

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Ковальский Федор Сергеевич

**Методы снижения риска пожаро- и взрывоопасных производственных
объектов с учётом вероятностно-экономического показателя безопасности
контуров защит**

2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре техносферной безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Мосолов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, заместитель генерального директора, руководитель органа по сертификации Общества с ограниченной ответственностью «ИНТЕХСЕРТ-ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ» (ООО «ИНТЕХСЕРТ-ПБ») Гордиенко Денис Михайлович

Кандидат технических наук, доцент Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования (ФГАОУ ВО) «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Бызов Антон Прокопьевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства РФ по делам ГО, ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Защита состоится 19 мая 2026 г. в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций РХТУ.1.5.01, созданного на базе Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева, по адресу: 125047 Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9, Конференц-зал (аудитория 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на официальном сайте:

https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.1.5.01 Кандидат технических наук, доцент



Молчанова Я.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что безопасность на производстве остаётся заявленным приоритетом, но на практике она реализуется через формальные, жёстко заданные нормы, которые не дают гибкости для принятия обоснованных решений. В таких условиях важно развивать подходы, основанные на количественной оценке рисков, чтобы можно было выбирать меры защиты, исходя из их влияния на безопасность и затраты. Это особенно актуально для предприятий, которые обязаны соблюдать требования пожарной и промышленной безопасности, но при этом оставаться конкурентоспособными.

Важнейшей государственной задачей в условиях беспрецедентных западных санкций в отношении Российской Федерации и продолжающейся специальной военной операции является обеспечение взрывопожаробезопасности на нефтегазовых и топливно-энергетических объектах, которые являются основой экономики государства.

Вследствие вышеприведенных обстоятельств необходимость в разработке новых методов и подходов, направленных на снижение пожарных рисков, является актуальной.

В работе представлен метод, применение которого позволяет формировать оптимальную конфигурацию комплексной системы обеспечения безопасности с заданным уровнем защиты при минимальном уровне затрат.

Основу принимаемых решений составляют такие исходные данные, как уровень риска, стоимость защитных мер и величина их эффективности, что позволяет обосновать утверждение об обеспечении требуемого уровня безопасности соответствующей (конкретной) конфигурацией системы защиты.

Предложенный подход снижает затраты и позволяет синхронизировать процесс усовершенствования мер безопасности предприятия с ускорением его промышленного роста и обеспечивает устойчивое развитие.

Степень разработанности. Вопросы управления рисками пожарной и промышленной безопасности являются предметом повышенного внимания в Российской Федерации и находятся в фокусе международного научного

сообщества. В 1960-х годах компанией ICI (Imperial Chemical Industries) были заложены основы методологии HAZOP (hazard and operability analysis – анализ опасности и работоспособности), компанией Bell Labs для Военно-воздушных сил США в 1962 году был разработан метод «деревьев отказов» (FTA – failure tree analysis), позволивший количественно оценивать вероятность аварийных сценариев, что стало поворотным моментом в переходе от качественных к вероятностным моделям безопасности.

Как показывает практика, даже широко используемые методы, в частности, основанные на принципе ALARP (As Low As Reasonably Practicable - «настолько низко, насколько это разумно возможно»), до настоящего времени сталкиваются с проблемой субъективной интерпретации понятия «разумной достижимости» мер защиты. Международные стандарты IEC 61508 и IEC 61511 хотя и задают чёткие требования к SIL (Safety Integrity Level – уровни полноты безопасности), не предлагают механизмов интеграции риск-ориентированного подхода с экономическими расчётами, что проявляется при проектировании сложных систем.

В России развитие методов управления рисками развивалось параллельно с формированием нормативной базы. Применение принципа ALARP рассматривали в своих работах Гордиенко Д.М. и Телюк А.С. К числу наиболее опасных «отказов» относят так называемые «каскадные» отказы», риски возникновения которых на объектах с взаимосвязанными технологическими процессами зачастую игнорируются отечественными методиками, что приводит к недооценке таких рисков.

В действующей законодательной базе (Федеральный закон №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», Федеральный закон №123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности») рассматривается данная проблема в целом, однако не решается задача достижения баланса между жёсткими требованиями и экономической целесообразностью в виду следующих причин:

- отсутствуют общепринятые методики количественной оценки обоснованности затрат в рамках ALARP, что приводит к конфликтам между

специалистами производственно-технологических процессов и экономистами при выборе систем защиты;

- сохраняется разрыв между нормативной базой и реальными производственными условиями: требования к SIL зачастую выполняются без учёта специфики объекта по формальному принципу.

Вышеперечисленные проблемы позволили сформулировать цель и задачи исследования.

Цель исследования: обеспечение пожарной, промышленной, также экономической безопасности опасных производственных объектов (ОПО) с учетом рентабельности затрат на меры защиты, соответствующих ожидаемому уровню риска на нефтехимических и химических производственных объектах.

Основные задачи. Для достижения поставленной в диссертации цели решаются следующие задачи:

1. Проанализировать нормативно-методическую базу и существующие подходы к риск-ориентированному подходу обеспечения пожарной и промышленной безопасности ОПО, определить проблемные аспекты применения вероятностного анализа риска при выборе мер защиты.

2. Сформировать методические подходы к заданию критериев приемлемости риска и принятию решений при выборе мер защиты для ОПО с учётом принципа ALARP и ограничений практического применения.

3. Разработать подход к количественной оценке риска на ОПО, обеспечивающий сопоставление вариантов мер защиты в условиях ограниченности исходных данных и ресурсов анализа.

4. Разработать подход к технико-экономическому обоснованию мер защиты, позволяющий учитывать соотношение затрат и эффективности снижения риска в условиях заданных ограничений.

5. Обосновать порядок применения и сочетания методов идентификации опасностей и последующей количественной оценки риска на различных стадиях жизненного цикла ОПО.

6. Разработать подход к выбору оптимальных наборов мер защиты для

ОПО при заданных ограничениях по уровням риска и ресурсам и провести апробацию предложенных решений на примерах ОПО.

Объект исследования: обеспечение пожарной и промышленной безопасности на опасных производственных объектах на основе риск-ориентированного подхода.

Предмет исследования: меры снижения пожарного риска на взрывопожароопасных объектах на основе применения вероятностно-экономического показателя при построении систем обеспечения промышленной и пожарной безопасности.

Методы исследования:

В процессе работы были использованы как общенаучные, так и специальные методы исследования. Теоретическая часть базировалась на анализе и обобщении научной литературы, отечественной и зарубежной нормативной базы, а также сравнительном исследовании подходов к обеспечению промышленной и пожарной безопасности. Для выявления закономерностей и построения концептуальной модели применялись методы анализа, синтеза и моделирования.

При идентификации опасностей и анализе возможных сценариев аварий особое место занял HAZOP-анализ. Для построения причинно-следственных зависимостей и количественной оценки вероятности критических событий использовался метод анализа деревьев отказов, что позволило учесть как технические отказы, так и ошибки персонала.

В работе принимались следующие определения риска:

- ожидаемый уровень риска/ожидаемый риск – рассчитанная величина опасного последствия;
- приемлемый риск – значение риска, менее или равное допустимому риску;
- допустимый риск – величина риска, с которой общество и предприятие готовы мириться, так как его полное устранение невозможно или экономически нецелесообразно.

Для оценки допустимого риска применялись вероятностно-статистические

методы с учётом доверительных интервалов и принцип ALARP, позволяющий соотнести технические возможности снижения риска с экономической целесообразностью. Использование доверительных интервалов позволяло учитывать неопределённость оценок риска и задавать область обоснованных значений допустимого риска. Экономическая составляющая исследования включала анализ эффективности защитных мероприятий на основе разработанного индекса экономической эффективности, интегрирующего результаты количественного анализа риска с затратами на системы защиты.

Практическая часть работы опиралась на данные эксплуатации конкретных объектов – установки гидроочистки дизельного топлива и компрессора природного газа. Для автоматизации расчётов и визуализации результатов применялся программный комплекс RizEx-3. Дополнительной эмпирической базой послужили статистические сведения МЧС России, Росстата и международных агентств.

Научная новизна:

Разработан риск-ориентированный подход к выбору систем защиты для опасных производственных объектов, основанный на совместном учёте величины риска, стоимости защитных мер и их эффективности, что позволяет обосновывать оптимальную конфигурацию системы обеспечения безопасности при заданных ограничениях.

Предложен индекс экономической эффективности и разработан порядок поэтапного выбора мер защиты, позволяющий количественно сопоставлять варианты решений по критерию снижения риска при заданных затратах и последовательно формировать состав системы защиты.

Разработан подход к заданию критериев приемлемости риска и обоснован порядок сочетания метода анализа опасности и работоспособности (HAZOP) и метода деревьев отказов для количественной оценки риска и выбора мер защиты в условиях ограниченности исходных данных и ресурсов анализа.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии подходов к выбору мер защиты для опасных производственных объектов на основе количественного сопоставления уровня риска, эффективности защитных мер и

затрат на их реализацию.

В работе доработаны представления о возможности совместного рассмотрения требований безопасности и экономической целесообразности в рамках единой процедуры принятия решений, что позволяет формализовать выбор конфигурации системы обеспечения безопасности при заданных ограничениях по риску.

Предложенный индекс экономической эффективности позволяет представить результат применения меры защиты в виде количественно сопоставимого показателя и тем самым перейти от качественного сравнения вариантов к их формализованному ранжированию по критерию снижения риска при заданных затратах. Использование данного показателя расширяет возможности риск-ориентированного подхода при обосновании состава мер защиты.

Теоретически значимым является также разработанный порядок поэтапного выбора мер защиты, основанный на последовательном пересчёте уровня риска и индекса экономической эффективности после каждого принятого решения. Такой порядок развивает подходы к выбору мер защиты в условиях ограниченности ресурсов и создаёт основу для дальнейшего развития методов количественного обоснования систем обеспечения безопасности опасных производственных объектов.

Практическая значимость работы.

Предложенный подход дает возможность предприятиям выбирать наиболее эффективные конфигурации систем защиты, соответствующие допустимому уровню риска, без дополнительных инвестиций. Это особенно актуально в условиях жёсткого нормативного регулирования, когда производственные организации вынуждены находить баланс между безопасностью и экономией.

Метод, апробированный на нефтегазовых и топливно-энергетических объектах, доказал свою эффективность: затраты в реализованных проектах на системы защиты в течение периода разработки, внедрения и опытной эксплуатации были снижены при сохранении приемлемого уровня безопасности, что

характеризует его универсальность в части применения как проектными организациями, так и службами промышленной безопасности.

Разработанный метод может быть встроен в существующие на ОПО процедуры риск-анализа без нарушения существующих регламентов, что существенно упрощает его внедрение и предоставляет механизмы рационального управления защитными мерами. Представленные в работе примеры применения методики к реальным производственным условиям подчеркивают ее практическую значимость.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 6 публикациях в рецензируемых изданиях, из них 3 статьи в журнале, индексируемом в международных базах данных Scopus, Chemical Abstracts и GeoRef.

Апробация:

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: IV, V и VI Международных научно-практических конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности (г. Москва, 2020, 2022, 2024 гг.); Российском нефтегазовом саммите «Химия. Транспортировка. Хранение» (г. Москва, 2021 г.); 2-м Международном форуме «Минеральные удобрения PRO» (г. Сочи, 2024 г.); Российском нефтегазовом техническом конгрессе (г. Москва, 2024 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Успехи в специальной химии и химической технологии» (г. Москва, 2025 г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан риск-ориентированный подход к выбору мер защиты для опасных производственных объектов, предусматривающий задание критериев приемлемости риска на основе фонового риска и применение принципа ALARP, что обеспечивает сопоставимость результатов количественной оценки риска при принятии решений.

2. Предложен индекс экономической эффективности, позволяющий количественно сопоставлять меры защиты по соотношению снижения риска и

затрат на их реализацию и использовать данный показатель при обосновании выбора защитных мер в условиях ограниченных ресурсов.

3. Обоснован порядок совместного применения HAZOP и метода деревьев отказов для количественной оценки риска и выбора мер защиты на опасных производственных объектах, что обеспечивает переход от выявления опасных ситуаций к количественному обоснованию принимаемых решений.

4. Разработан метод выбора конфигурации системы защиты, обеспечивающей требуемое снижение риска при обоснованных затратах, реализованный в виде поэтапной процедуры с последовательным пересчётом риска и индекса экономической эффективности после каждого принятого решения.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов подтверждается использованием методов математической статистики и анализа опасности и работоспособности. Апробация результатов проведенного исследования выполнена при подготовке НИР в компании ООО «ЦИТР «Ризикон», по результатам которой подготовлен акт о внедрении.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 101 наименование, и 7 приложений. Общий объем работы – 226 страниц, включая 28 рисунков, 8 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность Грановскому Эдуарду Алексеевичу, генеральному директору ООО «ЦИТР «Ризикон», за ценные советы, внимательное наставничество и неизменную поддержку на всех этапах работы над диссертацией. Его глубокие знания и практический опыт в области промышленной безопасности, а также внимательное отношение к деталям позволили сформировать научную основу исследования и придать работе завершённую и практическую значимость.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначены актуальность темы, цели и задачи исследования, определены объект и предмет работы, сформулированы новизна и практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены теоретические основы обеспечения пожарной

и промышленной безопасности опасных производственных объектов на основе анализа риска. Показано, что развитие отечественной и зарубежной нормативной базы сопровождалось переходом от жёстко предписывающих требований к риск-ориентированным и инженерным подходам, основанным на количественной оценке вероятности аварий и тяжести их последствий. Установлено, что в современных условиях обоснование мер защиты должно учитывать не только выполнение нормативных требований, но и эффективность снижения риска при ограниченных ресурсах.

Проанализированы понятия управления рисками и методы идентификации опасностей. Показано, что риск следует рассматривать как сочетание вероятности события и тяжести последствий. В качестве базового метода выявления опасностей на ОПО обоснован HAZOP-анализ, а для количественной оценки риска – его сочетание с методом деревьев отказов.

Выполненный анализ показал, что существующие подходы, включая применение принципа ALARP, не содержат достаточно чёткого количественного механизма сопоставления снижения риска и затрат на реализацию мер защиты. Для устранения данного ограничения в работе введён индекс экономической эффективности. Для каждого конечного последствия c вводится величина S_c , характеризующая тяжесть (ущерб) и вероятность наступления P_c . Тогда общий риск системы можно записать как:

$$R(x) = \sum_c P_c(x) S_c, \quad (1)$$

где x обозначает набор включённых систем защиты. В отсутствие барьеров (систем защит) имеем исходный риск $R_{\text{нач}} = R(0)$. При добавлении контура защиты вероятность наступления событий пересчитывается с учётом отказов барьеров. Если барьер i характеризуется вероятностью отказа $PF D_i$ и действует на набор событий β_c , то вероятность наступления последствия c принимает вид:

$$P_c(x) = P_c \prod_{i \in \beta_c \cap x} PF D_i \quad (2)$$

Соответственно, риск после установки барьера равен $R_{\text{кон}} = R(x \cup \{i\})$

Каждая система защиты имеет стоимость G_i , и задача анализа состоит в том, чтобы сопоставить снижение риска и требуемые затраты. Для этого вводится

индекс экономической эффективности, который показывает «цену» снижения риска. В базовой форме он определяется как

$$\text{ИЭЭ} = \frac{R_{\text{нач.}}}{R_{\text{кон.}}} \cdot \frac{1}{G}, \quad (3)$$

что можно интерпретировать как величину, показывающую, во сколько раз уменьшается риск на единицу вложенных средств.

На практике полезно рассматривать и маржинальный вариант этого индекса, показывающий эффект от включения отдельного барьера к уже выбранному набору:

$$\Delta R_i(x) = R(x) - R(x \cup \{i\}), \quad \text{ИЭЭ}_i(x) = \frac{\Delta R_i(x)}{G_i} \quad (4)$$

Таким образом, ИЭЭ показывает, во сколько раз снижается риск (независимо от его природы: индивидуальный, экономический, экологический) на каждый вложенный рубль.

Алгоритм практического применения выглядит как последовательный выбор барьеров по убыванию значения ИЭЭ. На первом шаге рассматриваются все доступные варианты защиты, выбирается тот, для которого показатель максимален. После его определения пересчитывается риск системы и, соответственно, значения ИЭЭ для оставшихся барьеров. Далее процедура повторяется до тех пор, пока суммарный риск не снизится до заданного приемлемого уровня $R_{\text{доп}}$. Таким образом удаётся выявить комбинацию защитных мер, при которой достигается баланс между стоимостью и снижением риска.

Формально задача может быть записана как оптимизационная:

$$\min_x \sum_i G_i x_i \quad \text{при условии } R(x) \leq R_{\text{доп}}, x_i \in \{0, 1\} \quad (5)$$

где x_i - бинарная переменная, равная единице, если барьер включён.

Таким образом, в первой главе обоснована необходимость совместного рассмотрения риска и затрат при выборе мер защиты, показана целесообразность использования НАЗОР в сочетании с количественными методами анализа и введён индекс экономической эффективности как инструмент формализованного выбора мер защиты для опасных производственных объектов.

Во второй главе выполнено определение минимальных условий безопасной

эксплуатации участка установки гидроочистки дизельных топлив (минимально необходимого перечня контуров противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ), обеспечивающего допустимый уровень риска) на основе последовательного применения HAZOP-анализа, количественной оценки риска и выбора рациональной комбинации систем защиты.

Рассматривался реакторный блок установки гидроочистки дизельных топлив, включающий насосы подачи сырья, компрессор подачи водородсодержащего газа, печь подогрева газосырьевой смеси и реакторный блок. Технологический процесс протекает следующим образом. Сырьё насосами подаётся в теплообменник, далее смешивается с циркулирующим водородсодержащим газом, после чего газосырьевая смесь проходит через теплообменник и печь, где нагревается до температуры 300–400°C и затем поступает в последовательно работающие реакторы. После реакторного блока газопродуктовая смесь охлаждается, разделяется в сепараторе на жидкую и газовую фазы, а далее направляется на последующие стадии процесса. Сокращенный перечень систем защиты представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень систем защит и описания их функции и стоимость

№	Обозначение в табл. 2	Наименование	Функция	Стоимость, руб.
1.	A	TIRSAHH-1/1,2, TIRSAHH-2/1,2	Остановка насоса поз. Н-1/Н-2 при достижении температуры подшипников вала насоса поз. Н-1/Н-2 максимального значения	2 500 000
2.	B	TIRSAHH-3/1,2, TIRSAHH-4/1,2	Остановка насоса поз. Н-1/Н-2 при достижении температуры подшипников электродвигателя насоса поз. Н-1/Н-2 максимального значения	2 500 000
3.	C	QIRSA-1	Остановка насоса поз. Н-1/Н-2 при достижении концентрации углеводородов вблизи насосов поз. Н-1/Н-2 максимального значения	1 000 000
...				
9.	I	ПАЗ- LIRSAHH-2	Остановка компрессора поз. ПК-1/ПК-2, остановка технологического процесса при росте уровня в сепараторе поз. С-1 до максимального значения	700 000

Продолжение таблицы 1

10.	J	ПАЗ-QIRSA-2	Остановка компрессора поз. ПК-1/ПК-2, сброс ВСГ на свечу, остановка технологического процесса при росте концентрации водорода вблизи компрессора поз. ПК-1/ПК-2 до максимального значения	1 000 000
...				
17.	Q	ПАЗ-PIRSALL-16	Остановка печи поз. П-1 при снижении давления топливного газа на основные горелки до минимального значения	900 000
18.	R	ПАЗ-PIRSALL-6	Остановка технологического процесса, подача пара в змеевики печи поз. П-1 при снижении давления газосырьевой смеси на входе в печь поз. П-1 до минимального значения	900 000
19.	S	ПАЗ-BSA-17...32	Остановка печи поз. П-1 при погасании пилотных горелок	10 000 000
20.	T	ПАЗ-BSA-1...16	Остановка печи поз. П-1 при погасании основных горелок	10 000 000
21.	U	ПАЗ-TIRSA-9	Остановка технологического процесса при росте температуры газосырьевой смеси после печи поз. П-1 до максимального значения	1 200 000
22.	V	ПАЗ-PIRSA-17	Остановка печи поз. П-1 при снижении давления топливного газа на пилотные горелки до минимального значения	900 000

HAZOP-анализ участка гидроочистки дизельных топлив, выполненный за 4 рабочих дня по ГОСТ Р 27.012–2019, выявил 3 последствия с риском гибели человека и 19 последствий с экономическим ущербом. Для персонала приняты границы индивидуального риска в соответствии с ALARP: верхняя 10^{-5} 1/год, нижняя 10^{-6} 1/год; для экономического риска: $2,5 \times 10^6$ и $2,5 \times 10^5$ руб./год соответственно. Для всех опасных событий построены деревья отказов в RizEx-3 с учётом отказов оборудования, контуров защиты и ошибок персонала. Расчёты показали, что без систем защиты индивидуальный и экономический риск превышают допустимые уровни, поэтому безопасная эксплуатация участка в исходной конфигурации невозможна и требует введения дополнительных контуров защиты.

Выбор минимально необходимой комбинации систем защиты осуществлялся на основе индекса экономической эффективности, введённого в первой главе. На

каждой итерации определялся контур, обеспечивающий наибольшее снижение риска на единицу затрат, после чего риск пересчитывался, а значения индекса для оставшихся контуров уточнялись. Такой порядок позволил перейти от полного перечня предусмотренных проектом систем защиты к рациональной последовательности их включения. Значения ИЭЭ, равные 0 указывают на то, что рассматриваемый контур не влияет на величину риска (частное между риском без контура и с контуром равно 1). Процесс итерационного вычисления показан в таблице 2.

Таблица 2 – Процесс поиска оптимальной комбинации систем защит для участка установки гидроочистки дизельных топлив

	A	B	C	...	I	J	...	Q	R	S	T	U	V	W	X	ИЭЭ	Сумм. инд. риск
1 итерация																	
	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		7,98E-05
A	0,1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	0	7,98E-05
B	1	0,1	1	...	1	1	...	1	1	1	1	1	1	1	1	0	7,98E-05
C	1	1	0,01		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1,79E-06	4,45E-05
...																	
I	1	1	1		0,1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	0	7,98E-05
J	1	1	1	...	1	0,1	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00E-06	7,97E-05
...																	
U	1	1	1		1	1		1	1	1	1	0,1	1	1	1	0	7,98E-05
V	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	0,1	1	1	1,35E-06	6,55E-05
W	1	1	1	...	1	1	...	1	1	1	1	1	1	0,1	1	1,22E-06	7,26E-05
X	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	1	1	0,1	1,28E-06	6,95E-05
2 итерация																	
	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	0,1	1	1		6,55E-05
A	0,1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	0,1	1	1	0	6,55E-05
B	1	0,1	1	...	1	1	...	1	1	1	1	1	0,1	1	1	0	6,55E-05
C	1	1	0,01		1	1		1	1	1	1	1	0,1	1	1	1,64E-06	2,67E-05
...																	
I	1	1	1		0,1	1		1	1	1	1	1	0,1	1	1	0	6,55E-05
J	1	1	1	...	1	0,1	...	1	1	1	1	1	0,1	1	1	1,00E-06	6,54E-05
...																	
U	1	1	1		1	1		1	1	1	1	0,1	0,1	1	1	0	6,55E-05
V	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	0,1	0,1	1	1,25E-06	5,83E-05
W	1	1	1	...	1	1	...	1	1	1	1	1	0,1	1	0,1	1,32E-06	5,52E-05
X	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	0,1	1	1	0	6,55E-05
...																	

Проведённый анализ показал, что наибольшее влияние на снижение риска гибели персонала оказывает контур QIRSA-1, обеспечивающий останов

технологического процесса при повышении концентрации углеводородов в районе насосов. Повышение требований к этому контуру до SIL 2 позволило достичь индивидуального риска $5,28 \times 10^{-7}$ 1/год, то есть обеспечить его снижение ниже целевого значения. При этом суммарные затраты на реализацию выбранной комбинации систем защиты составили 25,2 млн руб., а ожидаемый экономический ущерб – 1,6 млн руб./год.

Таким образом, для рассматриваемого участка установки гидроочистки дизельных топлив определена минимально необходимая конфигурация систем защиты, обеспечивающая достижение приемлемого уровня индивидуального риска при экономически обоснованных затратах. Показано, что отказ от части ранее предусмотренных проектом контуров не приводит к выходу за пределы допустимых значений риска, но позволяет сократить капитальные затраты примерно на 21 млн руб. В результате подтверждена возможность применения предложенного подхода для обоснования проектных решений по промышленной и пожарной безопасности на опасных производственных объектах.

В третьей главе рассмотрен двухступенчатый центробежный компрессор природного газа с приводом от паровой турбины, оснащённый маслосистемой, резервным маслонасосом и системой сухих газовых уплотнений. Природный газ поступает на всас компрессора из сети предприятия при избыточном давлении 1,1 МПа и температуре окружающей среды; сжатие осуществляется без промежуточного охлаждения. Особое значение для безопасности имеют сухие газовые уплотнения, предотвращающие прорыв газа в помещение компрессорной, а также системы контроля вибрации, температуры подшипников, осевого сдвига ротора, давления и загазованности.

Для объекта проведён HAZOP-анализ по ГОСТ Р 27.012–2019. Сессия продолжалась 3 рабочих дня с участием представителей проектной, эксплуатирующей и исследовательской организаций. В результате выявлены 1 сценарий, связанный с гибелью персонала, и 22 сценария, приводящие к экономическим потерям. Наиболее опасным признан сценарий загазованности помещения компрессорной при нарушении герметичности сухих газовых

уплотнений с последующим взрывом.

Допустимые критерии риска определялись на основе фоновых значений. Для индивидуального риска использованы статистические данные по Кемеровской области за 2019–2023 гг. По результатам расчёта фоновый бытовой риск гибели от пожаров, взрывов и отравлений составил 10^{-4} в год. Верхняя граница допустимого индивидуального риска для персонала установлена на уровне 10^{-4} в год, а нижняя - 10^{-6} в год. Для экономического риска принято, что потеря свыше 5×10^6 руб./год может привести к банкротству предприятия. Нижняя граница абсолютно допустимого экономического риска принята равной 5×10^5 руб./год.

Для всех выявленных опасных событий построены деревья отказов с использованием программного комплекса RizEx-3. Пример участка дерева отказов представлен на рисунке 1.

Оптимизация состава защит выполнялась на основе индекса экономической эффективности. В отличие от предыдущего примера, здесь учитывалось, что срабатывание контура защиты во многих случаях не устраняет само повреждение, а лишь предотвращает дальнейшее развитие аварии и ограничивает масштаб последствий. Поэтому при добавлении новых контуров ожидаемый ущерб снижался не монотонно. Всего было выполнено 27 итераций выбора защитных мер. На 20-й итерации до-

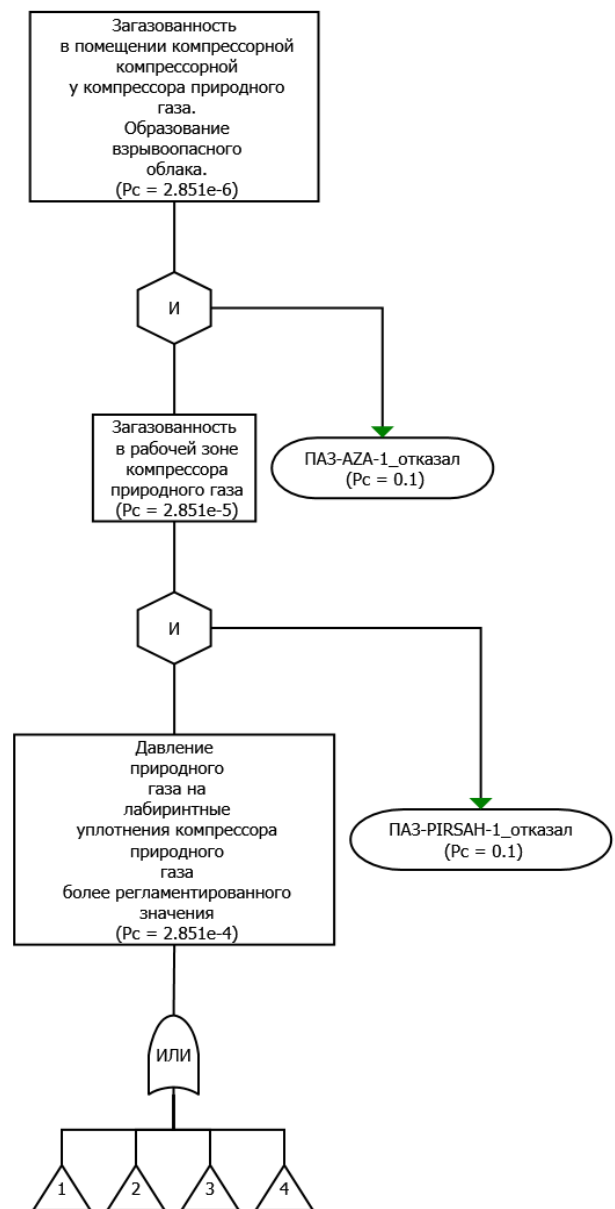


Рисунок 1 – Участок дерева отказов

стигнуто значение индивидуального риска $8,33 \times 10^{-7}$ 1/год, то есть ниже допустимого значения. При этом ожидаемый ущерб составил $4,9 \times 10^6$ руб./год, а затраты на безопасность – $14,75 \times 10^6$ руб. График процесса принятия решений представлен на рисунке 2.

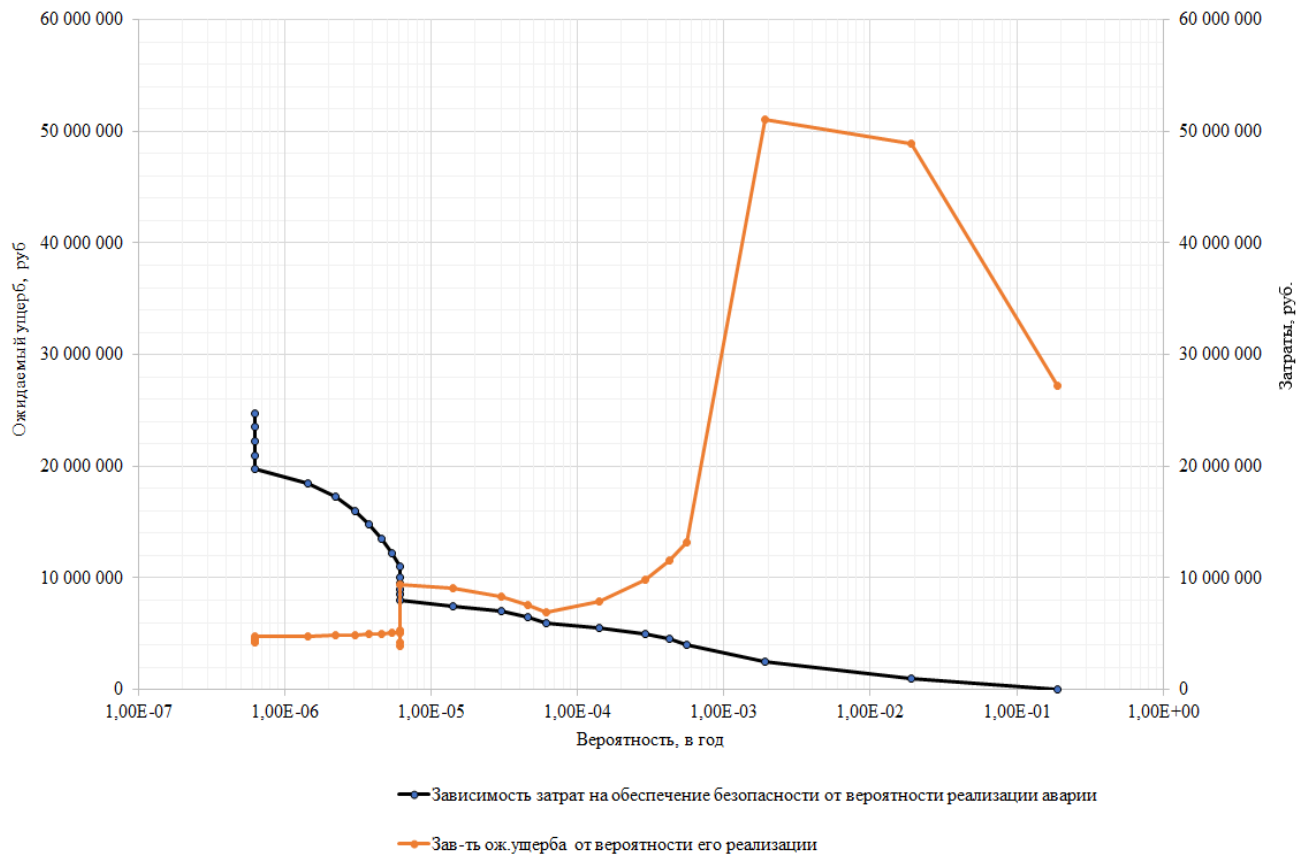


Рисунок 2 – Графическое отображение процесса принятия решений для компрессора природного газа

Дальнейшее добавление контуров защиты оказалось нецелесообразным, поскольку затраты на безопасность начинали превышать ожидаемый ущерб, тогда как индивидуальный риск уже был снижен до допустимого уровня, а экономический риск находился в области принятия решений по ALARP. Таким образом, для компрессора природного газа была определена минимально необходимая конфигурация защит, обеспечивающая безопасную эксплуатацию при рациональных затратах.

В четвертой главе рассмотрены ограничения предложенной методики: зависимость качества HAZOP от компетентности экспертов, фрагментарность причинно-следственных связей и необходимость применения деревьев отказов;

ресурсоёмкость моделирования крупных объектов; усреднённость статистики отказов; влияние выбора экономических параметров на область ALARP. Отмечено, что полученные границы ALARP и оптимальные конфигурации не могут напрямую переноситься на другие объекты без повторного анализа. Тем не менее метод демонстрирует практическую ценность при условии актуализации исходных данных.

Полученные результаты в совокупности соответствуют положениям п. 14 паспорта специальности 2.10.1 «Пожарная безопасность», связанным с совершенствованием методов оценки и снижения пожарных рисков на объектах защиты, и формируют основу для риск-ориентированной оптимизации контуров противоаварийной защиты с учётом экономической эффективности.

В заключении приведены основные выводы и результаты по проделанной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача обоснования рациональных конфигураций систем обеспечения пожарной, промышленной и экономической безопасности опасных производственных объектов на основе риск-ориентированного подхода и с учетом экономической целесообразности затрат на меры защиты.

На основании проведенного исследования сформулированы следующие **выводы**:

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных нормативно-методических подходов к обеспечению пожарной и промышленной безопасности ОПО и установлено, что практическое применение риск-ориентированных методов затруднено субъективностью трактовки принципа ALARP, а также отсутствием однозначного механизма связи требований безопасности с экономической обоснованностью защитных мер.

2. Сформированы методические подходы к заданию критериев приемлемости риска и принятию решений при выборе мер защиты. Показано, что использование фоновых рисков и учет неопределенности вероятностных оценок

позволяют корректно задавать область принятия решений в логике ALARP.

3. Предложен подход к количественной оценке риска на ОПО, основанный на совместном применении HAZOP-анализа и метода деревьев отказов. Предложенная последовательность обеспечивает переход от выявления опасных отклонений и последствий к расчету вероятностей аварийных событий с учетом отказов оборудования и ошибок персонала.

4. Разработан подход к технико-экономическому обоснованию мер защиты, основанный на сопоставлении эффекта снижения риска и затрат на его достижение. Для этого введен индекс экономической эффективности, позволяющий ранжировать защитные меры по их вкладу в снижение риска на единицу затрат.

5. Предложен итерационный порядок выбора защитных систем с последовательным пересчетом риска и индекса экономической эффективности на каждом шаге. Такой порядок позволяет обосновывать достаточность конкретной конфигурации системы защиты и выбирать рациональный состав мер при заданных ограничениях.

6. Предложенная методология апробирована на промышленных объектах и показала, что ее применение позволяет достигать приемлемых значений риска при исключении избыточных затрат на системы безопасности.

7. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный подход может быть использован проектными организациями и службами промышленной безопасности для обоснования состава и достаточности защитных систем без изменения действующих процедур риск-анализа и нормативных регламентов.

Таким образом, поставленная цель исследования достигнута. Разработанные в диссертации методические и расчетные подходы позволяют обосновывать рациональные конфигурации систем безопасности опасных производственных объектов с учетом приемлемого уровня риска и экономической целесообразности затрат.

Данное исследование имеет дальнейшие перспективы разработки в части

внедрения методологии в систему управления предприятием для перехода с планового ремонта по паспортным срокам оборудования на ремонт по состоянию (фактическому износу) элементов оборудования.

Проведённое исследование соответствует требованиям паспорта специальности 2.10.1 «Пожарная безопасность», в частности положениям пунктов 2 и 14, направленным на развитие методологических основ обеспечения пожарной безопасности и совершенствование методов оценки и снижения пожарных рисков на промышленных объектах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Ковальский Ф.С. Анализ применения методов смещенного идеала и анализа иерархий при категорировании объекта топливно-энергетического комплекса / **Ф.С. Ковальский**, А.С. Мосолов, Н.И. Акинин // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 3. – С. 15-20. (**Scopus, Chemical Abstracts, GeoRef**)
2. Ковальский Ф.С. Проблемы оптимизации затрат на снижение риска аварий / **Ф.С. Ковальский**, Э.А. Грановский, Н.И. Акинин // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 7. – С. 28-36. (**Scopus, Chemical Abstracts, GeoRef**)
3. Грановский Э.А. Об определении требований ко времени отклика систем безопасности / Э.А. Грановский, И.А. Строкина, **Ф.С. Ковальский** // Безопасность труда в промышленности – 2025. – № 5. – С. 49-55. (**Scopus, Chemical Abstracts, GeoRef**)
4. Ковальский Ф.С. Применение методов Дельфи и анализа иерархий при выборе приоритетного сценария развития аварийной ситуации на объекте защиты / **Ф.С. Ковальский**, А.С. Мосолов, Ю.В. Прус // Техносферная безопасность. – 2020. – № 3 (28). – С. 12-20.
5. Мосолов А.С. Методика расчета параметров аварийных взрывов топливно-воздушных смесей – методология и опыт применения / Мосолов А.С., Акинин Н.И. **Ковальский Ф.С.** // Пожарная безопасность. – 2025. – № 3 (120). – С. 56-70.
6. Ковальский Ф.С. Управление риском установки гидроочистки дизельного топлива с учетом вероятностно-экономического показателя

безопасности контуров защиты / **Ковальский Ф.С.**, Мосолов А.С., Акинин Н.И. // Пожарная безопасность. – 2025. – № 4 (121). – С. 62-70.

7. Ковальский Ф.С. Применение методов Дельфи и анализа иерархий при выборе приоритетного сценария развития аварийной ситуации на объекте защиты / **Ф.С. Ковальский**, А.С. Мосолов // IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности: материалы конференции, Москва, 21-22 апреля 2020 года. – Москва: Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 2020. – С. 42-45.

8. Шевцова Д.В. К вопросу о применении метода HAZOP при оценке риска аварий на ОПО по получению водорода / Д.В. Шевцова, **Ф.С. Ковальский**, Н.И. Акинин // V Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности: материалы конференции, Москва, 17-18 мая 2022 года. – Москва: Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 2022. – С. 21-24.

9. Стеценко И.А. Определение времени безопасности системы для обеспечения промышленной и пожарной безопасности / И.А. Стеценко, **Ф.С. Ковальский**, Э.А. Грановский, Н.И. Акинин // VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности: материалы конференции, Москва, 25 – 26 апреля 2024 года. – Москва: Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 2024. – С. 12-15.

10. Данилова К.В. К вопросу о возможности прогнозирования пожарных и промышленных рисков / К.В. Данилова, **Ф.С. Ковальский**, Э.А. Грановский, Н.И. Акинин // Успехи в специальной химии и химической технологии: Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 90-летию Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, 120-летию профессора К.К. Андреева, 130-летию профессора А.С. Бакаева. Материалы конференции. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2025. – С. 326-328.

11. Лебедева А.М. Об обеспечении пожарной и промышленной безопасности участка установки гидроочистки дизельных топлив / А.М. Лебедева,

Ф.С. Ковальский, Н.И. Акинин // Успехи в специальной химии и химической технологии: Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 90-летию Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, 120-летию профессора К.К. Андреева, 130-летию профессора А.С. Бакаева. Материалы конференции. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2025. – С. 324-325.

12. Ковальский Ф.С. Снижение риска эксплуатации компрессора природного газа с учетом вероятностно-экономического показателя безопасности контуров защиты / **Ф.С. Ковальский**, Э.А. Грановский, Н.И. Акинин // Успехи в специальной химии и химической технологии: Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 90-летию Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, 120-летию профессора К.К. Андреева, 130-летию профессора А.С. Бакаева. Материалы конференции. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2025. – С. 321-322.