. 43. Pp. 2377–2382. DOI:10.3303/CET1543397.
6. Assessment of domino effect: State of the art and research Needs / A. Necci, V. Cozzani, G. Spadoni, F. Khan // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2015. – Т. 143. – С. 3-18.
7. Assessment of safety barriers for the prevention of cascading events in oil and gas offshore installations operating in harsh environment / M. Bucelli, G. Landucci, S. Haugen [и др.]. – Текст : электронный // *Ocean Engineering*. – 2018. – Т. 158. – С. 171-185. – URL: <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2018.02.046> (дата обращения: 06.12.2024).
8. Barriers Involved in the Safety Management Systems: A Systematic Review of Literature / W. Qiao, E. Huang, H. Guo [и др.]. – Текст : электронный // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – Т. 19. – № 15. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19159512> (дата обращения: 06.12.2024).
9. Bucelli, M., Landucci, G., Haugen, S., Paltrinieri, N., Cozzani, V. Assessment of safety barriers for the prevention of cascading events in oil and gas offshore installations operating in harsh environment. *Ocean Engineering*. 2018. 158. Pp. 171–185. DOI:10.1016/J.OCEANENG.2018.02.046.
10. Cozzani, V., Tugnoli, A., Salzano, E. Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. 139(2). Pp. 209–219. DOI:10.1016/J.JHAZMAT.2006.06.041. URL:

https://www.researchgate.net/publication/6925035_Prevention_of_domino_effect_From_active_and_passive_strategies_to_inherently_safer_design (date of application: 14.03.2025).

11. Danzi, E. FLAME: A Parametric Fire Risk Assessment Method Supporting Performance Based Approaches / E. Danzi, L. Fiorentini, L. Marmo. – Текст : электронный // Fire Technology. – 2021. – Т. 57. – № 2. – С. 721-765. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01014-9> (дата обращения: 06.12.2024).

12. Development of a Bayesian network for probabilistic risk assessment of pesticides / S. Mentzel, M. Grung, K. E. Tollefsen [и др.]. – Текст : электронный // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2022. – Т. 18. – № 4. – С. 1072-1087. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ieam.4533> (дата обращения: 09.12.2024).

13. Di Maio, F., Scapinello, O., Zio, E., Ciarapica, C., Decarli, L., la Rosa, L. A Multistate Bayesian Network for Accounting the Degradation of Safety Barriers in the Living Risk Assessment of Oil and Gas Plants. Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference. 2020. Pp. 1303–1309. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0_4878-CD.

14. Ding, L., Ji, J., Khan, F., Li, X., Wan, S. Quantitative fire risk assessment of cotton storage and a criticality analysis of risk control strategies. Fire and Materials. 2020. 44(2). Pp. 165–179. DOI:10.1002/FAM.2761. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fam.2761> (date of application: 14.03.2025).

15. Economic Consequences of Fires at the Industrial Facilities / P. V. Polekhin, A. A. Poroshin, M. V. Zagumennova, A. G. Firsov // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. – 2022. – Т. 2022. – № 7. – С. 29-34.

16. Electrical Fire Dynamic Risk Assessment for High-Rise Buildings Based on Variable Fuzzy Set Theory and Bayesian Network / L. Su, C. Wei, F. Yang [и др.]. – Текст : электронный // Mathematical Problems in Engineering. – 2023. – Т. 2023. – № 1. – С. 9068958. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2023/9068958> (дата обращения: 11.12.2024).

17. Estimating Water Requirements for Firefighting Operations Using FIERASystem / D. Torvi, G. Hadjisophocleous, M. B. Guenther, G. Thomas. – Текст : электронный // Fire Technology. – 2001. – Т. 37. – № 3. – С. 235-262. – URL: <https://doi.org/10.1023/A:1012487619577> (дата обращения: 06.12.2024).

18. Ghaljahi, M., Omidi, L., Karimi, A. Resilience assessment in process industries: A review of literature. *Heliyon*. 2025. 11(4). Pp. e42498. DOI:10.1016/J.HELIYON.2025.E42498.
19. Giannakidou, S., Radoglou-Grammatikis, P., Lagkas, T., Argyriou, V., Goudos, S., Markakis, E.K., Sarigiannidis, P. Leveraging the power of internet of things and artificial intelligence in forest fire prevention, detection, and restoration: A comprehensive survey. *Internet of Things*. 2024. 26. Pp. 101171. DOI:10.1016/J.IOT.2024.101171.
20. Gowland, R. The accidental risk assessment methodology for industries (ARAMIS)/layer of protection analysis (LOPA) methodology: a step forward towards convergent practices in risk assessment? / R. Gowland. – Текст : электронный // *Journal of hazardous materials*. – 2006. – Т. 130 3. – № 3 SPEC. ISS. – С. 307-10. – URL: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.07.007> (дата обращения: 06.12.2024).
21. Hellas, M.S., Chaib, R., Nettour, D., Zerrouki, H. A new approach proposal for ensuring security engineering through barrier and operational quantitative risk analysis (BOQRA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024. 91. Pp. 105390. DOI:10.1016/J.JLP.2024.105390.
22. Hosseinnia Davatgar, B. Safety Barrier Management: Risk-Based Approach for the Oil and Gas Sector / B. Hosseinnia Davatgar, N. Paltrinieri, R. Bubbico. – Текст : электронный // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – Т. 9. – № 7. – URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9070722> (дата обращения: 06.12.2024).
23. Hosseinnia Davatgar, B., Paltrinieri, N., Bubbico, R. Safety Barrier Management: Risk-Based Approach for the Oil and Gas Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. 9(7). DOI:10.3390/JMSE9070722.
24. Hudson, T. G. L. Sparseness and Completeness: Simplifying Bowties to Improve Understanding and Predictive Power / T. G. L. Hudson, P. T. W. Hudson. – Текст : электронный // *Society of Petroleum Engineers - SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability 2020, HSE and Sustainability 2020*. – 2020. – URL: <https://dx.doi.org/10.2118/199496-MS> (дата обращения: 09.12.2024).
25. Ibrahim, H., Patruni, J.R. Bayesian network-based failure analysis of fire safety barriers in floating LNG facility. *SN Applied Sciences*. 2019. 1(10). Pp. 1–17. DOI:10.1007/S42452-019-1106-Z/TABLES/9. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-1106-z> (date of application: 14.03.2025).

26. Kabir, S., Papadopoulos, Y. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*. 2019. 115. Pp. 154–175. DOI:10.1016/J.SSCI.2019.02.009.
27. Kadri, F. The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study / F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement. – Текст : электронный // *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*. – 2013. – Т. 3. – № 2. – С. 66. – URL: https://www.researchgate.net/publication/257870198_The_Assessment_of_Risk_Caused_By_Fire_and_Explosion_in_Chemical_Process_Industry_A_Domino_Effect-Based_Study (дата обращения: 09.12.2024).
28. Khakzad, N. Dynamic risk analysis using bow-tie approach / N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2012. – Т. 104. – С. 36-44.
29. Khan, F. I. An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries / F. I. Khan, S. A. Abbasi // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2001. – Т. 14. – № 4. – С. 283-306.
30. Landucci, G., Argenti, F., Spadoni, G., Cozzani, V. Domino effect frequency assessment: The role of safety barriers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. 44. Pp. 706–717. DOI:10.1016/J.JLP.2016.03.006.
31. Landucci, G., Bucelli, M., Paltrinieri, N., Cozzani, V. Domino effect triggered by fire: performance assessment of safety barriers in harsh environmental conditions. 2017.
32. Landucci, G., Necci, A., Antonioni, G., Argenti, F., Cozzani, V. Risk assessment of mitigated domino scenarios in process facilities. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2017. 160. Pp. 37–53. DOI:10.1016/J.RESS.2016.11.023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.11.023> (date of application: 6.12.2024).
33. Li, S. Y. Fire Risk Assessment of High-rise Buildings Based on Gray-FAHP Mathematical Model / S. Y. Li, G. Tao, L. J. Zhang // *Procedia Engineering*. – 2018. – Т. 211. – С. 395-402.
34. Li, Y., Sankaranarayanan, B., Thresh Kumar, D., Diabat, A. Risks assessment in thermal power plants using ISM methodology. *Annals of Operations Research*. 2019. 279(1–2). Pp. 89–113. DOI:10.1007/S10479-018-3121-7.
35. Liao, D. A dynamic fire risk assessment method for compact historic villages based on the improved FRAME / D. Liao, X. Zhuo, J. Tao // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2024. – Т. 114. – С. 104935.

36. Marsh, D. W. R. Generalizing event trees using Bayesian networks / D. W. R. Marsh, G. Bearfield. – Текст : электронный // <http://dx.doi.org/10.1243/1748006XJRR131>. – 2008. – Т. 222. – № 2. – С. 105-114. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/1748006XJRR131> (дата обращения: 09.12.2024).
37. Meyer, S., Krantz, E.A. Risk-Informed Hazard Barrier Assessment. Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE12). 2008. 3. Pp. 163–166. DOI:10.1115/ICONE12-49327. URL: <https://dx.doi.org/10.1115/ICONE12-49327> (date of application: 14.03.2025).
38. Network based approach for predictive accident modelling / A. A. Baksh, F. Khan, V. Gadag, R. Ferdous. – Текст : электронный // Safety Science. – 2015. – Т. 80. – С. 274-287. – URL: <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2015.08.003> (дата обращения: 06.12.2024).
39. Niu, L., Zhao, Z., Tan, J., Liang, T., Zhang, F., Xiao, N., He, Y., Xie, S., Jing, R., Lin, J., Wang, F., Zhao, Y. A dynamic reliability assessment framework for integrated energy systems: A new methodology to address cascading failures. Advances in Applied Energy. 2025. 17. Pp. 100203. DOI:10.1016/J.ADAPEN.2024.100203.
40. Polekhin, P. V., Poroshin, A.A., Zagumennova, M. V., Firsov, A.G. Economic Consequences of Fires at the Industrial Facilities. Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. 2022. 2022(7). Pp. 29–34. DOI:10.24000/0409-2961-2022-7-29-34.
41. Probabilistic Fire Risk Framework for Optimizing Construction Site Layout / R. El Meouche, M. Abunemeh, I. Hijazi [и др.]. – Текст : электронный // Sustainability. – 2020. – Т. 12. – № 10. – URL: <https://doi.org/10.3390/su12104065> (дата обращения: 06.12.2024).
42. RaheesMohammedKurikkalO., V. Risk Mitigation in Major Hazard Scenarios Through Process Safety Management and Barrier Analysis / V. RaheesMohammedKurikkalO. – 2017.
43. Salvi, O. A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive. / O. Salvi, B. Debray. – Текст : электронный // Journal of hazardous materials. – 2006. – Т. 130 3. – № 3 SPEC. ISS. – С. 187-99. – URL: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.07.034> (дата обращения: 06.12.2024).
44. Sobral, J., Guedes Soares, C. Assessment of the adequacy of safety barriers to hazards. Safety Science. 2019. 114. Pp. 40–48. DOI:10.1016/J.SSCI.2018.12.021.

45. Tong, Q., Yang, M., Zinetullina, A. Динамический байесовский сетевой подход к оценке устойчивости инженерных систем. Журнал предотвращения потерь в процессе. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423020302813> (date of application: 14.03.2025).

46. Yuan, S. Dynamic-risk-informed safety barrier management: An application to cost-effective barrier optimization based on data from multiple sources / S. Yuan, G. Reniers, M. Yang // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2023. – Т. 83. – С. 105034.

47. Yuan, S., Yang, M., Reniers, G., Chen, C., Wu, J. Safety barriers in the chemical process industries: A state-of-the-art review on their classification, assessment, and management. Safety Science. 2022. 148. DOI:10.1016/J.SSCI.2021.105647.

48. Zerrouki, H. Bayesian Belief Network Used in the Chemical and Process Industry: A Review and Application / H. Zerrouki, H. Smadi. – Текст : электронный // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 159-165. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-016-0231-x> (дата обращения: 09.12.2024).

49. Zerrouki, H. Risk assessment of a liquefied natural gas process facility using bow-tie and Bayesian networks. Process Safety Progress. 2022. 41(3). Pp. 480–491. DOI:10.1002/PRS.12341. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/prs.12341> (date of application: 13.03.2025).

50. Экономические последствия пожаров на объектах промышленности | Статьи | Безопасность Труда в Промышленности. – URL: <https://btpnadzor.ru/archive/ekonomicheskie-posledstviya-pozharov-na-obektakh-promyshlennosti> (дата обращения: 18.11.2024). – Текст : электронный.

Нормативно-правовые акты

51. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция) \ КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (date of application: 16.10.2024).

52. Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 “Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях,

сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности” | Документы ленты ПРАЙМ: ГАРАНТ.РУ. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406477165/> (date of application: 31.03.2025).

53. Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 “Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах” | Документы ленты ПРАЙМ: ГАРАНТ.РУ. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409515151/> (date of application: 8.11.2024).

54. Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 N 387 Об утверждении Руководства по безопасности Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах. – URL: <https://pravo.ppt.ru/prikaz/rostekhnadzor/n-387-274672> (дата обращения: 08.11.2024). – Текст : электронный.

55. ГОСТ Р ИСО 16732-1-2024 Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии - docs.cntd.ru. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306887052> (date of application: 21.03.2025).

56. Руководство по оценке пожарного риска в зданиях. URL: <https://fire-techinfo.com/en/guidelines-for-fire-risk-assessment-in-buildings/> (date of application: 21.03.2025).

57. ISO 16733-1:2024 - Техника пожарной безопасности. Выбор сценариев проектируемых пожаров и проектируемые пожары. Часть 1. Выбор сценариев проектируемых пожаров. URL: <https://www.iso.org/standard/83172.html> (date of application: 21.03.2025).

Интернет-ресурсы

58. Взрыв на химзаводе в Таррагоне | Euronews. – URL: https://ru.euronews.com/2020/01/14/explosion-at-the-chemical-factory-in-tarragona?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 20.12.2024). – Текст : электронный.

59. Взрыв на химзаводе в Таррагоне | Euronews. URL: https://ru.euronews.com/2020/01/14/explosion-at-the-chemical-factory-in-tarragona?utm_source=chatgpt.com (date of application: 20.12.2024).

60. Из-за пожара на НПЗ в Индонезии эвакуировали около тысячи человек - РИА Новости, 29.03.2021. – URL: https://ria.ru/20210329/pozhar-1603235297.html?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 20.12.2024). – Текст : электронный.

61. Из-за пожара на НПЗ в Индонезии эвакуировали около тысячи человек - РИА Новости, 29.03.2021. URL: https://ria.ru/20210329/pozhar-1603235297.html?utm_source=chatgpt.com (date of application: 20.12.2024).

62. Крупные пожары на промышленных предприятиях в России в 2023-2024 годах - РИА Новости, 24.01.2024. – URL: https://ria.ru/20240124/pozhar-1923122923.html?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 20.12.2024). – Текст : электронный.

63. Крупные пожары на промышленных предприятиях в России в 2023-2024 годах - РИА Новости, 24.01.2024. URL: https://ria.ru/20240124/pozhar-1923122923.html?utm_source=chatgpt.com (date of application: 20.12.2024).

64. Отчет о мировой пожарной статистике № 29 со всесторонним анализом пожарной статистики за 2022 год | CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. – URL: https://ctif.org/ru/news/otchet-o-mirovoy-pozharnoy-statistike-no-29-so-vsestoronnim-analizom-pozharnoy-statistiki-za?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 11.12.2024). – Текст : электронный.

65. Отчет о мировой пожарной статистике № 29 со всесторонним анализом пожарной статистики за 2022 год | CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. URL: https://ctif.org/ru/news/otchet-o-mirovoy-pozharnoy-statistike-no-29-so-vsestoronnim-analizom-pozharnoy-statistiki-za?utm_source=chatgpt.com (date of application: 11.12.2024).

66. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году. – URL:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68570270> (дата обращения: 11.12.2024). –

Текст : электронный.

67. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году. URL:
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68570270> (date of application: 11.12.2024).