

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

На правах рукописи



ПРУС МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РИСКОВ
В СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Надыкто Алексей Борисович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1 Исследование существующих подходов и методов моделирования процессов управления рисками в социотехнических системах.....	14
1.1 Анализ основных угроз и современных проблем безопасности	14
1.2 Исследование и анализ основных понятий теории рисков.....	18
1.3 Исследование подходов к математической формализации и представлению рисков.....	26
1.4 Особенности постановки задач многокритериальной оптимизации при управлении рисками в социотехнических системах	32
1.5 Исследование подходов к моделированию рисков в сложных системах...	38
1.6 Обоснование цели и задач исследования.....	43
1.7 Выводы по первой главе.....	47
Глава 2 Разработка математических основ стохастического моделирования многокомпонентных рисков в системах обеспечения безопасности...	49
2.1 Развитие подходов к математической формализации и способов представления многокомпонентных рисков	50
2.2 Построение стохастической модели многокомпонентных рисков.....	52
2.3 Исследование параметров стохастической модели многокомпонентных рисков.....	56
2.4 Обоснование численного метода определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок	60
2.5 Разработка моделей функционирования систем обеспечения безопасности и прогнозирования ожидаемых потерь.....	68
2.6 Постановка задачи многокритериальной комбинаторной оптимизации при риск-ориентированном управлении.....	72
2.7 Выводы по второй главе	78

Глава 3 Разработка метода моделирования эксплуатационных многокомпонентных рисков	80
3.1 Развитие концепции эксплуатационных многокомпонентных рисков в социотехнических системах	80
3.2 Определение основных элементов модели многокомпонентных эксплуатационных рисков.....	82
3.3 Моделирование отказов общего вида.....	85
3.4 Моделирование с выделением опасных отказов.....	89
3.5 Моделирование режимов отказов с учетом обобщенной наработки и использованием распределения Вейбулла.....	99
3.6 Моделирование режимов опасных отказов	102
3.7 Выводы по третьей главе.....	104
Глава 4 Разработка и моделирование каскадных сценариев возникновения и развития кризисных ситуаций	105
4.1 Анализ методов прогнозирования развития кризисных ситуаций по каскадным сценариям	105
4.2 Обоснование гипотез и элементов стохастической модели.....	107
4.3 Построение общей математической модели каскадного сценария.....	111
4.4 Моделирование динамики отдельных этапов развития аварий и катастроф по каскадному сценарию.....	116
4.4.1 Моделирование отдельных этапов развития аварий и катастроф по каскадному сценарию.....	116
4.4.2 Моделирование динамики первого этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию.....	117
4.4.3 Моделирование динамики второго этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию.....	120
4.4.4 Моделирование динамики третьего и последующих этапов развития аварий и катастроф по каскадному сценарию.....	128
4.5 Выводы по четвертой главе.....	129

Глава 5 Применение методов моделирования многокомпонентных рисков к прикладным задачам.....	131
5.1 Разработка программного комплекса моделирования многокомпонентных рисков и его применение при исследовании эффективности систем обеспечения пожарной безопасности	131
5.1.1 Моделирование функционирования систем противопожарной защиты...	131
5.1.2 Прогнозирование потерь от пожаров в жилом секторе	144
5.2 Моделирование динамики развития инцидентов в системе «транспортное средство-опасный груз» по каскадному сценарию.....	148
5.3 Имитационное моделирование функционирования организационно-технических систем оперативного управления	161
5.4 Моделирование пожарно-электрического вреда при эксплуатации электрооборудования с учетом качества потребленной электроэнергии	164
5.5 Стохастическое моделирование геодинамической устойчивости природно-технических систем	173
5.6 Моделирование динамики функционирования и защитных свойств фильтрующе-поглощающих элементов	180
5.7 Выводы по пятой главе.....	185
Заключение.....	187
Список основных сокращений.....	190
Список литературы.....	191
Приложение А Программа для ЭВМ «Моделирование многокомпонентных рисков» (описание и листинг).....	215
Приложение Б Примеры формирования базы знаний и сравнительного анализа эффективности решений при управлении рисками.....	219
Приложение В Патент на изобретение «Способ и устройство оценки эффективности защитного действия фильтрующих элементов и/или устройств».....	224
Приложение Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Имитационное моделирование систем массового обслуживания с переменным числом каналов обслуживания»	226

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспечение безопасности социотехнических систем, в соответствии с концепцией риск-ориентированного управления, предполагает организацию процессов прогнозирования угроз различного характера на основе идентификации, анализа и оценки совокупности природных, техногенных и антропогенных рисков. Реализация концепции интеллектуального риск-ориентированного управления безопасностью требует преодоления противоречия между имеющимися научно-техническими и технологическими предпосылками, с одной стороны, и существующими процессами и методами обоснования решений и поддержки управления, с другой. Указанное противоречие проявляется, в частности, как наблюдаемое в различных сферах несоответствие существующих методов математического моделирования рисков, а также математического и информационно-аналитического обеспечения процедур принятия и исполнения решений уровню развития современных средств получения и технологий обработки мониторинговой информации.

Природные, техногенные и антропогенные риски являются объектами с достаточно сложной структурой при моделировании которой необходимо учитывать закономерности развития кризисных ситуаций и функционирования систем обеспечения безопасности (СОБ), свойства объектов защиты (ОЗ) и влияние иных факторов. Применение скалярных форм представления структуры рисков становится неэффективным, например, при прогнозировании ущерба с качественно различающимися составляющими, когда необходимо рассматривать переменные, связанные с фактически несопоставимыми и неприводимыми к единому эквиваленту признаками. Использование методов векторной оптимизации предполагает установление функциональной связи между управляемыми параметрами СОБ и характеристиками последствий реализации угроз, корректный прогноз которых требует детального исследования закономерностей возникновения и развития кризисных ситуаций в рамках определенных детерминированных, либо стохастических моделей. Современные СОБ различных видов предполагают интеграцию сил, средств и

ресурсов, в связи с чем формирование общих подходов при моделировании рисков становится весьма актуальным.

Развитие методов поддержки оперативного управления в условиях неполной информации представляет перспективное направление совершенствования информационно-аналитического обеспечения управления в СОб. Генерация алгоритмов оперативного реагирования при различных инцидентах может быть основана на адаптивном моделировании аварийных и критических состояний с учетом данных текущего мониторинга, которое позволяет определять «окна возможностей» предотвращения неблагоприятных сценариев развития событий и дальнейшего снижения угроз вплоть до их полного устранения.

Актуальность тематики исследования обусловлена его общей направленностью на создание математического инструментария, предназначенного для исследования структуры рисков, а также моделирования развития кризисных состояний, который может быть реализован при генерации алгоритмов стратегического управления рисками и оперативного управления в кризисных ситуациях.

Степень разработанности темы. При решении задач информационно-аналитического обеспечения управления безопасностью используются различные методы моделирования и анализа рисков. Например, при обосновании мероприятий по снижению рисков, классификации объектов и систем, прогнозировании последствий кризисных ситуаций могут применяться методы многокритериального анализа и векторной оптимизации (Ларичев О. И., Черешкин Д. С., Бритков В. Б., Цыгичко В. Н., Ройзензон Г. В.). Показана значительная эффективность при обосновании стратегий управления рисками методов имитационного моделирования и исследования статистических данных, использующих представление рисков композицией вероятности реализации угроз и условной вероятности последствий (Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Алехин Е. М.). При решении задач поддержки управления в условиях неполной информации применялось логико-вероятностные методы (Рыбаков А. В., Добров В. А.). В анализе техногенных рисков различных потенциально опасных объектов широко используются методы экспертной оценки и сценарный подход (Акимов В. А., Быков А. А., Белов П. Г., Владимиров В. А.,

Елохин Н. А.). Получили распространение методы определения показателей риска на основе моделирования поражающих факторов источников угроз (Овсяник А. И., Седнев В. А.). Дискретно-событийные методы моделирования техногенных аварий и природных катастроф применялись параллельно с описанием сценариев каскадных межсистемных аварий (Пантелеев В. А., Кириллов И. А., Шульц В. Л., Кульба В. В., Kaplan S., Haimes Y. Y., Garrick B. J.) и оценки стойкости сложных систем и сетевых структур различной природы (Wang S., Hong L., Chen X., Lu L., Wang X., Ouyang Y., Roningen J., Myers N., Calfas G., Ouyang M., Fang Y., Farsangi E. N., Takewaki I., Yang T., Astaneh-Asl A., Hickford A. J., Blainey S. P., Ortega A. H., Plant R., Buldyrev S. V., Parshani R., Pau G., Stanley H. E., Havlin S.).

Применение обсуждаемых методов для решения задач поддержки управления рисками в СОБ не позволяет, вместе с тем, в полной мере реализовать потенциальные возможности современных информационных технологий и методов имитационного моделирования. Математические модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки управления в СОБ должны обеспечивать проведение сравнительного анализа эффективности использования технических, финансовых и трудовых ресурсов. Решение подобных задач невозможно в рамках скалярных форм представления рисков из-за принципиальных ограничений, а эффективность применения методов векторной оптимизации невелика при отсутствии адекватных моделей, отражающих структуру взаимосвязей основных факторов рисков.

Модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки оперативного управления при реагировании на инциденты должны обеспечивать адекватность прогнозов развития опасных процессов и динамики критических состояний с учетом данных мониторинга текущего состояния ОЗ, а также показателей своевременности и эффективности целенаправленных действий и мероприятий.

Из вышесказанного следует вывод о перспективности развития методов стохастического моделирования многокомпонентных рисков с использованием векторно-матричных форм представления, а также дискретно-событийного описания динамики различных опасных процессов и явлений в социотехнических системах.

Объектом исследования является совокупность рисков, обусловленных

угрозами природного, техногенного и антропогенного характера, а **предметом исследования** - математические методы анализа и стохастического моделирования многокомпонентных рисков в социотехнических системах.

Целью настоящей работы является повышение эффективности информационно-аналитического обеспечения в сфере управления природными, техногенными и антропогенными рисками за счет формирования комплекса моделей, алгоритмов и программ, основанных на развитии математических методов исследования структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах.

Достижение цели предполагает решение следующей совокупности **задач**.

1. Развитие методов исследования структуры многокомпонентных рисков на основе: установления совокупности компонент матричного представления рисков, необходимой для прогнозирования возможных потерь при требуемой детализации состояний ОЗ и функционирования СОБ; разработки численного метода определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок; постановки задач МКО при управлении многокомпонентными рисками в социотехнических системах.

2. Развитие методов прогнозирования динамики кризисных ситуаций на основе стохастического моделирования опасных процессов и динамики критических состояний с учетом данных мониторинга и отражением вероятностных характеристик своевременности и эффективности оперативного реагирования при исследовании: вероятностных характеристик опасных отказов технических объектов (ТО) с учетом обобщенной наработки, выражаемой интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов; вероятностных характеристик развития опасных процессов и критических состояний по каскадным сценариям.

3. Реализация предлагаемых методов, построенных моделей и алгоритмов в комплексе проблемно-ориентированных программ численного анализа структуры и прогнозирования динамики многокомпонентных рисков, предназначенных для: определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок; прогнозирования потерь и анализа эффективности использования ресурсов, с учетом вероятностных оценок функционирования СОБ и состояний

ОЗ; прогнозирования развития аварийных и критических состояний критических состояний по каскадным сценариям; алгоритмов риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях; применения методов моделирования многокомпонентных рисков для решения прикладных задач в отдельных предметных областях.

Научная новизна результатов исследования состоит в развитии математических методов стохастического моделирования структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах, при этом впервые:

- в предлагаемом методе моделирования структуры многокомпонентных рисков используется матричное представление стохастической связи композиции установленных вероятностных характеристик уязвимости и состояний ОЗ, параметров рассматриваемых источников угроз и вариантов функционирования СОБ с набором возможных последствий;

- в рамках моделирования процессов риск-ориентированного управления обоснованы численный метод определения вероятностных характеристик уязвимости ОЗ по экспертным оценкам, методика стохастического анализа функционирования СОБ, постановка задачи многокритериальной комбинаторной оптимизации;

- в рамках моделирования эксплуатационных многокомпонентных рисков установлена связь вероятностных характеристик опасных отказов ТО с параметрами источников процессов деградации и обобщенной наработкой, представленной интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов;

- в рамках моделирования каскадных сценариев возникновения и развития кризисных ситуаций обоснован метод прогнозирования развития критических состояний и наборы аналитических решений локальных систем уравнений Колмогорова для нестационарных марковских процессов с ветвящейся структурой с учетом данных текущего мониторинга.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии математической теории рисков в области описания процессов возникновения и формирования структуры рисков, а также в создании математического аппарата моделирования процессов управления многокомпонентными рисками. Дальнейшее развитие данных

моделей и методов представляет основу исследования и управления рисками в более сложных СОБ, например, в интегрированных СОБ.

Практическая значимость исследования состоит в расширении круга решаемых задач информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в социотехнических системах, в частности:

- предложенные численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок, а также модели и алгоритмы анализа эффективности распределения ресурсов в системах безопасности и прогнозирования динамики кризисных ситуаций реализованы в комплексе проблемно-ориентированных программ поддержки управления рисками;

- предложенные методы исследования многокомпонентных рисков применены для решения ряда прикладных задач при моделировании: процессов управления в системах обеспечения пожарной безопасности; влияния показателей качества потребляемой электроэнергии на динамику пожароопасных отказов электрооборудования; прогнозирования потребности привлечения ресурсов при масштабных кризисных ситуациях; точечной оценки и районирования территорий природно-технических систем по уровню локальных вероятностно-временных показателей геодинамического риска; процессов фильтрации в предлагаемом устройстве испытания фильтрующе-поглощающих элементов с предварительной нейтронной активацией токсичных примесей.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач основано на применении методов теории вероятностей, теории случайных процессов, алгебры логики, теории принятия решений, анализа иерархий, многокритериальной оптимизации.

Положения и результаты, выносимые на защиту. Выносятся в качестве защищаемых следующие результаты исследования:

- метод моделирования структуры многокомпонентных рисков с матричным представлением стохастической связи композиции вероятностных характеристик уязвимости и состояний ОЗ, параметров рассматриваемых источников угроз и вариантов функционирования СОБ с набором возможных последствий;

- модель процессов риск-ориентированного управления в социотехнических системах, основанная на постановке задач многокритериальной комбинаторной оптимизации использования ресурсов и сравнительном анализе эффективности мероприятий, направленных на обеспечение безопасности;

- стохастическая модель динамики опасных отказов технических объектов с представлением обобщенной наработки интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов и совокупности наборов режимов отказов;

- каскадная стохастическая модель развития аварийных и критических состояний, с набором нестационарных решений локальных систем дифференциальных уравнений Колмогорова для прогнозирования динамики аварийных и критических состояний с учетом данных мониторинга текущего состояния;

- численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок, модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления, реализованные в комплексе проблемно-ориентированных программ.

Достоверность полученных результатов подтверждается последовательным применением апробированных математических методов анализа и синтеза, математическими доказательствами лемм, теорем и утверждений, результатами вычислительных экспериментов с применением предложенных моделей и методов и их программных реализаций, внутренней непротиворечивостью выводов и их согласованностью с результатами исследований других авторов.

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались на: XXIV-й, XXV-й и XXVI-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности» (Москва, 2015, 2016, 2017); III-й школе-семинаре молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности» (Елец, 2016); III-й и IV-й международной научно-практической конференции молодых ученых «Проблемы техносферной безопасности» (Москва, 2016, 2017); III-й Международной конференции «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (Екатеринбург, 2017); IV-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения

пожарной безопасности объектов» (Иваново, 2017); Школе-семинаре молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности» (Севастополь, 2017); IV-й Международной конференции и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 2018); Всероссийской научно-практической конференции «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2018); XI-й и XIII-й Международной конференции «Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности» (Москва, 2018, 2019); XXVII-й, XXIX-й и XXX-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, 2019, 2021, 2022); IV-й Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра» (Москва, 2021); Международной научно-практической конференции «Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: современные проблемы управления рисками и обеспечения безопасности социально-экономических и социально-политических систем и природно-техногенных комплексов» (Москва, 2022).

Практическая реализация заключается в использовании результатов при:

- выполнении проекта «Разработка инновационных материалов и технологии создания нового класса трёхмерных нанокompозитных керамических изделий сложной пространственной конфигурации» в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования и Российской Федерации (проект 0707-2020-0034);

- выполнении проекта «Разработка передовых технологий высокоскоростного многокоординатного фрезерования путем совершенствования кинематических параметров фрез и применения новых схем формообразования» в рамках Соглашения № 22–79–10353 от 29.07.2022 с Российским научным фондом;

- проектировании систем информационно-аналитической поддержки управления оперативным реагированием на инциденты в Национальном центре управления в кризисных ситуациях МЧС России;

- выполнении НИР «Компьютерное имитационное моделирование системы массового обслуживания с переменным числом каналов» в Академии ГПС МЧС России (План научной работы Академии ГПС на 2017 г., п. 19).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 научных работ, из них 8 статей в журналах из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, включенных в библиографическую базу данных Scopus, получены патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по: п. 1 – «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки)», п. 2 – «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (249 наименований) и 4 приложений, иллюстрирована 35 рисунками и 12 таблицами, содержит 227 страниц сквозной нумерации.

ГЛАВА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В данном разделе проводится критический анализ существующих подходов к моделированию опасных процессов в сложных социотехнических системах, теоретических представлений о природе и структуре техногенных, природных и антропогенных рисков, а также концепции риск-ориентированного управления безопасностью.

Обсуждаются подходы к формированию математического инструментария для решения задач оптимального управления рисками и прогнозирования динамики кризисных ситуаций, соответствующего современным технологиям сбора и обработки данных. Рассмотрены проблемы адаптации многокритериальных методов к решению задач риск-ориентированного управления в современных системах обеспечения безопасности.

Показана перспективность развития методов риск-ориентированного управления, основанных на стохастическом моделировании структуры взаимосвязи факторов риска и динамики опасных событий. Обоснована актуальность формирования математического инструментария представления многокомпонентных рисков, определены основные направления развития методов математического моделирования техногенных, природных и антропогенных рисков.

1.1 Анализ основных угроз и современных проблем безопасности

На протяжении всей истории существования человеческого общества наблюдается обусловленный социальным и техническим прогрессом сложный процесс возникновения и эволюции различных видов опасностей, сопровождающийся параллельным совершенствованием технологий защиты [1–6].

Для оценки актуальной совокупности опасностей, принято использовать,

согласно [7–9], интегральные показатели сокращения средней продолжительности жизни. К таким показателям относится индикатор сокращения средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни (ССОПЖ), обозначаемый как R (от англ. reduction of the average life expectancy). На рисунке 1.1 представлена общая динамика изменения на протяжении истории человечества ССОПЖ, определяемого как:

$$R(t) = \frac{T_S(t) - T_A(t)}{T_S(t)}, \quad (1.1)$$

где T_S – средняя видовая продолжительность жизни человека (от англ. specific life expectancy of a person), принятая как 100 лет; T_A – средняя актуальная продолжительность жизни (от англ. average life expectancy).

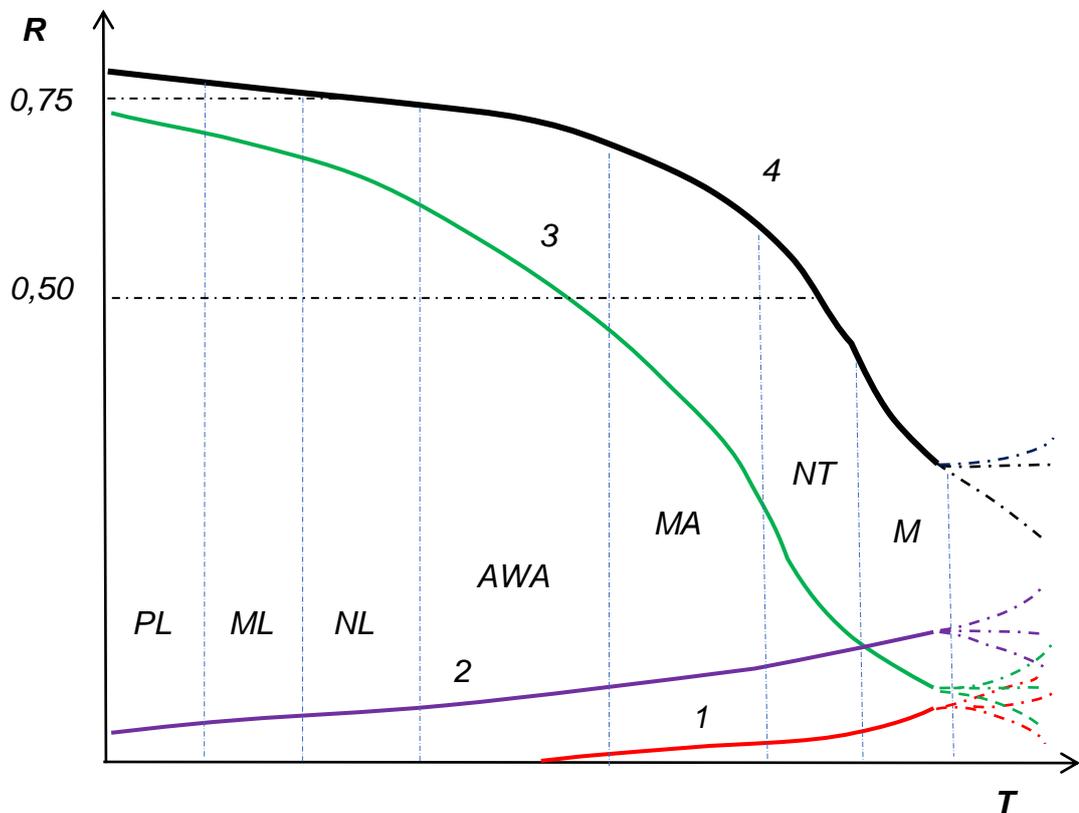


Рисунок 1.1 – Динамика угроз для жизнедеятельности в истории человечества:

1 – техногенные; 2 – социальные; 3 – природные; 4 – интегральная опасность

Отдельные эпохи: PL палеолит (paleolithic), ML мезолит (mesolithic), NL неолит (neolithic), AWA древний мир и античность (ancient world and antiquity), MA средние века (middle ages), NT новое время (new time), MТ новейшее время (modern times)

Человечество постоянно, начиная с доисторического периода своего существования, сталкивалось с разнообразными угрозами природного характера

(землетрясения, наводнения и засухи, лесные пожары, ураганы, опасные особи фауны и вредоносные представители флоры и пр.). В эту же эпоху начинают формироваться некоторые социальные опасности (агрессивные столкновения человеческих сообществ, войны).

Интеллектуальное, культурное и техническое развитие человечества (земледелие, ремесла, строительство и т. п.) неизбежно сопровождалось появлением новых видов опасностей (пожары, обрушения построек, отравления токсическими веществами и др.). Появление городских поселений сопровождалось возникновением эпидемий ряда смертоносных болезней (оспы, чумы и пр.).

Формирование совершенно новых групп опасностей обусловлено первой (к. XVIII – н. XIX в.в.) и второй (с. XIX – н. XX в.в.) промышленными революциями. По мере научно-технического прогресса наблюдалось открытие и интенсивное вовлечение в производственные и социально-экономические процессы новых веществ, видов энергии и носителей информации, что обусловило возникновение соответствующих опасностей и угроз (химической, радиационной, информационной и пр.). При этом некоторые существовавшие ранее виды опасностей могут приобретать новые формы распространения формировать глобальные угрозы для современной цивилизации, например опасности, обусловленные эксплуатацией природных ресурсов и загрязнением среды, освоением мирового океана, космоса, а также использованием новых видов и источников энергии.

К началу третьего тысячелетия создаваемые человечеством технические средства становятся по масс-энергетическим характеристикам соизмеримы с природными силами планетарного масштаба. При таких возможностях воздействия на среду обитания проблема обеспечения безопасности на всех уровнях (от отдельного человека до стран и мирового сообщества в целом) является важнейшей потребностью современности и сложнейшей научно-технической и социальной проблемой, требующей объединения усилий мирового сообщества и международных организаций [10–16].

Проблемы снижения рисков крупномасштабных стихийных бедствий, начиная с 1965 г. регулярно обсуждаются на заседаниях Генеральных Ассамблей

Организации Объединенных Наций (ООН). При современном глобальном планировании мероприятия различного характера, направленные на снижение совокупных экономических и социальных потерь, а также на обеспечение устойчивости современных сообществ к воздействию природных опасностей и обусловленных ими технологических и экологических катастроф, учитывают положения Международной стратегии уменьшения опасности бедствий (МСУОБ ООН, 1999 г.) [16].

При реализации основных направлений деятельности по снижению рисков на 2015–2030 годы МСУОБ ООН предлагает руководствоваться положениями принятой в 2015 г. на III-й Всемирной конференции по уменьшению опасности бедствий Сендайской рамочной программы действий по снижению риска бедствий [17, 18].

Приведем в заключении данного раздела основные (таблица 1.1) реальные индивидуальные и коллективные угрозы глобального характера живущему в начале XXI-го века человечеству.

Таблица 1.1 – Классификация глобальных угроз

Виды угроз	Вероятность	Причины и последствия
космические	низкая	космические лучи и электромагнитное излучение, массивные метеориты, астероиды, кометы и т. п.
природные	средняя	вулканические и сейсмические процессы, глобальные изменения климата
техногенные	средняя	масштабные аварии, взрывы, пожары
военные	средняя	глобальные конфликты с применением оружия массового поражения
экологические	высокая	загрязнение окружающей среды, опустынивание и деградация почв, истощение природных и биологических ресурсов
биологические	высокая	воздействие биологических патогенов (от микроорганизмов до многоклеточных паразитов)
экономические	высокая	нарушение функций масштабных социально-технических систем, обеспечивающих выполнение совокупности процессов, необходимых для безопасной жизнедеятельности
социальные и политические	высокая	
информационные	высокая	

1.2 Исследование и анализ основных понятий теории рисков

Решение проблем обеспечения безопасности любых объектов защиты в современных социотехнических системах предполагает целенаправленное противодействие угрозам различного характера [2–6] и основано на построении сложных и многоуровневых специализированных систем [5,15, 19–37], определяемыми как:

системы обеспечения безопасности (СОБ) –совокупности соответствующих сил, средств и иных ресурсов, а также комплексы организационно-правовых, экономических, социальных и научно-технических механизмов и мероприятий, ориентированных на выполнение функций по предупреждению, предотвращению и защите от различных видов угроз.

Основные функции СОБ по предупреждению угроз различного характера и обеспечению защиты от опасных факторов можно представить, согласно [21], в виде общей схемы (рисунок 1.2).

Основные понятия – «опасность» и «безопасность», а также связывающее их понятие «риск» неизбежно появляются при рассмотрении проблем, связанных с обеспечением безопасности для любого объекта [31–40] (рисунок 1.3 а, б). Несмотря на кажущуюся очевидность и простоту, составляющие основной триады «Опасность – риск – безопасность» (рисунок 1.4) в формирующейся теории риска и безопасности [41–50], стали на протяжении последних десятилетий предметом оживленной полемики среди специалистов в различных сферах безопасности [40–69].

На основе обобщения различных определений можно выделить основные признаки понятия «опасность», обусловленные возможностью нанесения вреда объекту защиты, сформулировав его следующим образом:

опасность – явление некоторой материальной (физической, химической, биологической, экономической, социальной и др.) природы, способное при определенных условиях привести к ущербу для рассматриваемого объекта защиты (человек, социум, природная окружающая среда и пр.).

Опасности различных видов далеко не всегда проявляются в реальности и как

правило, имеют потенциальный характер. Следует отметить, что часто употребляется сходное понятие «угроза», обозначающее актуальную опасность или определенную степень возможности реализации опасности.

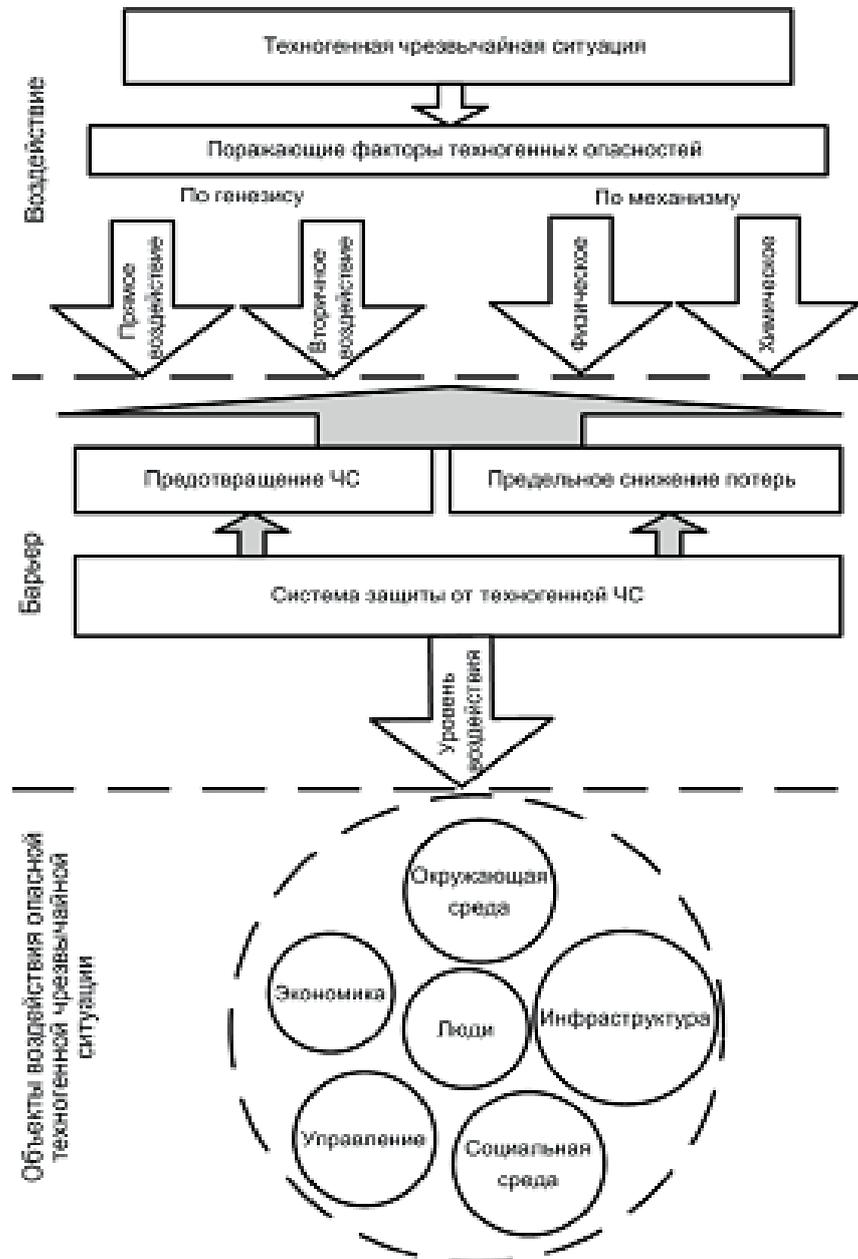


Рисунок 1.2 – Общая схема функционирования системы обеспечения безопасности [21]

Практически полное согласие специалистов наблюдается для понятия «безопасность», связанного с состоянием защищенности от угроз, для которого можно дать определение:

безопасность – состояние полной защищенности объекта защиты от всей совокупности реальных опасностей.

Наибольшее количество вопросов и терминологических споров связано с понятием «риск», обычно определяемым как некоторый предполагаемый негативный результат воздействия со стороны природной, техногенной или антропогенной среды на объект защиты. Такое представление о риске отражает стохастический характер разворачивания природного, техногенного или антропогенного процесса, сопровождающегося соответствующими негативными последствиями.

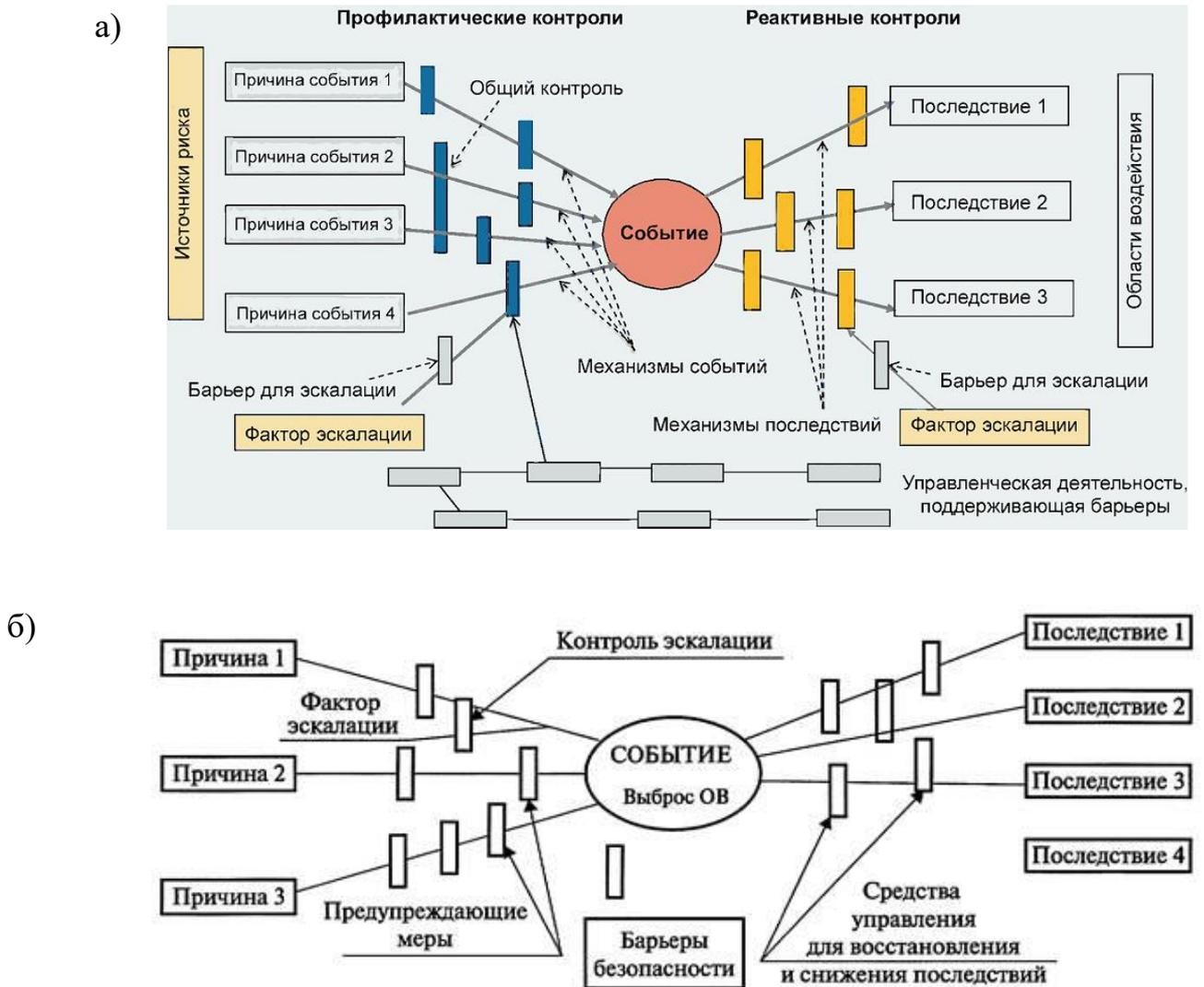


Рисунок 1.3 (а, б) – Диаграмма «галстук-бабочка» [39] и пример схемы развития опасного события (анализ барьеров безопасности [38])

Применяемые для анализа последствий таких процессов методы моделирования подразделяются на две категории hazard analysis и risk analysis [57–67]. При моделировании в первой категории в основном применяются детерминистские

математические (интегральные, зонные, дифференциальные) либо физические (полномасштабные и с уменьшением размеров) методы. Подобное моделирование связано с реализацией определенного сценария процесса и направлено на получение количественных данных о его поражающих факторах, а также о возможном ущербе и иных потерях [65].

Во второй категории при моделировании проводится анализ случайных факторов, влияющих реализацию отдельных возможных сценариев, определяющих в итоге возникающие опасности и их последствия [31,32, 40, 66].

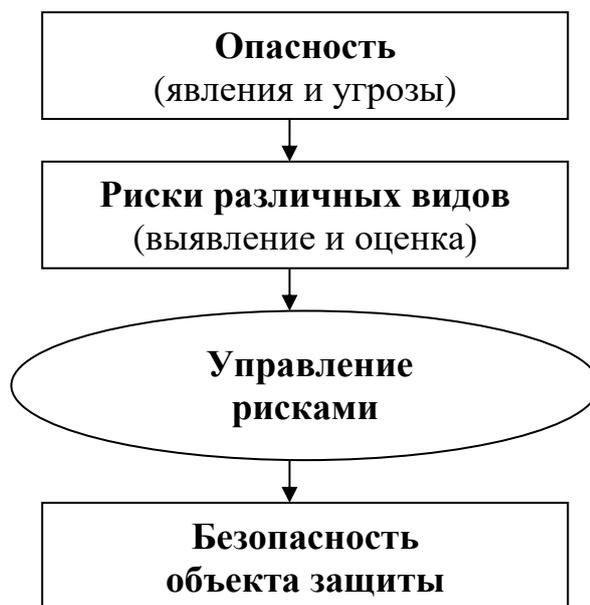


Рисунок 1.4 – Общая схема «Опасность – риск – безопасность» алгоритма обеспечения безопасности

В зависимости от определенного вида последствий различают отдельные виды риска – индивидуальный, коллективный и материальный, представляющие вероятностные параметры поражения в результате воздействия опасных факторов на отдельного человека, группу людей и имущество. Также могут рассматриваться риски экологический и косвенный материальный [37, 54–61].

Различия в основаниях классификации рисков связаны как с разнообразием источников рисков [31–40], так и подходов к их исследованию [58–96]. До настоящего времени единый общепризнанный классификатор рисков отсутствует, при этом можно выделить около 40 критериев классификации и свыше 240 видов

рисков. Наиболее часто при классификации рисков используются следующие признаки: источники и причины, продолжительность воздействия, степень тяжести, масштаб распространения, предсказуемость (рисунок 1.5). По объектам защиты риски подразделяются на индивидуальные, социальные, технические, экологические, экономические (таблица 1.2).

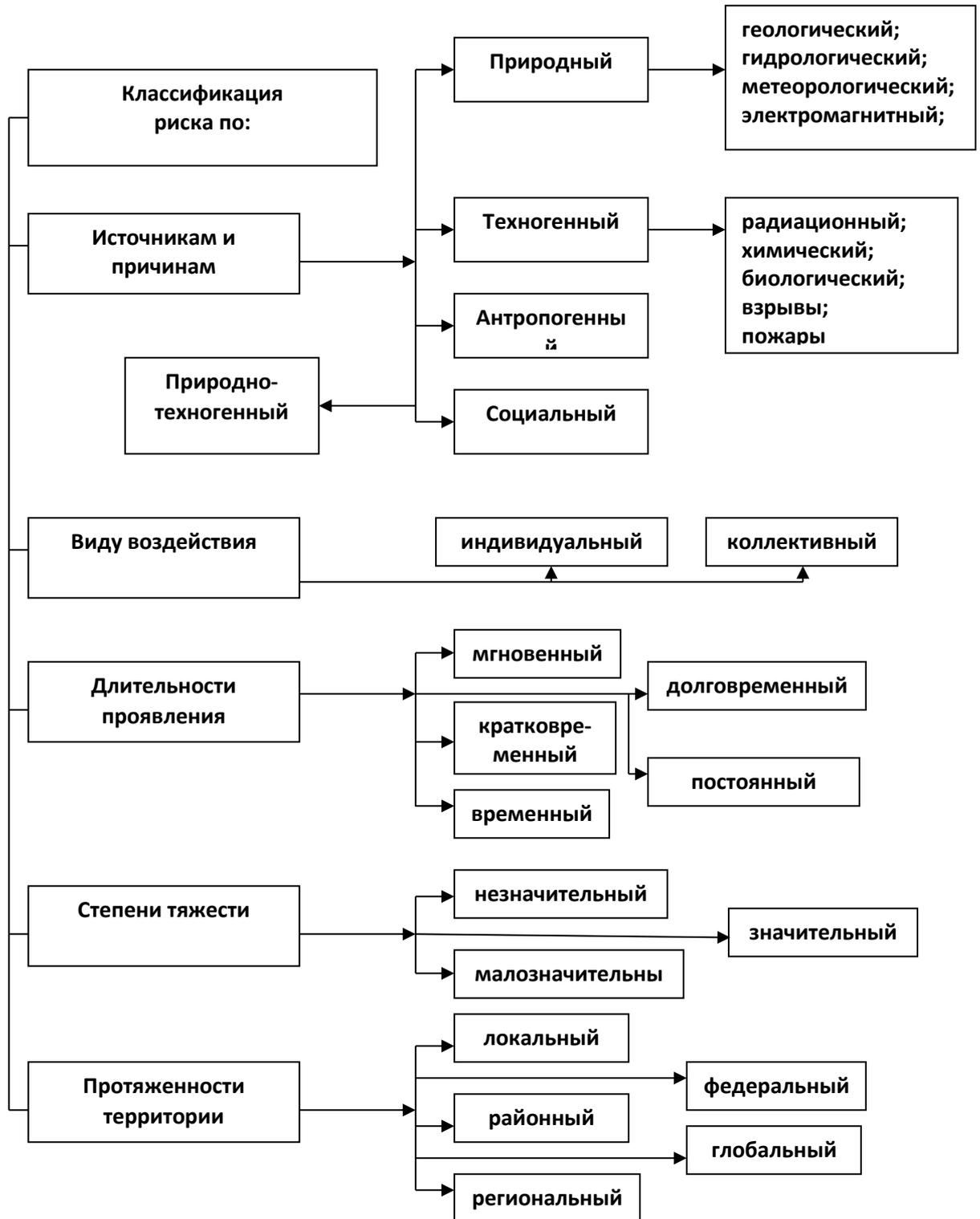


Рисунок 1.5 – Классификация возможных рисков

Понятие «риск» при употреблении вызывает ассоциации возможного причинения ущерба, возникновения утрат и потерь (жизни, здоровья, имущества, финансов, репутации и пр.) вследствие реализации угроз различного характера. При этом часто возможно количественное определение размеров ущерба, но в ряде случаев имеет смысл лишь его качественная оценка (например, репутационный ущерб).

При дальнейшем рассмотрении остановимся на измеримых, «количественных» показателях возможности и характеристиках последствий при реализации некоторой угрозы. Определенный вид опасностей может порождать множество различных рисков, характеризующих отдельные стороны и параметры, например частоту реализации, характер и размеры последствий.

На основе вышеприведенного обсуждения сформулируем определение:

риски – количественные показатели возможности, а также характеристик последствий реализации опасности определенного вида, выраженные в соответствующих единицах измерений.

Таблица 1.2 – Классификация рисков по источникам и объектам защиты

Вид риска	Объект защиты	Источник опасности	Негативное событие
Индивидуальный	Человек	Элементы окружающей среды	Заболевания, травмы, гибель
Технический	Технические системы	Отказы техники, нарушение регламентов	Аварии, разрушения, пожары, взрывы
Экологический	Экологические системы	Воздействие ЧС на элементы окружающей среды	Экологические катастрофы
Социальный	Социальные группы	ЧС природные, техногенные и антропогенные	Групповые заболевания, травмы, гибель,
Экономический	Материальные ресурсы	Опасные элементы техносферы, окружающей среды	Опасные факторы, содержание систем защиты

В зависимости от рассматриваемого множества факторов и обстоятельств риски могут изменяться. Выявление влияющих на уровень риска факторов и целенаправленное воздействие на них позволяет ослаблять негативное влияние угрожающей объекту защиты (системе) опасности – осуществлять управление риском.

Ограниченные инженерно-технические и экономические возможности как правило не позволяют добиться полного исключения имеющихся рисков, связанных с любым объектом защиты (системой). Однако в ряде случаев имеются

возможности уменьшения риска до некоторого приемлемого обществом (на данном этапе развития) допустимого уровня.

Исходя из приведенных соображений, предложим следующую дефиницию: **управление рисками** – целенаправленная деятельность по снижению степени реальных угроз для объекта защиты до минимально возможного уровня.

Из вышесказанного следует принципиальная невозможность достижения «абсолютной» безопасности объекта защиты (системы). Управляя рисками, возможно лишь повысить уровень безопасности данного объекта защиты до приемлемого в современных условиях (рисунок 1.6).

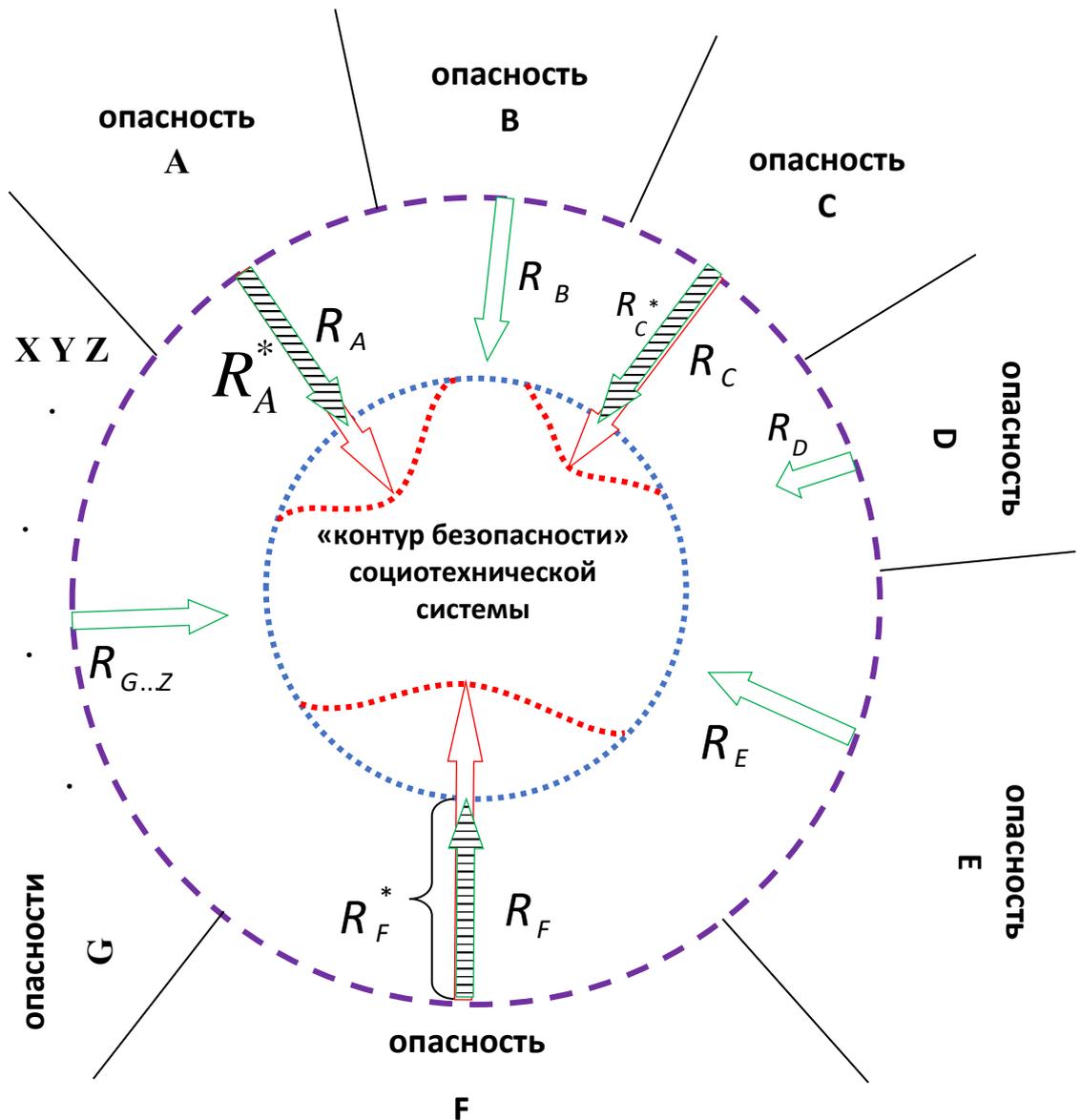


Рисунок 1.6 – Общий алгоритм обеспечения безопасности социотехнической системы

Принимая приведенную выше трактовку «состояния защищенности» от угрожающих объекту защиты опасностей, сформулируем ее следующим образом:

безопасность – свойство возможных состояний объекта(системы), в которых не превышены допустимые уровни значений для рассматриваемой совокупности рисков.

Обоснованный таким образом набор введенных определений позволяет логически выстроить соподчинение основных элементов теории риска и безопасности в триаде «Опасность – риск – безопасность», а также сформировать новое понятие – «управление риском».

Понятия «опасность», «угроза» и «вызов» родственны и представляют синонимы, отличающиеся некоторыми смысловыми оттенками, относящимися к определенным наборам рисков.

Достижение допустимого уровня безопасности для рассматриваемых объектов защиты (личности, общества, государства, социальных, экономических, технических систем) обусловлено некоторым процессом, направленным на снижение величин рассматриваемых рисков и представленным на рисунках 1.4 и 1.6.

Перечень основных введенных понятий и определений данного раздела представлен в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Базовые понятия в теории риска и безопасности

Понятие	Определение	Обозначение
опасность	Явление материальной природы, способное при определенных условиях привести к ущербу для рассматриваемого объекта защиты	A, B, C, \dots, Z
угроза	Степень возможности проявления определенного вида опасности, с воздействием соответствующих негативных факторов и причинения вреда объекту защиты	U_A, U_B, \dots, U_Z
риск	Количественный показатель возможности и/или последствий реализации угрозы, выраженный в соответствующих единицах измерения	R_A, R_B, \dots, R_Z
управление риском	Реализация комплекса мероприятий (инженерно-технических, экономических, социальных и пр.) по обеспечению допустимого уровня риска R^*	$R_i \leq R_i^*$ $i \in \{A, B, \dots, Z\}$
безопасность	Состояние объекта защиты (системы), в котором значения рисков находятся в пределах допустимых уровней	$R_A^*, R_B^*, \dots, R_Z^*$

1.3 Исследование подходов к математической формализации и представлению рисков

В литературных источниках в подавляющем числе случаев [40 – 65, 93,94] при моделировании различных видов риска математическое формализованное описание ограничено представлением двух основных факторов – возможности опасного события и ущерба:

$$R_i = P_i \cdot U_i, \quad i \in \{A, B, \dots, Z\} \quad (1.2)$$

где P_i - вероятность наступления, а U_i - математическое ожидание ущерба вследствие некоторого деструктивного события. Иногда приведенное выражение (1.2) может применяться в дифференциальной форме представления. Вероятность в (1.2) понимается как некоторая частотная характеристика с размерностью $[T^{-1}]$ для наступления неблагоприятного события, что находится в противоречии со свойством безразмерности вероятности случайного события.

Представление рисков в форме (1.2) является только одним из возможных вариантов, характеризующих ущерб от реализации определенного вида опасности. Использование представления (1.2) не позволяет определить такие риски, как индивидуальный и социальный, оказаться в различных условиях и подвергнуться воздействию опасных факторов при наступлении деструктивного события, погибнуть и получить травму определенной степени тяжести и многие другие риски. При исследовании рисков реализации различных опасностей в сложных социотехнических системах необходимо решать множество разнообразных научных и практических задач на основе применения широкого спектра математических методов теории вероятностей, теории надежности, теорий прочности, механики разрушения, исследования операций и др.

Например, при проведении вероятностного анализа риска, как правило, проводится построение и анализ соответствующего взвешенного ориентированного графа (рисунок 1.7) логического дерева событий:

$$G(V, E) = \langle V, E \rangle, \quad V \neq \emptyset, \quad E \subseteq V \times V, \quad \{v, v\} \notin E, \quad v \in V,$$

где вершины v – это события, а веса дуг – условные вероятности наступления

соответствующих событий. Возможные сценарии развития определяются выполнением СОБ функций предупреждения и защиты, которое отражается в «ветвлениях», а возможные исходы изображены выходами из крайних вершин.

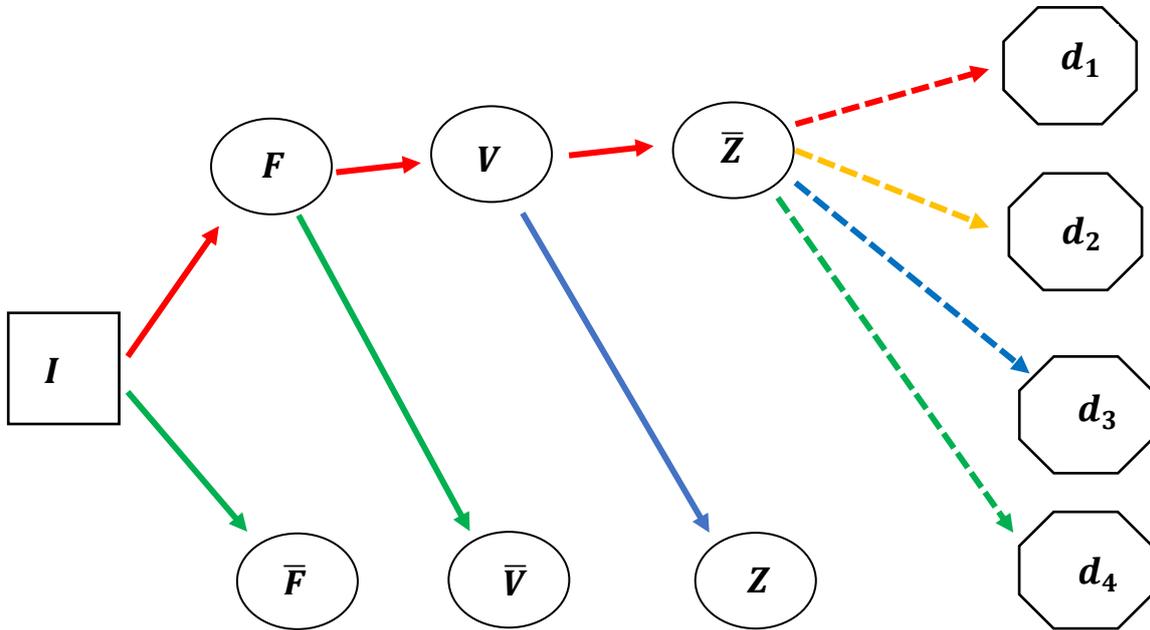


Рисунок 1.7 – Пример «дерева событий», построенного для моделирования индивидуального риска с учетом опасного события (F) и подверженности объекта защиты воздействию опасных факторов (V), выполнения СОБ функций защиты (Z), возможных последствий (D)

Построение моделей, позволяющих выявлять причины возникновения и развития деструктивных событий и их последствий, основано на концепции, согласно которой риски представляются в виде мультипликатора двух групп факторов, из которых одна связана с возможностью подвергнуться опасности, а другая - с различными видами последствий.

В формализованном математическом описании вероятность обусловленных опасным событием последствий определенного вида представляется в виде произведения безусловной вероятности подвергнуться опасности и условной вероятности наступления указанных последствий:

$$R_r^i = R_e^i \cdot R_c^i, \quad i \in \{A, B, \dots, Z\}, \quad (1.3)$$

$$r \in \{1, \dots, R\}, \quad e \in \{1, \dots, E\}, \quad c \in \{1, \dots, C\},$$

где R_r^i - вероятность результата (от англ. result) определенного вида, R_e^i -

вероятность возникновения (от англ. emergence) опасного события, R_c^i - условная вероятность наступления последствий (от англ. consequences).

Представление рисков в форме (1.3) дает возможность математической формализации и моделирования разнообразных видов рисков, отражающих всевозможные аспекты, связанные с различными объектами защиты и видами последствий, особенностями возможных опасных состояний и функционирования систем обеспечения безопасности и пр. [41–50]. Моделирование таких рисков представляет интерес при исследовании различных видов деятельности, например в сфере страхования, проектирования зданий и сооружений, организации производственных, логистических и других процессов, оборудования и средств для предупреждения угроз и защиты от опасных факторов.

Проведение дальнейшей декомпозиции рисков и детализации их структуры требует преодоления некоторых ограничений, обусловленных использованием скалярных форм их представления.

Формирование принципиально нового математического инструментария, позволяющего оперировать с порождающими факторы риска событийными рядами, а также с неоднородной совокупностью объектов защиты и с различными видами последствий, связано с развитием методов анализа структуры и векторно-матричного описания рисков.

В [95–98] предложен метод, основанный на детализации состояний объектов защиты и стратификации по различным степеням подверженности воздействию опасных факторов и уязвимости, а также дифференциации возможных и ожидаемых последствий по отдельным составляющим ущерба.

Моделирование основано на представлении текущего состояния объекта защиты вектором:

$$\mathbf{p}_j = (p_1^j, \dots, p_l^j, \dots, p_L^j) \in R_{1 \times L}, \quad j = \overline{1, \dots, N}, \quad l \in \{1, \dots, L\} \quad (1.4)$$

где p_l^j - вероятности пребывания j -го объекта в l -ом состоянии [95].

В качестве комплексной количественной характеристики составляющих возможного ущерба при условии реализации угрозы определенного вида предлагается

использовать «вектор возможных последствий».

Вектор возможных последствий определяется произведением вектора текущего состояния объекта защиты и матрицы оператора, характеризующего его «уязвимость»:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_j^{k_i} &= \mathbf{p}_j^t \mathbf{S}_j^{k_i} = (v_1^j, \dots, v_m^j, \dots, v_M^j) \in R_{1 \times M}, \\ i &= \overline{1, \dots, N}, k \in \{1, \dots, K\}, m \in \{1, \dots, M\}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Компоненты $s_{lm}^{k_i}$ матрицы оператора $\mathbf{S}_j^{k_i}$ характеризуют условные вероятности наступления различных последствий m при реализации угрозы вида k от i -го источника и зависят от определенного текущего состояния объекта защиты \mathbf{p}_j^t :

$$\mathbf{S}_j^{k_i} = \begin{pmatrix} s_{11}^{k_i} & \dots & s_{1M}^{k_i} \\ \vdots & s_{lm}^{k_i} & \vdots \\ s_{L1}^{k_i} & \dots & s_{LM}^{k_i} \end{pmatrix} \in R_{L \times M}. \quad (1.6)$$

В рамках данной модели можно ввести набор различных по охвату объектов защиты и видов угроз «векторов ожидаемых последствий», являющимися комплексными количественными характеристиками составляющих ожидаемого ущерба и социально-экономических потерь на протяжении некоторого рассматриваемого временного интервала. Компоненты локального вектора ожидаемых последствий представляются произведениями компонент (1.5) и соответствующих вероятностей реализации угроз определенного вида от отдельных источников угроз:

$$\mathbf{r}_j^{k_i} = \mathbf{v}_j P_j^{k_i} = (v_1^j P_j^{k_i}, \dots, v_m^j P_j^{k_i}, \dots, v_M^j P_j^{k_i}) \in R_{1 \times M}. \quad (1.7)$$

Отдельные компоненты вектора ожидаемых последствий (1.7), согласно [95], интерпретируются результатом парной композиции следующих событий:

— «опасное событие на объекте o_i представляет угрозу вида k объекту o_j (с вероятностью реализации $P_j^{k_i}$)» ;

— «причинение объекту o_j ущерба вида m при реализации угрозы вида k (с условной вероятностью v_m^j)».

Остальные указанные векторы ожидаемых последствий представляют

социально-экономические потери на локальном и территориальном уровнях от отдельного вида угроз, а также от всей совокупности рассматриваемых угроз, которые связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}_j^k &= \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_j^{ki} = \sum_{i=1}^N \mathbf{v}_j P_j^{ki} = \mathbf{v}_j \sum_{i=1}^N P_j^{ki} = \mathbf{v}_j P_j^k, \\
 \mathbf{r}_j &= \sum_{k=1}^K \mathbf{r}_j^k = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_j^{ki} = (\mathbf{r}_1^j, \dots, \mathbf{r}_m^j, \dots, \mathbf{r}_M^j), \\
 \mathbf{r}^k &= \sum_{j=1}^N \mathbf{r}_j^k = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_j^{ki}, \\
 \mathbf{r} &= \sum_{k=1}^K \mathbf{r}^k = \sum_{j=1}^N \mathbf{r}_j.
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

Набор векторов ожидаемых последствий (1.8) в целом, согласно предложенному в [95] векторно-матричному инструментарию, представляет собой единую комплексную характеристику как совокупных, так и однородных рисков для объектов защиты, при этом отдельные компоненты должны рассматриваться в качестве количественных характеристик соответствующих составляющих для определенных видов социально-экономических потерь.

Элементы обсуждаемой модели (1.3–1.8) при представлении рисков характеризуют отдельные стороны рассматриваемых угроз, связанные не только с возможностью реализации размерами ущерба, но также и с рядом обстоятельств, способствующих реализации угроз и проявлению опасных факторов. Для определения этих элементов необходимо исследование частотных характеристик возникновения опасных событий, а также обусловленных различными обстоятельствами социальных, экономических и экологических последствий.

Из множества существующих методов в процессе оценки и анализа рисков выбираются наиболее эффективные, на основе рекомендаций руководящих документов и стандартов [38, 39] по применимости этих методов для решения задач оценки и управления рисками, представленных в таблице 1.4.

Отдельные характеристики рисков возможно оценивать на основе

статистического анализа данных, но при отсутствии необходимой статистической информации могут применяться и иные методы, в частности – сценарные, а также экспертные.

Таблица 1.4 – Методы оценки риска и характеристики их применимости

Методы оценки риска	Процессы оценки риска					№ приложения
	Идентификация	Анализ риска			Сравнит. оценка	
		Последствия	Вероятностные характеристики	Уровень		
Мозговой штурм	SA	NA	NA	NA	NA	B 01
Интервью структурир-е/	SA	NA	NA	NA	NA	B 02
М. Дельфи	SA	NA	NA	NA	NA	B 03
Контрольные листы	SA	NA	NA	NA	NA	B 04
Предвар-й.ан-з опасностей	SA	NA	NA	NA	NA	B 05
Иссл-е опасности и раб-сти	SA	SA	A	A	A	B 06
Ан-з опасности и критич-х контр. точек	SA	SA	NA	NA	SA	B 07
Оценка токсиколог-го риска	SA	SA	SA	SA	SA	B 08
Ан-з сценариев структурир-й "что..., если...?"	SA	SA	SA	SA	SA	B 09
Ан-з сценариев	SA	SA	A	A	A	B 10
Ан-з воздействия на бизнес	A	SA	A	A	A	B 11
Ан-з первопричины	NA	SA	SA	SA	SA	B 12
Ан-з видов и посл-й отказов	SA	SA	SA	SA	SA	B 13
Ан-з дерева неисправностей	A	NA	SA	A	A	B 14
Ан-з дерева событий	A	SA	A	A	NA	B 15
Ан-з причин и последствий	A	SA	SA	A	A	B 16
Причинно-следственный ан-з	SA	SA	NA	NA	NA	B 17
Ан-з уровней защиты	A	SA	A	A	NA	B 18
Ан-з дерева решений	NA	SA	SA	A	A	B 19
Ан-з вл-я человек-го фактора	SA	SA	SA	SA	A	B 20
Ан-з "галстук-бабочка"	NA	A	SA	SA	A	B 21
Тех. обл.-обеспеч. надежн-ти	SA	SA	SA	SA	SA	B 22
Ан-з скрытых дефектов	A	NA	NA	NA	NA	B 23
Марковский ан-з	A	SA	NA	NA	NA	B 24
Мод-е м. Монте-Карло	NA	NA	NA	NA	SA	B 25
Байесовский ан-з и сети без-ти	NA	SA	NA	NA	SA	B 26
Кривые	A	SA	SA	A	SA	B 27
Индексы риска	A	SA	SA	A	SA	B 28
Матрица послед-й и вер-й	SA	SA	SA	SA	A	B 29
Ан-з эффективности затрат	A	SA	A	A	A	B 30
Мультикр-й ан-з решений	A	SA	A	SA	A	B 31

SA - строго применим | NA - не применим | A - применим

Развитие концепции мультипликативного представления рисков предполагает исследование внутригрупповых и межгрупповых связей между рассматриваемыми факторами риска. Такой подход фактически основывается на гипотезе о том, что элементы риска (1.3–1.8) представляют некоторое единое целое, поэтому не могут рассматриваться отдельно.

Следовательно, количественные характеристики риска должны быть объединены в некоторую объективно существующую систему, которая является отражением внутреннего единства закономерностей процессов, проявляющихся в возникновении угроз и последствиях их реализации.

Перспективным направлением развития способов формализации в теории рисков является моделирование, основанное на представлении рисков в виде некоторых линейных многокомпонентных алгебраических объектов (объектов линейной алгебры), заданных на векторных пространствах конечной размерности.

Приведенные выше рассуждения позволяют обосновать понятие многокомпонентного риска и сформулировать для него общее определение:

многокомпонентный риск – единая совокупность количественных и качественных характеристик угроз и последствий, отражающая в своей структуре влияние основных факторов риска.

1.4 Особенности постановки задач многокритериальной оптимизации при управлении рисками в социотехнических системах

Как показано выше, в достаточно сложной структуре многокомпонентных рисках отражаются закономерности развития кризисных ситуаций, функционирования систем обеспечения безопасности, а также влияние свойств и состояний объектов защиты и ряда других факторов [40–51, 95–99]. Необходимым условием корректного прогнозирования возможных потерь при наличии угроз является применение адекватно описывающих закономерности формирования кризисных ситуаций детерминированных либо стохастических математических моделей [40, 65, 66]. Вместе с тем, при моделировании многокомпонентных рисков становится актуальным формирование общих подходов, поскольку современные системы обеспечения различных видов безопасности предполагают интеграцию сил, средств и ресурсов.

Для удобства дальнейшего анализа подобные многокомпонентные риски, формально представленные на рисунке 1.8, можно выразить в виде сложной

функции нескольких переменных:

$$R_r^i(\tau) = \Psi(T(\tau), N(\tau), S(\tau)),$$

$$i \in \{A, B, \dots, Z\},$$
(1.9)

где T – техногенные N – природные и S – социальные факторы и причины, являющиеся функциями времени τ .

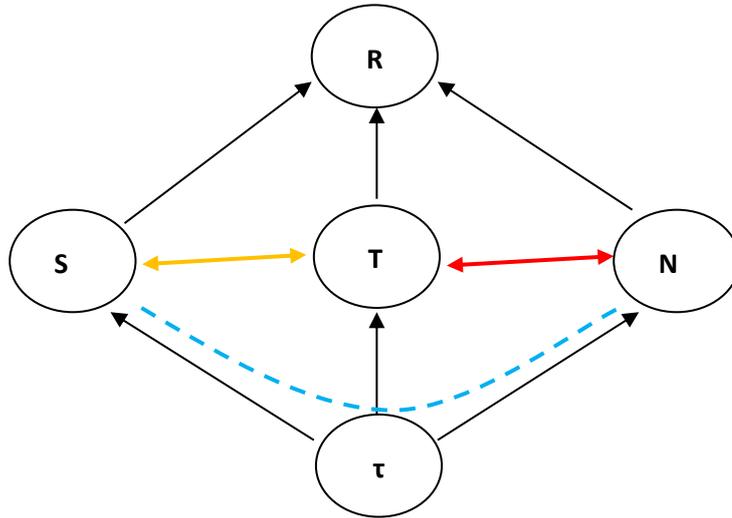


Рисунок 1.8 – Общая структура риска как функции от основных факторов различного происхождения (T , N , S) и времени τ

Реализация риск-ориентированного подхода к управлению в сложных социотехнических системах означает, что в процессе управления рисками происходит целенаправленное воздействие на факторы (1.9), в результате которого количественные значения рисков понижаются до некоторых приемлемых уровней. Наглядная схема, отражающая общих чертах структуру алгоритма обеспечения безопасности представлена на рисунке 1.9.

Дополнительная детализация каждого из этапов включает определение конкретных методов и технологий анализа различных аспектов угроз (таблица 1.3) и функционирования систем обеспечения безопасности, а также организации мероприятий профилактического и защитного характера.

Достаточно широко распространено мнение о возможности реализации концепции риск-ориентированного управления безопасностью на основе применения многокритериальных методов для прогнозирования угроз и оценки последствий кризисных ситуаций и инцидентов в социотехнических системах [100–102].

Методы многокритериальной оптимизации могут применяться непосредственно при исследовании природных, техногенных и антропогенных рисков для решения ряда задач, связанных с классификацией угроз и оценкой последствий, выбором мероприятий по снижению рисков [100–105].

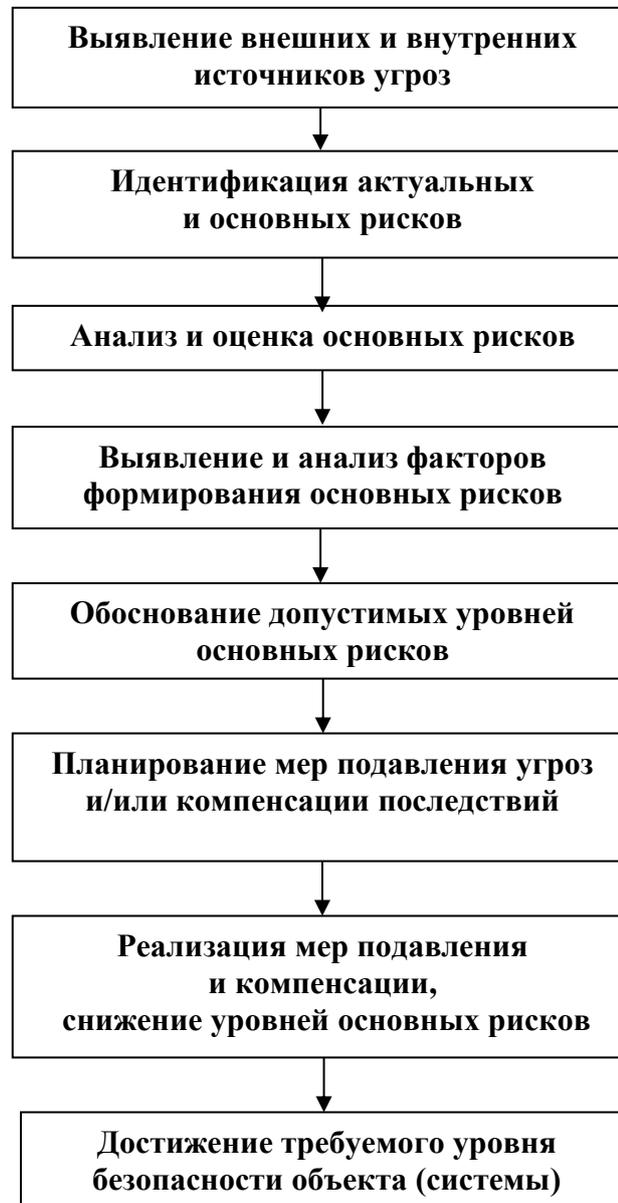


Рисунок 1.9 – Общая схема алгоритма риск-ориентированного управления

При постановке задачи многокритериальной оптимизации необходимо определить [106–114]:

- **пространство решений W** - первичную совокупность решений, которые можно рассматривать при поиске предпочтительного;

- **множество допустимых решений** $X \subset W$ - совокупность решений, которые можно рассматривать в качестве альтернатив;
- **набор критериальных функций** $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, заданных на W и осуществляющих отображение $W \rightarrow U$ в **критериальное пространство** U ;
- **множество достижимых критериев** $Y \subset U$, $Y = \{f(X)\}$.

Приведем формальную постановку задачи многокритериальной оптимизации для дискретного множества допустимых решений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall j: f_j(\mathbf{X}) \rightarrow \max(\min) \quad (j = \overline{1, \dots, m}), \\ \forall i: \varphi_i(\mathbf{X}) \leq b_i \quad (i = \overline{1, \dots, n}), \\ \forall k: x_k \in X_k \quad (k \in \{1, \dots, K\}), \\ \mathbf{X} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_K)^T \in R_{q \times 1}, \end{array} \right. \quad (1.10)$$

где \mathbf{X} - вектор переменных, X_k – множество принимаемых переменной значений, $f_j(\mathbf{X})$ - частный критерий, $\varphi_i(\mathbf{X})$ - функция, задающее ограничение b_i .

Согласно табл. 1.3, характеристик применимости различных методов оценки риска, многокритериальные методы анализа решений считаются применимыми на всех этапах оценки риска, т. е. при решении задач идентификации, анализа (последствий, вероятностных характеристик и уровня), а также сравнительного анализа.

Вместе с тем проведение детального анализа природных, техногенных и антропогенных рисков на любом этапе невозможно без предварительного исследования основных значимых характеристик и параметров источников угроз, свойств объектов защиты и неоднородностью их совокупности, особенностей функционирования систем обеспечения отдельных видов безопасности. Например, для оценки ожидаемых потерь необходимо достаточно подробное описание динамики возникновения и развития кризисных ситуаций, профилактических и защитных мероприятий, воздействия опасных факторов на объекты защиты и др. Решение подобных задач возможно лишь в рамках построения определенных математических моделей – как детерминированных, так и стохастических.

Наиболее сложная и значимая проблема риск-ориентированного управления безопасностью связана с установлением закономерностей, определяющих

результаты разнообразных, целенаправленных, направленных на снижение рисков воздействий. Необходимо понимать опосредованный характер влияния подобных воздействий на показатели рисков, поскольку, как правило, они непосредственно отражаются на изменении свойств только одной из групп факторов риска, например, на состоянии объектов защиты или средств обеспечения безопасности.

С точки зрения формальной постановки задач многокритериальной оптимизации указанное обстоятельство приводит к необходимости рассмотрения некоторых промежуточных пространств и дополнительных отображений между пространством решений и критериальным пространством $W \rightarrow Q \rightarrow G \dots \rightarrow U$. При этом в ряде случаев при задании осуществляющих указанное отображение критериальных функций $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, необходим учет как сложных, так и неявных функциональных зависимостей между переменными.

Наиболее подходящим из возможных вариантов представляется задание критериальных функций с промежуточными отображениями, описывающими изменения состояний объектов защиты, а также функционирования систем и средств обеспечения безопасности [115–121].

В соответствии с приведенной трактовкой элементов задачи риск-ориентированного управления, для объектов защиты необходимо использовать представление, в котором они распределены как по типам l , так и по состояниям q :

$$\mathbf{C} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{C}^q \leftrightarrow \mathbf{C} = \sum_{q=1}^Q (c_1^q, \dots, c_l^q, \dots, c_L^q)^T \in R_{L \times 1},$$

$$l \in \{1, \dots, L\}, \quad q \in \{1, \dots, Q\} .$$
(1.11)

Параметры и вероятностные характеристики функционирования систем и средств обеспечения безопасности определяют условные вероятности ущерба определенных видов m , представимые для (1.11) в виде компонент матриц из набора:

$$\mathbf{S} = \bigcup_{q=1}^Q \mathbf{S}^q = \bigcup_{q=1}^Q (s_{ml}^q) \in R_{L \times M}$$

$$m \in \{1, \dots, M\} .$$
(1.12)

Проявление угроз различного характера для (1.11) предлагается представить в виде характеризующих соответствующие интенсивности потоков опасных событий компонент диагональных матриц из набора:

$$\mathbf{V} = \bigcup_{q=1}^Q \mathbf{V}^q = \bigcup_{q=1}^Q (\delta_{lj} v_l^q) \in R_{L \times L}, \quad (1.13)$$

$$j \in \{1, \dots, L\}.$$

В векторе переменных \mathbf{X} предлагается отделить связанные X_k и не связанные $X_{\bar{k}}$ с целенаправленными воздействиями на объекты защиты и систему обеспечения безопасности переменные в соответствии с:

$$\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_K, x_{\bar{1}}, \dots, x_{\bar{k}}, \dots, x_{\bar{K}})^T \in R_{(K+\bar{K}) \times 1}, \quad (1.14)$$

$$x_k \in X_k, \quad x_{\bar{k}} \in X_{\bar{k}}, \quad k \in \{1, \dots, K\}, \quad \bar{k} \in \{1, \dots, \bar{K}\}.$$

Введем «вектора ожидаемых потерь», аналогичных рассмотренным ранее в (1.8) векторам ожидаемых последствий согласно:

$$\mathbf{D} = (D_1, \dots, D_m, \dots, D_M)^T \in R_{M \times 1}. \quad (1.15)$$

Предлагается для учета сложной и неявной зависимости критериев от исходных переменных принять следующую гипотезу об отображении вектора переменных из пространства решений в вектор ожидаемых потерь из критериального пространства:

$$\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{D}, \quad \mathbf{X} \in W, \quad \mathbf{D} \in U. \quad (1.16)$$

Необходимость и целесообразность применения многокритериальных методов при реализации концепции риск-ориентированного управления безопасностью современных социотехнических систем очевидна. Вместе с тем, из вышесказанного следует, что учет сложной структуры природных, техногенных и антропогенных рисков требует существенной модификации формальной постановки задачи многокритериальной оптимизации.

При этом следует понимать, что адекватный прогноз последствий реализации угроз различного характера возможен в рамках математической модели, описывающей закономерности возникновения и развития кризисных ситуаций с учетом свойств объектов защиты, а также особенностей и эффективности

функционирования систем обеспечения безопасности.

Поэтому при управлении многокомпонентными рисками, по мнению автора, представляется вполне обоснованной, исходя из (1.11) – (1.16), формальная постановка задачи многокритериальной оптимизации в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{D} : \mathbf{D} = \mathbf{S}(\mathbf{VC}) ; \\ \mathbf{D}(\mathbf{X}) = (D_1, \dots, D_m, \dots, D_M)^T \in R_{M \times 1} ; \\ \forall m: D_m \rightarrow \min, \quad m \in \{1, \dots, M\} ; \\ \forall i: \varphi_i(\mathbf{X}) \leq b_i, \quad i = \overline{1, \dots, n} ; \\ \forall k: x_k \in \mathbf{X}_k, \quad k \in \{1, \dots, K\}, \\ x_{\bar{k}} \in \mathbf{X}_{\bar{k}}, \quad \bar{k} \in \{1, \dots, \bar{K}\}, \\ \mathbf{X} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_K, x_{\bar{1}}, \dots, x_{\bar{k}}, \dots, x_{\bar{K}})^T \in R_{(K+\bar{K}) \times 1}. \end{array} \right. \quad (1.17)$$

1.5 Исследование подходов к математическому моделированию рисков в сложных системах

Математическое моделирование процессов управления рисками, как правило, предполагает описание основных факторов, непосредственно связанных с реализацией некоторого множества возможных сценариев возникновения и развития опасных событий. Поскольку даже элементарные модели оценки рисков основаны на анализе деревьев событий (рисунок 1.8), понятна невозможность описания процессов управления рисками в сложных социотехнических системах без построения и последующего анализа соответствующих деревьев событий и решений.

В последние десятилетия сформировался подход к оценке (и управлению) рисками [40, 122–124], основанный на определении так называемой «тройки рисков», требующей ответов на вопросы: «Что может пойти не так?», «Насколько вероятно, что это произойдет?», «Каковы будут последствия?».

Концепция математического моделирования таких процессов, понимаемых

как совокупность процедур, связанных с прогнозированием, обнаружением и отслеживанием возникающих вынужденных изменений, известна как теория структурирования сценариев TSS (The theory of scenario structuring) [123,124].

В рамках теории структурирования сценариев TSS [123,124] на протяжении четырех последних десятилетий формируется инструментарий количественной оценки рисков QRA (quantitative risk assessment), основанный введении так называемых наборов триплетов, определяющих риски:

$$R = \{ \{s_i, l_i, x_i\} \}, \quad i = \overline{1, \dots, n}, \quad (1.18)$$

$$S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}, \quad L = \{l_1, \dots, l_i, \dots, l_n\} \quad l_i = P(s_i),$$

где каждый набор состоит из определенного сценария, его вероятности и соответствующего вектора потерь или возможных последствий. Подобное определение рисков позволяет в дальнейшем переходить к постановке задач исследования устойчивости и уязвимости сложных систем на основе иерархического моделирования и его производных [40, 122,123].

Следует вместе с тем отметить, что построение адекватных моделей для сложных систем невозможно без формулировки универсального согласованного определения риска. Даже для определенного класса систем формирование такого определения представляет серьезную проблему, требующую применения методологического подхода при исследовании роли системных состояний. При этом понятие риска для системы становится многомерным и детализированным по своей сути и представляет сложную функцию иницирующего события, состояний системы и окружающей среды, а также времени (рисунок 1.8).

При определении риска и математической формализации его основных факторов согласно [40] рекомендуется рассматривать и отражать следующие аспекты.

Свойства системы в любой момент определяются понятием «состояние», описываемым заданием значений некоторого набора параметров, т. е. вектора текущего состояния. На переход системы в последующие состояния могут влиять не только последнее предыдущее состояние, в некоторых случаях необходимо учитывать с определенной глубиной предысторию эволюции системы.

Свойства уязвимости и устойчивости системы зависят от таких входных

данных как характер инициирующего события, времени его возникновения и текущего состояния системы. Необходимо учитывать, что при этом на факторы риска наиболее значимое влияние оказывают состояния таких подсистем как объект защиты и система обеспечения безопасности. Поэтому необходимо описание свойств элементов множества «объекты защиты» с точки зрения их уязвимости и подверженности воздействию угроз, а также функций системы обеспечения безопасности по предотвращению угроз и обеспечению защиты объектов от опасных факторов. Математическая формализация подобных элементов модели требует использования матричных форм описания с возможностью многоиндексного представления.

Даже в случае отдельных опасных событий исследование уязвимости и устойчивости системы предполагает моделирование последствий с учетом возможных сценариев, которые могут быть представлены в рамках взаимодействия двух подсистем «множества объекты защиты» и «система обеспечения безопасности» (ОЗ – СОБ).

Вместе с тем моделирование последствий от реализации угрозы (инициирующего события) отдельного вида является основой дальнейшего анализа рисков сложной системы. Необходим поиск и создание универсального формального представления основных факторов всех типов рисков и построение единого алгоритма количественного определения соответствующих возможных либо ожидаемых последствий. Применительно к представлению рисков различных видов определяется фундаментальное значение подобной общей модели, которая, по сути, может стать базовой моделью многокомпонентных рисков.

Такая модель может быть интегрирована в качестве составного элемента в более общие модели исследования рисков в сложных системах. В качестве общих моделей наибольший интерес представляют разнообразные модели, рассматривающие динамику процессов, связанных с источниками угроз и возможными сценариями развития опасных ситуаций, воздействием опасных факторов на объекты защиты и возникновением возможных потерь.

Представляя объекты моделирования рисков в виде условной схемы, изображенной на рисунке 1.10, можно в соответствии с моделируемыми процессами и

закономерностями выделить в семействе таких моделей два основных направления, связанными как с возникновением опасных событий, так и с последствиями воздействия на объекты защиты соответствующих опасных факторов.

В вышеописанную схему исследования риска, как правило, включается этап, связанный с анализом источников угроз. Поэтому к первому направлению следует относить разнообразные модели, описывающие закономерности возникновения инцидентов. В рамках данного направления, в частности выделяются задачи анализа потоков опасных событий, обусловленных отказами технических элементов и устройств [40, 125–128].

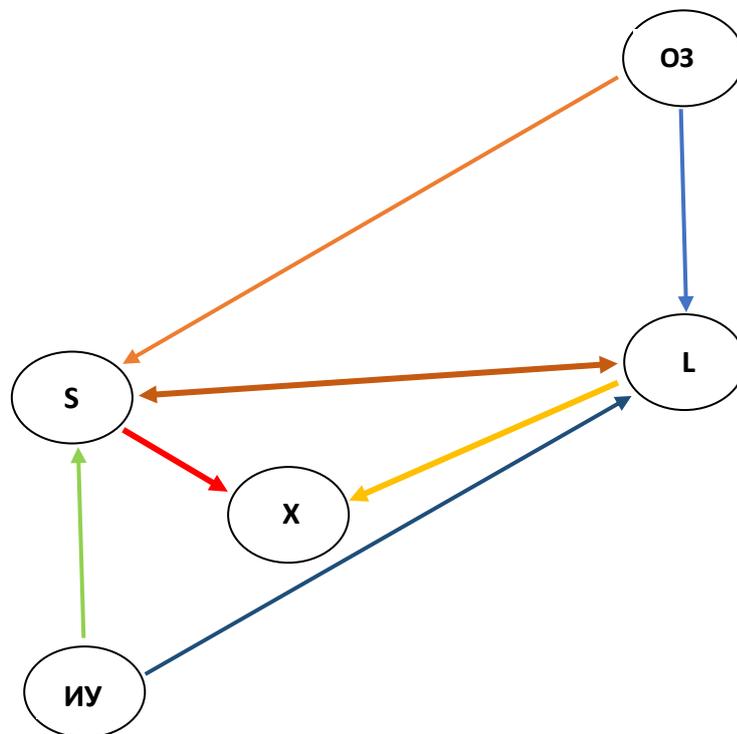


Рисунок 1.10 – Общая схема динамического моделирования рисков

ИУ- источники угроз, **S** - сценарии и их вероятности **L**, объекты защиты **ОЗ** и потери **X**

Рассматриваемая в этом разделе схема исследования риска в сложных системах будет неполной без анализа возможного масштабирования опасных событий и влияния их на устойчивость системы в целом. Поэтому ко второму направлению можно отнести моделирование развития инцидентов и их последствий по так называемому «принципу домино» и одному из возможных каскадных сценариев, описываемого последовательностью поэтапных переходов к критическим состояниям

с нарастанием потенциала угроз и/или интенсивности проявления неблагоприятных факторов и явлений [128–139].

Необходимость учета возможных каскадных сценариев развития аварий в процессе исследования безопасности объектов закреплена в международных стандартах, описывающих процессы жизненного цикла систем, а также в отечественных отраслевых нормативных документах [38, 39], регулирующих проектирование и эксплуатацию объектов производственной, социальной, транспортной, инженерной и информационной инфраструктуры.

Техногенные аварии и природные катастрофы больших масштабов представляют собой, как правило, некоторую последовательность поэтапно разворачивающихся взаимосвязанных событий. Достаточно часто крупные аварии и катастрофы техногенного и природного происхождения развиваются по «принципу домино», с реализацией сценариев каскадного типа. При этом отказы некоторых элементов порождают цепочки отказов других элементов в рамках одной, либо нескольких взаимодействующих систем [128–142].

В описаниях последовательностей событий, связанных с развитием масштабных аварий либо природных катастроф, как правило, могут быть выявлены некоторые «точки бифуркации» с так называемыми «окнами возможностей», представляющих временные интервалы, характеризующиеся повышенной эффективностью целенаправленных воздействий, способных существенно повлиять на динамику событий и вызвать переход в «русло» относительно благоприятного сценария. Развитие методов математического моделирования опасных процессов, позволяющих прогнозировать динамику критических состояний с учетом данных мониторинга текущего состояния объектов, а также своевременность и эффективность целенаправленных воздействий со стороны систем обеспечения безопасности, представляет перспективное и важное направление исследований в современной теории риска и безопасности [144–146].

Выполнение требований своевременности реагирования оперативных и аварийно-спасательных подразделений служб экстренного реагирования в кризисных ситуациях обеспечивает успешность действий, способствующих предотвращению

неблагоприятных сценариев [147–151]. Построение математических моделей, позволяющих прогнозировать развитие наиболее вероятных сценариев при инцидентах, авариях, катастрофах и стихийных бедствиях и генерация на их основе алгоритмов превентивного оперативного реагирования представляется достаточно перспективным направлением совершенствования информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в системах обеспечения безопасности [152–157]. Подобные математические модели должны удовлетворять, согласно [158–166], требованиям адекватности (соответствия моделируемой системе и цели моделирования) и адаптивности (согласованность параметров состояниям моделируемой системы).

1.6 Обоснование цели и задач исследования

При появившихся к началу третьего тысячелетия возможностях воздействия на среду обитания со стороны технических средств, соизмеримыми с природными силами планетарного масштаба, проблема обеспечения безопасности на всех уровнях (от отдельного человека до стран и мирового сообщества в целом) является важнейшей потребностью современности и сложнейшей научно-технической и социальной проблемой, требующей объединения усилий мирового сообщества и международных организаций [10–18].

Решение проблем безопасности в современных социотехнических системах основано на построении соответствующих сложных и многоуровневых систем обеспечения безопасности, представляющих совокупности соответствующих сил, средств и иных ресурсов, а также комплексы организационно-правовых, экономических, социальных и научно-технических механизмов и мероприятий, ориентированных на выполнение функций по предупреждению, предотвращению и защите от различных видов угроз [5,15, 19–37].

Опасность определенного вида может характеризоваться оценивающими различные ее стороны множеством рисков, которые интерпретируются как количественные характеристики возможности, а также последствий ее реализации,

выраженные в соответствующих единицах измерения [31–40]. Добиться полного исключения имеющихся рисков невозможно, однако возможно уменьшить риск до некоторого приемлемого обществом допустимого уровня при соответствующем управлении рисками, которое понимается как целенаправленная деятельность по снижению степени опасности объекта защиты до минимально возможного уровня.

Выявление закономерностей возникновения и развития деструктивных событий и их последствий на основе математического формализованного описания различных видов риска требует представления рисков мультипликатором факторов по крайней мере двух групп, связанных с возможностью опасных событий, а также с наступлением последствий различных видов [40 – 65, 93,94].

Проведение дальнейшей декомпозиции рисков и детализации их структуры требует преодоления некоторых ограничений, обусловленных использованием скалярных форм их представления [41–50]. Перспективным направлением развития способов формализации в теории рисков является моделирование, основанное на представлении рисков в виде некоторых линейных многокомпонентных алгебраических объектов, заданных на векторных пространствах конечной размерности [95–98]. Развитие нового математического инструментария, использующего аппарат векторно-матричных и многоиндексных представлений, позволяет сформировать понятие многокомпонентного риска, представляющего единую совокупность количественных и качественных характеристик угроз и последствий, отражающую в своей структуре влияние основных факторов риска.

Распространено мнение о возможности реализации концепции риск-ориентированного управления безопасностью на основе применения методов многокритериальной оптимизации [100–114]. Следует отметить, что наиболее сложная и значимая проблема риск-ориентированного управления безопасностью связана с установлением закономерностей, определяющих результаты целенаправленных воздействий, направленных на снижение рисков [115–121]. Опосредованный характер влияния подобных воздействий на показатели рисков с точки зрения формальной постановки задач многокритериальной оптимизации приводит к необходимости рассмотрения некоторых промежуточных пространств и дополнительных

отображений между пространством решений и критериальным пространством $W \rightarrow Q \rightarrow G \dots \rightarrow U$, необходимости учета как сложных, так и неявных функциональных зависимостей между переменными. Наиболее подходящим вариантом представляется задание критериальных функций с промежуточными отображениями, описывающими изменения состояний объектов защиты, а также функционирования систем и средств обеспечения безопасности.

Природные, техногенные и антропогенные риски представлены достаточно сложными структурами, особенности которых требуют существенной модификации в формальной постановке задачи многокритериальной оптимизации. При этом следует понимать, что адекватный прогноз последствий возможен в рамках математической модели, описывающей закономерности возникновения и развития кризисных ситуаций, а также особенности объектов защиты и эффективность функционирования систем обеспечения их безопасности.

Моделирование последствий от реализации угрозы (инициирующего события) отдельного вида является основой дальнейшего анализа рисков сложной системы. Необходим поиск и создание универсального математического аппарата формального представления основных факторов всех типов рисков и построение единого алгоритма количественного определения соответствующих возможных либо ожидаемых последствий. Применительно к представлению рисков различных видов определяется фундаментальное значение подобной общей модели, которая, по сути, может стать базовой моделью многокомпонентных рисков, которая может быть интегрирована в качестве составного элемента в более общие модели исследования рисков в сложных системах.

При формировании общих подходов наибольший интерес вызывают разнообразные модели, рассматривающие динамику процессов, связанных с источниками угроз и возможными сценариями развития опасных ситуаций, воздействием опасных факторов на объекты защиты и возникновением возможных потерь [40, 122–124, 128–142, 144–166].

На основе проведенного критического анализа существующих теоретических представлений о природе и структуре техногенных, природных и

антропогенных рисков и о концепциях риск-ориентированного управления в сложных социотехнических системах обоснован выбор основного направления диссертационного исследования, заключающегося в развитии математических методов исследования многокомпонентных рисков с учетом функционирования систем обеспечения безопасности и параметров состояния объектов защиты, а также стохастического моделирования опасных процессов и динамики критических состояний с учетом данных мониторинга и отражением вероятностных характеристик своевременности и эффективности оперативного реагирования.

В рамках выбранного направления исследования предполагается решение следующей совокупности **задач**.

1. Развитие методов исследования многокомпонентных рисков на основе матричного представления структуры совокупности факторов риска:

- модификация метода стохастического анализа структуры рисков, введение ряда дополнительных компонент модели матричного представления для детализации состояний ОЗ и функционирования СОБ;

- построение дискретно-событийной модели функционирования СОБ;

- обоснование методики определения вероятностных параметров модели многокомпонентных рисков, обусловленных функционированием СОБ;

- установление совокупности компонент матричного представления рисков, необходимой для требуемой детализации возможных потерь;

- обоснование численного метода определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок;

- построение расчетной модели определения ожидаемого ущерба, отражающей распределение ОЗ по состояниям с различной готовностью и уязвимостью, с учетом вероятностных оценок выполнения совокупности функций СОБ;

- обоснование метода анализа эффективности затрат ресурсов и оптимального управления природными, техногенными и антропогенными рисками в СОБ.

2. Развитие методов прогнозирования динамики кризисных ситуаций на основе дискретно-событийного моделирования при исследовании:

- вероятностных характеристик опасных отказов технических объектов (ТО)

с учетом обобщенной наработки, выражаемой интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов;

- вероятностных характеристик развития опасных процессов и критических состояний по каскадным сценариям;

- вариантов распределения ресурсов, привлекаемых к локализации и ликвидации последствий масштабных кризисных ситуаций;

- алгоритмов риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях.

3. Реализация построенных моделей и алгоритмов в комплексе проблемно-ориентированных программ численного анализа параметров и прогнозирования динамики рисков, предназначенных для:

- определения ожидаемого ущерба и анализа эффективности использования ресурсов, с учетом вероятностных оценок функционирования систем защиты и состояний ОЗ;

- прогнозирования аварийных и критических состояний при инцидентах;

- распределения ресурсов при масштабных кризисных ситуациях.

1.7 Выводы по первой главе

1. Выявление закономерностей возникновения и развития деструктивных событий и их последствий возможно на основе представления рисков мультипликативным по крайней мере двух групп факторов, связанных с возможностью реализации угроз различного характера, а также с наступлением различных видов последствий.

2. Моделирование многокомпонентных рисков как единой совокупности количественных и качественных характеристик угроз и последствий на основе мультипликативного представления требует развития нового математического инструментария, использующего аппарат векторно-матричных и многоиндексных представлений основных факторов риска.

3. Применение многокритериальных методов для решения задач риск-

ориентированного управления в системах обеспечения безопасности невозможно без учета сложной структуры природных, техногенных и антропогенных рисков, особенности которых требуют существенной модификации формальной постановки задачи многокритериальной оптимизации при управлении многокомпонентными рисками.

4. Адекватный прогноз последствий реализации угроз различного характера возможен в рамках математической модели, описывающей закономерности возникновения и развития кризисных ситуаций, а также особенности объектов защиты и эффективность функционирования систем обеспечения их безопасности.

5. Перспективным направлением совершенствования информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в системах обеспечения безопасности представляется построение математических моделей, позволяющих прогнозировать наиболее вероятные сценарии развития критических состояний при инцидентах, и генерация на их основе алгоритмов превентивного оперативного реагирования.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОСНОВ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РИСКОВ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В настоящем разделе изложены результаты исследований автора, отражающие развитие концепции многокомпонентных рисков и методов их стохастического моделирования, а также постановки различных прикладных задач обеспечения риск-ориентированного управления в системах обеспечения безопасности.

Информационно-аналитическое обеспечение процессов мониторинга разнообразных природных, техногенных и антропогенных рисков и поддержки управления различными видами безопасности в сложных социотехнических системах должно быть основано на математических методах идентификации, анализа и оценивания рисков, позволяющих реализовать в полной мере потенциальные возможности современных методов и программно-аппаратных средств имитационного моделирования. Перспективным направлением представляется, с точки зрения автора, развитие новых подходов к изучению природных, техногенных и антропогенных рисков исследований рисков, основанных на стохастическом моделировании структуры многокомпонентных рисков в социотехнических системах.

Рассмотренный в настоящей главе подход и предлагаемый метод моделирования многокомпонентных рисков, основанный на векторно-матричных и многоиндексных представлениях структуры совокупности факторов риска, может быть использован для изучения различных природных, техногенных и антропогенных рисков, а также Использование такого математического аппарата для представления рисков предоставляет широкие возможности оперирования с обуславливающими возникновение факторов риска событийным рядом, а также с последствиями их воздействия на совокупность защищаемых объектов.

Предложена обобщенная стохастическая модель многокомпонентных рисков с матричным представлением состояний объекта защиты и вероятностных характеристик функционирования систем обеспечения безопасности, а также модель оптимального управления многокомпонентными рисками на основе много-

критериальной комбинаторной оптимизации затрат и распределения ресурсов.

Основные результаты исследований, изложенные в настоящем разделе, опубликованы автором в серии работ [115–121, 167–177], отражающих развитие концепции многокомпонентных рисков и совершенствование математического инструментария, предназначенного для анализа структуры и детализации различных факторов риска, а также решения ряда прикладных задач, направленных на совершенствование информационно-аналитического обеспечения поддержки риск-ориентированного управления в системах обеспечения безопасности.

2.1 Развитие подходов к математической формализации и способов представления многокомпонентных рисков

Математические методы идентификации, анализа и оценивания рисков, представляют основу информационно-аналитического обеспечения процессов мониторинга разнообразных природных, техногенных и антропогенных рисков и поддержки управления различными видами безопасности сложных социотехнических систем.

При решении разнообразных задач обеспечения безопасности в социально-экономических и социотехнических системах используется ряд эффективных методов анализа рисков, которые можно условно разделить на четыре основные группы отличающиеся, согласно [100], особенностями реализации так называемых инженерного, модельного, экспертного и социологического подходов.

К настоящему моменту наиболее перспективным направлением представляется развитие методов многокритериального анализа [101–114] природных, техногенных и антропогенных рисков, которые могут найти непосредственное применение при решении задач, относящимся к прогнозированию последствий кризисных ситуаций и инцидентов, классификации объектов защиты и систем обеспечения безопасности, выявлению различных угроз, выбору мероприятий по снижению рисков и пр.

Как показано в предыдущем разделе, математическая постановка задачи

векторной оптимизации (1.17) в общем случае связана с описанием функциональных связей между некоторой совокупностью альтернативных решений (областью определения или допустимых решений), а также соответствующей совокупностью векторных оценок (областью значений или достижимых результатов), компоненты которых представляют численные значения некоторого набора частных критериев.

Постановка задачи векторной оптимизации при управлении безопасностью требует установления функциональных связей между ожидаемыми потерями - последствиями возможных кризисных ситуаций и управляемыми параметрами систем обеспечения безопасности. Однако природные, техногенные и антропогенные риски имеют достаточно сложную структуру, обусловленную динамикой развития кризисных ситуаций и функционированием систем обеспечения безопасности, неоднородностью свойств объектов защиты и другими факторами [41–50]. Поэтому оценка последствий и ожидаемых потерь может проводиться лишь в рамках определенной детерминированной либо стохастической математической модели, описывающей динамику возникновения и развития кризисных ситуаций.

Отмечается тенденция преимущественного развития методов стохастического и имитационного моделирования для исследования природных, техногенных и антропогенных рисков в социотехнических системах [44–49, 99]. Применяемый при этом математический аппарат основан на скалярных формах представления основных факторов рисков [40–94]. Вместе с тем при моделировании природных, техногенных и антропогенных рисков возникает необходимость рассматривать фактически несопоставимые признаки и переменные, которые не могут быть приведены к единому эквиваленту [45–56, 95–99]. Такие принципиальные ограничения не позволяют реализовать в полной мере потенциальные возможности современных методов и программно-аппаратных средств имитационного моделирования для информационно-аналитического обеспечения процессов управления рисками в системах безопасности.

Представляется перспективным подход к стохастическому моделированию многокомпонентных рисков, предложенный в [95–99, 115–121], основанный на векторно-матричном представлении компонент риска и отражающий углубленную

детализацию состояний объекта защиты и вероятностные характеристики функционирования систем обеспечения безопасности. Применение такого математического аппарата для представления рисков предоставляет широкие возможности оперирования с обуславливающими возникновение факторов риска событийным рядом, а также с последствиями их воздействия на совокупность защищаемых объектов.

2.2 Построение стохастической модели многокомпонентных рисков

Многокомпонентные риски в предлагаемой стохастической модели представляются результатом взаимодействия двух составляющих – «мультипликатора» и «акселератора», связанных с соответствующими группами элементов и факторов. Мультипликатор представляет совокупность элементов и факторов, обуславливающих возможность реализации угроз, а акселератор – совокупность элементов и факторов, определяющих уязвимость объектов защиты.

Определим основные элементы стохастической модели многокомпонентных рисков, исходя из приведенной выше общей концепции генезиса рисков.

Представление структуры антропогенных, техногенных и природных рисков предусматривает проведение процедуры разбиения множества «объекты защиты» на подмножества, с близкими показателями риска. При выявлении групп, значительно отличающихся по основным показателям риска, связанных с характеристиками уязвимости и подверженности угрозам, рекомендуется проведение кластеризации объектов защиты.

Процедура разбиения, основанная на выявлении корреляционных связей между совокупностью значимых признаков объектов защиты с характеристиками уязвимости и подверженности воздействию опасных факторов может представлять отдельный этап, предшествующий проведению исследований многокомпонентных рисков в рамках данной модели.

Для разбиения множества объектов на классы разработаны достаточно эффективные методы [178, 179], в частности, применяемые в пространстве признаков

большой размерности [105].

Поскольку объект защиты может находиться в одном из возможных состояний, отличающихся по степени защищенности, в ряде случаев возникает необходимость учета так называемого «текущего состояния». Такое различие может возникнуть вследствие снижения уязвимости объекта и повышения готовности к защите от опасных факторов, например, вследствие проведения модификации систем защиты, реализации мероприятий, направленных на предупреждение возникновения источников угроз и предотвращение опасных событий.

Представление совокупности элементов «объекты защиты», относящихся к определенным подмножествам разбиения в виде кортежа (вектора):

$$\mathbf{C} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_I) \in R_{1 \times I}, \quad i \in \{1, \dots, I\} \quad (2.1)$$

отражает количественное распределение представителей по компонентам, соответствующим их принадлежности к различным группам риска.

Характерной особенностью настоящей стохастической модели многокомпонентных рисков является учет представленного некоторой конфигурацией распределения объектов защиты внутри каждой группы (2.1) по влияющим на показатели риска текущим состояниям:

$$q \in \{1, \dots, Q\},$$

в соответствии с (1.11), а также рассмотренным выше элементами задачи риск-ориентированного управления.

Определение 2.1. Конфигурация совокупности «объекты защиты» однозначно связана с текущим распределением:

$$A = \bigcup_{q=1}^Q \bigcup_{i=1}^I A_i^q \quad (2.2)$$

объектов защиты, различающихся по принадлежности к группам риска (i) и отдельным состояниям (q).

Введем соответствующие конфигурации (2.2) удельные коэффициенты структуры распределения рассматриваемой совокупности объектов защиты относительно групп и состояний:

$$|A_i^q| = \alpha_i^q,$$

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^I \alpha_i^q = 1,$$

с выполнением условия нормировки для коэффициентов структуры распределения.

Тогда для векторов (2.1), а также для их отдельных компонент можно использовать следующие эквивалентные представления:

$$c_i = \sum_{q=1}^Q c_i^q \leftrightarrow c_i = c_i \sum_{q=1}^Q \alpha_i^q, \\ i \in \{1, \dots, I\}, \quad q \in \{1, \dots, Q\}, \\ \mathbf{c} = \left(\sum_{q=1}^Q c_1^q, \dots, \sum_{q=1}^Q c_i^q, \dots, \sum_{q=1}^Q c_I^q \right) \leftrightarrow \mathbf{c} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{c}^q, \\ \mathbf{c}^q = (c_1^q, \dots, c_i^q, \dots, c_I^q).$$

В рассматриваемой стохастической модели многокомпонентные риски представлены как результат взаимодействия мультипликатора и акселератора связанных, соответственно, как с элементами, обуславливающими возможность появления опасных событий, так и с элементами, определяющими параметры уязвимости подвергающихся воздействию опасных факторов объектов. При анализе отдельных параметров модели необходимо отличать внешние параметры от внутренних (например, состояние является внутренним параметром).

Определение 2.2. Мультипликатор представляет общую вероятностно-временную характеристику многокомпонентного риска, однозначно связанную с совокупностью элементов диагональных матриц:

$$\dot{\mathbf{v}}^q = \begin{pmatrix} \dot{v}_1^q & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & \dot{v}_i^q & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \dot{v}_I^q \end{pmatrix} \in R_{I \times I}, \quad (2.3)$$

$$i \in \{1, \dots, I\}, \quad q \in \{1, \dots, Q\},$$

являющимися вероятностно-временными характеристиками подверженности

объектов защиты воздействию опасных факторов.

Отдельные компоненты диагональных матриц $\dot{\mathbf{V}}^q$ (от лат. *victima* – жертва) представляют собой производные по времени вероятностных характеристик v_i^q подверженности воздействию опасных факторов объектов защиты, распределенных по принадлежности к группам риска i и отдельным состояниям q . Мультипликатор интерпретируется как первая составляющая событийного ряда, генерирующего риски.

Определение 2.3. Акселератор представляет общую вероятностно-интенсивную характеристику многокомпонентного риска, однозначно связанную с совокупностью элементов матриц:

$$\mathbf{S}^q = \begin{pmatrix} S_{1^q 1} & \cdots & S_{1^q J} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & S_{i^q j} & \vdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{I^q 1} & \cdots & S_{I^q J} \end{pmatrix} \in R_{I \times J}, \quad (2.4)$$

$$i^q \in \{1^q, \dots, I^q\}, \quad j \in \{1, \dots, J\}, \quad q \in \{1, \dots, Q\},$$

являющимися вероятностно-интенсивными характеристиками уязвимости объектов защиты при воздействии опасных факторов.

Акселератор характеризует степень уязвимости объектов защиты и связан с ожидаемыми потерями при воздействии опасных факторов. Прямоугольная матрица \mathbf{S} (от англ. *sensitivity* – чувствительность) представляет собой совокупность элементов, рассматриваемых в качестве вторичных составляющих событийного ряда. Эти компоненты являются условными вероятностями наступления последствий различных видов j в результате воздействия опасных факторов на объекты, представляющие определенные группы риска i , с учетом распределения по текущим состояниям q .

В настоящей модели в качестве основных показателей многокомпонентного риска принимаются ожидаемые социально-экономические потери, обусловленные воздействием в течение определенного временного интервала рассматриваемых опасных факторов. Совокупные ожидаемые потери представляются так

называемым «вектором ожидаемых потерь», формируемым в результате композиции первичных и вторичных составляющих событийного ряда – мультипликатора и акселератора.

Определение 2.4. Вектор ожидаемых потерь представляет собой итоговую характеристику многокомпонентного риска, однозначно определяемую совокупностью компонентов кортежа (вектора):

$$\mathbf{D} = (d_1, \dots, d_j, \dots, d_J) \in R_{1 \times J},$$

$$\mathbf{D} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{D}^q, \quad \mathbf{D}^q = \mathbf{C}^q \mathbf{V}^q \mathbf{S}^q = (d_1^q, \dots, d_j^q, \dots, d_J^q) \in R_{1 \times J}. \quad (2.5)$$

Отдельные компоненты вектора (2.5) ожидаемых потерь характеризуют для данной совокупности объектов защиты составляющие ожидаемого ущерба в соответствии с последствиями различного вида. При этом совокупный вектор ожидаемых потерь вычисляется в виде суммы векторов ожидаемых потерь для подмножеств объектов защиты, принадлежащим к отдельным состояниям q .

2.3 Исследование параметров стохастической модели многокомпонентных рисков

В настоящей модели рассматриваются основные внешние параметры, обусловленные совокупностью сил и средств, предназначенных для обеспечения защиты объектов. Эти параметры непосредственно влияют на количественные характеристики ожидаемых потерь и их структуру в случае реализации угроз при возникновении опасных событий. При исследовании влияния отдельных параметров модели на ожидаемые потери необходимо учитывать различные обстоятельства, обусловленные не только наличием определенной совокупности обеспечивающих защиту сил, средств и систем, но прежде всего с фактическим выполнением функций защиты объектов со стороны отдельных элементов этой совокупности. Например, результаты срабатывания систем защиты при возникновении опасных событий и при воздействии опасных факторов на объекты защиты.

Рассмотрим события «наличие/отсутствие возможности выполнения», а также «фактическое выполнение/невыполнение» для каждой из рассматриваемых ниже L функций защиты объектов. Обозначим их булевыми переменными и введем соответствующие идентификаторы двух видов:

$$R_l = [1,0], \quad E_l = [1,0], \quad l \in \{1 \dots L\}. \quad (2.6)$$

События «наличие/отсутствие возможности выполнения» для основных функций защиты объектов при воздействии опасных факторов относятся к категориям достоверных либо невозможных событий и однозначно обусловлены наличием и состоянием систем защиты объектов.

Лемма 2.1. Идентификаторы R_l наличия либо отсутствия возможности выполнения основных функций защиты объектов представляют собой детерминированные величины, значения которых:

$$\begin{cases} R_l = 1 \text{ наличие возможности} , \\ R_l = 0 \text{ "отсутствие возможности" .} \end{cases} \quad (2.7)$$

Следует отметить, что события типа «фактическое выполнение/невыполнение» основных функций защиты объектов при условии воздействия на них опасных факторов относятся к категории случайных событий, представленные случайными величинами – идентификаторами E_l .

Лемма 2.2. Вероятности выраженных случайными величинами E_l случайных событий фактического выполнения/невыполнения обусловлены событиями «наличие/отсутствие возможности выполнения» основных функций защиты объектов в соответствии с:

$$\begin{cases} 0 \leq P(E_l = 1) \leq 1 \quad (P(E_l = 0) = 1 - P(E_l = 1)) \quad \text{при } R_l = 1 \\ P(E_l = 1) = 0 \quad (P(E_l = 0) = 1) \quad \text{при } R_l = 0 \end{cases} . \quad (2.8)$$

Событие «выполнение функции $[\Phi_l]$ защиты объектов» относится, в соответствии с интерпретацией (2.8), к категории случайных (возможных) событий только при определенных обеспечивающих возможность его выполнения условиях. Вероятность указанного события при этом совпадает с вероятностью его фактического выполнения. Если возможность выполнения соответствующей функции

защиты отсутствует, рассматриваемое событие относится к категории невозможных событий (вероятность тождественно равна нулю).

Рассмотрим события выполнения или невыполнения отдельных функций защиты объектов при условии реализации угроз. Представим соответствующие идентификаторы производными булевыми индексами – результатом произведения значений пары исходных булевых индексов $(R_l^k \cdot E_l^k)$. При этом возможные варианты фактически действующей совокупности функций защиты объектов представляются упорядоченными наборами производных булевых индексов:

$$\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}. \quad (2.9)$$

Обозначим вероятности событий, соответствующих возможным вариантам выполнения совокупности функций защиты объектов от опасных факторов, как:

$$P(\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}). \quad (2.10)$$

Вероятности событий (2.10) зависят от некоторых технических характеристик отдельных элементов систем защиты объектов и определяются вероятностными показателями их срабатывания.

Основные параметры модели, в наибольшей степени влияющим на результаты численной оценки ожидаемых потерь представляют собой частные условные вероятности событий, связанных с наступлением определенных последствий при возникновении опасных факторов, наступающих при условии выполнения одного из возможных вариантов совокупности функций защиты.

Определение 2.5. Частные условные вероятности наступления последствий воздействия опасных факторов для распределенных по состояниям объектов, относящиеся к заданным вариантам выполнения совокупности функций защиты:

$$S_{i^q j}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}}. \quad (2.11)$$

Возможности практической реализации предлагаемой стохастической модели в значительной степени связана с решением проблемы численной оценки параметров модели (2.11). Для каждого случая необходимо определить оптимальную процедуру оценки параметров, исходя из требований адекватности и допустимой трудоемкости.

Основной подход к организации процедуры оценки частных условных вероятностей ожидаемых потерь для определенного набора выполнения функций защиты связан с возможностями проведения достаточно большого объема исследований имеющих статистических данных о потерях от воздействия опасных факторов при реализации различного вида угроз в случае наступления опасных событий.

Получение подобных данных предполагает наличие и функционирование соответствующей системы сбора первичных данных об инцидентах, кризисных и чрезвычайных ситуациях. При отсутствии необходимых статистических данных количественная оценка рассматриваемых параметров может осуществляться на основе экспертных методов.

Многокритериальные методы позволяют получить более обоснованные результаты в сравнении с методом непосредственной оценки, представляющим процедуру приписывания экспертами объектам числовых значений на интервале $[0,1]$.

Выбор для решения рассматриваемых задач конкретных многокритериальных методов требует учета их противоречивых свойств [180, 181]. Достоинства и недостатки выбранного метода проявляются степенью соответствия результатов применения сформулированным в [180] основным методологическим требованиям, обеспечивающим полноту сравнений, рациональность и нечувствительность к ошибкам. Также следует отметить сильную чувствительность многокритериальных методов к набору альтернатив, изменение которого в общем случае может повлечь изменение отношений предпочтений между ранее введенными альтернативами [181–183].

На первоначальном этапе применения настоящей модели для решения прикладных задач риск-ориентированного управления в социотехнических системах предлагается использование экспертных оценок частных условных вероятностей (2.11). В соответствии с общим алгоритмом реализации МАИ, проводятся экспертные оценки на основе процедуры попарных сравнений для всего набора частных условных вероятностей (2.11), связанного с наступлением для представителей группы i^q различных последствий j в результате воздействия опасных факторов

при заданном варианте выполнения совокупности функций защиты.

Практическая применимость МАИ обусловлена незначительным числом критериев сравнения (обычно не более 5), необходимых для определения параметров (2.11) и относительно небольшими трудозатратами выполнения экспертами процедуры попарного сравнения.

При этом следует учитывать ряд обстоятельств, обусловленных отсутствием достаточного математического обоснования перевода вербальных оценок в численные значения [184]. Поскольку вплоть до настоящего времени какое-либо научное обоснование перевода значений ранговой шкалы в численные значения шкалы отношений отсутствует, применение экспертных методов для количественных оценок вероятностных параметров различных событий является одной из актуальных проблем в области анализа рисков [185, 186]. Разрешение указанного основного математического противоречия может быть достигнуто при условии введения в общую модель ряда принципиальных соображений, позволяющих установить правила однозначного перевода вербальных оценок в численные значения.

2.4 Обоснование численного метода определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок

Количественная оценка вероятностных характеристик многокомпонентных рисков редких событий и явлений предполагает, как правило, анализ большого объема статистических данных, однако достаточно часто имеющиеся выборочные совокупности данных не являются репрезентативными, либо не соответствуют требованиям, предъявляемым к организации систематического статистического учета. Как указывалось выше, научное обоснование допустимости применения экспертных методов для количественных оценок вероятностных параметров различных событий является одной из актуальных проблем в области анализа рисков и моделирования безопасности социотехнических систем.

Осознание значимости роли познающего субъекта, участвующего в процессе инструментального измерения физических величин привело к формированию

понятия «эффект наблюдателя», которое имеет различную интерпретацию в различных областях физики – квантовой механике, общей и специальной теории относительности, космологии и пр. [187, 188].

Характерной особенностью экспертных методов является частичное либо полное слияние познающего субъекта и средства измерения. Исходя из общих положений теории измерений, необходимо построение общей модели экспертных методов, в качестве основных элементов которой рассматривается совокупность:

$$S \Leftrightarrow I \Leftrightarrow O ,$$

включающая познающего субъекта - «наблюдателя», средства измерения - «прибор» и объект с «измеряемыми свойствами». Построение подобных моделей и научное обоснование экспертных методов, по мнению авторов настоящей статьи, может привести к формированию междисциплинарного научного направления, затрагивающего ряд значимых вопросов, относящихся к теории познания, нейрофизиологии, когнитивной психологии, когнитивной лингвистики, невербальной коммуникации и искусственного интеллекта.

С точки зрения математического обоснования, применение экспертных методов с процедурой перевода вербальных оценок в численные значения, как правило приводит к ошибочной интерпретации результатов [184], непосредственно представленных в ранговой шкале экспертных оценок, но фактически используемых как результаты шкалы отношений.

Разрешение указанного противоречия в проблеме количественной оценки вероятностей редких событий на основе экспертных методов возможно при условии введения в общую модель ряда принципиальных соображений, позволяющих установить правила однозначного перевода вербальных оценок в численные значения. Наиболее обоснованным и перспективным направлением при моделировании экспертных процедур представляется применение достижений сенсорной психофизики [189–191]. Психофизические или сенсометрические методы (вынужденного выбора, минимальных изменений, постоянных раздражителей, оценки, средней ошибки, центральной точки и др.) используются при построении субъективных шкал и измерении чувствительности сенсорных систем. Например, в [192]

анализируется функциональная связь между объективной и субъективной вероятностями на основании эмпирических психофизических законов Фехнера и Стивенса.

Для построения модели экспертного метода измерения вероятностей редких событий, основанного на гипотезе о функциональной связи между результатами субъективной оценки и объективного измерения вероятностей, введем пространство элементарных событий, обусловленных конечным набором возможных исходов:

$$\Omega = \{a_1, \dots, a_N\}. \quad (2.12)$$

Определим для каждого элементарного события объективные и субъективные вероятности:

$$\begin{aligned} a_i \rightarrow p_i, \quad a_i \rightarrow q_i, \\ i \in \{1, \dots, N\}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Использование законов Фехнера и Стивенса для описания функциональной связи между результатами субъективной оценки и объективного измерения вероятностей, как показано в [193], приводит к сходным результатам, но выбор закона Стивенса предпочтителен с точки зрения дальнейшего решения вычислительных задач. Тогда отношение объективных вероятностей определяется (в соответствии с законом Стивенса) степенной функцией отношения субъективных вероятностей:

$$\frac{p_l}{p_m} = \left(\frac{q_l}{q_m} \right)^\vartheta, \quad (2.14)$$

где ϑ – некоторая константа, значение которой превышает единичное (> 1) при оценке вероятностей редких событий (рисунок 2.1).

Для нахождения численного значения ϑ , устанавливающего конкретный вид функциональной связи между результатами субъективной оценки и объективного измерения вероятностей могут применяться как экспертные методы, так и методы, основанные на анализе имеющихся статистических данных. Рассмотрим, например, ситуацию, в которой хотя бы для одной пары исходов возможна не только экспертная оценка отношения субъективных вероятностей, но и статистическая оценка отношения объективных вероятностей. В таком случае значение ϑ

непосредственно определяется показателем степенной функции для отношения субъективных вероятностей, при котором выполняется равенство (2.14) с отношением соответствующих объективных вероятностей.

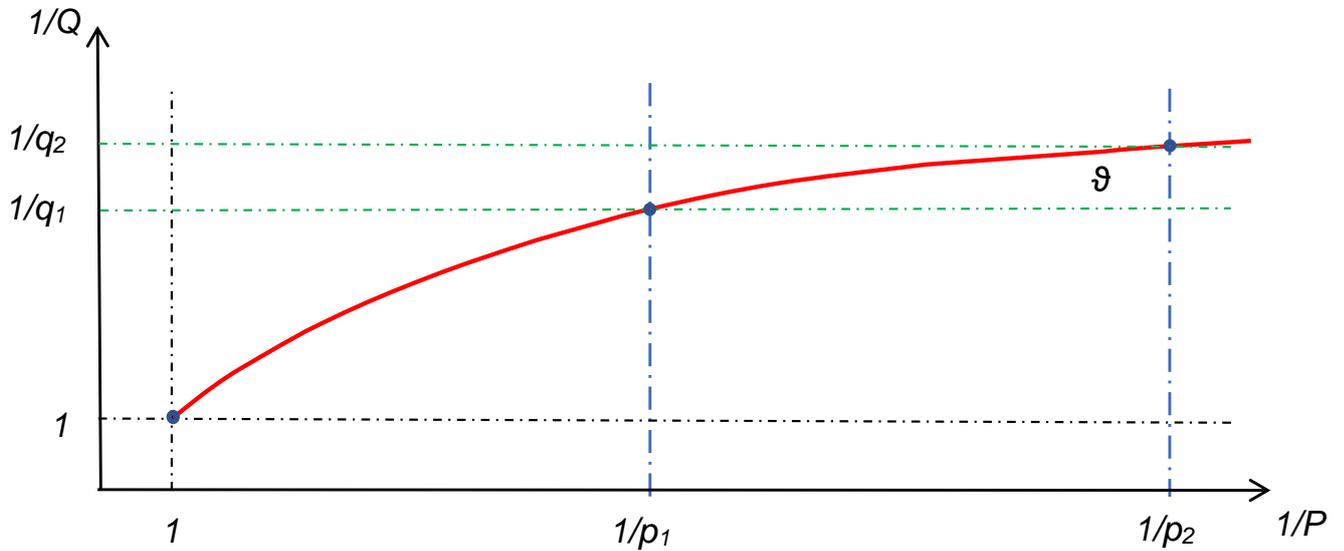


Рисунок 2.1 – Гипотеза о функциональной связи между объективной вероятностью P и субъективной оценкой Q в соответствии с психофизическим законом Стивенса

Для повышения точности вербальных оценок в современных экспертных методах применяются, как правило, процедуры парных сравнений альтернатив. Эффективность процедур парных сравнений, согласно выводам психофизических исследований [189–191], подтверждает предположение о том, что эксперты, при условии предоставления комфортных условий и возможности сосредоточиться на рассматриваемых конкретных вопросах, достаточно часто ориентируются в проблеме гораздо лучше, чем оценивают сами.

Результаты парных сравнений субъективных вероятностей для всего набора возможных исходов сводятся в квадратную матрицу:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & \dots & \dots & d_{1N} \\ \dots & \dots & d_{ij} & \dots & \dots \\ d_{N1} & \dots & \dots & \dots & d_{NN} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Определять численные значения элементов матрицы (2.15) рекомендуется на основе вербальной шкалы парных сравнений (таблица 2.1) для субъективных вероятностей возможных исходов.

Обработка матрицы парных сравнений позволяет, согласно [194-197], перейти от относительных значимостей факторов к абсолютным, совокупность которых составляет компоненты главного собственного вектора обратно симметричной матрицы:

$$DX = \lambda X, \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_N \end{pmatrix}, \quad \sum_{i=1}^N x_i = 1. \quad (2.16)$$

Таблица 2.1 – Шкала парных сравнений вероятностей возможных исходов

Степень	Определение	Объяснение
1	Эквивалентность	Равновозможное наступление сравниваемых исходов
3	Слабое превышение	Некоторое преобладание возможностей наступления одного исхода над другим
5	Сильное превышение	Сильное преобладание возможностей наступления одного исхода
7	Очень сильное превышение	Практически явное преобладание возможностей наступления одного исхода
9	Абсолютное превышение	Наивысшая степень преобладания возможностей наступления одного исхода
2,4,6,8	Промежуточные значения	Компромиссное сравнение возможностей наступления исходов

Недостатки способа (2.16) связаны с отсутствием аналитического решения, при этом численное определение нормированного главного собственного вектора предполагает использование достаточно громоздкого алгоритма. Вместе с тем для обратно-симметричных матриц, близких к согласованным, существуют простые и эффективные приближенные способы определения компонент собственного вектора. Наиболее точное из приближений, описанных в [195], основано на вычислении нормированных средних геометрических величин для расположенных в каждой строке элементов матрицы парных сравнений.

Значения субъективных вероятностей с хорошим приближением могут быть, согласно [195], представлены как нормированные среднегеометрические величин соответствующих строк матрицы парных сравнений (2.15):

$$q_l = \frac{\sqrt{\prod_{j=1}^N d_{lj}}}{\sum_{i=1}^N \sqrt{\prod_{j=1}^N d_{ij}}} , \quad (2.17)$$

$$l \in \{1, \dots, n\} .$$

Дополнительное преимущество рассматриваемого представления проявляется при определении объективных вероятностей на основе подстановки выражений (2.17) в соотношение (2.14). Поскольку субъективные вероятности (2.17) пропорциональны средним геометрическим элементов соответствующих строк матрицы парных сравнений, в выражении (2.14) при нахождении отношения субъективных вероятностей происходит сокращение знаменателей:

$$\frac{q_l}{q_m} = \frac{\sqrt{\prod_{j=1}^N d_{lj}}}{\sqrt{\prod_{j=1}^N d_{mj}}} \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) имеет простой и наглядный смысл: отношение субъективных вероятностей возможных исходов равно отношению средних геометрических элементов соответствующих строк матрицы парных сравнений возможностей наступления исходов.

Принятие гипотезы о функциональной связи между результатами субъективной оценки и объективного измерения вероятностей представляет, по сути, теоретическое обоснование предложенной автором в [176, 177] и описанной ниже процедуры объективизации экспертных оценок вероятностей редких событий.

Математическая формализация данной процедуры заключается в определении правил перевода значений ранговой шкалы для экспертных оценок субъективных вероятностей в значения количественной шкалы отношений для соответствующих объективных вероятностей.

Для реализации процедуры объективизации подставляем в (2.14) отношения субъективных вероятностей в виде (2.18), а также учитываем условие нормировки вероятностей совокупности событий из полной группы. В результате получаем систему соотношений, определяющую значения объективных вероятностей для всех

ВОЗМОЖНЫХ ИСХОДОВ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{p_l}{p_m} = \left(\frac{\prod_{j=1}^N d_{lj}}{\prod_{j=1}^N d_{mj}} \right)^{\frac{\theta}{N}}, \\ \sum_{i=1}^N p_i = 1 \end{array} \right. . \quad (2.19)$$

Рассмотрим вопросы, касающиеся адекватности количественных оценок основных вероятностных параметров (2.11) стохастической модели многокомпонентных рисков и допустимости применения для этих целей экспертных оценок.

Процедура попарных сравнений выполняется экспертами для частных условных вероятностей наступления различных последствий воздействия опасных факторов для всех распределенных по состояниям объектов, относящиеся к заданным вариантам выполнения совокупности функций защиты. По результатам процедуры строится матрица попарных сравнений:

$$\Theta_{i^q}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{S_{i^q 1}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q 2}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} & \dots & \dots & \frac{S_{i^q 1}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q J}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} \\ \frac{S_{i^q 2}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q 1}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{S_{i^q (J-1)}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q J}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} \\ \frac{S_{i^q J}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q 1}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} & \dots & \dots & \frac{S_{i^q J}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q (J-1)}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} & 1 \end{pmatrix} . \quad (2.20)$$

Найденные субъективные оценки условных вероятностей представляют собой компоненты нормированного главного собственного вектора (с наибольшим собственным значением J) для полученной матрицы парных сравнений.

Согласованность и непротиворечивость суждений экспертов оцениваются, в

соответствии с [183, 184], индексом согласованности матрицы парных сравнений:

$$\Theta_{i^q}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} \cdot \begin{pmatrix} S_{i^q 1}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} \\ \vdots \\ S_{i^q J}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} \end{pmatrix} \cong J \cdot \begin{pmatrix} S_{i^q 1}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} \\ \vdots \\ S_{i^q J}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

При вычислении количественных оценок основных вероятностных параметров (2.11) стохастической модели многокомпонентных рисков рекомендуется использование предложенных правил перевода (2.19) значений ранговой шкалы экспертных оценок для субъективных вероятностей, полученных с применением процедуры парных сравнений, в значения количественной шкалы отношений для соответствующих объективных вероятностей [176, 177].

Основное условие применения предлагаемого численного метода для количественной оценки вероятностных характеристик связано с необходимостью задания численного значения ϑ , устанавливающего конкретный вид функциональной связи (2.14) между результатами субъективной оценки возможностей наступления исходов и объективного измерения их вероятностей в соответствии с психофизическим законом Стивенса. Нахождение указанной константы для определенного вида событий может представлять собой достаточно сложную задачу, требующую проведения соответствующих исследований в данной предметной области.

При моделировании отдельных видов риска и систем обеспечения безопасности наиболее перспективными из возможных способов установления функциональной связи (2.14) представляются те, которые основаны на проведении ретрополяции в рамках имитационного эксперимента результатов реализации различных угроз [6]. В процессе выполнения ретроспективного прогноза необходимо производить подбор такого значения константы (2.14), при котором достигается наилучшее соответствие моделируемого ущерба с реальными статистическими данными.

Таким образом, предлагаемый численный метод может применяться для вычисления вероятностных параметров (2.11) стохастической модели многокомпонентных рисков при условии выполнения процедур парных сравнений (2.20) и объективизации результатов экспертных оценок (2.19) в соответствии с заданным коэффициентом функциональной связи (2.14).

2.5 Разработка моделей функционирования систем обеспечения безопасности и прогнозирования ожидаемых потерь

При моделировании многокомпонентных рисков, как правило, необходимо учитывать неоднородность рассматриваемой совокупности объектов защиты, которая может содержать подмножества, существенно различающиеся по ряду значимых параметров (например, по конфигурациям наличия систем защиты объектов от опасных факторов и их технического состояния, по наличию конкретных сил и средств, а также иным условиям обеспечения безопасности объектов и пр.).

Для представления вариантов возможного выполнения определенной совокупности функций защиты введем комплексные идентификаторы в виде упорядоченных наборов соответствующих булевых переменных:

$$[R_1 \dots R_l \dots R_L].$$

Для отображения вариантов фактического выполнения определенной совокупности функций защиты вводятся, с учетом (2.7–2.8), аналогичные комплексные идентификаторы, представляющие упорядоченные наборы булевых переменных:

$$[E_1 \dots E_l \dots E_L].$$

В [117] представлена общая методика оценки ожидаемого ущерба от пожаров в жилом секторе для определенной территории, а также приведена методика расчета значений вероятностей различных вариантов фактического выполнения своих функций системами обеспечения противопожарной защиты в жилых зданиях.

Неоднородность рассматриваемой совокупности объектов защиты относительно возможности выполнения определенной совокупности функций защиты объектов может учитываться при введении соответствующих удельных коэффициентов структуры распределения:

$$\beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = \left| B_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \right|, \quad \sum_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = 1. \quad (2.22)$$

Утверждение 2.1. Конфигурация распределения объектов защиты по

степени защищенности определяется распределением объектов защиты, различающихся по принадлежности к группам риска и отдельным состояниям, а также по возможным вариантам выполнения определенной совокупности функций защиты:

$$B = \bigcup_{q=1}^Q \bigcup_{i=1}^I \bigcup_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} B_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \quad (2.23)$$

В случае реализации угрозы, условные вероятности события, связанного с наступлением j -го вида последствий при фиксированном возможном варианте выполнения совокупности функций защиты определяются математическими ожиданиями случайных величин $s_{i^q j}$. При этом для фиксированного комплексного идентификатора возможного выполнения определенной совокупности функций защиты по всем возможным комплексным идентификаторам их фактического выполнения вычисляется результат суммирования соответствующих попарных произведений вероятностей возможных вариантов фактического выполнения совокупности функций защиты (2.10) и соответствующих частных условных вероятностей (2.11).

Приведем теорему, опуская ее достаточно очевидное доказательство.

Теорема 2.1. Условные вероятности последствий j -го вида в результате воздействия опасных факторов для заданного варианта $[R_1 \dots R_l \dots R_L]$ возможного выполнения совокупности функций защиты однозначно определяются вероятностями вариантов $\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}$ фактического выполнения совокупности функций защиты в соответствии с :

$$\begin{aligned} & \langle s_{i^q j} \rangle_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = \\ & = \sum_{[E_1 \dots E_l \dots E_L]} s_{i^q j}^{\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}} P(\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}) . \end{aligned} \quad (2.24)$$

Определим теперь математические ожидания условных вероятностей последствий j -го вида при воздействии опасных факторов с учетом условных вероятностей (2.24) и распределения вариантов возможного выполнения совокупности функций защиты (2.23). Они могут быть представлены в виде двойной суммы, с внешним суммированием по всем возможным комплексным идентификаторам фактического выполнения определенной совокупности функций защиты попарных

произведений соответствующих коэффициентов (2.23) и внутренних сумм (2.24).

Отметим, что в ряде случаев при известном распределении объектов защиты по подмножествам с заданными вариантами возможного выполнения совокупности функций защиты целесообразно непосредственно использовать (2.24) для определения локальных векторов «ожидаемых потерь» в соответствии с (2.5). При этом для единственного коэффициента конфигурации (2.23) принимается:

$$\beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = 1 .$$

Приведем соответствующую теорему, опуская ее очевидное доказательство.

Теорема 2.2. Математические ожидания условных вероятностей последствий j -го вида в результате воздействия опасных факторов однозначно определяются вероятностями возможных вариантов $\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}$ фактического выполнения совокупности функций защиты, а также конфигурацией распределения объектов защиты по степени защищенности в соответствии с:

$$\begin{aligned} \langle S_{i^q j} \rangle &= \sum_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \cdot \langle S_{i^q j} \rangle_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = \\ &= \sum_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \times \\ &\times \sum_{[E_1 \dots E_l \dots E_L]} S_{i^q j}^{\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}} P(\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}) . \end{aligned} \quad (2.25)$$

Таким образом, с (2.25) завершается определение основных элементов модели. Взаимные связи между введенными выше элементами модели многокомпонентных рисков представлены на рисунке 2.2 в виде общей схемы, на которой отражены только часть дуг, связывающих некоторые из элементов смежных слоев.

Для дальнейшего определения показателей риска необходимо иметь полные наборы установленных частных условных вероятностей событий, связанных с наступлением определенных последствий воздействия опасных факторов (2.11), а также наборы вероятностей возможных вариантов фактического выполнения совокупности функций защиты (2.24).

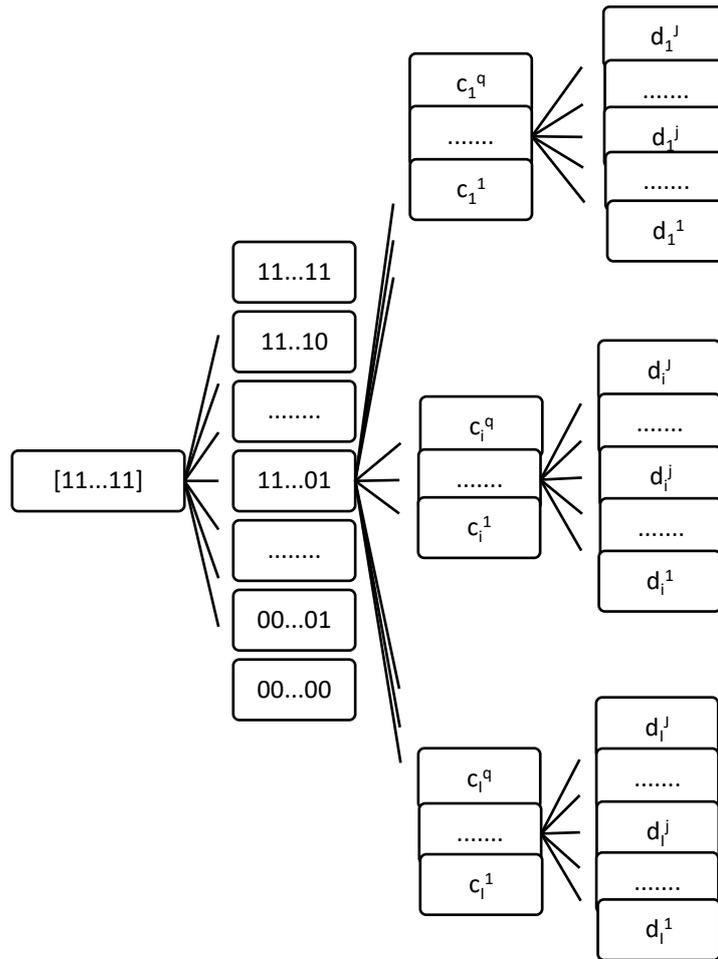


Рисунок 2.2 – Схема связей между элементами модели многокомпонентных рисков

На основе вычисления компонент вектора ожидаемых потерь (2.5) возможно произвести оценку ожидаемых для рассматриваемого множества объектов в течение определенного временного интервала социально-экономических потерь от воздействия исследуемых опасных факторов.

Опуская достаточно очевидные доказательства, приведем лемму и теорему, определяющие связь компонент вектора ожидаемых потерь с распределениями объектов защиты по степени защищенности и по состояниям.

Лемма 2.3. Математические ожидания компонент вектора «ожидаемых потерь»:

$$\mathbf{D} = (d_1, \dots, d_j, \dots, d_J) \in R_{1 \times J}$$

однозначно определяются составляющими по состояниям для объектов защиты:

$$\mathbf{D} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{D}^q, \quad \mathbf{D}^q = (d_1^q, \dots, d_j^q, \dots, d_j^q), \quad d_i = \sum_{q=1}^Q d_i^q. \quad (2.26)$$

Теорема 2.3. Составляющие вектора «ожидаемых потерь» по состояниям объектов защиты однозначно определяются величинами математических ожиданий условных вероятностей наступления последствий j -го вида в результате воздействия опасных факторов в соответствии с:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^q &= \mathbf{C}^q \mathbf{V}^q \mathbf{S}^q = \\ &= (c_1^q \dots c_i^q \dots c_I^q) \begin{pmatrix} v_1^q & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & v_i^q & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & v_j^q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle s_{1^q 1} \rangle & \dots & \langle s_{1^q j} \rangle \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \langle s_{i^q j} \rangle & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \\ \langle s_{I^q 1} \rangle & \dots & \langle s_{I^q j} \rangle \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.6 Постановка задачи многокритериальной комбинаторной оптимизации при риск-ориентированном управлении

Процедура оценки эффективности различных вариантов распределения затрат финансовых средств, а также использования иных ресурсов, выделяемых на модернизацию систем защиты объектов от опасных факторов, либо на изменение состояния объектов защиты зависит от количества возможных вариантов и числа компонент вектора «ожидаемых потерь». При небольшом количестве вариантов распределения затрат и ресурсов, а также при небольшом количестве компонент вектора «ожидаемых потерь» рекомендуется проводить сравнительный анализ визуально представленных данных (рисунки 2.3 и 2.4).

В более сложных случаях процедура оценки эффективности различных вариантов распределения затрат и ресурсов может быть осуществлена на основе решения задач многокритериальной оптимизации.

В рамках настоящей модели рассматривается общая постановка подобных

задач многокритериальной комбинаторной оптимизации для выбора решений при управлении рисками в системах обеспечения безопасности.

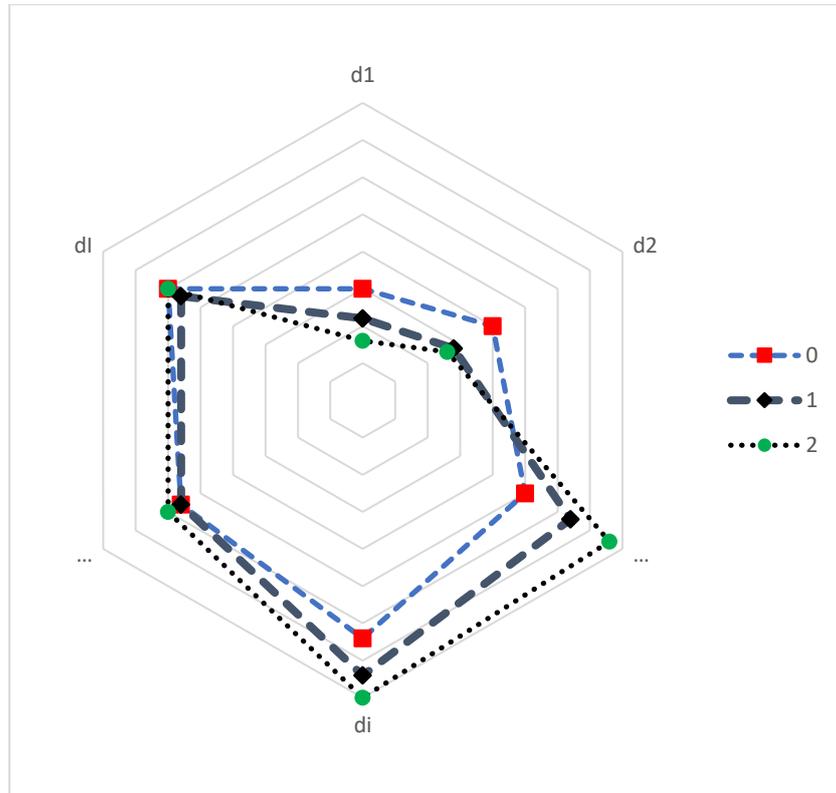


Рисунок 2.3 – Различные варианты (0,1,2) распределения затрат и ресурсов с компонентами вектора «ожидаемых потерь»

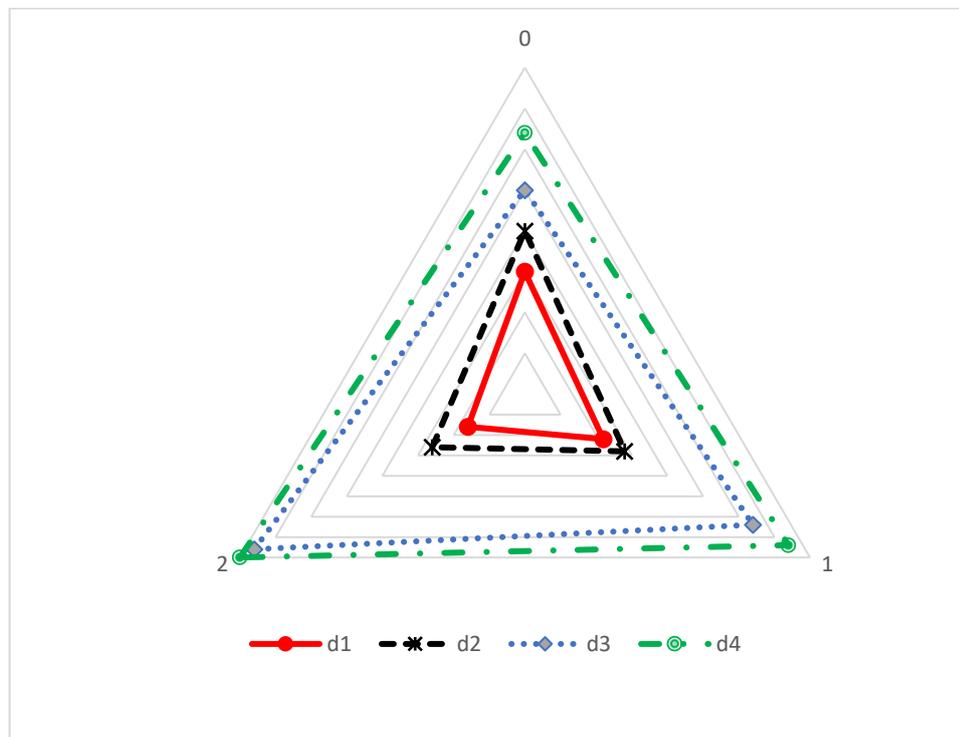


Рисунок 2.4 – Отдельные компоненты вектора «ожидаемых потерь» при различных вариантах (0,1,2) распределения затрат и ресурсов

Решение задачи многокритериальной оптимизации в общем случае состоит из трех этапов [174, 195]. На первом этапе проводится поиск достижимых конфигураций распределения объектов защиты по степени защищенности и/или по состояниям, на втором – определение области достижимых решений в пространстве целевых функций и Парето-оптимального множества решений, на третьем – выбор наилучшей достижимой конфигурации с точки зрения уменьшения ожидаемых потерь в соответствии с установленным решающим правилом отбора решений [174, 195].

Для формализации рассматриваемой задачи многокритериальной оптимизации необходимо определить:

- переменные и параметры;
- накладываемые ограничения;
- область определения в пространстве переменных.

Различные достижимые конфигурации распределения объектов защиты по состояниям, а также конфигурации распределения объектов защиты по степени защищенности могут выступать как в качестве переменных, так и в качестве параметров задачи, в зависимости от варианта распределения затрат финансовых средств или иных ресурсов.

С точки зрения задач риск-ориентированного управления можно выделить три варианта распределения затрат финансовых средств или иных ресурсов:

- на модернизацию систем защиты объектов от опасных факторов;
- на изменение состояния объектов защиты (распределения по состояниям);
- одновременно на модернизацию систем защиты и изменение состояния объектов защиты.

Модернизация систем защиты объектов приводит к изменению конфигурации $B \rightarrow B'$ распределения объектов защиты по степени защищенности (2.23) и в соответствии с (2.25, 2.27) приводит к следующему изменению компонент вектора «ожидаемых потерь»:

$$\Delta D = D(A, B) - D(A, B') \quad . \quad (2.28)$$

Таким образом, в первом варианте параметрами задачи являются конфигурации

распределения объектов защиты по состояниям, а переменными - конфигурации распределения объектов защиты по степени защищенности.

Воздействие на состояния объектов защиты отражается в изменении распределения по состояниям $A \rightarrow A'$ и компонентам вектора (2.2), что непосредственно приводит, согласно (2.27), к изменению компонент вектора «ожидаемых потерь»:

$$\Delta \mathbf{D} = \mathbf{D}(A, B) - \mathbf{D}(A', B) . \quad (2.29)$$

Поэтому, во втором варианте конфигурации распределения объектов защиты по состояниям являются переменными задачи, а параметрами - конфигурации распределения объектов защиты по степени защищенности.

Для третьего варианта, связанного с одновременной как с модернизацией систем защиты, так и с изменением состояния объектов защиты, соответствующее изменение компонент вектора «ожидаемых потерь»:

$$\Delta \mathbf{D} = \mathbf{D}(A, B) - \mathbf{D}(A', B') . \quad (2.30)$$

В данном случае необходимо рассматривать в качестве отдельных переменных как конфигурации распределения объектов защиты по состояниям, так и конфигурации распределения объектов защиты по степени защищенности.

Для интерпретации изменений (2.28–2.30) вектора ожидаемых потерь предлагается ввести сопряженный с ним так называемый «вектор предотвращенных потерь».

Определение 2.6. Вектор предотвращенных потерь сопряжен вектору ожидаемых потерь и представляет комплексную характеристику снижения риска, однозначно связанную с компонентами кортежа (вектора):

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{D} &= (\Delta d_1, \dots, \Delta d_j, \dots, \Delta d_j), \\ \Delta d_j &= d_j(A, B) - d_j(A', B'). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Такая замена векторов позволяет вместо процедуры минимизации компонент вектора «ожидаемых потерь» рассматривать эквивалентную процедуру максимизации вектора «предотвращенных потерь» при соответствующих изменениях конфигураций распределения объектов защиты как по состояниям, так и по степени

защищенности.

Как указывалось выше, в дальнейшем необходимо установить:

- область достижимых решений в пространстве целевых функций;
- Парето-оптимальное множества решений;
- решающее правило выбора.

Заключительный этап состоит в процедуре сравнительного анализа входящих в Парето-оптимальное множество решений в соответствии с решающим правилом для выбора наилучшего из них [174, 195–197]. Дальнейший переход от пространства целевых функций к пространству переменных позволяет установить требуемые конфигурации распределения объектов защиты по степени защищенности и по состояниям, а также соответствующее распределение затрат финансовых средств или иных ресурсов.

Описываемая задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации. Вместе с тем, в соответствии предлагаемым алгоритмом решения выполняется совокупность процедур перебора и сравнения [174, 175, 195–197], поэтому автором предлагается рассматривать ее как задачу многокритериальной комбинаторной оптимизации.

Предлагается следующая обобщенная формулировка задачи многокритериальной комбинаторной оптимизации распределения различного вида ресурсов при управлении многокомпонентными рисками.

Утверждение 2.2. Задача многокритериальной комбинаторной оптимизации состоит в максимизации компонент вектора «предотвращенных потерь» при изменении конфигураций распределения объектов защиты по состояниям и распределения объектов защиты по степени защищенности:

$$\max_{\substack{B \rightarrow B' \\ A \rightarrow A'}} \{\Delta d_1, \dots, \Delta d_j, \dots, \Delta d_J\} \quad (2.32)$$

при ограничениях на затраты Φ и ресурсы Ψ^k , $k = \overline{1, \dots, K}$:

$$\Phi \leq \Phi_{max}, \quad \Psi^k \leq \Psi_{max}^k. \quad (2.33)$$

Применение модели управления многокомпонентными рисками (2.28–2.33)

требует обязательной привязки к предметной области (рисунок 2.5), включающей определение основных факторов исследуемых рисков с их последующей математической формализацией.



Рисунок 2.5 – Общая схема применения модели многокомпонентных рисков

В настоящее время при решении подобных многокритериальных задач преимущественно применяются различные способы скаляризации с аддитивной сверткой критериев [109, 113, 198]. Следует учитывать, что такой подход является по сути эвристическим, поскольку процедура скаляризации не имеет под собой

математической основы. Поэтому целесообразно строить альтернативные алгоритмы решения, в частности, основанные на получении дополнительной информации об относительной важности критериев и использовании ее для решения проблемы сужения множества Парето [199, 200].

Общая методика постановки задачи многокритериальной комбинаторной оптимизации при управлении многокомпонентными пожарными рисками в жилом секторе на определенной территории и подготовки данных для последующего нахождения Парето-оптимального множества решений, представляющих собой варианты финансовых вложений в оборудование зданий средствами противопожарной защиты рассмотрена в [116]. Результаты адаптации построенной автором модели к риск-ориентированному управлению показали эффективность созданного математического инструментария как при оценке вероятностных характеристик выполнения основных функций реальными системами обеспечения безопасности, так и при сравнительном анализе эффективности мероприятий, направленных на повышение готовности и техническую модернизацию систем обеспечения безопасности.

Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований представляется построение моделей оптимального управления многокомпонентными рисками различной природы в социотехнических системах на основе многокритериальной комбинаторной оптимизации затрат и распределения ресурсов в соответствующих системах обеспечения безопасности.

2.7 Выводы по второй главе

1. Совершенствование инструментария математического моделирования многокомпонентных рисков требует применения матричного и многоиндексного представлений композиции вероятностных характеристик возникновения опасных событий и функционирования систем обеспечения безопасности, а также уязвимости и состояний объектов защиты.

2. Многокомпонентные риски могут быть представлены результатом

взаимодействия двух составляющих – «мультипликатора» и «акселератора», связанных в рамках предлагаемой стохастической модели с соответствующими группами элементов и факторов.

3. Применение предлагаемого метода дискретно-событийного моделирования функционирования систем защиты позволяет установить вероятностные характеристики непосредственного выполнения основных функций защиты при реализации угроз различного характера.

4. Применение предлагаемого численного метода определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок возможно при условии задания функциональной связи между результатами субъективной оценки возможностей наступления исходов и объективного измерения их вероятностей в соответствии с психофизическим законом Стивенса.

5. Процедура сравнительного анализа эффективности управления в системах обеспечения безопасности выполнима на основе построенной модели многокомпонентных рисков и применения математического инструментария визуализации компонент «вектора ожидаемых потерь».

6. Математическое обеспечение поддержки риск-ориентированного управления в социотехнических системах должно включать модели и алгоритмы постановки и решения задач многокритериальной комбинаторной оптимизации распределения различного вида ресурсов при управлении многокомпонентными рисками.

7. Предлагаемый метод моделирования многокомпонентных рисков может применяться для исследования различных природных, техногенных и антропогенных рисков, а также при проектировании информационно-аналитических систем и создании программно-аппаратных средств поддержки риск-ориентированного управления в системах обеспечения безопасности.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РИСКОВ

В настоящем разделе представлены результаты проведенных автором исследований многокомпонентных рисков, связанных с возникновением опасных отказов в процессе эксплуатации технических объектов и систем.

Проведено дискретно-событийное моделирование опасных отказов технических объектов (ТО), основанное на представлении обобщенной наработки интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов и учете источников процессов деградации в рамках построенной модели эксплуатационных многокомпонентных рисков.

Основные результаты исследований, изложенные в настоящем разделе, опубликованы автором в серии работ [201–210], в которых приведены результаты моделирования эксплуатационных многокомпонентных рисков в социотехнических системах, порождаемых опасными отказами технических объектов и систем.

3.1 Развитие концепции эксплуатационных многокомпонентных рисков в социотехнических системах

Построение эффективных систем обеспечения безопасности, основанных на современных методах, предполагающих цифровизацию и интеллектуализацию всей совокупности обеспечивающих технических средств и технологий, а также отношений между субъектами в области обеспечения различных сторон жизнедеятельности, является необходимым условием перехода к риск-ориентированному управлению в социотехнических системах и организации деятельности по снижению социально-экономических потерь от угроз различного характера [169–171].

Перспективным направлением снижения социально-экономических потерь, обусловленных различными инцидентами при эксплуатации технических объектов, систем и различного оборудования является формирование специализиро-

ванных социотехнических подсистем, направленных на минимизацию рисков, связанным с эксплуатационными факторами [5–7,10, 20–22, 143–156].

Значительное количество аварий, катастроф и иных чрезвычайных происшествий ситуаций инцидентами, обусловленными так называемыми опасными отказами технических объектов, систем и различного оборудования, под которыми будем понимать отказы, приводящие к нарушению условий и (или) пределов безопасной эксплуатации с потенциальной возможностью возникновения различного рода опасных событий [31–36].

Поэтому становится актуальной проблема создания новых технологий, обеспечивающих регулирование в допустимых пределах уровня эксплуатационных многокомпонентных рисков. Такие технологии могут быть созданы основе организации мониторинга реальных условий и иных факторов эксплуатации [204–207], а также их регулирования путем внедрения соответствующих технических и экономических механизмов [6, 7, 211–215]. В связи с вышесказанным становятся актуальными исследования закономерностей возникновения опасных отказов ТО, которые могут приводить к аварийным ситуациям (рисунок 3.1).

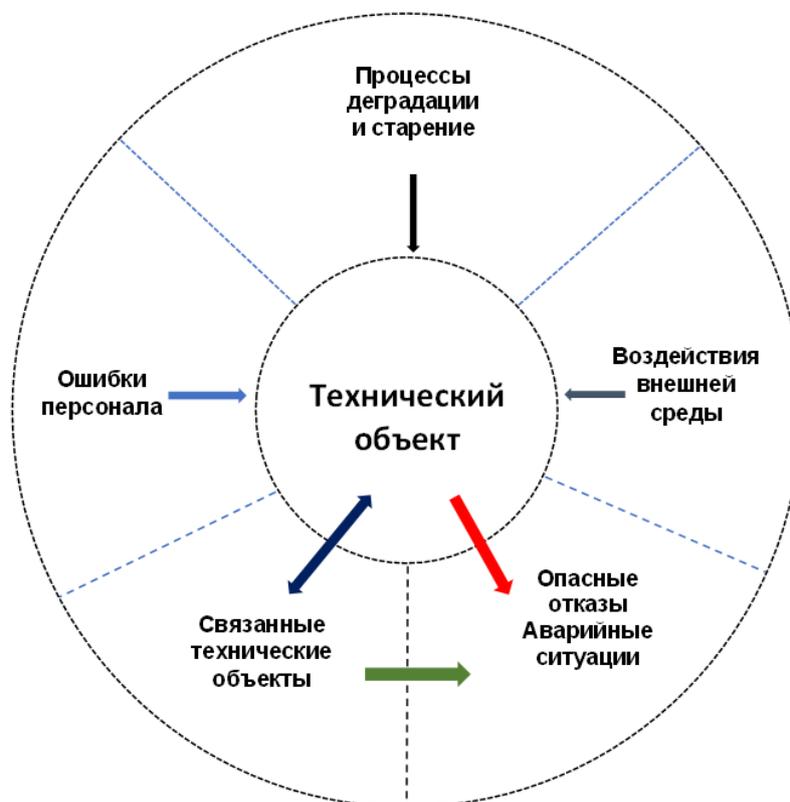


Рисунок 3. 1 – Возникновение опасных отказов технических объектов и систем

Перспективным направлением представляется развитие методов моделирования потоков таких опасных отказов с учетом как реальных, так и возможных условий эксплуатации ТО в различных социотехнических системах.

Согласно основным положениям вероятностно-физических [216–219] и физико-технологических [220–224] моделей, в структуру любого реального технического объекта включается некоторый набор источников процессов деградации (ИПД), представляющих собой материальные носители конкретных возникающих и развивающихся деградационных изменений.

В процессе эксплуатации некоторого множества технических объектов деградационные изменения различных типов и с различными механизмами возникновения порождают потоки возможных режимов отказов, обусловленных соответствующими наборами ИПД.

В рамках развития приведенной концепции построена модель динамики опасных отказов технических объектов, основанная на представлении обобщенной наработки интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов и учете наборов источников процессов деградации.

3.2 Определение основных элементов модели многокомпонентных эксплуатационных рисков

Определим основные элементы модели многокомпонентных эксплуатационных рисков, основанной на построении функций распределения отказов и вероятности безотказной работы в соответствии с правилами описания смеси конкурирующих режимов отказов [225], с последующим выделением опасных отказов.

Введем вероятностное пространство для описания связанных с отдельным режимом отказов событий:

$$(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P}) , \quad (3.1)$$

включающее пространство элементарных событий, сигма-алгебру подмножеств пространства элементарных событий и их вероятностную меру.

Пространство элементарных событий для отдельного режима отказов состоит из несовместных событий «отказ» и «отсутствие отказа», являющихся противоположными и составляющих полную группу:

$$\Omega = \{\phi, \rho\}. \quad (3.2)$$

Сигма-алгебра подмножеств пространства элементарных событий для отдельного режима отказов включает события:

$$\mathfrak{A} = \{\{\phi\}, \{\rho\}, \{\phi, \rho\}, \{\emptyset\}\} \quad (3.3)$$

Вероятности указанных событий определяются вероятностной мерой:

$$P(\phi) = F, P(\rho) = R, \quad (3.4)$$

$$P(\phi, \rho) = 1, P(\emptyset) = 0.$$

Вероятности введенных взаимно противоположных событий отдельного режима отказов изменяются во времени и соответственно определяются как функции F -распределения отказов и R -вероятности безотказной работы:

$$P(\phi) = F(t), P(\rho) = R(t), \quad (3.5)$$

$$P(\phi, \rho) = F(t) + R(t) = 1.$$

Перейдем к построению вероятностного пространства для некоторой совокупности технических объектов одного вида.

Совокупность «технические объекты» распределена по определенным типам и состоит из подмножеств, представленных компонентами вектора (кортежа), численно равными количеству ТО одного типа в соответствующих группах:

$$\mathbf{C} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_l), \quad i \in \{1, \dots, l\}. \quad (3.6)$$

Пронумеруем все возможные режимы отказов ТО определенного типа и введем для них индикаторы с булевыми переменными:

$$E_{l_i} = [1, 0], \quad l_i \in \{1, \dots, L_i\}. \quad (3.7)$$

В подмножествах, включающих определенные типы ТО, необходимо провести дополнительное разбиение по нескольким подгруппам, отличающихся характерными наборами ИПД, порождающими соответствующие наборы конкурирующих режимов отказов. При добавлении набора с режимами без отказов получаем множество возможных режимов отказов технических объектов с булеаном 2^{L_i} .

При этом любой из $2^{L_i} - 1$ возможных наборов конкурирующих режимов отказов соответствует идентификатору, представляющему упорядоченный ненулевой набор булевых индексов длины L_i :

$$\begin{aligned} Q_i &= \{[E_1 \dots E_{l_i} \dots E_{L_i}]\} = \\ &= \{[1 \dots 0 \dots 0], [01 \dots 0 \dots 0], \dots [11 \dots 0 \dots 0], \dots, \\ &\dots [101 \dots 0 \dots 0], \dots [11 \dots 1 \dots 0], [11 \dots 1 \dots 1]\}, \\ |Q_i| &= 2^{L_i} - 1. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Проведем упорядочение, рассматривая каждый из наборов булевых индексов как некоторое целое число, выраженное в двоичной системе счисления. Это позволяет представить рассматриваемые возможные наборы конкурирующих режимов отказов натуральными числами в соответствии с:

$$\begin{aligned} q_i &\leftrightarrow [E_1 \dots E_{l_i} \dots E_{L_i}] \in Q_i, \quad q_i = \overline{1, \dots, (2^{L_i} - 1)}, \\ q_i &= (E_1 \dots E_{l_i} \dots E_{L_i})_2 = \sum_{l_i=1}^{L_i} E_{l_i} \cdot 2^{(L_i-l_i)}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

При моделировании многокомпонентных рисков, порождаемых опасными отказами технических объектов возникает потребность учета долевых распределений как по типам, так и по подгруппам внутри одного типа ТО, в соответствии с реализуемыми наборами конкурирующих режимов отказов. Конкретный вид такого двухступенчатого распределения представляет собой важнейший параметр предлагаемой модели – «конфигурацию распределения».

Утверждение 3.1. Конфигурация долевого распределения совокупности технических объектов по определенным типам и наборам конкурирующих режимов отказов:

$$A = \bigcup_{i=1}^I \bigcup_{q_i \in Q_i} \Gamma^{q_i} = \bigcup_{i=1}^I B_i \bigcup_{q_i \in Q_i} \Theta(q_i), \quad (3.10)$$

различающихся по принадлежности к типам (i) и к различным наборам конкурирующих режимов отказов (q_i).

Введем соответствующие конфигурации (3.10) удельные коэффициенты структуры распределения рассматриваемой совокупности ТО относительно типов и различных наборов конкурирующих режимов отказов:

$$|\Gamma^{q_i}| = \gamma^{q_i}, \quad |B_i| = \beta_i, \quad |\Theta(q_i)| = \vartheta(q_i),$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{q_i \in Q_i} \gamma^{q_i} = \sum_{i=1}^I \beta_i \sum_{q_i=1}^{|Q_i|} \vartheta(q_i) = 1, \quad ,$$

с выполнением условия нормировки для коэффициентов структуры распределения.

Тогда для векторов (3.6) и для их отдельных компонент можно использовать следующие эквивалентные представления:

$$c_i = \bigcup_{q_i \in Q_i} c^{q_i} \leftrightarrow c_i = c_i \bigcup_{q_i \in Q_i} \Theta(q_i) \quad , \quad c_i = \beta_i |C| \quad ,$$

$$C = \left(c_1 \bigcup_{q_1 \in Q_1} \Theta(q_1), \dots, c_i \bigcup_{q_i \in Q_i} \Theta(q_i), \dots, c_I \bigcup_{q_I \in Q_I} \Theta(q_I) \right) .$$

(3.11)

Дальнейшее моделирование направлено на определение текущих вероятностей событий, порождаемых наборами конкурирующих режимов отказов.

3.3 Моделирование отказов общего вида

Моделирование событий в системе «технические объекты определенного типа» основано на рассмотрении подмножеств событий вероятностного пространства, представляющего полную группу несовместных событий «отказы по определенным режимам» и «отсутствие отказа»:

$$\Omega = \left\{ \bigcup_{q_i \in Q_i} \bigcup_{l_i=1}^{L_i} \Phi_{l_i}^{q_i}, \bigcup_{q_i \in Q_i} \rho^{q_i} \right\} .$$

(3.12)

При моделировании отказов для подгруппы из совокупности ТО одного типа, отличающейся характерным набором режимов отказов, рассматривается вероятностное подпространство «технические объекты определенного типа с

определенным набором режимов отказов»:

$$\Omega^{q_i} = \left\{ \bigcup_{l_i=1}^{L_i} \Phi_{l_i}^{q_i}, \rho^{q_i} \right\}. \quad (3.13)$$

Событие «отказ» представляет сумму несовместных элементарных событий, обусловленных возможными конкурирующими режимами отказов:

$$\Phi^{q_i} = \bigcup_{l_i=1}^{L_i} \Phi_{l_i}^{q_i} \quad (3.14)$$

В структуре подпространства (3.13) событие «безотказная работа» является произведением независимых в совокупности событий «безотказная работа отдельного l_i -го режима отказов», представляющих дополнения элементарных событий, обусловленных отдельными возможными конкурирующими режимами отказов:

$$\rho^{q_i} = \prod_{l_i=1}^{L_i} \rho_{l_i}^{q_i} = \prod_{l_i=1}^{L_i} \Omega^{q_i} / \Phi_{l_i}^{q_i} = \prod_{l_i=1}^{L_i} \Omega^{q_i} / \Phi_{l_i}^{q_i} = \prod_{l_i=1}^{L_i} \overline{\Phi_{l_i}^{q_i}} \quad (3.15)$$

Рассмотрим возможные события при эксплуатации технических объектов с наборами источников процессов деградации, порождающими определенные наборы конкурирующих режимов отказов. Вероятности таких событий рассматриваются как текущие и условные, поскольку они изменяются во времени и относятся к определенным возможным наборам режимов отказов, представленных в конфигурации долевого распределения (3.10).

Для отдельного режима отказов в зависимости от его реализации в рассматриваемом наборе отказов текущая функция распределения соответствующей условной вероятности безотказной работы в соответствии с (3.4) принимает вид:

$$R_{l_i} = \begin{cases} R_{l_i} = 1 - F_{l_i}, & l_i \in q_i; \\ 1, & l_i \notin q_i. \end{cases} \quad (3.16)$$

Использование индикаторов возможных отказов, выраженных булевыми переменными, позволяет представить текущую функцию распределения вероятности безотказной работы для отдельного режима отказов как:

$$R_{l_i}^{q_i} = 1 - E_{l_i}^{q_i} F_{l_i}. \quad (3.17)$$

В случае отсутствия конкретного отказа в рассматриваемом наборе отказов, соответствующие значения индикаторов возможных отказов и безотказной работы:

$$\left[E_{l_i}^{q_i} = 0 \right] \leftrightarrow \left[R_{l_i}^{q_i} = 1 \right].$$

Как было рассмотрено выше, событие «безотказная работа» в системе «технические объекты определенного типа при некотором наборе режимов отказов» определяется как произведение независимых в совокупности событий, связанных с отсутствием отдельных возможных отказов. Поэтому условная текущая вероятность этого события - безотказной работы для рассматриваемого набора конкурирующих режимов отказов представляется мультипликативной функцией распределений текущих вероятностей безотказной работы для отдельных режимов отказов:

$$R^{q_i} = \prod_{l_i=1}^{L_i} R_{l_i}^{q_i} = \prod_{l_i=1}^{L_i} \left(1 - E_{l_i}^{q_i} F_{l_i} \right). \quad (3.18)$$

Событие «отсутствие отказа» в системе «технические объекты определенного типа» происходит вследствие реализации одного из событий, входящих в полную группу в соответствии с принадлежностью к различным наборам конкурирующих режимов отказов. Его вероятность определяется в соответствии с правилами нахождения полной вероятности, представляющей сумму произведений вероятностей событий полной группы и соответствующих условных вероятностей безотказной работы при отдельных наборах отказов.

С учетом конфигурации распределения (3.10) по наборам конкурирующих режимов отказов и (3.18) текущая вероятность безотказной работы для отдельного ТО, принадлежащего совокупности ТО данного типа c_i , представляется как:

$$R_i = \sum_{q_i \in Q_i} \vartheta(q_i) R^{q_i} = \sum_{q_i \in Q_i} \vartheta(q_i) \prod_{l_i=1}^{L_i} R_{l_i}^{q_i} = \sum_{q_i \in Q_i} \vartheta(q_i) \prod_{l_i=1}^{L_i} \left(1 - E_{l_i}^{q_i} F_{l_i} \right). \quad (3.19)$$

Представим текущую функцию распределения отказов в соответствии с (3.5) и учитывая (3.16–3.19), для отдельного ТО, принадлежащего совокупности ТО одного типа c_i , следующим образом:

$$\begin{aligned}
F_i = 1 - R_i &= 1 - \sum_{q_i \in Q_i} \vartheta(q_i) \prod_{l_i=1}^{L_i} R_{l_i}^{q_i} = \\
&= 1 - \sum_{q_i \in Q_i} \vartheta(q_i) \prod_{l_i=1}^{L_i} (1 - E_{l_i}^{q_i} F_{l_i}) .
\end{aligned} \tag{3.20}$$

3.4 Моделирование с выделением опасных отказов

Технические объекты отличаются характерными наборами источников процессов деградации, порождающих потоки возможных режимов отказов, которые могут приводить к возникновению опасных инцидентов различного вида. Поэтому среди возможных наборов конкурирующих режимов отказов необходимо выделить наборы, содержащие опасные режимы отказов, соответствующие рассматриваемому виду угроз.

Проведем разбиение каждой группы «технические объекты одного типа» на две подгруппы, отличающихся наборами конкурирующих режимов отказов, соответственно включающих и не включающих опасные режимы:

$$Q_i = \{q_i\} = Q_i^f \cup Q_i^{\bar{f}} = \{q_i^f\} \cup \{q_i^{\bar{f}}\} . \tag{3.21}$$

Перенумеруем все возможные режимы отказов ТО одного типа с введением соответствующих булевых индикаторов для опасных и неопасных режимов отказов:

$$\begin{aligned}
L_i &= L_i^f + L_i^{\bar{f}} , \\
l_i \in l_i^f \cup l_i^{\bar{f}} &\in \{1^f, \dots, L_i^f\} \cup \{1^{\bar{f}}, \dots, L_i^{\bar{f}}\} ,
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$E_{l_i^f} = [1,0], E_{l_i^{\bar{f}}} = [1,0] .$$

Использование обозначений (3.22) позволяет перейти к представлению подгрупп ТО каждого типа с характерными наборами источникам процессов деградации, порождающих соответствующие наборы конкурирующих режимов отказов,

совокупностями упорядоченных наборов булевых индексов длины L_i , разделенных на группы наборов индексов, включающих и не включающих опасные режимы отказов:

$$q_i = q_i^f \cup q_i^{\bar{f}} = \begin{cases} q_i^f = \left[E_{l_1^f}^{q_i} \dots E_{l_i^f}^{q_i} \dots E_{L_i^f}^{q_i} \mid E_{l_1^{\bar{f}}}^{q_i} \dots E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i} \dots E_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i} \right], & \text{если } \exists E_{l_i^f}^{q_i} = 1; \\ q_i^{\bar{f}} = \left[E_{l_1^f}^{q_i} \dots E_{l_i^f}^{q_i} \dots E_{L_i^f}^{q_i} \mid E_{l_1^{\bar{f}}}^{q_i} \dots E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i} \dots E_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i} \right], & \text{если } \nexists E_{l_i^f}^{q_i} = 1. \end{cases} \quad (3.23)$$

Согласно (3.23), общая совокупность наборов конкурирующих режимов отказов разбивается на совокупности двух видов, содержащие конкурирующие опасные режимы отказов и состоящие исключительно из конкурирующих неопасных режимов, которые имеют вид:

$$q_i = q_i^f \cup q_i^{\bar{f}} = \begin{cases} q_i^f \in Q_i = \left\{ \underbrace{0 \dots 1 \dots 0}_{L_i^f} \underbrace{0 \dots 1 \dots 0}_{L_i^{\bar{f}}} \right\}; \\ q_i^{\bar{f}} \in Q_i = \left\{ \underbrace{0 \dots 0 \dots 0}_{L_i^f} \underbrace{0 \dots 1 \dots 0}_{L_i^{\bar{f}}} \right\}. \end{cases} \quad (3.24)$$

Между общим количеством ранее введенных возможных режимов отказов ТО одного типа, а также количествами опасных и неопасных режимов выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} |Q_i| &= |Q_i^f| + |Q_i^{\bar{f}}| = \\ &= (2^{L_i^f} - 1) 2^{L_i^{\bar{f}}} + (2^{L_i^{\bar{f}}} - 1) = 2^{L_i^f} \cdot 2^{L_i^{\bar{f}}} - 1 = 2^{L_i} - 1. \end{aligned}$$

Произведем детализацию рассматриваемой совокупности технических объектов одного вида, аналогично ранее проведенной во второй главе диссертации декомпозиции (2.2) совокупности «объекты защиты». В результате получим конфигурацию распределения ТО по типам, соответствующим функциональному назначению, а также характерным наборам источникам процессов деградации, порождающих различные наборы конкурирующих режимам отказов.

Далее, из всевозможных наборов необходимо провести процедуру выделения подгрупп ТО с такими наборами конкурирующих режимов отказов, которые включают в себя режимы возможных опасных отказов, а также режимы возможных

неопасных отказов. При этом указанные режимы рассматриваются по отношению к угрозам определенного характера и обозначаются соответствующими верхними индексами f или \bar{f} .

Утверждение 3.2. Конфигурация распределения совокупности «технические объекты» по типам объектов и наборам конкурирующих режимов отказов с разделением опасных и неопасных наборов отказов:

$$A = \bigcup_{i=1}^I \left(\bigcup_{q_i^f \in Q_i} \Gamma^{q_i^f} + \bigcup_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \Gamma^{q_i^{\bar{f}}} \right) = \bigcup_{i=1}^I B_i \left(\bigcup_{q_i^f \in Q_i} \Theta(q_i^f) + \bigcup_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \Theta(q_i^{\bar{f}}) \right), \quad (3.25)$$

$$\sum_{i=1}^I \left(\sum_{q_i^f} \gamma^{q_i^f} + \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \gamma^{q_i^{\bar{f}}} \right) = \sum_{i=1}^I \beta_i \left(\sum_{q_i^f} \vartheta(q_i^f) + \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \vartheta(q_i^{\bar{f}}) \right) = 1,$$

различающихся по принадлежности к типам объектов и наборам конкурирующих режимов отказов с разделением на опасные и неопасные в соответствии с:

$$c_i = c_i^f + c_i^{\bar{f}}, \quad c_i^f = c_i \bigcup_{q_i^f \in Q_i} \Theta(q_i^f), \quad c_i^{\bar{f}} = c_i \bigcup_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \Theta(q_i^{\bar{f}}), \quad (3.26)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}^f + \mathbf{C}^{\bar{f}}, \quad \mathbf{C}^f = (c_1^f, \dots, c_i^f, \dots, c_I^f), \quad \mathbf{C}^{\bar{f}} = (c_1^{\bar{f}}, \dots, c_i^{\bar{f}}, \dots, c_I^{\bar{f}}).$$

Приведем выражения, определяющие функции текущей вероятности безотказной работы для отдельного ТО, принадлежащего совокупности ТО данного типа. При этом проведем, согласно (3.25), разбиение множества наборов режимов отказов, выделяя подмножества наборов, содержащие и не содержащие конкурирующие опасные режимы отказов. В определенной таким образом первой подгруппе наборов необходимо учитывать как опасные, так и неопасные режимы отказов. Во второй подгруппе наборов опасные режимы отказов не содержатся и поэтому учитываются только неопасные режимы отказов.

Функция распределения во времени текущей вероятности безотказной работы для первой и второй групп наборов конкурирующих режимов отказов принимает вид:

$$\begin{aligned}
R^{q_i^f} &= \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f} \cdot \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} = \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} \left(1 - E_{l_i^f}^{q_i^f} F_{l_i^f}\right) \cdot \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \left(1 - E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} F_{l_i^{\bar{f}}}\right) = \\
&= \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}, \tag{3.27} \\
R^{q_i^{\bar{f}}} &= \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}} = \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \left(1 - E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}} F_{l_i^{\bar{f}}}\right) = \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}},
\end{aligned}$$

где для сокращения записи введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
\Xi_{L_i^f}^{q_i^f} &= \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f} = \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} \left(1 - E_{l_i^f}^{q_i^f} F_{l_i^f}\right), \\
\Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} &= \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} = \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \left(1 - E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} F_{l_i^{\bar{f}}}\right), \tag{3.28} \\
\Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}} &= \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}} = \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \left(1 - E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}} F_{l_i^{\bar{f}}}\right).
\end{aligned}$$

Общая функция распределения во времени текущей вероятности безотказной работы для ТО одного типа с учетом конфигурации (3.25) и разделения (3.27) по принадлежности к подгруппам наборов конкурирующих режимов отказов:

$$\begin{aligned}
R_i &= \sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) \cdot R^{q_i^f} + \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \vartheta(q_i^{\bar{f}}) \cdot R^{q_i^{\bar{f}}} = \\
&= \sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) \cdot \left(\Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right) + \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \vartheta(q_i^{\bar{f}}) \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}. \tag{3.29}
\end{aligned}$$

Используя (3.26–3.27), выразим общую функцию распределения во времени отказов для общей совокупности технических объектов одного типа с учетом с учетом конфигурации (3.18) и разделения (3.20) по принадлежности к подгруппам наборов конкурирующих режимов отказов:

$$\begin{aligned}
F^i = 1 - R_i &= 1 - \left[\sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) R^{q_i^f} + \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \vartheta(q_i^{\bar{f}}) R^{q_i^{\bar{f}}} \right] = \\
&= 1 - \left[\sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) \cdot \left(\Xi_{L_i}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i}^{q_i^{\bar{f}}} \right) + \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \vartheta(q_i^{\bar{f}}) \cdot \Xi_{L_i}^{q_i^{\bar{f}}} \right].
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Проведем дальнейшее преобразование общей функции распределения во времени отказов (3.30) с целью представления ее в виде суммы функций распределения, соответствующих исключительно опасным и исключительно неопасным отказам.

Автором получены аналитические выражения, соответствующие распределению во времени для функций исключительно опасных и исключительно неопасных отказов. Предлагаемая процедура вывода основана на построении промежуточной дискретно-событийной модели для определенного набора режимов отказов, содержащего конкурирующие опасные режимы отказов, и последующим ее обобщением на всю совокупность технических объектов одного типа.

1. Рассмотрим вероятностное подпространство (3.13), представляющего совокупность возможных событий для некоторого отдельного набора режимов отказов, содержащего конкурирующие опасные режимы отказов. Полная группа событий состоит из противоположных событий «отказ» и «отсутствие отказа»:

$$\Omega^{q_i} = \{\Phi^{q_i}, \overline{\Phi^{q_i}}\}, \tag{3.31}$$

При этом, возможно представить событие «отказ» суммой двух несовместных событий «опасный отказ» и «неопасный отказ»:

$$\Phi^{q_i} = \Phi_f^{q_i} + \Phi_{\bar{f}}^{q_i}, \quad \Phi_f^{q_i} \cdot \Phi_{\bar{f}}^{q_i} = \emptyset, \tag{3.32}$$

Отсюда следует, что три несовместные события: «опасный отказ», «неопасный отказ», а также «отсутствие отказа» также образуют полную группу событий:

$$\Omega^{q_i} = \{\Phi_f^{q_i}, \Phi_{\bar{f}}^{q_i}, \overline{\Phi^{q_i}}\} \tag{3.33}$$

Для вероятностей рассматриваемых событий справедливы следующие соотношения:

$$P(\phi^{q_i}) + P(\overline{\phi^{q_i}}) = 1, \quad (3.34)$$

$$P(\phi) = P(\phi_f^{q_i}) + P(\phi_{\bar{f}}^{q_i}).$$

2. Рассмотрим структуру вероятностного пространства (3.12), учитывая разделение на два пространства, соответствующие разделению ТО на наборы режимов отказов, включающие и не включающие опасные конкурирующие режимы отказов:

$$\Omega = \bigcup_{q_i \in Q_i} \Omega^{q_i} = \bigcup_{q_i^f \in Q_i} \Omega^{q_i^f} \cup \bigcup_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \Omega^{q_i^{\bar{f}}}, \quad (3.35)$$

$$\Omega^{q_i^f} = \{ \phi^{q_i^f}, \rho^{q_i^f} \}, \quad \Omega^{q_i^{\bar{f}}} = \{ \phi^{q_i^{\bar{f}}}, \rho^{q_i^{\bar{f}}} \}.$$

Первое из двух введенных в (3.35) вероятностных пространств состоит из вероятностных подпространств, представляющих совокупности событий, связанных с подгруппами «ТО определенного типа с определенным набором режимов отказов включающим опасные конкурирующие режимы отказов», а второе – из подпространств, представляющих совокупности событий, связанных с подгруппами «ТО определенного типа с определенным набором режимов отказов не включающим опасные конкурирующие режимы отказов».

Для вероятностных подпространств, принадлежащих введенным в (3.35) вероятностным пространствам, определим соотношения для вероятностей событий, образующих, согласно (3.33), полную группу, в соответствии с (3.13–3.15), (3.32–3.32) и (3.35):

$$\phi^{q_i^f} = \bigcup_{l_i^f=1}^{L_i^f} \phi_{l_i^f}^{q_i^f} + \bigcup_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}, \quad \rho^{q_i^f} = \bigcap_{l_i^f=1}^{L_i^f} \overline{\phi_{l_i^f}^{q_i^f}} \cdot \bigcap_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \overline{\phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}} \quad (3.36)$$

$$\phi^{q_i^{\bar{f}}} = \bigcup_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}, \quad \rho^{q_i^{\bar{f}}} = \bigcap_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \overline{\phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}}.$$

События «отказ» представлены в (3.36), суммами несовместных событий, обусловленных возможными конкурирующими режимами отказов, а события

«отсутствие отказа» определяется произведением событий, представляющих отсутствие отдельных возможных отказов. Вероятностные подпространства, принадлежащие ко второму вероятностному пространству, не включают, согласно (3.36) события, связанные с опасными отказами.

Используя (3.36), получаем представление введенных в (3.35) вероятностных пространств в виде следующих совокупностей элементарных событий:

$$\bigcup_{q_{i_i}^f \in Q_i} \Omega^{q_i^f} = \left\{ \bigcup_{q_{i_i}^f \in Q_i} \bigcup_{l_i^f=1}^{L_i^f} \phi_{l_i^f}^{q_i^f}, \bigcup_{q_{i_i}^f \in Q_i} \bigcup_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}, \bigcup_{q_{i_i}^f \in Q_i} \left[\bigcap_{l_i^f=1}^{L_i^f} \overline{\phi_{l_i^f}^{q_i^f}} \cdot \bigcap_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \overline{\phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}} \right] \right\}, \quad (3.37)$$

$$\bigcup_{q_{i_i}^{\bar{f}} \in Q_i} \Omega^{q_i^{\bar{f}}} = \left\{ \bigcup_{q_{i_i}^{\bar{f}} \in Q_i} \bigcup_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}, \bigcup_{q_{i_i}^{\bar{f}} \in Q_i} \left[\bigcap_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \overline{\phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}} \right] \right\}.$$

3. Установим на основе (3.37) соотношения между вероятностями событий, связанных с исключительно опасными и исключительно неопасными отказами для вероятностных подпространств, принадлежащие к первому вероятностному пространству.

Событие «отказ» для ТО с характерным набором ИПД, порождающих как опасные, так и неопасные конкурирующие в одном наборе режимы отказов, можно представить суммой несовместных событий «опасный отказ» и «неопасный отказ», и вероятность этого события определяется как:

$$\phi^{q_i^f} = \phi_f^{q_i^f} + \phi_{\bar{f}}^{q_i^f}, \quad (3.38)$$

$$P(\phi^{q_i^f}) = P(\phi_f^{q_i^f}) + P(\phi_{\bar{f}}^{q_i^f}).$$

Событие «отсутствие отказа» в рассматриваемом наборе режимов отказов является произведением независимых в совокупности событий (3.27), представляющих отсутствие отдельных конкурирующих в одном наборе режимов возможных отказов (которые могут относиться как опасным, так и к неопасным отказам), поэтому его вероятность:

$$\rho^{q_i^f} = \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} \overline{\phi_{l_i^f}^{q_i^f}} \cdot \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \overline{\phi_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}}, \quad (3.39)$$

$$P(\rho^{q_i^f}) = \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f} \cdot \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}$$

Событие «отказ» является противоположным событию «отсутствие отказа», поэтому его вероятность, равная сумме вероятностей несовместных событий «опасный отказ» и «неопасный отказ» может быть определена разностью:

$$\begin{aligned} P(\phi^{q_i^f}) &= P(\phi_f^{q_i^f}) + P(\phi_{\bar{f}}^{q_i^f}) = 1 - P(\rho^{q_i^f}) = \\ &= 1 - \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f} \cdot \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Рассмотрим соотношения между событиями «опасный отказ» «неопасный отказ». Событие «отказ» включает в себя несовместные события «опасный отказ» и «неопасный отказ», а также происходит только с одним из этих событий, поэтому является их суммой в соответствии с:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_f^{q_i^f} \cdot \phi_{\bar{f}}^{q_i^f} + \phi_{\bar{f}}^{q_i^f} \cdot \phi_f^{q_i^f} = \phi^{q_i^f}, \\ \phi_f^{q_i^f} \subset \phi^{q_i^f}, \quad \phi_{\bar{f}}^{q_i^f} \subset \phi^{q_i^f}, \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \phi_f^{q_i^f} \cdot \phi_{\bar{f}}^{q_i^f} = \phi_f^{q_i^f}, \\ \phi_{\bar{f}}^{q_i^f} \cdot \phi_f^{q_i^f} = \phi_{\bar{f}}^{q_i^f}, \\ \phi^{q_i^f} = \phi_f^{q_i^f} + \phi_{\bar{f}}^{q_i^f}. \end{array} \right. \quad (3.41)$$

При условии возникновения события «отказ», рассматриваемые события «опасный отказ» и «неопасный отказ» образуют полную группу и оказываются противоположными.

С учетом (3.41) приведем следующие соотношения между условными и безусловными вероятностями:

$$P\left(\phi_f^{q_i^f} \mid \phi^{q_i^f}\right) = \frac{P\left(\phi_f^{q_i^f} \cdot \phi^{q_i^f}\right)}{P\left(\phi^{q_i^f}\right)} = \frac{P\left(\phi_f^{q_i^f}\right)}{P\left(\phi^{q_i^f}\right)},$$

(3.42)

$$P\left(\phi_{\bar{f}}^{q_i^f} \mid \phi^{q_i^f}\right) = \frac{P\left(\phi_{\bar{f}}^{q_i^f} \cdot \phi^{q_i^f}\right)}{P\left(\phi^{q_i^f}\right)} = \frac{P\left(\phi_{\bar{f}}^{q_i^f}\right)}{P\left(\phi^{q_i^f}\right)},$$

Отметим, что возникновение событий «опасный отказ», «неопасный отказ» обусловлено двумя независимыми в рамках настоящей модели, рассматривающей конкурирующие режимы отказов, потоками случайных событий, которые объединены в единый поток и приводят к событию «отказ».

Поэтому правомерно принятие гипотезы о том, что вероятности событий «опасный отказ» и «неопасный отказ» описываются некоторой мультипликативной функцией от распределений текущих вероятностей безотказной работы для отдельных конкурирующих режимов отказов, отличающейся от функции вида (3.18) и (3.40) наличием неопределенного множителя, представляющего собой функцию времени:

$$P\left(\phi_f^{q_i^f}\right) = \Theta^{q_i^f}(t) \left(1 - \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f}\right)$$

(3.43)

$$P\left(\phi_{\bar{f}}^{q_i^f}\right) = \Theta^{q_i^f}(t) \left(1 - \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f}\right).$$

С другой стороны очевидно, что из (3.41–3.42) следует равенство взаимных отношений условных и безусловных вероятностей событий «опасный отказ» и «неопасный отказ» в любой момент времени.

Тогда, в момент возникновения события «отказ» взаимное отношение условных вероятностей для любого момента времени, согласно (3.43), определяется следующим образом:

$$\frac{P\left(\Phi_f^{q_i^f} \mid \Phi_i^{q_i^f}\right)}{P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^f} \mid \Phi_i^{q_i^f}\right)} = \frac{P\left(\Phi_f^{q_i^f}\right)}{P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^f}\right)} =$$

$$= \left(1 - \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} R_{l_i^f}^{q_i^f}\right) / \left(1 - \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} R_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right)$$
(3.44)

Составим на основе (3.40) и (3.44), следующую систему уравнений, применив представление (3.28) для сокращения записи:

$$\left\{ \begin{array}{l} P\left(\Phi_f^{q_i^f}\right) + P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^f}\right) = 1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}, \\ \frac{P\left(\Phi_f^{q_i^f}\right)}{P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^f}\right)} = \frac{1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f}}{1 - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}}. \end{array} \right.$$
(3.45)

Решение системы (3.45) позволяет определить значения вероятностей событий «опасный отказ» и «неопасный отказ» для ТО с характерным набором ИПД, порождающих как опасные, так и неопасные конкурирующие в одном наборе режимы отказов:

$$P\left(\Phi_f^{q_i^f}\right) = \frac{\left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right) \cdot \left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f}\right)}{2 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}},$$

$$P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^f}\right) = \frac{\left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right) \cdot \left(1 - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right)}{2 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}}.$$
(3.46)

Событие «отказ» для ТО с характерным набором ИПД, порождающих только неопасные конкурирующие в одном наборе режимы отказов, совпадает с событием «неопасный отказ», и вероятность этого события определяется как:

$$\Phi^{q_i^{\bar{f}}} = \Phi_{\bar{f}}^{q_i^{\bar{f}}},$$

(3.47)

$$P\left(\Phi^{q_i^{\bar{f}}}\right) = P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^{\bar{f}}}\right).$$

Для любого набора, не содержащего опасные режимы отказов, текущая вероятность события «неопасный отказ» определяется как вероятность события, противоположного событию «отсутствие отказа» и, в соответствии с (3.27), выражается как:

$$P\left(\Phi_{\bar{f}}^{q_i^{\bar{f}}}\right) = 1 - R^{q_i^{\bar{f}}} = 1 - \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \left(1 - E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}} F_{l_i^{\bar{f}}}\right) = \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}. \quad (3.48)$$

Подстановка текущих вероятностей (3.46, 3.48) в (3.30) позволяет получить аналитическое выражение функции распределения отказов для совокупности технических объектов одного типа с опасными и неопасными наборами конкурирующих режимов отказов, представляя его в виде суммы функций распределения, соответствующих исключительно опасным и исключительно неопасным отказам:

$$F_i^f = \sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) \cdot \frac{\left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right) \cdot \left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f}\right)}{2 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}},$$

$$F_i^{\bar{f}} = \sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) \cdot \frac{\left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right) \cdot \left(1 - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right)}{2 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}} +$$

$$+ \sum_{q_i^{\bar{f}} \in Q_i} \vartheta(q_i^{\bar{f}}) \cdot \left(1 - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^{\bar{f}}}\right).$$
(3.49)

Дальнейшее моделирование направлено на определение текущих вероятностей событий, порождаемых реализацией опасных режимов отказов ТО с учетом реальных условий эксплуатации.

3.5 Моделирование режимов отказов с учетом обобщенной наработки и использованием распределения Вейбулла

Построим общую модель, позволяющую описать влияние на характеристики надежности и безопасности технических объектов разнообразных эксплуатационных факторов. Выделим и рассмотрим динамику одного из возможных режимов отказов на основе использования трехпараметрического распределения Вейбулла, получившего широкое распространение при моделировании широкого спектра данных из распределений отказов различных ТО с возрастающей, убывающей и постоянной интенсивностью [224, 225].

Закономерности изменений во времени показателей надежности при эксплуатации ТО, отражаются в поведении функций опасности (интенсивности отказов), при этом выделяются отдельные периоды эксплуатации, которые можно отследить на так называемой кривой жизни ТО. Как правило, эта кривая имеет U-образную форму (рисунок 3.2), интерпретируемую как изменение в течение трех периодов эксплуатации динамики интенсивности отказов: приработки, нормальной эксплуатации, интенсивного износа и старения. Следует отметить, что указанные элементы U-образной кривой характерны не для всех ТО, в частности, для большинства электрорадиоэлементов слабо выражен либо отсутствует участок, соответствующий нормальной эксплуатации [220].

При моделировании и оценке интенсивности потока эксплуатационных отказов сложных ТО непосредственное использование временных параметров некорректно и ключевым понятием является, согласно [204, 205], некоторая «обобщенная наработка технического объекта», которую следует определить следующим образом.

Определение 3.1. Обобщенная наработка – скалярная величина, являющаяся мерой изменения качества технического объекта вследствие эксплуатационного износа и деградационных процессов, представляемая интегральным функционалом вида:

$$\Theta(\vec{f}, t) = \int_{t_0}^T L(\vec{f}, t) dt, \quad (3.50)$$

берущим в качестве аргумента некоторую траекторию изменения состояния под воздействием различных эксплуатационных факторов и возвращающим в качестве результата вещественное число.

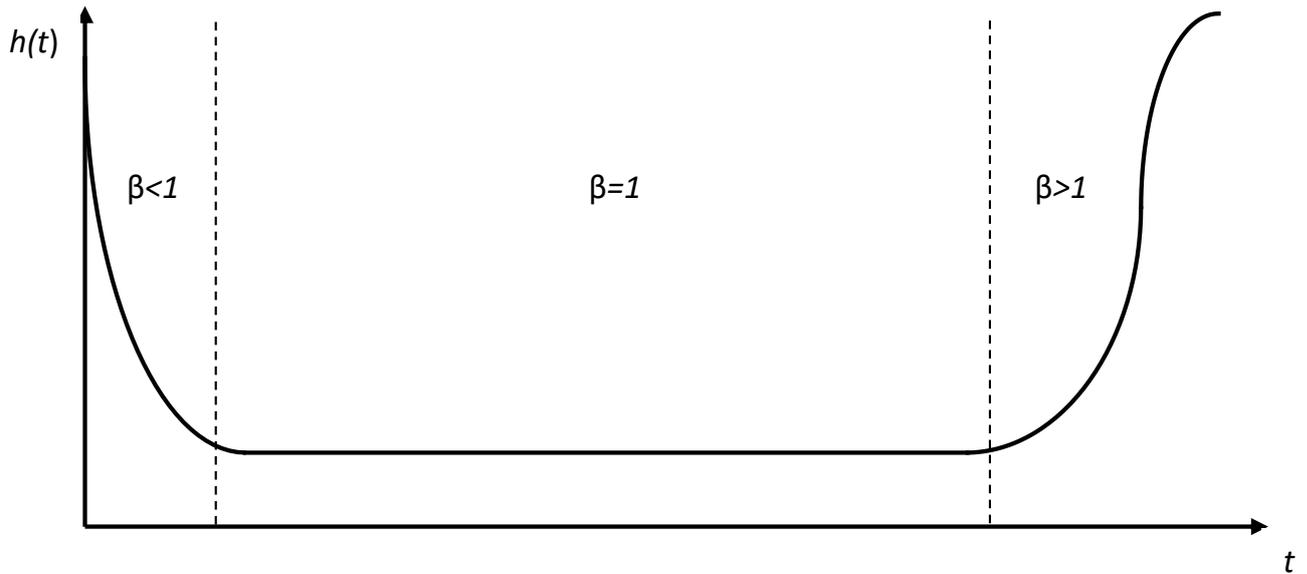


Рисунок 3.2 – Типовая функция опасности (интенсивности отказов) технического объекта [215]

Определение 3.2. Текущее количественное значение обобщенной наработки $\tau(t)$ рассматривается как эквивалент срока эксплуатации технического объекта при нормальных условиях (с соответствующим обозначением в размерности времени).

Найдем функцию распределения отказов технических объектов определенного типа, преобразуя (3.20) с учетом (3.50) и представлением вероятностей безотказной работы для отдельных режимов отказов трехпараметрическими распределениями Вейбулла:

$$F_i = \sum_{q_i \in Q_i} \vartheta(q_i) \left[1 - \exp \left(- \sum_{l_i=1}^{L_i} E_{l_i}^{q_i} \left(\frac{\tau - \theta_{l_i}}{\eta_{l_i}} \right)^{\beta_{l_i}} \right) \right] \quad (3.51)$$

Мгновенные интенсивности отказов или функции опасности описываются соответствующими трехпараметрическими распределениями:

$$\lambda_{l_i} = \beta_{l_i} \frac{(\tau - \theta_{l_i})^{\beta_{l_i}-1}}{\eta_{l_i}^{\beta_{l_i}}}$$

где: коэффициенты η_* , θ_* и β_* определяют масштаб, сдвиг и форму для функции зависимости интенсивности λ_* соответствующего режима отказов (обозначаемого *) от времени.

Основной вклад в общую статистику отказов на отдельных этапах времени эксплуатации обусловлен режимами отказов с наибольшими текущими значениями интенсивностей. Доминирующие режимы отказов обусловлены соответствующими интенсивностями, поведение которых определяется значениями коэффициентов формы распределений:

$$\lambda_r = \beta_r \frac{(\tau - \theta_r)^{\beta_r-1}}{\eta_r^{\beta_r}} \quad \beta_r < 1$$

$$\lambda_s = \beta_s \frac{(\tau - \theta_s)^{\beta_s-1}}{\eta_s^{\beta_s}} \quad \beta_s = 1$$

$$\lambda_a = \beta_a \frac{(\tau - \theta_a)^{\beta_a-1}}{\eta_a^{\beta_a}} \quad \beta_a < 1$$

где нижние индексы соответствуют режимам приработки (run), нормальной эксплуатации (stable), старения и износа (aging).

Период приработки начинается с момента начала эксплуатации ТО и характеризуется достаточно быстрым снижением интенсивности отказов, обусловленных наличием не выявленного производственного брака.

Вероятность возникающих в период приработки отказов стремятся исключить, выявляя скрытые дефекты монтажа и изготовления, отбраковывая элементы и др., поэтому коэффициент масштаба можно интерпретировать как количественную характеристику эффективности системы контроля качества выпускаемой продукции. Как правило, проявление скрытых дефектов становится возможным с момента начала эксплуатации, при этом можно принять нулевое значение коэффициента сдвига. Для периода старения и износа характерен заметный рост интенсивности отказов, обусловленный интенсивным износом и необратимыми физико-химическими процессами старения материалов, из которых состоят рабочие элементы

оборудования и иных технических объектов.

В работах [204–207] автором приводятся аргументы о целесообразности объединения периода нормальной эксплуатации с периодом старения и износа в случаях, когда характерные отказы обусловлены одними и теми же деградиационными физико-химическими процессами.

3.6 Моделирование режимов опасных отказов

Применение ранее полученных представлений (3.50) и (3.49) функций распределения отказов с соответствующим учетом значений функционала наработки (3.50) и использованием трехпараметрических распределений Вейбулла для описания отказов позволяют построить эффективный математический инструментарий для исследования динамики отказов и решения ряда задач по определению различных параметров надежности и безопасности эксплуатации технических объектов.

Найдем аналитические решения для функции распределения опасных отказов с соответствующим учетом обобщенной наработки, выражаемой интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов и представлением вероятностей безотказной работы трехпараметрическими распределениями Вейбулла.

Вероятность возникновения опасного отказа для совокупности ТО одного типа в течение заданного интервала эксплуатации по времени определяется разностью функций распределения исключительно опасных отказов (3.49), соответствующим, с учетом зависимости (3.50), значениям функционала наработки в моменты времени начала и завершения рассматриваемого интервала:

$$\Delta F_i^f(t_1; t_2) = F_i^f(\tau_2 = \tau(t_2)) - F_i^f(\tau_1 = \tau(t_1)) \quad (3.52)$$

Проведем преобразование функции распределения опасных отказов (3.49) с учетом значений функционала наработки (3.50) и представлением вероятностей безотказной работы трехпараметрическими распределениями Вейбулла.

Введем следующие обозначения, позволяющие компактно записать выражения для функции распределения опасных отказов в различные моменты времени:

$$\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_j) = \sum_{l_i^f=1}^{L_i^f} E_{l_i^f}^{q_i^f} \left(\frac{\tau_j - \theta_{l_i^f}}{\eta_{l_i^f}} \right)^{\beta_{l_i^f}}, \quad \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_j) = \sum_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} \left(\frac{\tau_j - \theta_{l_i^{\bar{f}}}}{\eta_{l_i^{\bar{f}}}} \right)^{\beta_{l_i^{\bar{f}}}} \quad (3.53)$$

В результате указанных преобразований функции распределения опасных отказов (3.49) с использованием обозначений (3.53) получим следующее общее аналитическое выражение, определяющее вероятность (3.52) возникновения опасного отказа для совокупности ТО одного типа в течение заданного временного интервала:

$$F_i^f(\tau_2) - F_i^f(\tau_1) = \sum_{q_i^f \in Q_i} \alpha^{q_i^f} \times$$

$$\times \left[\frac{\left(1 - \exp \left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_2) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_2) \right) \right) \cdot \left(1 - \exp \left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_2) \right) \right)}{\exp \left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_2) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_2) \right)} - \right.$$

$$\left. - \frac{\left(1 - \exp \left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_1) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_1) \right) \right) \cdot \left(1 - \exp \left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_1) \right) \right)}{\exp \left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_1) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_1) \right)} \right]. \quad (3.54)$$

Дальнейшее развитие модели эксплуатационных рисков основано на представлении обобщённой наработки интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов с учётом наборов источников процессов деградации.

Предлагаемая общая модель может применяться при выявлении закономерностей возникновения опасных инцидентов с учётом как текущих, так и достижимых условий эксплуатации технических объектов. Применение модели эксплуатационных рисков для прогнозирования потоков опасных инцидентов позволяет решать ряд задач риск-ориентированного управления различными видами безопасности в социотехнических системах.

3.7 Выводы по третьей главе

1. Дискретно-событийное моделирование многокомпонентных эксплуатационных рисков, основанное на гипотезе о наборах источников процессов деградации, порождающих потоки независимых отказов, позволяет получить аналитические решения для функций распределения опасных отказов технических объектов и систем.

2. В рамках построенной модели эксплуатационных многокомпонентных рисков установлена связь параметров источников процессов деградации с обобщенной наработкой, представленной интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов, позволяющая формировать математический инструментарий прогнозирования опасных отказов технических объектов и систем.

3. Использование распределений Вейбулла для задания интенсивностей потоков отказов позволяет получить аналитические выражения для описания динамики опасных отказов технических объектов и определения функции распределения опасных отказов с учетом значений функционала наработки.

4. Методы и модели, основанные на определении конфигурации распределения технических объектов по типам и наборам конкурирующих режимов отказов с разделением опасных и неопасных наборов отказов, а также соответствующих функций распределения исключительно опасных отказов с учетом значений функционала наработки позволяют сформировать необходимый математический инструментарий исследования вероятно-временных характеристик многокомпонентных эксплуатационных рисков.

5. Предлагаемая стохастическая модель эксплуатационных многокомпонентных рисков совместима с базовой моделью многокомпонентных рисков и может применяться при решении прикладных задач математического и информационно-аналитического обеспечения риск-ориентированного управления в системах безопасности, в частности, связанных с прогнозированием потоков инцидентов, инициирующих опасные события, а также ожидаемых социально-экономических потерь.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДНЫХ СЦЕНАРИЕВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ

В настоящем разделе изложены результаты проведенных автором исследований многокомпонентных рисков, обусловленных различными угрозами в социотехнических системах, основанных на дискретно-событийном моделировании опасных процессов развития инцидентов и аварий по каскадному сценарию.

Построена стохастическая модель, описывающая в рамках марковского процесса развитие инициируемых локальными инцидентами аварий и катастроф по каскадным сценариям с ветвящейся структурой и позволяющая прогнозировать возникновение аварийных и критических состояний, а также изменение вероятностных характеристик своевременности и эффективности возможных воздействий при оперативном реагировании на инциденты.

Основные результаты исследований, изложенные в настоящем разделе, опубликованы автором в серии работ [144–146, 169–171, 207–210], в которых приведены результаты моделирования различных процессов, связанных с возникновением и развитием инцидентов и аварий по каскадному сценарию.

4.1 Анализ методов прогнозирования развития кризисных ситуаций по каскадным сценариям

Техногенные аварии и природные катастрофы часто представляют собой совокупности взаимосвязанных событий, разворачивающихся поэтапно в течение более или менее продолжительного временного интервала по определенным типам каскадных сценариев, в которых аварии и/или отказы одних элементов порождают отказы и/или аварии других элементов в рамках одной системы, либо нескольких взаимодействующих систем. При анализе безопасности объектов производственной, социальной, транспортной, инженерной, информационной инфраструктуры

необходимо рассматривать возможные сценарии каскадного развития инцидентов, аварий и катастроф.

Моделирование динамики реальных аварийных либо опасных природных процессов вызывает интерес, поскольку устанавливает «окна возможностей» – интервалы своевременности и эффективности для целенаправленного воздействия по предотвращению развития неблагоприятных сценариев развития событий. В этой связи математическое моделирование динамики вероятных сценариев при инцидентах, авариях, катастрофах и стихийных бедствиях, с построением превентивных риск-ориентированных алгоритмов оперативного реагирования является важным направлением развития систем информационно-аналитического обеспечения и поддержки управления в системах обеспечения безопасности.

Наиболее актуальные задачи состоят в обосновании решений, направленных на предотвращение опасных сценариев развития опасных процессов и снижение общих потерь. Позитивное влияние на динамику событий и эффективность любого комплекса возможных целенаправленных воздействий при оперативном реагировании на инциденты требует максимального использования имеющейся информации различной степени полноты о текущем состоянии объекта и тенденциях развития опасного процесса, поступающей в результате регистрации и обработки данных технических средств мониторинга.

Определенный теоретический и практический интерес представляет развитие методов дискретно-событийного моделирования развития аварий и катастроф техногенного и природного происхождения по каскадному сценарию, являющихся основой решения прикладных задач математического и информационно-аналитического обеспечения риск-ориентированного управления в СОБ. Моделирование каскадных сценариев позволяет формировать аналитические, численные или алгоритмических процедуры поиска частных решений задач, направленных на прогнозирование динамики возникновения кризисных ситуаций и выявление вероятностных характеристик своевременности и эффективности возможных целенаправленных воздействий, оказывающих при оперативном реагировании существенное влияние на дальнейшие сценарии событий и окончательные исходы опасных процессов.

4.2 Обоснование гипотез и элементов стохастической модели

Предлагаемая стохастическая модель состоит в описании динамики возникновения и развития аварий и катастроф техногенного и природного происхождения в рамках случайного процесса с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. К основным параметрам такого представления:

$$\Xi(t) = \{S, Q\} \quad (4.1)$$

относятся:

- множество дискретных состояний процесса:

$$S = \{S_i\}, \quad i = \overline{1, \dots, n}.$$

- вектора начального и текущего состояний, компонентами которых являются вероятности состояний системы в начальный и текущий моменты времени:

$$P(0) = (p_1^0, \dots, p_n^0), \quad P(t) = (p_1, \dots, p_n) \in R_{1 \times n} \quad (4.2)$$

- матрица интенсивностей переходов между состояниями

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & \dots & \dots & \dots & q_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & q_{ij} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & \dots & \dots & \dots & q_{nn} \end{pmatrix} \in R_{n \times n},$$

где интенсивности определяются пределом отношения вероятности перехода между состояниями к временному интервалу:

$$q_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}.$$

Интенсивности переходов могут зависеть от времени, т. е. рассматриваемый случайный процесс является неоднородным. Следует также отметить, что определение состояний случайного процесса требует корректного кодирования перечня состояний, а также зависит от интерпретации понятия «состояние» в конкретной системе.

Приведем основные гипотезы, допущения и ограничения, принимаемые при построении предлагаемой стохастической модели техногенных аварий и катастроф.

Первая гипотеза, которая лежит в основе предлагаемого способа стохастического моделирования, заключается в предположении о каскадном характере развития аварий и катастроф, инициируемых различными инцидентами, заключающемся в возможности реализации ряда неблагоприятных сценариев вследствие возникновения инициирующего события (аварийной ситуации). При этом возможно разделение любой реализующейся последовательности событий по этапам, характеризующимся определенной длительностью развития, степенями текущей опасности состояний системы и возможностями дальнейшего перехода к критическим состояниям последующих уровней с возрастанием степени опасности и/или усилением проявления неблагоприятных факторов.

В общем случае на процессы развитие инцидентов влияет вся предыстория событий, т. е. переходы между состояниями могут зависеть не только от предыдущего, но и от ряда предшествующих состояний, и формально описываются моделью, относящейся к классу немарковских случайных процессов. Вместе с тем, при моделировании многие немарковские процессы удается трансформировать за счет расширения числа состояний в марковские случайные процессы. Основное допущение связано с возможностью описания наблюдаемой динамики реальных систем на основе уравнений Колмогорова в рамках модели неоднородных марковских процессов с дискретным набором состояний при непрерывном потоке времени.

Вторая гипотеза связана с предположением о древовидной структуре наблюдаемой последовательности событий с ветвлением при переходах на последующие уровни. Соответствующие сценарии возможных реализаций последовательности элементарных событий отражаются как совокупности переходов между состояниями моделируемой системы. Представление множества состояний системы вершинами размеченного стратифицированного графа, построенного на рисунке 4.1, отображает иерархическую структуру переходов, разграничивая этапы последовательности событий в соответствии с динамикой развития аварийной ситуации и выделением страт различных уровней, включающих наборы близких по степени опасности состояний.

В основе третьей гипотезы лежит эмпирически оправданное предположение

о значительных отличиях в наблюдаемой динамике на различных этапах развития аварийной ситуации. По мере развития событий и возрастании угроз на последующих уровнях происходит качественное изменение динамики переходов между принадлежащими к смежным стратам возможными состояниями системы.

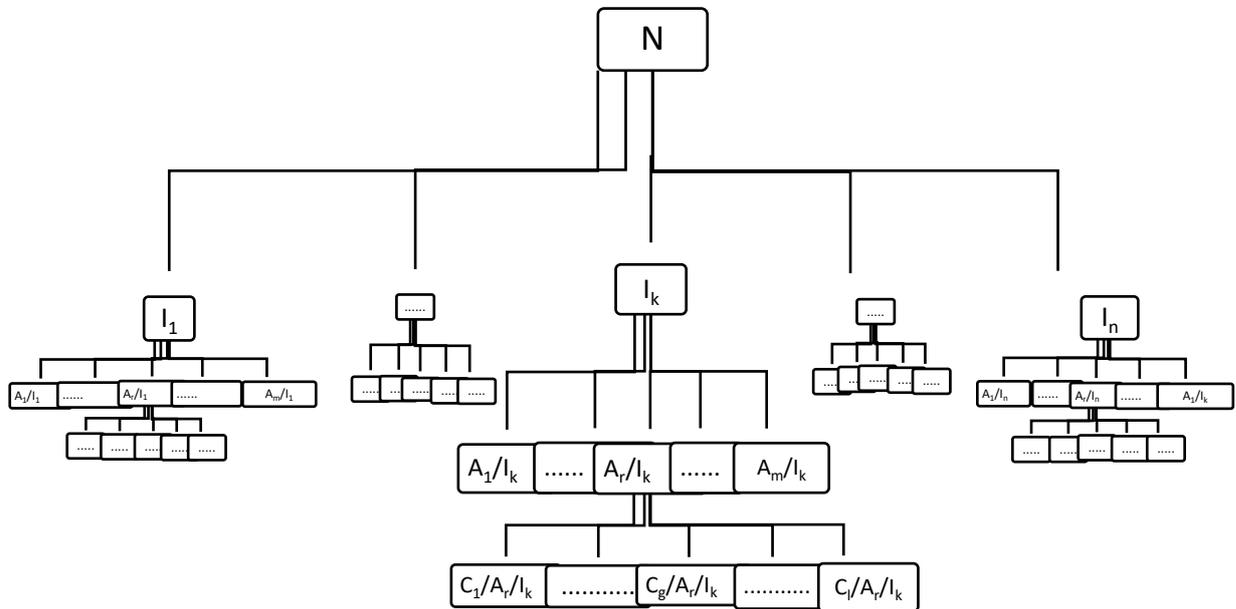


Рисунок 4. 1 – Стратифицированный граф состояний системы «потенциально опасный объект – инцидент, авария, катастрофа»

Еще одно предположение связано с подбором подходящих законов для адекватного описания временной зависимости интенсивности переходов между состояниями, с учетом определенных этапов развития аварийной ситуации. Представляется обоснованным использование трехпараметрических распределений Вейбулла, позволяющих быстро и легко из анализа статистических данных либо с помощью экспертных методов осуществлять подбор необходимых параметров, при которых достигается достаточно точное соответствие изменения интенсивностей переходов между состояниями и наблюдаемой динамикой развития аварийных ситуаций и катастроф.

Определим систему «потенциально опасный объект – инцидент, авария, катастрофа» (ПОО–ИАК) (в англоязычной версии *potentially hazardous facility – incident, accident, catastrophe (PHF–IAC)*). Такая система может быть представлена размеченным стратифицированным графом:

$$\mathbf{G}(\mathbf{S}, \mathbf{E}) \quad (4.3)$$

Множество вершин графа (рисунок 4.1) совпадает с множеством состояний с разбиением на страты, соответствующие определенным этапам развития аварийной ситуации:

$$\mathbf{S} = \mathbf{N} \cup \mathbf{I} \cup \mathbf{A} \cup \mathbf{C}, \quad \mathbf{N} \cap \mathbf{I} = \emptyset, \quad \mathbf{I} \cap \mathbf{A} = \emptyset, \quad \mathbf{A} \cap \mathbf{C} = \emptyset.$$

Множества состояний, соответствующих стратам, обозначается символами \mathbf{N} – нормальное состояние (Normal); \mathbf{I} – инцидент (incident); \mathbf{A} – авария (accident); \mathbf{C} – катастрофа (catastrophe) и включают отдельные состояния:

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= \{N\}, & |\mathbf{N}| &= 1, \\ \mathbf{I} &= \{I_k\}, & k &= \overline{1, \dots, n}, \\ \mathbf{A} &= \{A_r\}, & r &= \overline{1, \dots, m}, \\ \mathbf{C} &= \{C_g\}, & g &= \overline{1, \dots, l}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Элементы множества дуг графа соответствуют возможным переходам между состояниями:

$$\mathbf{E} \subseteq \mathbf{S} \times \mathbf{S},$$

при этом каскадный характер развития аварий и катастроф отражается на отборе элементов множества дуг:

$$\begin{cases} \mathbf{E} \subseteq \mathbf{N} \times \mathbf{I} \cup \mathbf{I} \times \mathbf{A} \cup \mathbf{A} \times \mathbf{C}, \\ \mathbf{E} \not\subseteq \mathbf{I} \times \mathbf{I} \cup \mathbf{A} \times \mathbf{A} \cup \mathbf{C} \times \mathbf{C}, \end{cases} \quad (4.5)$$

поскольку в качестве возможных рассматриваются только переходы между состояниями, принадлежащим к смежным стратам.

Возможные сценарии развития событий при возникновении инцидента рассматриваются как композиции последовательности произошедших событий, которые представляются простыми ориентированными маршрутами в графе, соединяющем начальные и конечные состояния, относящиеся к стратам различного уровня.

В случае моделирования переходов между состояниями в рамках процесса марковского типа необходимо учитывать предысторию переходов на одно предшествующее состояние. При детализации состояний уровня \mathbf{A} (авария) необходимо в этом случае учитывать их связи с предыдущими состояниями уровня \mathbf{I} (инцидент), представляя множеством вершин, принадлежащих к данной страте графа (4.3), в

интенсивности λ_* переходов между состояниями (обозначенных $*$) от времени.

В качестве третьего предположения принимается следующая интерпретация основных этапов развития аварий и катастроф в рамках предлагаемой каскадной модели (4.3–4.11).

Первый этап обусловлен переходом из единого состояния «норма» в одно из состояний, включаемых в агрегированное состояние «инцидент». Спонтанное формирование некоторого потенциально опасного предаварийного состояния системы может быть описано в приближении однородного пуассоновского процесса.

Дальнейшее развитие событий по одному из неблагоприятных сценариев связано с вторым этапом, представляющим обусловленный нарушением нормального функционирования системы переход из потенциально опасного предаварийного состояния к одному из критических состояний следующего уровня, соответствующих агрегированному состоянию «авария». Возможен некоторый временной сдвиг при перераспределении элементов системы либо трансформации запасенной энергии. При этом формируются предпосылки возникновения с нарастающей по времени интенсивностью переходов к последующим критическим состояниям следующего уровня опасности, для которого характерны процессы неконтролируемой интенсивной диссипации запасенной энергии.

Переход к третьему этапу может произойти в ходе дальнейшей трансформации системы и связан с возникновением критического события, характеризующегося резким выделением значительной доли запасенной энергии, приводящим к разрушению основных элементов системы, а также воздействию опасных факторов на находящиеся в зоне поражения людей и иные объекты. Также при определении момента этого перехода необходимо учитывать некоторый возможный временной сдвиг, обусловленный изменением элементов системы и дальнейшей трансформацией энергии системы.

В качестве четвертого этапа развития событий могут рассматриваться различные возможные последующие переходы к состояниям системы, связанным с возникновением и дальнейшим развитием по некоторым неблагоприятным сценариям чрезвычайных ситуаций соответствующих масштабов.

4.4 Моделирование динамики развития аварий и катастроф по каскадному сценарию

4.4.1 Моделирование отдельных этапов развития аварий и катастроф по каскадному сценарию

Рассмотрим подход к моделированию динамики отдельных этапов развития аварий и катастроф по каскадному сценарию, основанный на поиске некоторых локальных решений для критических состояний в системе «потенциально опасный объект – инцидент, авария, катастрофа».

Описание возможных сценариев развития последовательности событий в системе ПОО–ИАК как правило, требует разграничения общего сценария возникновения различных инцидентов и развития аварийных ситуаций на этапы, отличающиеся определенными характерными уровнями текущей опасности и возможностями дальнейшего перехода к более опасным состояниям, динамикой и длительностью развития процессов [144–146].

Неблагоприятные сценарии развития инцидентов представляют цепочки событий, в которых события последующих этапов отличаются резким возрастанием уровня опасности, приводя к возникновению катастрофического события (пожар, взрыв, химическое заражение или радиоактивное загрязнение и т. п.), сопровождающегося воздействием опасных факторов на объекты и людей, попавших в зону поражения, с формированием ЧС соответствующего масштаба [130–159].

Возможность предотвращения развития событий по неблагоприятному сценарию с дальнейшим снижением уровня опасности вплоть до исчезновения угроз и ликвидации негативных последствий инцидента обусловлена своевременными действиями со стороны оперативных и аварийно-спасательных подразделений служб экстренного реагирования. Значительному повышению оперативности реагирования экстренных служб могут способствовать информационно-аналитические системы поддержки управления различными видами безопасности, обеспечивающие непрерывность мониторинга, а также идентификацию инцидентов и

оперативное информирование в реальном масштабе времени о развитии аварийной ситуации [169–171, 201–203, 226–228].

Поэтому представляет интерес моделирование динамики развития опасных событий при инцидентах, основанное на получении отдельных локальных решений системы дифференциальных уравнений Колмогорова (4.9) с заданными распределениями Вейбулла (4.11), описывающих интенсивности переходов между принадлежащим к смежным этапам состояниями системы ПОО–ИАК.

В общем случае, как следует из графа состояний системы (рисунок 4.1), вектор состояния системы ПОО–ИАК содержит $l+n+nm+nml$ компонент. Однако при рассмотрении локальных решений строится вектор состояний с минимальным количеством компонент, соответствующим рассматриваемым переходным процессам и состояниям.

4.4.2 Моделирование динамики первого этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию

Моделирование динамики первого этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию позволяет оценить возможность возникновения инициирующего события, обусловленного различными типами возможных инцидентов, и порождающего совокупность событий, развивающихся по каскадному сценарию с ветвящейся структурой.

Необходимым условием моделирования динамики формирования инициирующего события является определение численных значений интенсивностей изменения вероятностей возникновения возможных инцидентов. Множество инцидентов разбивается на подмножества «инцидент типа $k \in \{1, \dots, n\}$ », включающие соответствующие инциденты определенного типа. При этом предполагается, что рассматриваемые при моделировании возможные инциденты представляют собой достаточно редкие события, интенсивность которых постоянна во времени.

Возможные события, входящие в рассматриваемую совокупность (событие «норма» и набор событий «инцидент типа $k \in \{1, \dots, n\}$ »), несовместны и их

композиция является достоверным событием. Таким образом, указанные события образуют пространство элементарных событий моделируемой системы ПОО–ИАК.

Компоненты ожидаемого в определенный момент вектора состояний системы ПОО–ИАК представляют вероятности состояния «норма» и набора состояний «инцидент k -го типа»:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1(t) = \{P_N, P_{I_1}, \dots, P_{I_k}, \dots, P_{I_n}\}, \\ P_N + P_{I_1} + \dots + P_{I_k} + \dots + P_{I_n} = 1. \end{cases} \quad (4.12)$$

Условие нормировки для суммы вероятностей соответствующих несовместных событий отражено во втором уравнении системы. Вероятности рассматриваемых событий являются функциями времени (для сокращения записи в соответствующих компонентах вектора состояний временную зависимость не указываем) и определяются на основании локального решения, состоящего в решении первых $n+1$ уравнений системы (4.9).

При рассмотрении агрегированного аварийного состояния «инцидент» в качестве компонент ожидаемого в определенный момент вектора состояний системы ПОО–ИАК принимаются вероятности соответствующих несовместных событий:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1(t) = \{P_N, P_I\}, \\ P_N + P_I = 1, \\ P_I = P_{I_1} + \dots + P_{I_k} + \dots + P_{I_n}. \end{cases} \quad (4.13)$$

Результатом моделирования динамики первого этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию является нахождение компонент ожидаемого вектора состояний, численно равных вероятностям возникновения иницирующих событий, обусловленных соответствующими возможными инцидентами различных типов. Приведем результаты оценки компонент ожидаемого вектора состояний для достаточно коротких относительно обратных коэффициентов масштаба (4.10) временных интервалов.

Если ограничиться рассмотрением событий, связанных с переходами от безаварийного состояния «норма» к агрегированному состоянию «инцидент»,

4.4.3 Моделирование динамики второго этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию

Моделирование динамики второго этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию позволяет получить количественную оценку параметров, определяющих длительность временного лага между реализовавшимся на предшествующем этапе инициирующим событием, обусловленным переходом в состояние «инцидент k -го типа» и возможным аварийным событием, связанным с переходом в состояние «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа».

Аварийное событие, в свою очередь, может порождать цепочки дальнейших событий, развивающихся по каскадному сценарию с ветвящейся структурой.

Процедура и результаты моделирования динамики формирования аварийного события при возникновении инцидентов зависят от полноты информации как о типе инициирующего инцидента, так и о типе аварии. В начале моделирования данного этапа необходимо принять условие, согласно которому в случае поступления информации о произошедшем инциденте (приеме сообщения о произошедшей аварии) первая компонента вектора состояния системы ПОО–ИАК приравнивается к нулю и исключается из дальнейшего рассмотрения.

При построении модели данного этапа определяется пространство элементарных событий, представляющих собой все возможные события «инцидент k -го типа» и «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа».

Входящие в рассматриваемую совокупность события несовместны, и их композиция является достоверным событием. Компоненты ожидаемого в определенный момент вектора состояний системы ПОО–ИАК представляют вероятности совокупности наборов состояний «инцидент k -го типа» и состояний «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа».

Ожидаемый текущий вектор состояний системы ПОО–ИАК в общем случае включает $n + nm$ компонент, которые могут быть представлены с учетом суммы вероятностей соответствующих несовместных событий в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}(t) = \{P_{I_1}, \dots, P_{I_k}, \dots, P_{I_n}, P_{A_1/I_1}, \dots, P_{A_r/I_k}, \dots, P_{A_m/I_n}\}, \\ P_{I_1} + \dots + P_{I_k} + \dots + P_{I_n} + P_{A_1/I_1} + \dots + P_{A_r/I_k} + \dots + P_{A_m/I_n} = 1. \end{array} \right. \quad (4.16)$$

Вышеуказанные вероятности являются функциями времени (для сокращения записи в компонентах вектора состояния временная зависимость не указывается) и определяются на основании локального решения, состоящего в решении первых $n+nm$ уравнений системы (4.9).

При поиске наборов частных решений системы дифференциальных уравнений Колмогорова (4.9) необходимо учитывать поступающую в результате регистрации и обработки данных технических средств мониторинга информацию различной степени полноты о текущем состоянии объекта и тенденциях развития опасного процесса в системе ПОО–ИАК.

В случаях, когда имеется достоверная информация о конкретном типе произошедшего инцидента, то начальная вероятность соответствующего состояния принимается равной единице, и при дальнейшей детализации рассматривается только соответствующий начальный на данном этапе вектор состояний и его производные компоненты.

Приведем пример для случая поступления достоверной информации о событии «инцидент k -го типа».

Вследствие полученной информации отпадает необходимость моделирования соответствующих иным типам инцидентов каскадных сценариев, представленных $n-1$ ветвями стратифицированного графа состояний системы ПОО–ИАК. Таким образом, при известном инициирующем начальном событии рассматриваем в качестве возможных только последующие события «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа». Тогда $nm + 1$ компонент текущего вектора состояний системы ПОО–ИАК могут быть представлены с учетом нормировки суммы вероятностей соответствующих несовместных событий в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}_2(t) = \{P_{I_k}, P_{A_1/I_k}, \dots, P_{A_r/I_k}, \dots, P_{A_m/I_k}\}, \\ P_{I_k} + P_{A_1/I_k} + \dots + P_{A_r/I_k} + \dots + P_{A_m/I_k} = 1. \end{array} \right. \quad (4.17)$$

При рассмотрении агрегированного аварийного состояния «авария, обусловленная инцидентом k -го типа» в качестве компонент ожидаемого в определенный момент вектора состояний системы ПОО–ИАК принимаются вероятности соответствующих несовместных событий:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2(t) = \{P_{I_k}, P_{A/I_k}\}, \\ P_{I_k} + P_{A/I_k} = 1, \\ P_{A/I_k} = P_{A_1/I_k} + \dots + P_{A_r/I_k} + \dots + P_{A_m/I_k}. \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Результатом моделирования динамики второго этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию является нахождение компонент ожидаемого вектора состояний, численно равных вероятностям возникновения аварийных событий, обусловленных развитием реализовавшегося на предшествующем этапе иницирующего события.

Переходы между состояниями в системе ПОО–ИАК для второго этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию описываются системой уравнений (4.9) в предположении (4.10) об изменении в соответствии с трехпараметрическими распределениями Вейбулла интенсивности переходов между состояниями системы. При дальнейшем моделировании необходимо учитывать, что каждый из коэффициентов сдвига θ_* в (4.11) характеризуется ожидаемым моментом, начиная с которого становится возможным переход к аварийному сценарию развития событий, и в случае имеющейся информации о наличии соответствующих сложившихся условий принимается равным нулю.

Приведем результаты моделирования второго этапа развития аварий и катастроф по каскадному сценарию в системе ПОО–ИАК.

Представим событие, заключающееся в продолжающемся пребывании системы в состоянии «инцидент k -го типа» в виде произведения событий, каждое из которых является противоположным к событию, связанному с переходом в состояние «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа»:

$$I_k = \bar{A}/I_k = \bar{A}_1/I_k \cap \bar{A}_2/I_k \cap \dots \cap \bar{A}_m/I_k,$$

Аналогично представим событие, заключающееся в переходе системы из

состояния «инцидент k -го типа» в одно из состояний «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа» в виде суммы событий, связанных с переходом в состояние «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа»:

$$\bar{I}_k = A/I_k = A_1/I_k \cup A_2/I_k \cup \dots \cup A_m/I_k .$$

Вероятности возникновения аварийных ситуаций описываются переходами из состояния «инцидент k -го типа» к состояниям «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа» и могут быть достаточно точно описаны на основе системы приближенных выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{I_k}(t) = P_{\bar{A}/I_k}(t) \approx \\ \approx e^{-\left\{ \left(\frac{t-\theta_{A_1/I_k}}{\eta_{A_1/I_k}} \right)^{\beta_{A_1/I_1}} + \dots + \left(\frac{t-\theta_{A_r/I_k}}{\eta_{A_r/I_k}} \right)^{\beta_{A_r/I_k}} + \dots + \left(\frac{t-\theta_{A_m/I_k}}{\eta_{A_m/I_k}} \right)^{\beta_{A_m/I_k}} \right\}} \\ \\ P_{\bar{I}_k}(t) = P_{A/I_k}(t) \approx \\ \approx 1 - e^{-\left\{ \left(\frac{t-\theta_{A_1/I_k}}{\eta_{A_1/I_k}} \right)^{\beta_{A_1/I_1}} + \dots + \left(\frac{t-\theta_{A_r/I_k}}{\eta_{A_r/I_k}} \right)^{\beta_{A_r/I_k}} + \dots + \left(\frac{t-\theta_{A_m/I_k}}{\eta_{A_m/I_k}} \right)^{\beta_{A_m/I_k}} \right\}} \end{array} \right. \quad (4.19)$$

$$\left(\frac{t-\theta_{A_1/I_k}}{\eta_{A_1/I_k}} \right)^{\beta_{A_1/I_1}} + \dots + \left(\frac{t-\theta_{A_r/I_k}}{\eta_{A_r/I_k}} \right)^{\beta_{A_r/I_k}} + \dots + \left(\frac{t-\theta_{A_m/I_k}}{\eta_{A_m/I_k}} \right)^{\beta_{A_m/I_k}} \ll 1$$

Локальное решение уравнений системы (4.9) в виде (4.19) с задаваемыми согласно (4.11) интенсивностями переходов между основными состояниями системы ПОО–ИАК, представляет собой аналитическое описание временных зависимостей для вероятностей нахождения системы ПОО–ИАК в состояниях «инцидент k -го типа» и агрегированных аварийных состояниях «авария, обусловленная инцидентом k -го типа», выполняющееся с достаточно хорошим приближением при небольших длительностях процесса.

Необходимо отметить, что при моделировании на временных интервалах, сравнимых с длительностью переходных процессов, требуется учет условных финальных вероятностей (4.10) переходов из рассматриваемого состояния в одно из состояний смежного уровня.

Локальные решения, подобные (4.19), достаточно адекватно описывают динамику развития аварийных ситуаций в случаях, когда возможно ограничиться рассмотрением событий, связанных с возникновением аварийной ситуации общего

типа, обусловленной развитием реализовавшегося на предшествующем этапе инициирующего события. Практическим приложением данного решения может быть основанная на нем процедура определения «окна возможностей» - временного интервала, в течение которого целесообразно осуществление деятельности по подавлению либо локализации инициирующего события и предотвращению последующих событий, приводящих к развитию ситуации по одному из возможных неблагоприятных сценариев.

На рисунке 4.2 приведены обобщенные результаты моделирования с использованием (4.19) для описания динамики свободного развития инцидента с переходом в аварийное состояние.

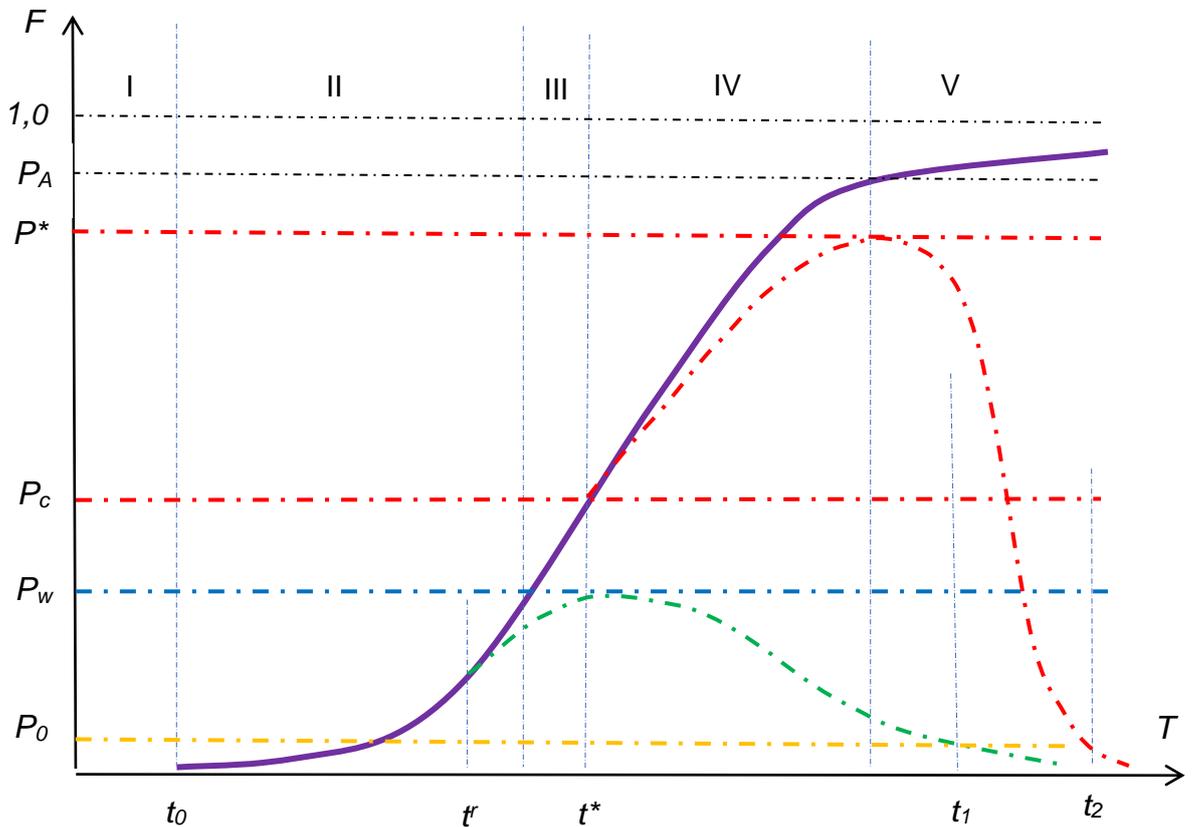


Рисунок 4.2 – Результаты моделирования динамики второго этапа с текущими вероятностями возникновения критического состояния с точки зрения целесообразности и допустимости производства АСНР: P_0 – незначительная, P_w – допустимая, P_c и P^* – предельно допустимые для начала АСНР и продолжения АСНР, P_c – аварийная (переход к третьему этапу)

Графики с пунктирными линиями отражают прогнозируемую динамику при

реагировании и производстве аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСНР). Поэтому можно сделать вывод о возможности использования предлагаемой процедуры моделирования при решении задач прогнозирования и определения длительности временных интервалов целесообразности и допустимости производства АСНР.

На основе локального решения (4.19) возможно установить локальное решение системы (4.9), с задаваемыми согласно (4.11) интенсивностями переходов между основными состояниями системы ПОО–ИАК, описывающее временные зависимости для вероятностей нахождения в состояниях «инцидент k -го типа» и в агрегированных аварийных состояниях «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа». Проведем отдельно моделирование как на малых, так и на сравнимых с длительностью переходных процессов временных интервалах.

При детализации событий, соответствующих агрегированному состоянию «авария, обусловленная инцидентом k -го типа» следует учитывать, что его составляющие – события «авария r -го типа, обусловленная инцидентом k -го типа» являются несовместными событиями.

Непосредственно на основе анализа интегралов интенсивностей переходов (4.11) между основными состояниями системы ПОО–ИАК можно установить необходимость выполнения в любой момент следующего соотношения между значениями вероятностей рассматриваемых событий:

$$\begin{aligned}
 & P_{A_1/I_k}(t) : \dots : P_{A_r/I_k} : \dots : P_{A_m/I_k}(t) = \\
 & = \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{A_1/I_k}}{\eta_{A_1/I_k}}\right)^{\beta_{A_1/I_k}}} \right) : \dots : \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{A_r/I_k}}{\eta_{A_r/I_k}}\right)^{\beta_{A_r/I_k}}} \right) : \dots \\
 & \quad \dots : \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{A_m/I_k}}{\eta_{A_m/I_k}}\right)^{\beta_{A_m/I_k}}} \right).
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Сопоставление первого уравнения системы (4.19) и соотношения выполняющегося в любой момент времени пропорциональности (4.20), позволяет обосновать следующее предположение относительно закономерности изменения вероятностей рассматриваемых событий при небольших относительно длительности переходных

аварийного события.

Моделирование третьего этапа предполагается проводить, рассматривая переходы между состояниями системы ПОО–ИАК в рамках марковского процесса, как последовательность случайных событий с конечным или счётным числом исходов, где вероятность наступления каждого события зависит только от состояния, достигнутого в предыдущем событии. С математической точки зрения при таком подходе описания событий второго и третьего этапа не имеют принципиальных различий.

При моделировании динамики третьего этапа развития аварий и катастроф по каскадному ветвящемуся сценарию в рамках описания процесса немарковского типа требуется учитывать зависимость (4.8) переходов в состояния нижнего уровня от всего ряда предшествующих состояний.

Переход к четвертому этапу связан с формированием чрезвычайных ситуаций соответствующих масштабов и их дальнейшим развитием по некоторым неблагоприятным сценариям. Как правило, моделирование формирования ЧС связано с исследованием процессов, распределенных на некоторой территории в рамках различных полевых моделей [3–11, 19–40].

4.5 Выводы по четвертой главе

1. Формирование математического инструментария исследования динамики обусловленных различными угрозами многокомпонентных рисков в социотехнических системах возможно на основе методов дискретно-событийного моделирования процессов, связанных с развитием инициируемых локальными инцидентами аварий и катастроф техногенного и природного происхождения по каскадному сценарию.

2. Стохастическое моделирование, основанное на представлении распределениями Вейбулла интенсивностей переходов между критическими состояниями смежных уровней в системе «потенциально опасный объект – инцидент, авария, катастрофа» позволяет исследовать динамику развития инцидентов по каскадным

сценариям.

3. Полученные в рамках построенной модели марковских процессов с ветвящейся структурой аналитические решения нестационарных локальных систем уравнений Колмогорова, описывающие развитие инцидентов по каскадному сценарию могут применяться для прогнозирования динамики критических состояний с учетом данных текущего мониторинга.

4. Вероятностные характеристики своевременности и эффективности возможных целенаправленных воздействий при оперативном реагировании могут быть определены на основе предлагаемых для некоторых типовых «каскадных сценариев» развития критических состояний локальных аналитических решений.

5. Предлагаемая в данном разделе модель совместима с рассмотренными ранее базовой моделью многокомпонентных рисков, а также моделью многокомпонентных эксплуатационных рисков, и может применяться при решении ряда прикладных задач математического и информационно-аналитического обеспечения оперативного реагирования на инциденты в системах обеспечения различных видов безопасности.

ГЛАВА 5 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РИСКОВ К ПРИКЛАДНЫМ ЗАДАЧАМ

В настоящем разделе сформированный в предыдущих разделах математический инструментарий применен для решения ряда прикладных задач информационно-аналитического обеспечения риск-ориентированного управления отдельными видами безопасности в социотехнических системах.

Приведены результаты прикладных исследований структуры и динамики многокомпонентных рисков, а также некоторые общие методики и алгоритмы, реализованных в комплексе прикладных программ (приложения А–Г).

Основные результаты исследований, изложенные в настоящем разделе, опубликованы автором в работах [115–120, 167–177, 201–210, 229–233].

5.1 Разработка программного комплекса моделирования многокомпонентных рисков и его применение при исследовании эффективности систем обеспечения пожарной безопасности

5.1.1 Моделирование функционирования систем противопожарной защиты

Обеспечение пожарной безопасности (ПБ) в жилом секторе сопряжено с затратами финансовых средств, а также привлечением материальных и трудовых ресурсов, требуемых для реализации комплекса мероприятий по предупреждению, предотвращению и защите от пожаров, включающих создание и размещение пожарно-спасательных подразделений (ПСП), установку систем противопожарной защиты, обучение населения мерам безопасности и действиям при пожарах и пр. При этом крайне актуальна проблема поиска и обоснования наиболее эффективных по затратам финансовых, трудовых и иных ресурсов вариантов управленческих решений по обеспечению пожарной безопасности и снижению социально-экономических потерь от пожаров. Опыт решения различных прикладных задач ПБ, а также

результаты исследований мировой и отечественной пожарной статистики [41–50] свидетельствуют о высокой информативности статистических показателей индивидуальных и интегральных пожарных рисков, представленных совокупностью:

$$R_3 = R_1 \cdot R_2 ,$$

$$[R_3] = \frac{1}{10^5 \cdot \text{год}} , [R_1] = \frac{\text{пож}}{10^5 \text{чел} \cdot \text{год}} , [R_2] = \frac{\text{чел}}{\text{пож}} , \quad (5.1)$$

в которой индивидуальный риск гибели R_3 представляет композицию различных рисков: безусловного – оказаться в условиях пожара R_1 и условного – гибели на пожаре R_2 . Выражение (5.1) объединяет компоненты индивидуального риска, значения которых определяются статистическими оценками вероятности подвергнуться опасным факторам пожара (ОФП), а также условной вероятности гибели.

Дальнейшая детализация показателей (5.1) связана с переходом от скалярного к векторно-матричному представлению пожарных рисков [95–98], позволяющего оперировать с событийными рядами, обуславливающими как формирование ОФП, так и результаты воздействия ОФП. Детализация индивидуальных и интегральных пожарных рисков проводится, как показано автором в [117–120] на основе стратификации населения по степени уязвимости и подверженности воздействию ОФП, определения основных функций противопожарной защиты (ПЗ) и оценки вероятностных показателей их выполнения системами обеспечения пожарной безопасности (СОПБ).

Стратификация состоит в кластеризации множества «население территории» по группам с определенными характеристиками уязвимости и подверженности воздействию ОФП, в соответствии с социальными, психофизиологическими и иными признакам (с учетом возраста, пола, трудоспособности, физическим параметрам, условиям и месту проживания и пр.) [117]. Наиболее простым способом является разбиение по трудоспособности согласно [234] , с выделением : c_1 –детей и подростков (до 16 лет); c_2 –трудоспособного населения (мужчин 16–64 лет и женщин 16–59 лет); c_3 –лиц старшего возраста (мужчин от 65 лет и женщин от 60 лет); c_4 – лиц с ограниченными возможностями (инвалидов). В результате стратификации совокупность «население территории» представлена вектором:

$$\mathbf{C} = (c_1, c_2, c_3, c_4) \in R_{1 \times 4} . \quad (5.2)$$

Необходимо учитывать влияние условий и места проживания представителей групп (5.2), поскольку жилые здания:

$$z^k, k \in \{1 \dots K\}$$

различаются по ряду влияющих на пожарную опасность внутренних и внешних факторов, включая свойства и характеристики пожароопасности, оборудование системами ПЗ, расположение ПСП и др.

Первая составляющая событийного ряда, определяющая вероятностно-временные характеристики подверженности воздействию ОФП отдельных групп населения, представляется, согласно с [117–120], элементами диагональной матрицы \mathbf{V} (от лат. *victima* - жертва):

$$\mathbf{V}^k = \begin{pmatrix} v_1^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2^k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3^k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4^k \end{pmatrix} = p^k \begin{pmatrix} \tau_1^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2^k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3^k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau_4^k \end{pmatrix} \in R_{1 \times 4} . \quad (5.3)$$

Поскольку все находящиеся в здании люди одновременно подвергаются воздействию ОФП, значения элементов матрицы \mathbf{V}^k определяются произведением вероятности возникновения пожара (общего множителя) и долевой продолжительности τ_i^k для пребывания представителей (5.2). Эффекты выполнения мероприятий по предупреждению и предотвращению пожаров учитываются введением для элементов \mathbf{V}^k соответствующих понижающих коэффициентов $w_i^k < 1$.

Предлагаемая модель позволяет оценить результаты мероприятий пожарной профилактики, например при исследовании их влияния на вероятность возникновения пожара. Общий поток инициирующих пожары событий обусловлен совокупностью техногенных и антропогенных факторов, порождающих два принципиально различных типа генерирующих источников. Первая группа потоков

$$\lambda_f^k, f \in \{1 \dots F\}$$

непосредственно зависит от технического состояния инженерных систем (газопровод, электроснабжение, и пр.) и других инженерно-технических параметров. Потоки второй группы

$$\lambda_i^k, i \in \{1 \dots I\}$$

связаны с последствиями различных нарушений правил пожарной безопасности.

С учетом эффективности конкретных мероприятий по предупреждению и предотвращению пожаров, вероятность возникновения пожара в здании может быть представлена в виде:

$$p^k = \left(\sum_{f=1}^F (\lambda_{f^0}^k (1 - \alpha_f^k) + \alpha_f^k \lambda_{f^*}^k) + \sum_{i=1}^I (\lambda_{i^0}^k (1 - \alpha_i^k) + \alpha_i^k \lambda_{i^*}^k) \right) T, \quad (5.4)$$

где $\lambda_{f^0}^k, \lambda_{i^0}^k$ и $\lambda_{f^*}^k, \lambda_{i^*}^k$ – потоки инициирующих событий до и после проведения мероприятий, а коэффициенты α_f^k и α_i^k характеризуют относительный охват соответствующих источников, T – рассматриваемый временной интервал.

Статистическая вероятность возникновения пожара в течение года, согласно [235], в жилых многоквартирных домах – $2,6 \cdot 10^{-2}$; в жилых многоквартирных домах – $1,9 \cdot 10^{-3}$. Более точная оценка вероятности, учитывающая влияющие на риск возникновения пожара особенности систем предупреждения пожаров и противопожарной защиты исследуемых жилых зданий, возможна при использовании статистически обоснованных, либо специальных экспертных методик.

Целесообразно разделить каждую группу риска на две подгруппы, и вектор (5.2) – на два соответствующих вектора:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^k &= (c_1^k, c_2^k, c_3^k, c_4^k) = \mathbf{C}_0^k + \mathbf{C}_*^k = \mathbf{C}^k \mathbf{A}^k + \mathbf{C}^k (\mathbf{E} - \mathbf{A})^k = \\ &= (c_1^k, c_2^k, c_3^k, c_4^k) \begin{pmatrix} \alpha_1^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2^k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3^k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4^k \end{pmatrix} + \\ &+ (c_1^k, c_2^k, c_3^k, c_4^k) \begin{pmatrix} 1 - \alpha_1^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \alpha_2^k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \alpha_3^k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \alpha_4^k \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5.5)$$

где нижние индексы i^* и i^0 отличают подгруппы представителей (5.2), с которыми

профилактические мероприятия по обучению населения мерам безопасности и действиям при пожаре проводились/не проводились, α_i^k - показатели относительного охвата мероприятиями противопожарной профилактики отдельных групп, определяющие размеры подгрупп $c_{i^0}^k$ и $c_{i^*}^k$.

Локальные частотные характеристики подверженности воздействию ОФП для совместно находящихся представителей (5.2) в отдельных зданиях представляются в векторной форме:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^k &= (f_1^k, f_2^k, f_3^k, f_4^k) = \mathbf{C}^k \mathbf{V}^k = \mathbf{C}_0^k \mathbf{V}^k + \mathbf{C}_*^k \mathbf{V}^k = \mathbf{F}_0^k + \mathbf{F}_*^k = \\ &= (f_{1^0}^k, f_{2^0}^k, f_{3^0}^k, f_{4^0}^k) + (f_{1^*}^k, f_{2^*}^k, f_{3^*}^k, f_{4^*}^k) = \\ &= p^k (c_{1^0}^k \tau_1^k, c_{2^0}^k \tau_2^k, c_{3^0}^k \tau_3^k, c_{4^0}^k \tau_4^k) + p^k (c_{1^*}^k \tau_1^k, c_{2^*}^k \tau_2^k, c_{3^*}^k \tau_3^k, c_{4^*}^k \tau_4^k). \end{aligned} \quad (5.6)$$

Вторая составляющая событийного ряда, определяющая вероятностно-интенсивные характеристики, представлена элементами прямоугольной матрицы \mathbf{S} (от англ. sensitivity -чувствительность). Каждый из элементов выражает степень уязвимости отдельных подвергающихся воздействию ОФП представителей (5.2) как условную вероятность наступления определённого вида последствий. Учет эффекта профилактических мероприятий по обучению (5.5) приводит, согласно [117–120], к расщеплению единой матрицы \mathbf{S} на матрицы:

$$\mathbf{S}_0 = \begin{pmatrix} S_{1^0 1} & S_{1^0 2} & S_{1^0 3} & S_{1^0 4} \\ S_{2^0 1} & S_{2^0 2} & S_{2^0 3} & S_{2^0 4} \\ S_{3^0 1} & S_{3^0 2} & S_{3^0 3} & S_{3^0 4} \\ S_{4^0 1} & S_{4^0 2} & S_{4^0 3} & S_{4^0 4} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_* = \begin{pmatrix} S_{1^* 1} & S_{1^* 2} & S_{1^* 3} & S_{1^* 4} \\ S_{2^* 1} & S_{2^* 2} & S_{2^* 3} & S_{2^* 4} \\ S_{3^* 1} & S_{3^* 2} & S_{3^* 3} & S_{3^* 4} \\ S_{4^* 1} & S_{4^* 2} & S_{4^* 3} & S_{4^* 4} \end{pmatrix} \in R_{1 \times 4}, \quad (5.7)$$

где нижние индексы i^* и i^0 отличают подгруппы, состоящие из представителей (5.5), с которыми профилактические мероприятия проводились /не проводились.

Для каждого здания z^k , составляются соответствующие (5.7) локальные матрицы \mathbf{S}_0^k и \mathbf{S}_*^k , элементами которых являются локальные условные вероятности наступления последствий воздействия ОФП, обусловленные результатом соответствующего выполнения основных функций ПЗ.

Компоненты «вектора ожидаемых потерь» (5.5) отражают потери по отдельным видам последствий для жизни и здоровья, понимаемыми, согласно [236], как

повреждения и нарушения физиологических функций в результате воздействия ОФП. В соответствии с квалифицирующими признаками тяжести вреда выделяются четыре вида последствий: d_1 – гибель; d_2 – тяжелые травмы; d_3 – травмы средней тяжести; d_4 – легкие травмы.

С учетом эффективности профилактических мероприятий по обучению и охвата населения (5.5) потери каждого вида подразделяются на составляющие d_{j0}^k , d_{j*}^k ($j = \{1 \dots J\}$), при этом локальный «вектор ожидаемых потерь» представляет сумму векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^k &= (d_1^k, d_2^k, d_3^k, d_4^k) \\ &= (d_{10}^k, d_{20}^k, d_{30}^k, d_{40}^k) + (d_{1*}^k, d_{2*}^k, d_{3*}^k, d_{4*}^k) = \\ &= \mathbf{D}_0^k + \mathbf{D}_*^k = \mathbf{F}_0^k \mathbf{S}_0^k + \mathbf{F}_*^k \mathbf{S}_*^k = \mathbf{C}^k \mathbf{V}^k \mathbf{S}_0^k + \mathbf{C}_*^k \mathbf{V}^k \mathbf{S}_*^k . \end{aligned} \quad (5.8)$$

Моделирование влияния совокупности сил и средств обеспечения пожарной безопасности на количественные характеристики и структуру ожидаемых потерь в случае возникновения пожара основано на четком разграничении обстоятельств, связанных с наличием определенной совокупности сил, средств и систем обеспечения функций ПЗ, с одной стороны и, с другой стороны – фактическим выполнением функций ПЗ. В соответствии с (5.6) введем идентификаторы, обозначающие булевыми переменными наличие/отсутствие возможности выполнения и фактическое выполнение/невыполнение для каждой из рассматриваемых L функций ПЗ в случае пожара в здании: $R_l^k = [1,0]$, $E_l^k = [1,0]$, ($l = \{1 \dots L\}$).

Идентификаторы R_l^k возможности выполнения/невыполнения функций ПЗ являются, согласно (5.7), детерминированными величинами, связанными с наличием систем ПЗ, сил и средств обеспечения пожарной безопасности, а также иных значимых факторов. Согласно (5.8), идентификаторы E_l^k фактического выполнения/невыполнения функций ПЗ являются случайными величинами, для которых:

$$\left[\begin{array}{l} 0 \leq P(E_l^k = 1) \leq 1 \text{ при } R_l^k = 1, \\ P(E_l^k = 1) = 0 \text{ (} P(E_l^k = 0) = 1 \text{)} \text{ при } R_l^k = 0. \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Событие «фактическое выполнение функции $[\Phi_l]$ ПЗ», согласно (5.9), является возможным лишь при выполнении условия «возможность выполнения функции $[\Phi_l]$ ПЗ».

Поскольку событие «фактическое выполнение функции $[\Phi_l]$ ПЗ» представляет композицию указанных событий, то его идентификатор можно представить производным булевым индексом – результатом произведения пары исходных булевых индексов:

$$\{E_l^k\} \Leftrightarrow \{R_l^k \cdot E_l^k\} \Rightarrow E_l^k = R_l^k \cdot E_l^k.$$

Для обозначения событий, заключающихся в выполнении или невыполнении функций ПЗ применяются идентификаторы представленные, в соответствии с (5.9), произведением булевых пар:

$$\{[\Phi_l]\} \Leftrightarrow \{E_l^k\} = \{(R_l^k \cdot E_l^k)\}.$$

При моделировании принимаем эквивалентность полной группы событий в случае возникновения пожара множеству комплексных событий, которые представляют возможные варианты выполнения совокупности функций ПЗ. Идентификаторы таких комплексных событий, в соответствии с вышесказанным, выражаются соответствующими упорядоченными наборами произведений булевых пар:

$$\{[\Phi_1] \dots [\Phi_l] \dots [\Phi_L]\} \Leftrightarrow \{(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)\}. \quad (5.10)$$

Каждое комплексное событие (5.10) представляет композицию из L элементарных событий и его вероятность, согласно (2.10), обозначается как:

$$P(\{[\Phi_1] \dots [\Phi_l] \dots [\Phi_L]\}) = P(\{(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)\}). \quad (5.11)$$

Процедура вычисления (5.11) выполняется с учетом текущего состояния и показателей надежности установленных в здании технических систем ПЗ, а также текущего состояния и готовности иных сил и средств обеспечения ПБ. Приведенная ниже общая методика вычисления (5.11) основана на исследовании композиции комплексных событий, обусловленных выполнением основных функций ПЗ. Первый этап включает детализацию и декомпозицию комплексных событий (5.10), определение взаимной зависимости и совместности основных событий. Второй этап включает построение событийных рядов последовательностей элементарных

событий, выделение несовместных событий и расчёт их вероятностей. Заключительный этап состоит в группировке комплексных событий из соответствующих несовместных событий и в расчёте их вероятностей.

Моделирование ожидаемых потерь возможно при определении основных параметров (2.11) для подгрупп $c_{i^0}^k$ и $c_{i^*}^k$, представляющие собой частные локальные условные вероятности наступления последствий воздействия ОФП при заданном варианте (5.10) выполнения совокупности функций ПЗ:

$$S_{i^0 j}^{(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)}, \quad S_{i^* j}^{(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)} \quad (5.12)$$

Определение параметров (5.12) возможно в результате анализа и обработки статистических данных о потерях при пожарах, либо на основе экспертных методов. К настоящему времени подобные методики не разработаны, в [117–120] автором предложено использование полученной методами парных сравнений оценочной шкалы вероятности наступления последствий воздействия ОФП для подгрупп $c_{i^0}^k$ и $c_{i^*}^k$ при определенных вариантах выполнения совокупности функций ПЗ.

Определяемые согласно (2.17) локальные условные вероятности наступления j -го вида последствий воздействия ОФП для подгрупп $c_{i^0}^k$ и $c_{i^*}^k$ представляют математические ожидания величин $S_{i^0 j}^k$ и $S_{i^* j}^k$ и вычисляются суммированием попарных произведений частных локальных условных вероятностей (5.12) на соответствующие вероятности (4.11) возможных вариантов выполнения функций ПЗ:

$$\begin{aligned} \langle S_{i^0 j}^k \rangle &= \\ &= \sum_{E_1 \dots E_L} S_{i^0 j}^{(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)} \cdot P[(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)], \\ \langle S_{i^* j}^k \rangle &= \\ &= \sum_{E_1 \dots E_L} S_{i^* j}^{(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)} \cdot P[(R_1^k \cdot E_1^k) \dots (R_l^k \cdot E_l^k) \dots (R_L^k \cdot E_L^k)]. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Подстановка результатов вычислений локальных условных вероятностей (5.13) в (5.8), позволяет получить локальный «вектор ожидаемых потерь». Его компоненты представляют составляющие по отдельным видам ожидаемого ущерба для находящихся в здании представителей подгрупп (5.5):

$$\begin{aligned}
\mathbf{D}^k &= \mathbf{D}_0^k + \mathbf{D}_*^k = \\
&= p^k \cdot (c_{1^0}^k \tau_1^k, c_{2^0}^k \tau_2^k, c_{3^0}^k \tau_3^k, c_{4^0}^k \tau_4^k) \cdot \begin{pmatrix} \langle S_{1^0 1}^k \rangle & \langle S_{1^0 2}^k \rangle & \langle S_{1^0 3}^k \rangle & \langle S_{1^0 4}^k \rangle \\ \langle S_{2^0 1}^k \rangle & \langle S_{2^0 2}^k \rangle & \langle S_{2^0 3}^k \rangle & \langle S_{2^0 4}^k \rangle \\ \langle S_{3^0 1}^k \rangle & \langle S_{3^0 2}^k \rangle & \langle S_{3^0 3}^k \rangle & \langle S_{3^0 4}^k \rangle \\ \langle S_{4^0 1}^k \rangle & \langle S_{4^0 1}^k \rangle & \langle S_{4^0 3}^k \rangle & \langle S_{4^0 4}^k \rangle \end{pmatrix} + \\
&+ p^k \cdot (c_{1^*}^k \tau_1^k, c_{2^*}^k \tau_2^k, c_{3^*}^k \tau_3^k, c_{4^*}^k \tau_4^k) \cdot \begin{pmatrix} \langle S_{1^* 1}^k \rangle & \langle S_{1^* 2}^k \rangle & \langle S_{1^* 3}^k \rangle & \langle S_{1^* 4}^k \rangle \\ \langle S_{2^* 1}^k \rangle & \langle S_{2^* 2}^k \rangle & \langle S_{2^* 3}^k \rangle & \langle S_{2^* 4}^k \rangle \\ \langle S_{3^* 1}^k \rangle & \langle S_{3^* 2}^k \rangle & \langle S_{3^* 3}^k \rangle & \langle S_{3^* 4}^k \rangle \\ \langle S_{4^* 1}^k \rangle & \langle S_{4^* 1}^k \rangle & \langle S_{4^* 3}^k \rangle & \langle S_{4^* 4}^k \rangle \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Введем для рассматриваемой совокупности локальных векторов (5.14) интегральный «вектор ожидаемых потерь», компоненты которого представляют аддитивные величины – составляющие совокупного ожидаемого ущерба по видам последствий:

$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= \sum_{k=1}^K \mathbf{D}^k = \sum_{k=1}^K (\mathbf{D}_0^k + \mathbf{D}_*^k) = \\
&= \sum_{k=1}^K \mathbf{D}_0^k + \sum_{k=1}^K \mathbf{D}_*^k = \left(\sum_{k=1}^K d_1^k, \sum_{k=1}^K d_2^k, \sum_{k=1}^K d_3^k, \sum_{k=1}^K d_4^k \right).
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Приведем основанную на вычислении интегрального вектора ожидаемых потерь (5.15) общую методику прогнозирования ожидаемых потерь от пожаров в жилом секторе на заданной территории, основанную на применении рассмотренной ранее базовой модели многокомпонентных рисков.

В соответствии с техническим регламентом о требованиях ПБ [237], определим и представим в таблице 5.1 основные функции ПЗ, взаимную связь между ними, а также необходимое для их выполнения обеспечение.

При проведении детализации и декомпозиции комплексных событий (5.10) и определении вероятностных характеристик функционирования СОПБ необходимо различение событий, связанных не только с наличием и текущим состоянием готовности сил, средств и технических систем, но также и с надежностью их срабатывания при возникновении пожара.

Таблица 5.1 – Функций ПЗ, их обеспечение и взаимосвязь

Φ_i	ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ПЗ	R_l	E_l	ОБЕСПЕЧЕНИЕ	ВЗАИМОСВЯЗЬ Φ_i	
Φ_1	Обеспечение управления эвакуацией	R_1	E_1	Установка систем защиты от ОФП (с САП и без САП)	$R_3=1$	$[\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \Phi_3]$
Φ_2	Обеспечение противодымной защиты	R_2	E_2		-----	-----
Φ_3	Обеспечение автоматического пожаротушения	R_3	E_3		$R_3=0$	$[\Phi_1 \quad \Phi_2]$
Φ_4	Обеспечение своевременного прибытия ПСП	R_4	E_4	Дислокация ПСП	Автономны	$[\Phi_4]$
Φ_5	Обеспечение доступа к обычным путям эвакуации	R_5	E_5	Эвакуационные пути		$[\Phi_5]$
Φ_6	Обеспечение возможности дополнительной аварийной эвакуации	R_6	E_6	Аварийные выходы		$[\Phi_6]$

Введем идентификаторы для обозначения возможности или невозможности выполнения рассматриваемой совокупности функций ПЗ набором булевых переменных $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6\}$.

Идентификаторы фактического выполнения функций ПЗ, зависящих от срабатывания при возникновении пожара отдельных технических систем, а также сил и средств СОПБ, представлены булевыми переменными $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6\}$.

В таблицах 5.2, 5.3 показана взаимная связь функций ПЗ в совокупностях Φ_1, Φ_2, Φ_3 либо Φ_1, Φ_2 , детерминированных в соответствии с определенной конфигурацией оснащения зданий системами защиты от ОФП. Примеры деревьев событий, на основе которых рассчитываются значения вероятностей возможных вариантов выполнения указанных совокупностей функций ПЗ, представлены на рисунках 5.1 и 5.2.

Для жилых зданий, в которых не установлены системы автоматического пожаротушения (САП), возможность выполнения совокупности функций ПЗ $[\Phi_1 \quad \Phi_2]$ определяется наличием и соответствием требованиям нормативных документов ПБ (таблица 5.2) технических систем: обнаружения пожара (СОП), обеспечения управления эвакуацией (СОУЭ) и противодымной защиты (СПДЗ).

Для жилых зданий, в которых установлены САП возможность выполнения совокупности функций ПЗ $[\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \Phi_3]$ обусловлена наличием и соответствием требованиям нормативных документов ПБ (таблица 5.3) технических систем: САП, СОУЭ и СПДЗ.

Наличие и соответствие требованиям для рассматриваемых технических систем указывается в строках таблиц 5.2 и 5.3 булевыми значениями.

Таблица 5. 2 – Выполнение совокупности функций ПЗ без установки САП

Система ОП			Система ОУЭ			Система ПДЗ			Идентификаторы возможности выполнения функций			Идентификаторы (R_1E_1)(R_2E_2)(R_3E_3) выполнения [$\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3$] и вероятности $P((R_1E_1)(R_2E_2)(R_3E_3))$			
Н	с	$K_{обн}$	Н	с	$K_{оуэ}$	Н	с	$K_{пдз}$	R_1	R_2	R_3	110	100	010	000
1	1	0,8	1	1	0,8	1	1	0,8	1	1	0	0,512	0,128	0,128	0,232
1	1	0,8	1	1	0,8	1	0	0	1	0	0	0	0,64	0	0,36
1	1	0,8	1	1	0,8	0	0	0	1	0	0	0	0,64	0	0,36
1	1	0,8	1	0	0	1	1	0,8	0	1	0	0	0	0,64	0,36
1	1	0,8	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	0,8	0	0	0	1	1	0,8	0	1	0	0	0	0,64	0,36
1	1	0,8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0,8	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0,8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Н – наличие, с – соответствие

Таблица 5. 3 – Выполнение совокупности функций ПЗ при оборудовании САП

Система АП			Система ОУЭ			Система ПДЗ			Идентификаторы возможности выпол- нения функций			Идентификаторы выполнения [$\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3$] (R_1E_1)(R_2E_2)(R_3E_3) и вероятности $P((R_1E_1)(R_2E_2)(R_3E_3))$				
Н	с	$K_{ап}$	Н	с	$K_{оуэ}$	Н	с	$K_{пдз}$	R_1	R_2	R_3	111	101	011	001	000
1	1	0,9	1	1	0,8	1	1	0,8	1	1	1	0,576	0,144	0,144	0,036	0,1
1	1	0,9	1	1	0,8	1	0	0	1	0	1	0	0,72	0	0,18	0,1
1	1	0,9	1	1	0,8	0	0	0	1	0	1	0	0,72	0	0,18	0,1
1	1	0,9	1	0	0	1	1	0,8	0	1	1	0	0	0,72	0,18	0,1
1	1	0,9	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0,9	0,1
1	1	0,9	0	0	0	1	1	0,8	0	1	1	0	0	0,72	0,18	0,1
1	1	0,9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0,9	0,1
1	1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,9	0,1
1	0	0	1	1	0,8	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0,8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Н – наличие, с – соответствие

ОБН		ОУЭ		ПДЗ	
Н	с	Н	с	Н	с
1	1	1	1	1	1

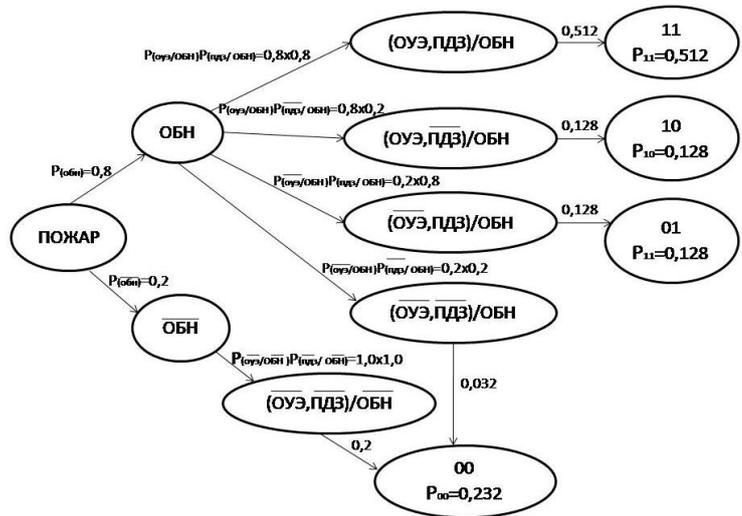


Рисунок 5.1 – Дерево событий, обуславливающих возможные варианты выполнения/ невыполнения функций Φ_1, Φ_2, Φ_3 для конфигурации 1 из табл. 5.2.

АП		ОУЭ		ПДЗ	
Н	с	Н	с	Н	с
1	1	1	1	1	1

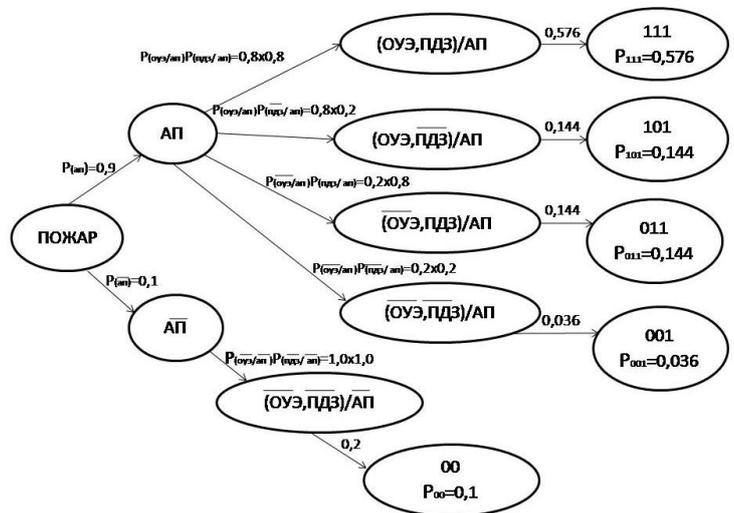


Рисунок 5.2 – Дерево событий, обуславливающих возможные варианты выполнения (невыполнения) функций Φ_1, Φ_2, Φ_3 для конфигурации 1 из табл. 5.3

Функции ПЗ Φ_4, Φ_5, Φ_6 взаимно независимы и обусловлены иными, влияющими на спасение людей, факторами в СОПБ, представленными в таблицах 5.4–5.6. Возможности событий «выполнение функций $[\Phi_4], [\Phi_5], [\Phi_6]$ », согласно данным таблиц 5.4–5.6, зависят от дислокации ПСП, обеспечения требований ПБ к путям эвакуации, а также к аварийным и эвакуационным выходам (в зависимости от класса функциональной пожарной опасности здания). Определение вероятностей выполнения $[\Phi_4], [\Phi_5], [\Phi_6]$ проводится с учетом понижающих коэффициентов в соответствии с положениями действующего технического регламента о требованиях ПБ [237].

Таблица 5.4 – Выполнение функции ПЗ Φ_4

Для зданий Φ 1.3 и Φ 1.4	Дислокация ПО		Φ_4	
	<i>c</i>	$K_{по}$	возм. выполнения / R_4	$P_4 = P(E_4=1)$
	1	0,95	1	0,95
0	0	0	0	

Таблица 5.5 – Выполнение функции ПЗ Φ_5

Для зданий Φ 1.3 и Φ 1.4	Пути эвакуации		Φ_5	
	<i>c</i>	$K_{эв}$	возм. выполнения / R_5	$P_5 = P(E_5=1)$
	1	0,8	1	0,8
0	0	0	0	

Таблица 5.6 – Выполнение функции ПЗ Φ_6

Для зданий	Аварийные выходы			Φ_6	
	<i>n</i>	<i>c</i>	K_{ϕ}	возм. выполнения / R_6	$P_6 = P(E_6=1)$
	Φ 1.3	1	1	0,75	1
1		0	0	0	0
0		0	0	0	0
Φ 1.4.	1	1	0,75	1	0,75

События «выполнение функций $[\Phi_4]$, $[\Phi_5]$, $[\Phi_6]$ » независимы друг от друга (попарно и в совокупности), а также от ранее рассмотренных событий, связанных с выполнением функций $[\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \Phi_3]$. Для возможных при заданной конфигурации вариантов вероятности выполнения функций $[\Phi_4]$, $[\Phi_5]$, $[\Phi_6]$ соответствуют значениям элементов таблиц 5.4–5.6 с соответствующими идентификаторами:

$$P[(R_4^k \cdot E_4^k)], P[(R_5^k \cdot E_5^k)], P[(R_6^k \cdot E_6^k)].$$

Комплексные идентификаторы возможности или невозможности выполнения для совокупности функций ПЗ обозначаются, согласно (2.6–2.9), упорядоченными наборами из шести булевых переменных $[R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6]$.

В таблице 5.7 представлен фрагмент полной таблицы со сведениями о СОПБ жилых зданий, необходимыми для определения $[R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6]^k$, а также о проживающем в зданиях населении с разбиением, согласно (5.2), по группам и подгруппам с определенными характеристиками уязвимости и подверженности воздействию ОФП.

Характеристики СОПБ для совокупности находящихся на территории жилых зданий z^k отображаются данными таблицы 5.7. В правой части таблицы приведены комплексные идентификаторы выполнения максимально возможной

совокупности функций ПЗ $[R_1R_2R_3R_4R_5R_6]^k$, которые определяются на основе данных таблиц 5.2–5.6 следующим образом. Исходя из данных таблицы 5.7 о конфигурации оснащения жилого здания системами ПЗ происходит обращение к таблице 5.2 либо 5.3, с поиском совпадающей строки по оснащению здания системами ПЗ и определением значения соответствующего идентификатора $[R_1R_2R_3]$. Далее на основе данных таблицы 5.7 о факторах, влияющих на спасение находящихся в жилом здании людей, происходит обращение к таблицам 5.4–5.6, с поиском совпадающих строки и определением соответствующих значений идентификаторов $[R_4], [R_5], [R_6]$.

Совокупность жилых зданий z^k может быть разбита на подгруппы с эквивалентными конфигурациями по оснащению техническими системами и иным влияющими на спасение факторами, и с тождественными идентификаторами $[R_1R_2R_3R_4R_5R_6]$.

Таблица 5.7 – Данные о проживающих и об оснащении зданий системами ПЗ

k	p^k 10^{-2}	Группы c_i , относительное время τ_i , подгруппы c_{i0}^k / c_i^k				Оснащение жилых зданий системами защиты от ОФП				Факторы, влияющие на спасение людей			Идентификаторы текущий и достижимый, затраты							
		c_1 $\tau_1 =$ 0,6	c_2 $\tau_2 =$ 0,5	c_3 $\tau_3 =$ 0,7	c_4 $\tau_4 =$ 0,9	АП		ОП		ОУЭ		ПДЗ	Дисло- кация ПО	Пути эваку- ации	Аварий- ные выходы		$\left[\begin{smallmatrix} R^k \\ L \end{smallmatrix} \right]^0$	$\left[\begin{smallmatrix} R^k \\ L \end{smallmatrix} \right]^*$	$\frac{w^k}{10^6}$ руб	
		н	с	н	с	н	с	н	с	н	с	с	с	н	с					
1	2,6	40/53	37/9	18/11	1/0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	001111	111111	2,1
2	2,6	6/6	11/9	8/8	3/5	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	100111	110111	0,15
3	2,6	7/8	2/6	3/4	5/5	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	010111	111111	0,15
4	2,6	9/7	2/8	1/3	2	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	100111	110111	1,2
...

Рассмотрим полную группу событий, обусловленных возможными вариантами выполнения совокупности шести основных функций ПЗ при возникновении пожара в здании. События из полной группы выполнения совокупности функций ПЗ представляют единые комплексы событий, выражаемых композицией четырех независимых событий: одного сложного – «выполнение совокупности функций $[\Phi_1 \ \Phi_2]$ (либо $[\Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3])$ » и трех простых – «выполнение функций $[\Phi_4]$, $[\Phi_5]$, $[\Phi_6]$ ». Поэтому вероятность комплексного события выражается произведением вероятностей:

$$\begin{aligned}
& P[(R_1^k \cdot E_1^k)(R_2^k \cdot E_2^k)(R_3^k \cdot E_3^k)(R_4^k \cdot E_4^k)(R_5^k \cdot E_5^k)(R_6^k \cdot E_6^k)] = \\
& = P[(R_1^k \cdot E_1^k)(R_2^k \cdot E_2^k)(R_3^k \cdot E_3^k)]P[(R_4^k \cdot E_4^k)]P[(R_5^k \cdot E_5^k)]P[(R_6^k \cdot E_6^k)].
\end{aligned} \tag{5.16}$$

Локальные условные вероятности наступления j -го вида последствий воздействия ОФП для подгрупп $c_{i^0}^k$ и $c_{i^*}^k$ вычисляются согласно (5.13) с учетом (5.16):

$$\begin{aligned}
\langle S_{i^0j}^k \rangle &= \sum_{E_1 E_2 E_3 E_4 E_5 E_6} S_{i^0j}^{(R_1^k \cdot E_1^k)(R_2^k \cdot E_2^k)(R_3^k \cdot E_3^k)(R_4^k \cdot E_4^k)(R_5^k \cdot E_5^k)(R_6^k \cdot E_6^k)} \times \\
&\times P[(R_1^k \cdot E_1^k)(R_2^k \cdot E_2^k)(R_3^k \cdot E_3^k)]P[(R_4^k \cdot E_4^k)]P[(R_5^k \cdot E_5^k)]P[(R_6^k \cdot E_6^k)], \\
\langle S_{i^*j}^k \rangle &= \sum_{E_1 E_2 E_3 E_4 E_5 E_6} S_{i^*j}^{(R_1^k \cdot E_1^k)(R_2^k \cdot E_2^k)(R_3^k \cdot E_3^k)(R_4^k \cdot E_4^k)(R_5^k \cdot E_5^k)(R_6^k \cdot E_6^k)} \times \\
&\times P[(R_1^k \cdot E_1^k)(R_2^k \cdot E_2^k)(R_3^k \cdot E_3^k)]P[(R_4^k \cdot E_4^k)]P[(R_5^k \cdot E_5^k)]P[(R_6^k \cdot E_6^k)].
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Применение (5.17) при известных значениях основных параметров модели (5.12) и вероятностей вариантов выполнения функций ПЗ (по данным таблиц 5.4–5.6) позволяет вычислить усредненные локальные условные вероятности наступления последствий воздействия ОФП для конкретной конфигурации по оснащению техническими системами и иным влияющими на спасение факторами с соответствующим значением идентификатора $[R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6]^k$.

5.1.2 Прогнозирование потерь от пожаров в жилом секторе

Предложенная методика реализована в алгоритмах расчета ожидаемых потерь, интегрированных в едином программном комплексе, описанном в Приложениях А и Б. В Приложении А представлена программа для ЭВМ «Моделирование многокомпонентных рисков», предназначенная для формирования базы знаний на основе определения (5.12) при проведении процедур экспертной оценки, а также аналитического расчета вероятностей возможных вариантов выполнения функций защиты. Приложение Б содержит общую методику определения потерь от пожаров в жилом секторе и примеры сравнительного анализа эффективности мероприятий, направленных на модернизацию СОПБ в жилом секторе.

Компоненты локального «вектора ожидаемых потерь» вычисляются по (5.14) при подстановке результатов расчетов (5.13), а также данных таблицы 5.7:

$$\begin{aligned}
 d_1^k &= p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_1} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_1} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_1} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_1} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_1} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_1} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_1} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_1} \rangle) \tau_4^k \right), \\
 d_2^k &= p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_2} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_2} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_2} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_2} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_2} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_2} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_2} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_2} \rangle) \tau_4^k \right), \\
 d_3^k &= p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_3} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_3} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_3} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_3} \rangle) \tau_2^k \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_3} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_3} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_3} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_3} \rangle) \tau_4^k \right), \\
 d_4^k &= p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_4} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_4} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_4} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_4} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_4} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_4} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_4} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_4} \rangle) \tau_4^k \right).
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

Затем вычисляются компоненты интегрального «вектора ожидаемых потерь»:

$$\begin{aligned}
 d_1 &= \sum_{k=1}^K p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_1} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_1} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_1} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_1} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_1} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_1} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_1} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_1} \rangle) \tau_4^k \right), \\
 d_2 &= \sum_{k=1}^K p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_2} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_2} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_2} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_2} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_2} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_2} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_2} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_2} \rangle) \tau_4^k \right), \\
 d_3 &= \sum_{k=1}^K p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_3} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_3} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_3} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_3} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_3} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_3} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_3} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_3} \rangle) \tau_4^k \right), \\
 d_4 &= \sum_{k=1}^K p^k \left((c_{1^0}^k \langle s_{1^0_4} \rangle + c_{1^*}^k \langle s_{1^*_4} \rangle) \tau_1^k + (c_{2^0}^k \langle s_{2^0_4} \rangle + c_{2^*}^k \langle s_{2^*_4} \rangle) \tau_2^k + \right. \\
 &\quad \left. + (c_{3^0}^k \langle s_{3^0_4} \rangle + c_{3^*}^k \langle s_{3^*_4} \rangle) \tau_3^k + (c_{4^0}^k \langle s_{4^0_4} \rangle + c_{4^*}^k \langle s_{4^*_4} \rangle) \tau_4^k \right),
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

характеризующие, в соответствии с (5.15), отдельные составляющие ожидаемого ущерба по видам последствий от пожаров и воздействий ОФП для всего

проживающего на территории населения.

Анализ эффективности различных вариантов вложения финансовых средств, выделяемых на оборудования совокупности жилых зданий системами защиты от ОФП или модернизацию этих систем, основан на вычислении компонент (5.19) интегрального «вектора ожидаемых потерь для всех возможных вариантов изменений совокупной конфигурации технических систем и факторов, влияющих на спасение людей, с идентификаторами $[R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6]^k$.

В таблице 5.7 для каждого здания z^k в разделе «Идентификаторы текущий и достижимый», приведены возможности изменения технических систем и факторов, влияющих на спасение людей, характеризуемые текущим и достижимым комплексными идентификаторами состояния, а также соответствующие переходам между этими состояниями финансовые затраты:

$$[R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]^0 \xrightarrow{w^k} [R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]^* , \quad (5.20)$$

где w^k - затраты на оборудование или модернизацию систем защиты от ОФП.

С учетом (5.20) определяется изменение компонент локальных «векторов ожидаемых потерь»:

$$\Delta d_j^k = d_j^{k^0} - d_j^{k^*} = d_j^k \left([R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]^0 \right) - d_j^k \left([R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]^* \right) \quad (5.21)$$

Выбор оптимального варианта распределения финансовых средств и иных ресурсов может быть реализован при условии достижения минимального из возможных уровней потерь от пожаров и воздействий ОФП при общих затратах, не превышающих допустимый общий объем затрат и локальных затратах, не превышающих допустимые локальные объемы затрат:

$$\begin{aligned} \max_{[R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]^*} [\Delta d_j] = \max_{[R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]^*} \left[\sum_{k=1}^K \Delta d_j^k \right] \\ \text{при} \\ \sum_{k=1}^K w^k \leq W_{max}, \quad w^k \leq w_{max}^k \quad . \end{aligned} \quad (5.22)$$

Таким образом, применение предлагаемой автором стохастической модели многокомпонентных рисков и обоснованного в работах [117-120] векторно-

матричного представления при моделировании индивидуальных и интегральных пожарных рисков позволяет сформировать математический и программный инструментарий сравнительного анализа эффективности мероприятий, направленных на модернизацию и совершенствование СОПБ, основанный на прогнозировании (5.21) ожидаемого сокращения потерь (Приложения А, Б).

Возможность постановки задачи многокритериальной оптимизации (5.22) позволяет сформировать удобный математический и программный инструментарий поддержки решений по управлению ресурсами, который может применяться при обосновании эффективности планируемых финансовых вложений и затрат иных ресурсов на модернизацию и совершенствование СОПБ на основе поиска наилучшего по количественным и качественным параметрам достижимого варианта снижения ожидаемых потерь от пожаров.

5.2 Моделирование динамики развития инцидентов в системе «транспортное средство-опасный груз» по каскадному сценарию

В качестве примера реализации предлагаемого в главе 4 подхода к описанию динамики развития инцидентов по каскадному сценарию рассмотрим дискретно-событийную модель, построенную для системы «транспортное средство-опасный груз» (ТС–ОГ), предназначенную для использования в информационной подсистеме прогнозирования рисков при транспортировке опасных грузов [208–210, 226–228].

Анализ возможных сценариев развития инцидентов позволяет сделать заключение о принадлежности модели к группе немарковских случайных процессов, сводящимся к марковским за счет расширения числа состояний системы. Развитие инцидентов имеет каскадный характер с ветвлением переходов на каждом из этапов, что обуславливает древовидную структуру последовательности событий.

Стохастическое моделирование происходящих в системе ТС–ОГ динамических процессов основано на построении дискретно-событийных моделей с дискретными состояниями и непрерывным временем. Переходы между состояниями в

системе ТС–ОГ обусловлены влиянием стационарных и нестационарных потоков событий (удар, опрокидывание, разгерметизация и т. д.) [226–228].

Размеченный стратифицированный граф, приведенный на рисунке 5.3, представляет множество элементарных состояний системы ТС–ОГ (с их группировкой по четырем уровням), а также соответствующими путями определяет возможные сценарии развития событий. Особенностью обозначения и группировки состояний по стратам является возможность их привязки к определенному этапу развития событий по некоторому сценарию. При этом возможна детализация элементарных состояний с учетом предыдущих состояний и предварительной истории переходов на заданную глубину связности переходов и состояний. Поэтому любое текущее состояние обозначается как композиция последовательности произошедших после возникновения инцидента событий: N-нормальное состояние (Normal); C – столкновение (Collision); O – опрокидывание (Overturn); F – пожар (Fire); E – взрыв (Explosion), A – авария (accident).

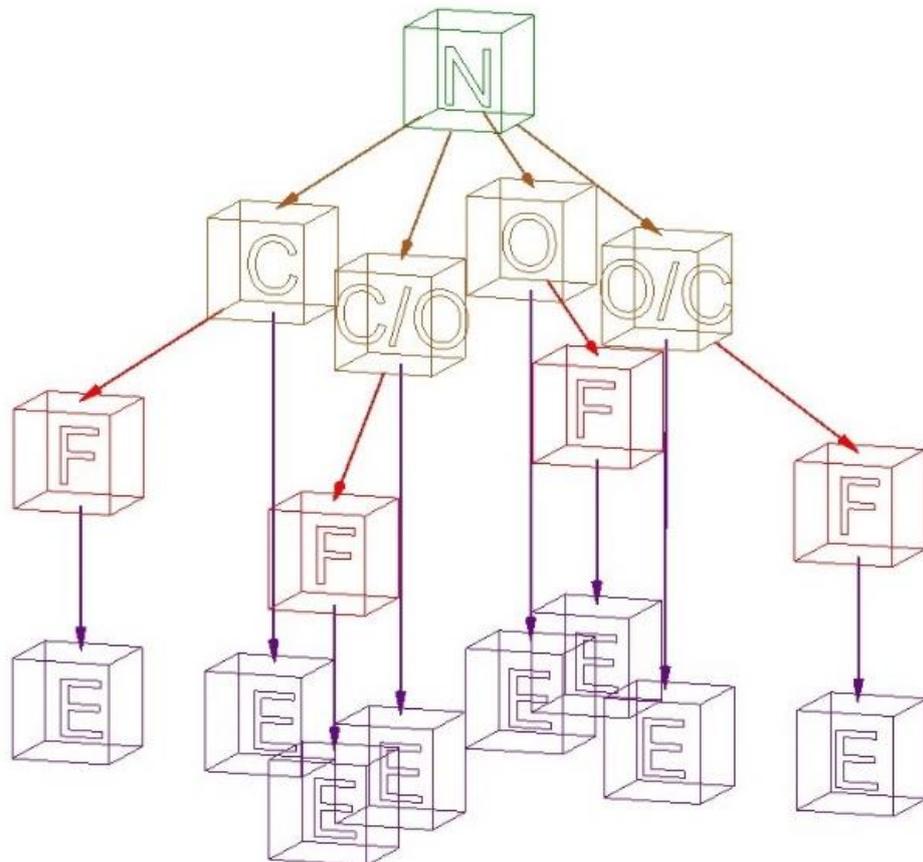


Рисунок 5.3 – Стратифицированный граф множества элементарных состояний системы «транспортное средство-опасный груз»

Моделирование последовательности переходов между состояниями в системе ТС–ОГ до и после возникновения инцидентов в соответствии с построенным стратифицированным графом состояний (рисунок 5.3) проводится на основе поиска подходящих с точки зрения дальнейшего определения параметров (на основе анализа статистических данных, либо применения экспертных методов) решений систем дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_N}{dt} = -P_N(\lambda_C + \lambda_O + \lambda_{CO} + \lambda_{OC}), \\ \frac{dP_O}{dt} = P_N \lambda_C - P_C(\lambda_{F/C} + \lambda_{E/C}), \\ \frac{dP_{CO}}{dt} = P_N \lambda_O - P_O(\lambda_{F/O} + \lambda_{E/O}), \\ \frac{dP_{CO}}{dt} = P_N \lambda_{CO} - P_{CO}(\lambda_{F/CO} + \lambda_{E/CO}), \\ \frac{dP_{OC}}{dt} = P_N \lambda_{OC} - P_{OC}(\lambda_{F/OC} + \lambda_{E/OC}), \\ \frac{dP_{F/C}}{dt} = P_C \lambda_{F/C} - P_{F/C} \lambda_{E/F/C}, \\ \frac{dP_{F/O}}{dt} = P_O \lambda_{F/O} - P_{F/O} \lambda_{E/F/O}, \\ \frac{dP_{F/CO}}{dt} = P_{CO} \lambda_{F/CO} - P_{F/CO} \lambda_{E/F/CO}, \\ \frac{dP_{F/OC}}{dt} = P_{OC} \lambda_{F/OC} - P_{F/OC} \lambda_{E/F/OC}, \\ \frac{dP_E}{dt} = \frac{dP_{E/C}}{dt} + \frac{dP_{E/O}}{dt} + \frac{dP_{E/CO}}{dt} + \frac{dP_{E/OC}}{dt} + \\ + \frac{dP_{E/F/C}}{dt} + \frac{dP_{E/F/O}}{dt} + \frac{dP_{E/F/CO}}{dt} + \frac{dP_{E/F/OC}}{dt} = \\ = P_C \lambda_{E/C} + P_O \lambda_{E/O} + P_{CO} \lambda_{E/CO} + P_{OC} \lambda_{E/OC} + \\ + P_{F/C} \lambda_{E/F/C} + P_{F/O} \lambda_{E/F/O} + P_{F/CO} \lambda_{E/F/CO} + P_{F/OC} \lambda_{E/F/OC}. \end{array} \right. \quad (5.23)$$

Динамика переходов между возможными состояниями в системе ТС–ОГ, принадлежащими к смежным стратам, качественно различается по мере развития событий и возрастания степени опасности состояний. Адекватное описание динамики развития последовательности событий по возможным сценариям может быть реализовано на основе подбора некоторого подходящего закона изменения интенсивностей переходов между состояниями системы ТС–ОГ и оценки его

определяющих параметров.

В связи с вышеуказанными обстоятельствами необходимо введение следующих предположений:

- при развитии возможного сценария в последовательности событий выделяются отдельные этапы с соответствующими состояниями системы ТС–ОГ,
- изменение интенсивностей переходов между состояниями описывается параметрической функцией от времени.

На первом этапе возникновение инцидента индуцирует переход в системе «ТС–ОГ» из начального в некоторое потенциально опасное аварийное состояние. При определении набора возможных инцидентов можно исключить маловероятные происшествия, непосредственно не связанные с автотранспортным происшествием (например, самопроизвольные возгорание, взрыв или разгерметизацию).

Принимается предположение о неизменной интенсивности обусловленных автотранспортным происшествием переходов в одно из аварийных потенциально опасных состояний: «столкновение», «опрокидывание», «столкновение с последующим опрокидыванием», «опрокидывание с последующим столкновением».

Дальнейшее развертывание последовательности событий по некоторому неблагоприятному сценарию ведет к формированию второго этапа, связанного с переходом из аварийного потенциально опасного состояния к некоторому критическому состоянию системы «ТС–ОГ». При этом критические состояния «пожар» и «взрыв» могут рассматриваться как агрегированные либо детализированы с учетом конкретного предшествующего состояния, включенного в агрегированное состояние «авария». При неопределенной информации о текущем состоянии и затрудненной детализации переходов, следует предусмотреть возможность описания переходов между состояниями, включенными в агрегированные состояния «пожар» и «взрыв».

Качественное отличие динамики второго этапа от первого связано с нестационарной интенсивностью переходов [226–228]. При этом возможен некоторый временной интервал задержки развития процесса, связанный с формированием предпосылок дальнейшего развития событий по неблагоприятному сценарию.

Например, при переходах из состоянием «авария» в одно из критических состояний «пожар» или «взрыв», или между критическими состояниями «пожар» и «взрыв».

Дальнейшее развертывание по определенному неблагоприятному сценарию последовательности событий на третьем этапе приводит к скачкообразной трансформации опасных процессов (пожара, взрыва, химического или биологического заражения, радиоактивного загрязнения и пр.) вследствие резкого изменения интенсивностей энергетического потока и воздействия на находящиеся в зоне поражения людей и иные объекты защиты ряда сопутствующих опасных факторов.

Последующее развитие последовательности событий по наиболее неблагоприятным сценариям приводит к четвертому этапу, связанному с формированием ЧС с дальнейшим возрастанием развитием ее масштаба и распространению последствий в пространстве и времени.

Моделирование развертывания последовательности событий по различным сценариям состоит в описании динамики изменения интенсивностей переходов между смежными состояниями на основе трехпараметрического распределения Вейбулла. Соответствующие распределения изменения интенсивностей для возможных переходов между смежными состояниями в системе ТС-ОГ полностью определяются тремя параметрами – коэффициентами масштаба, формы и сдвига.

В качестве примера рассмотрим последовательность событий, происходящих после автотранспортного происшествия с ТС и ОГ для категории «перевозка нефтепродуктов», результатом которого стало повреждение оболочки емкости с ОГ.

Переход между состояниями «столкновение» – «пожар» в данном случае обусловлен следующей последовательностью событий: утечка и испарение ЛВЖ, возникновение источника зажигания и контакт паров ЛВЖ с ним, приводящее к воспламенению емкости.

Некоторый временной лаг рассматриваемого перехода связан с проливом некоторого количества ЛВЖ, достаточного для дальнейшего развития цепи событий. Далее формируется пожароопасная ситуация, обусловленная образованием паров ЛВЖ, а также возможностью их воспламенения в случае контакта с источником зажигания. Коэффициент масштаба в данном случае определяет частоту

возникновения источника зажигания. Коэффициент формы позволяет описать динамику изменения вероятности контакта ЛВЖ с источником зажигания по мере увеличения объемов пролива и испарения ЛВЖ.

Интенсивности возможных переходов между состояниями смежных уровней в системе ТС–ОГ, с учетом вышесказанного, могут быть представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_C = \frac{1}{\eta_C}, \quad \lambda_O = \frac{1}{\eta_O}, \quad \lambda_{CO} = \frac{1}{\eta_{CO}}, \quad \lambda_{OC} = \frac{1}{\eta_{OC}}, \\ \lambda_{F/C} = \beta_{F/C} \frac{(t - \theta_{F/C})^{\beta_{F/C}-1}}{\eta_{F/C}^{\beta_{F/C}}}, \quad \lambda_{F/O} = \beta_{F/O} \frac{(t - \theta_{F/O})^{\beta_{F/O}-1}}{\eta_{F/O}^{\beta_{F/O}}}, \\ \lambda_{F/CO} = \beta_{F/CO} \frac{(t - \theta_{F/CO})^{\beta_{F/CO}-1}}{\eta_{F/CO}^{\beta_{F/CO}}}, \quad \lambda_{F/OC} = \beta_{F/OC} \frac{(t - \theta_{F/OC})^{\beta_{F/OC}-1}}{\eta_{F/OC}^{\beta_{F/OC}}}, \\ \lambda_{E/C} = \beta_{E/C} \frac{(t - \theta_{E/C})^{\beta_{E/C}-1}}{\eta_{E/C}^{\beta_{E/C}}}, \quad \lambda_{E/O} = \beta_{E/O} \frac{(t - \theta_{E/O})^{\beta_{E/O}-1}}{\eta_{E/O}^{\beta_{E/O}}}, \\ \lambda_{E/CO} = \beta_{E/CO} \frac{(t - \theta_{E/CO})^{\beta_{E/CO}-1}}{\eta_{E/CO}^{\beta_{E/CO}}}, \quad \lambda_{E/OC} = \beta_{E/OC} \frac{(t - \theta_{E/OC})^{\beta_{E/OC}-1}}{\eta_{E/OC}^{\beta_{E/OC}}}, \\ \lambda_{E/F/C} = \beta_{E/F/C} \frac{(t - \theta_{E/F/C})^{\beta_{E/F/C}-1}}{\eta_{E/F/C}^{\beta_{E/F/C}}}, \\ \lambda_{E/F/O} = \beta_{E/F/O} \frac{(t - \theta_{E/F/O})^{\beta_{E/F/O}-1}}{\eta_{E/F/O}^{\beta_{E/F/O}}}, \\ \lambda_{E/F/CO} = \beta_{E/F/CO} \frac{(t - \theta_{E/F/CO})^{\beta_{E/F/CO}-1}}{\eta_{E/F/CO}^{\beta_{E/F/CO}}}, \\ \lambda_{E/F/OC} = \beta_{E/F/OC} \frac{(t - \theta_{E/F/OC})^{\beta_{E/F/OC}-1}}{\eta_{E/F/OC}^{\beta_{E/F/OC}}}, \end{array} \right. \quad (5.24)$$

где коэффициенты $\eta_{*/\dots}$, $\theta_{*/\dots}$ и $\beta_{*/\dots}$ определяют масштаб, сдвиг и форму для функции зависимости интенсивностей λ_* переходов между состояниями смежных страт (обозначенных $*/\dots$) от времени.

Рассмотрим, согласно предложенному в главе 4 методу прогнозирования критических состояний, так называемые локальные решения для критических

состояний в системе «транспортное средство-опасный груз». Описание возможных сценариев развития последовательности событий при инцидентах в системе ТС–ОГ в значительной степени упрощается при разграничении общих сценариев возникновения инцидентов и развития разнообразных аварийных и критических ситуаций на этапы, характеризующиеся определенными уровнями текущей опасности и возможностями дальнейшего формирования переходов к более опасным состояниям, динамикой и длительностью развития опасных процессов [226–228].

Неблагоприятные сценарии развития инцидентов представляют последовательность переходов между состояниями смежных этапов с нарастанием интенсивности опасных процессов и повышением уровня угроз до возникновения критического состояния (пожара, взрыва, химического или биологического заражения, радиоактивного загрязнения и т. п.) катастрофического характера, с интенсивным воздействием опасных факторов на население и иные расположенные в зонах поражения объекты, с формированием ЧС значительного масштаба [226–228].

При своевременном реагировании оперативных подразделений и эффективных целенаправленных действиях аварийно-спасательных подразделений служб экстренного реагирования возникают возможности подавления опасных процессов и их проявлений, а также торможения развития событий по неблагоприятному сценарию, с последующим снижением уровня опасности вплоть до нейтрализации угроз и ликвидации негативных последствий инцидента. Значительному повышению оперативности реагирования экстренных служб способствует применение информационно-аналитических систем поддержки управления безопасностью в процессе транспортировки опасных грузов, обеспечивающих непрерывность логистического мониторинга, а также идентификацию инцидентов и оперативное информирование в реальном времени о развитии аварийной ситуации [208–210].

Поэтому представляет интерес моделирование динамики развития опасных событий при инцидентах, основанное на получении отдельных локальных решений системы дифференциальных уравнений Колмогорова (5.23) с заданными параметрами распределений Вейбулла (5.24), описывающих переходы между принадлежащими к смежным этапам состояниями системы ТС–ОГ.

Как следует из графа состояний (рисунок 5.3), вектор состояния системы ТС–ОГ в общем случае содержит 17 компонент. Однако при рассмотрении локальных решений строится вектор состояний с минимальным количеством компонент, соответствующим рассматриваемым переходным процессам и состояниям.

Результаты моделирования первого этапа развития обусловленных автотранспортным происшествием событий при переходах от состояния «норма» к одному из состояний, агрегированных в страте «авария»:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C(t) = 1 - e^{-\lambda ct} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_c} t} \approx \frac{1}{\eta_c} t, \\ P_O(t) = 1 - e^{-\lambda ot} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_o} t} \approx \frac{1}{\eta_o} t, \\ P_{CO}(t) = 1 - e^{-\lambda cot} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_{co}} t} \approx \frac{1}{\eta_{co}} t, \\ P_{OC}(t) = 1 - e^{-\lambda oct} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_{oc}} t} \approx \frac{1}{\eta_{oc}} t, \\ \\ P_N(t) = e^{-\left(\frac{1}{\eta_c} + \frac{1}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_{co}} + \frac{1}{\eta_{oc}}\right)t}, \\ \\ P_A(t) = 1 - e^{-\left(\frac{1}{\eta_c} + \frac{1}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_{co}} + \frac{1}{\eta_{oc}}\right)t} \approx \left(\frac{1}{\eta_c} + \frac{1}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_{co}} + \frac{1}{\eta_{oc}}\right) t, \\ \left(\text{при } \left(\frac{1}{\eta_c} + \frac{1}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_{co}} + \frac{1}{\eta_{oc}}\right) t \ll 1 \right). \end{array} \right. \quad (5.25)$$

Из системы (5.25) определяется ожидаемый в определенный момент вектор состояния системы ТС–ОГ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P} = \{P_N, P_C, P_O, P_{CO}, P_{OC}\}, \\ P_N + P_C + P_O + P_{CO} + P_{OC} = 1. \end{array} \right.$$

При моделировании агрегированного аварийного состояния текущий вектор состояния системы ТС–ОГ и вероятности состояний представляются системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P} = \{P_N, P_A\}, \\ P_N + P_A = 1. \end{array} \right.$$

Первая компонента вектора состояния системы ТС–ОГ приравнивается к нулю, либо исключается из дальнейшего рассмотрения в случае поступления информации о произошедшем инциденте (приеме сообщения о произошедшей аварии).

При моделировании динамики формирования критических состояний «пожар» или «взрыв» после произошедшего автотранспортного происшествия необходимо учитывать информацию о пожароопасных и взрывоопасных свойствах ОГ.

Ниже приведем пример моделирования, в котором принимается следующий сценарий возможного развития событий в системе ТС–ОГ. Происходит автотранспортное происшествие с разгерметизацией и последующим возгоранием. Далее, в процессе пожара возможно возникновение взрывоопасного состояния, ведущего к взрыву при определенных условиях.

Результаты моделирования динамики возникновения пожара при переходах из состояний, возникших в результате автотранспортного происшествия, можно представить в виде уравнений, описывающих текущее значение вероятностей возгорания:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{F/C}(t) = 1 - P_C(t) = P_C(0) \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/C}}{\eta_{F/C}}\right)^{\beta_{F/C}}} \right), \\ P_{F/O}(t) = 1 - P_O(t) = P_O(0) \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/O}}{\eta_{F/O}}\right)^{\beta_{F/O}}} \right), \\ P_{F/CO}(t) = 1 - P_{CO}(t) = P_{CO}(0) \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/CO}}{\eta_{F/CO}}\right)^{\beta_{F/CO}}} \right), \\ P_{F/OC}(t) = 1 - P_{OC}(t) = P_{OC}(0) \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/OC}}{\eta_{F/OC}}\right)^{\beta_{F/OC}}} \right). \end{array} \right. \quad (5.26)$$

При этом предполагаем, что каждый из коэффициентов сдвига θ_* характеризуется ожидаемым временем разгерметизации емкости с ОГ, и в случае

имеющейся информации о нарушении целостности оболочки емкости принимается равным нулю.

Из системы (5.26) определяется ожидаемый текущий вектор состояния системы ТС-ОГ:

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \{ P_C, P_O, P_{CO}, P_{OC}, P_{F/C}, P_{F/O}, P_{F/CO}, P_{F/OC} \}, \\ P_C + P_O + P_{CO} + P_{OC} + P_{F/C} + P_{F/O} + P_{F/CO} + P_{F/OC} = 1. \end{cases}$$

Если имеется информация о конкретном аварийном состоянии, то начальная вероятность этого состояния принимается равной единице, и при дальнейшей детализации рассматривается только соответствующие производные компоненты вектора состояния. Например, при известном событии «удар» система уравнений (5.26) принимает вид:

$$\begin{cases} P_{\bar{F}/C}(t) = P_C(t) = e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/C}}{\eta_{F/C}}\right)^{\beta_{F/C}}}, \\ P_{F/C}(t) = 1 - P_{\bar{F}/C}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/C}}{\eta_{F/C}}\right)^{\beta_{F/C}}}, \end{cases} \quad (5.27)$$

и соответствующий (5.27) текущий вектор состояния системы ТС–ОГ представляется как:

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \{ P_C, P_{F/C} \}, \\ P_C + P_{F/C} = 1. \end{cases}$$

При моделировании динамики взрывоопасного состояния в ходе развития пожара принимаем предположение о том, что конкретный вид автотранспортного происшествия оказывает незначительное влияние различий на развитие событий. Результаты моделирования представлены в виде уравнений, описывающих текущее значение вероятностей критических состояний «пожар» и «взрыв»:

$$\begin{cases} P_F(t) = e^{-\left(\frac{t-\theta_{E/F}}{\eta_{E/F}}\right)^{\beta_{E/F}}}, \\ P_E(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{E/F}}{\eta_{E/F}}\right)^{\beta_{E/F}}}. \end{cases} \quad (5.28)$$

В этом случае текущий вектор состояния системы ТС-ОГ представляется с

учетом (5.28) в соответствии с:

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \{ P_F, P_{E/F} \}, \\ P_F + P_{E/F} = 1. \end{cases}$$

Таким образом, локальные решения систем уравнений Колмогорова, полученные для избранных сценариев развития аварийной ситуации позволяют проводить численное моделирование и оценку вероятностных характеристик возникновения аварийных и критических состояний.

Теоретические исследования процессов перехода из состояния пожара в состояние взрыва для различных краевых условий представляет достаточно трудоемкую задачу, которая может быть решена только при введении ряда упрощающих предположений [238]. К настоящему времени достаточно точное и соответствующее потребностям информационно-аналитического обеспечения управления при оперативном реагировании на инциденты описание динамики таких переходов, с учетом разнообразных условий, на основе экспериментальных либо статистических данных также невозможно.

Поэтому создание экспертных методик для определения коэффициентов распределений Вейбулла, описывающих динамику вероятности перехода из состояния пожара во взрыв при различных реально возможных условиях не только целесообразно для решения задач поддержки управления при оперативном реагировании на инциденты, но и представляет значительный интерес с точки зрения теории горения и взрыва [238].

Предлагаемая стохастическая модель общая методика ее применения позволяет прогнозировать динамику развития аварийных и критических состояний по каскадному сценарию, а также отражает вероятностные характеристики своевременности и эффективности возможных воздействий при оперативном реагировании на инциденты.

На рисунке 5.4 представлены результаты моделирования динамики взрывоопасного состояния в ходе развития пожара на основе (5.29) при различных значениях коэффициентов формы, с фиксированными коэффициентами сдвига и формы

распределения Вейбулла. При известных фиксированных коэффициентах распределения Вейбулла возможно определение рассмотренных в предыдущем разделе временных интервалов, относящихся к оптимальному реагированию и возможностью проведения АСНР при заданной допустимой вероятности перехода к взрывоопасному состоянию (рисунок 5.5).

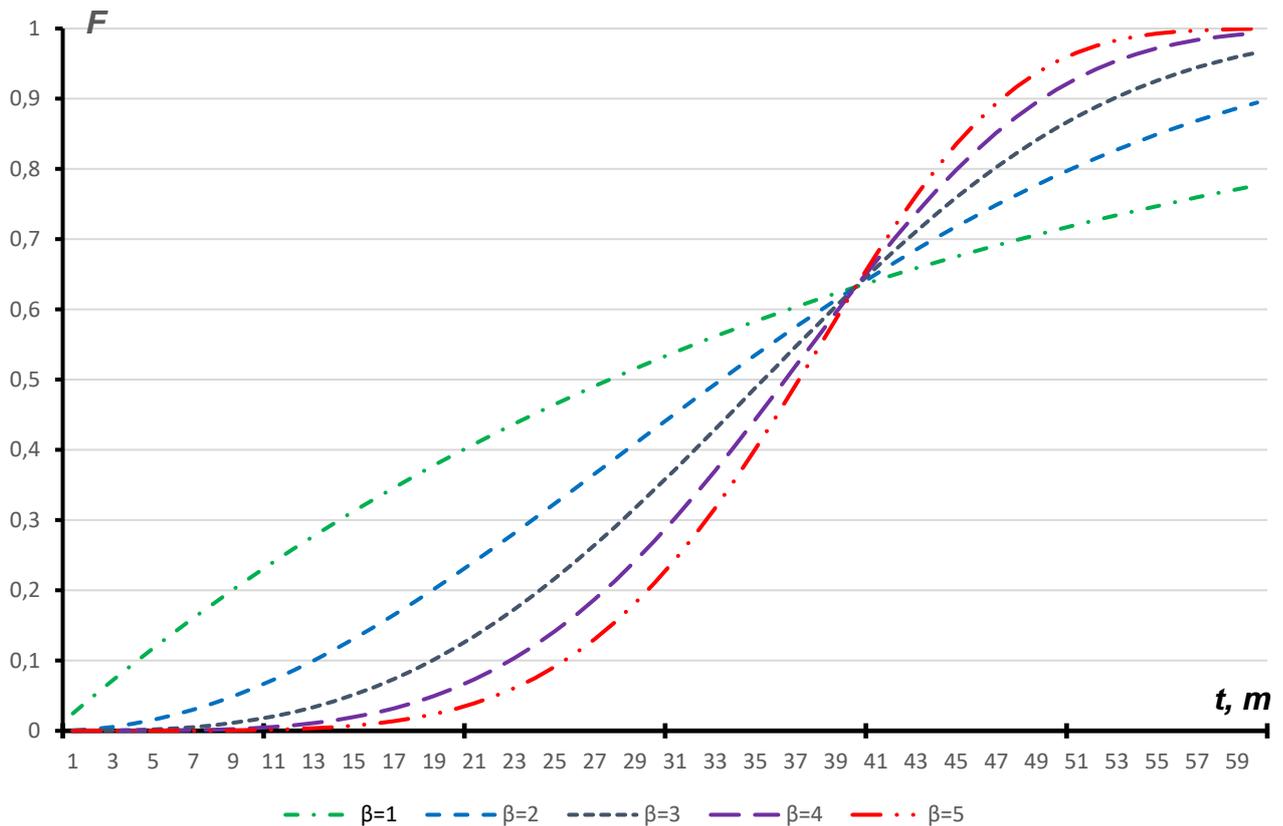


Рисунок 5.4 – Изменение вероятности взрывоопасного состояния при значениях коэффициентов

$$\theta_{E/F} = 0, \quad \eta_{E/F} = 40, \quad \beta_{E/F} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

Методика реализована в алгоритмах, интегрированных в едином программном комплексе (Приложение Б) прогнозирования аварийных и критических состояний по каскадному сценарию в рамках модели «транспортное средство-опасный груз», предназначенном для использования в информационной подсистеме прогнозирования рисков транспортировки ОГ и позволяющего производить оценку:

- коэффициентов масштаба, формы и сдвига трехпараметрического распределения Вейбулла, определяющих интенсивности переходов (5.24) между состояниями

системы (5.25) по результатам экспертных оценок;

- построения для оценки длительности «окон возможностей» оперативного реагирования временных зависимостей на основе отдельных локальных аналитических решений систем дифференциальных уравнений Колмогорова (5.26–5.28), описывающих переходы между принадлежащими к смежным этапам состояниями системы ТС–ОГ.

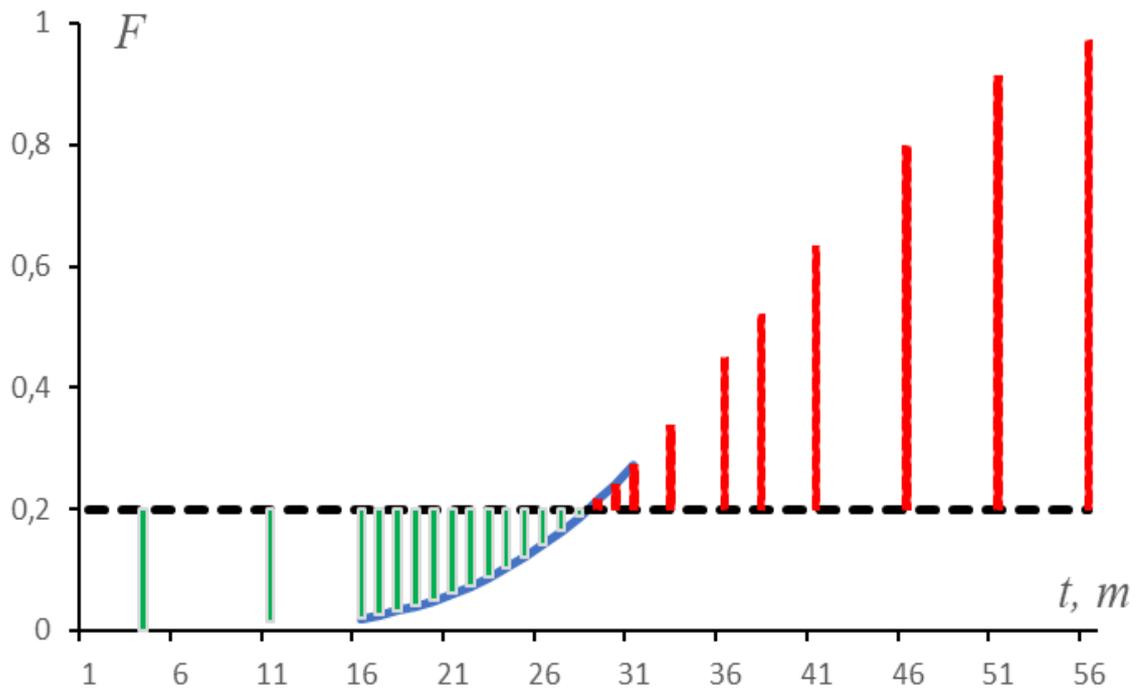


Рисунок 5.5 – Определение «окна возможностей» оперативного реагирования в соответствии с допустимой вероятностью перехода к состоянию последующего этапа

Таким образом, построенная прикладная модель представляет собой основу для методик прогнозирования динамики развития инцидентов, аварий и катастроф по каскадному сценарию в системах, аналогичных рассмотренной в настоящем разделе системе ТС–ОГ, и может применяться для информационно-аналитической поддержки управления и решения задач оперативного реагирования и прогнозирования рисков проведения АСНР в условиях неполной информации.

5.3 Имитационное моделирование функционирования организационно-технических систем оперативного управления

В периоды проявления кризисных ситуаций различного характера оперативное управление в системах обеспечения безопасностью достаточно часто происходит в условиях высокоинтенсивной интервальной нагрузки для персонала, технических средств и информационных систем аппарата управления. Поэтому актуальность развития соответствующих методов моделирования и проектирования так называемых «адаптивных» организационно-технических подсистем СОБ, отличающихся гибкостью и способностью к оперативной трансформации, достаточно велика [6, 211–215, 230].

Адаптивные системы оперативного управления изначально предназначены и проектируются [211–215] для многократного решения небольшого количества типовых задач, генерация которых описывается потоком случайных событий с переменной интенсивностью. Характер эксплуатации рассматриваемых организационно-технических систем связан с их трансформацией в соответствии с текущими и перспективными потребностями обеспечения оперативного управления. По особенностям функционирования такие системы можно рассматривать как системы массового обслуживания с переменным числом каналов (СМО ПК), функционирующие в условиях нестационарного потока требований.

При проектировании адаптивных организационно-технических систем некорректно и неэффективно применение стандартных математических моделей СМО. Построение адекватной модели невозможно без учета влияния ряда переходных процессов, обусловленных как нестационарным потоком требований, так и вариациями числа каналов обслуживания [239, 240].

Предварительное планирование режимов функционирования адаптивных организационно-технических систем оперативного управления в соответствии с предлагаемым способом основывается на формировании предварительного прогноза и использовании ожидаемых характеристик поступающего потока требований.

Проектирование адаптивных систем оперативного управления, как следует из вышесказанного, возможно на основе применения компьютерных технологий имитационного моделирования для решения задач оптимизации показателей эффективности функционирования СМО ПК.

Варианты варьирования количества каналов представляет собой «управляемый параметр», а прогнозируемый нестационарный поток требований рассматривается как «неуправляемый параметр».

Имитационное моделирование основана на построенной автором дискретно-событийной модели функционирования СМО ПК, представленной в виде графа на рисунке 5.6, по строкам которого сгруппированы соответствующие определенному количеству $n(t)$ оставшихся необслуженных требований возможные состояния СМО ПК.

Параметры функционирования СМО ПК, определяемые при имитационном моделировании, подразделяются на:

- «внешние» (длина очереди и время ожидания),
- «внутренние» (загрузка каналов обслуживания).

Имитационное моделирование функционирования СМО ПК в условиях прогнозируемого нестационарного потока требований с использованием разработанной автором компьютерной программы [229] предполагает возможность задания пользователем количественных характеристик входного потока и параметров каналов обслуживания.

Программа позволяет моделировать функционирование СМО ПК, подбирая на основе анализа полученных при нескольких сеансах моделирования результатов оптимальные параметры варьирования количества каналов обслуживания.

Представленные имитационная модель СМО ПК, а также алгоритм и программа могут использоваться в компьютерной системе поддержки управления в организационно-технических системах для решения задач оптимального распределения ограниченных ресурсов, привлекаемых к оперативному управлению в кризисных ситуациях.

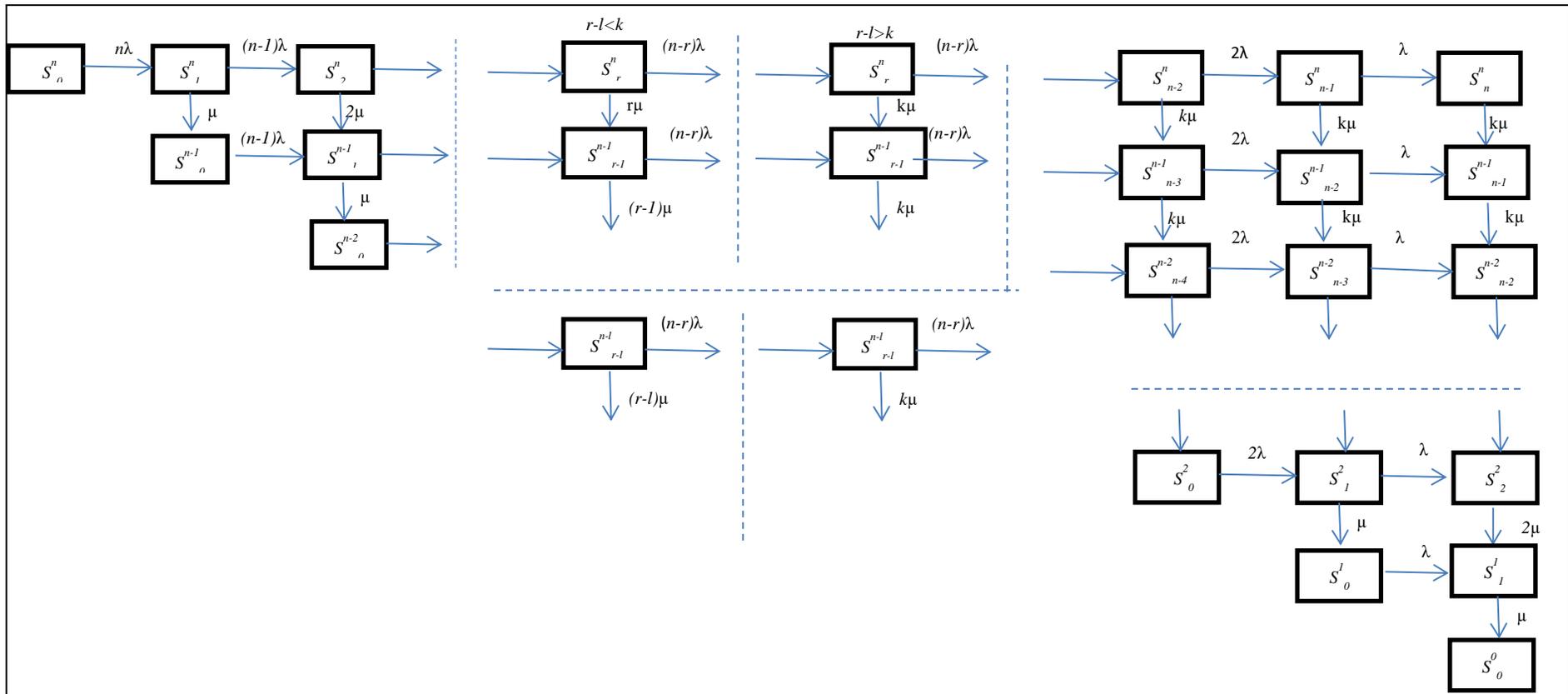


Рисунок 5.6 – Граф состояний адаптивной СМО ПК с неограниченной очередью

5.4 Моделирование пожарно-электрического вреда при эксплуатации электрооборудования с учетом качества потребленной электроэнергии

Перспективным направлением снижения социально-экономических потерь от пожаров является формирование специализированных социотехнических систем, направленных на минимизацию потока инцидентов, генерируемых основными источниками пожарных рисков [6, 211–215]. Поскольку значительное количество пожаров инициируется инцидентами, обусловленными различными отказами электрооборудования, становится актуальной проблема создания новых технологий, обеспечивающих регулирование в допустимых пределах уровня риска возникновения пожаров по электротехническим причинам.

При формировании единой системы профилактики пожаров и планировании разнообразных мероприятий, направленных на значительное снижение риска пожаров по электротехническим причинам, возникают потребности их научного, инженерно-технического, экономического и нормативно-правового обоснования. Применение для этих целей вероятностно-физических моделей надежности, качества и безопасности [216–223] позволяет выделить основные технологические направления по снижению риска пожаров по электротехническим причинам, обусловленные:

- снижением пожароопасности электротехнических приборов и оборудования;
- улучшением параметров качества потребляемой электроэнергии.

При построении моделей риск-ориентированного управления в системах обеспечения пожарной безопасности возникает необходимость обоснования новых критериев управления, отражающих специфику исследуемых рисков. Перспективным направлением представляется развитие подходов, связанных с моделированием пожарно-электрического вреда (ПЭВ), и позволяющих выявлять основные факторы, влияющие на уровень пожарной опасности эксплуатации электрооборудования и ущерб от пожаров по электротехническим причинам [211–215].

Формирование понятия ПЭВ основано на изучении ряда явлений, связанных с негативным изменением качества электроприборов и иного электрооборудования

[211–216] в процессе их эксплуатации по преобразованию и передаче электрической энергии. Возрастание опасности пожаров по электротехническим причинам и сокращение пожаробезопасного ресурса эксплуатации полностью определяется физикой процессов деградации электрорадиоматериалов (ЭРМ) и компонент электрооборудования.

В значительной степени на понятие ПЭВ повлияли исследования [211–213], установившие влияние показателей качества потребленной при эксплуатации электрооборудования электроэнергии на уровень пожарной опасности. Поскольку возрастание опасности пожаров по электротехническим причинам связано с потреблением электроэнергии низкого качества, целесообразно применение устройств, дифференцирующих ее по качественным показателям, в частности, модифицированных дополнительными функциями электросчетчиков-подавителей (ЭСП) ПЭВ и ОФП [211].

Эффективность применения ЭСП ПЭВ и ОФП исследуется в предложенной автором когнитивной модели [206, 207], представленной на рисунке 5.7 в виде, позволяющем выявить основных факторы формирования ПЭВ и визуализировать их взаимосвязь.

При отсутствии средств, дифференцирующих потребляемую электроэнергию по допустимым W_d и недопустимым показателями качества $W_{нд}$, как отражено на рисунке 5.7 (а), возможно выявить факторы формирования ПЭВ, обусловленные статистически усредненными показателями возникновения пожаров по электротехническим причинам и объемов потребления электроэнергии. Применение ЭСП ПЭВ и ОФП, как показано на рисунке 5.7 (б), позволяет осуществлять мониторинг текущих показателей ПЭВ, а также оказывать на них некоторое влияние.

Таким образом, применение технических систем дифференциации потребляемой электроэнергии W по характеристикам качества представляет потенциальную основу для построения организационно-технической системы обеспечения необходимого качества поставляемой и потребляемой электроэнергии.

Как показано пронумерованными дугами графа когнитивной модели на рисунке 5.7 (б), ЭСП ПЭВ и ОФП обеспечивают выполнение наряду с основной

функцией дифференциации потребляемой электроэнергии по характеристикам качества (функция 1) также и некоторые функции, направленные на подавление ПЭВ. Дополнительные функции могут быть реализованы при помощи встроенных непосредственно в ЭСП ПЭВ и ОФП устройств и механизмов [214, 215] компенсации (функция 2) отклонений показателей качества электроэнергии от допустимых, в результате позволяющих добиться некоторого повышения качества потребляемой электроэнергии [211]. При соответствующей модификации ЭСП ПЭВ также способны идентифицировать пожароопасные режимы с последующим аварийным отключением электрооборудования и обесточиванием электросети (функция 3).

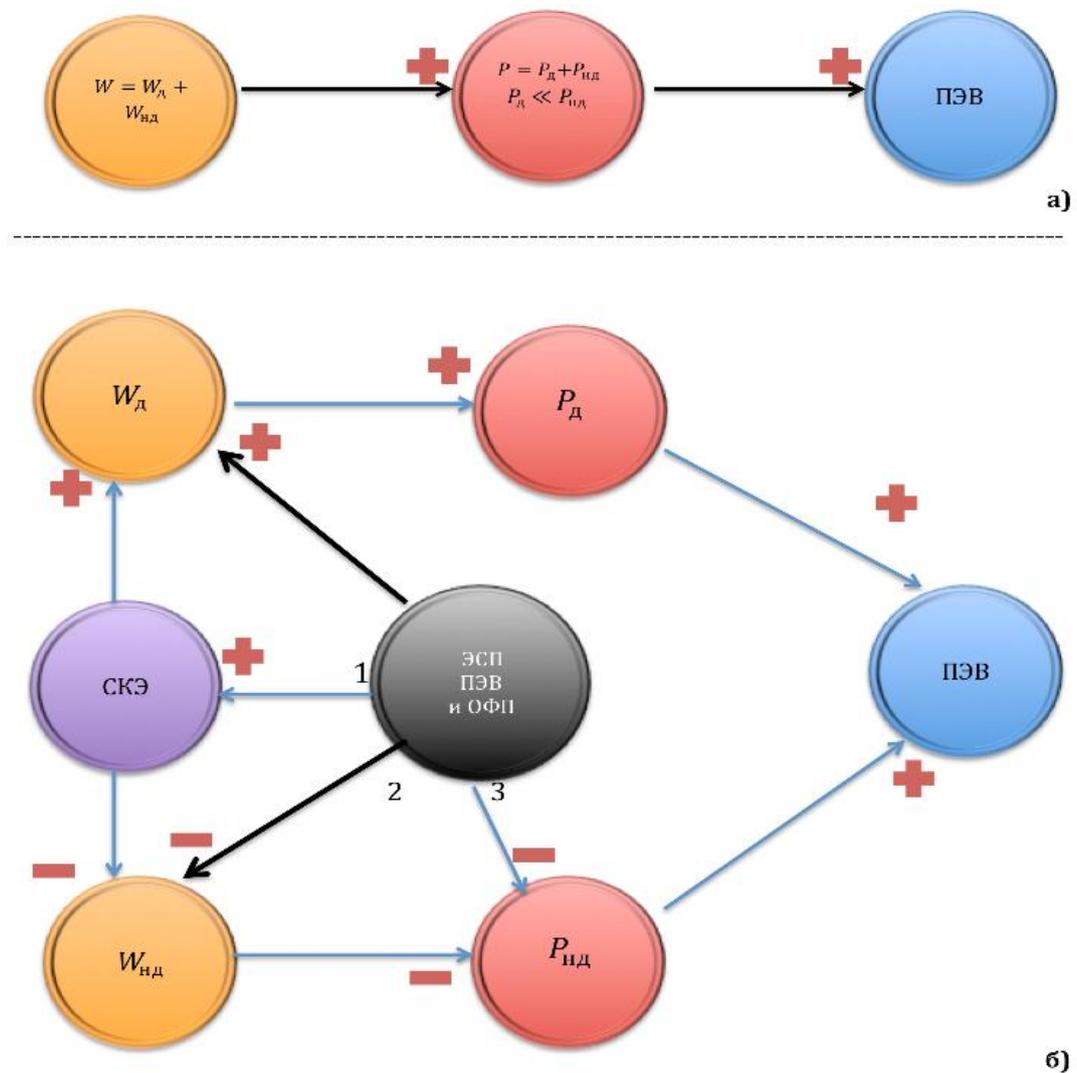


Рисунок 5.7 (а,б) – Когнитивная модель ПЭВ с применением ЭСП ПЭВ и ОФП

Предлагаемые в [211–216] показатели ПЭВ имеют противоречивый характер

и значительную степень неопределенности, что препятствует их применению. Поскольку при создании эффективных моделей и алгоритмов управления рисками пожаров по электротехническим причинам необходимы надежное определение природы возникновения и количественная оценка ПЭВ, существующие показатели ПЭВ нуждаются в уточнении, детализации, теоретическом и технологическом обосновании.

Причины изменения качества и надежности электротехнического изделия не ограничиваются непосредственно эксплуатационным износом, поскольку связаны также с рядом иных деградиационных процессов. Основные факторы, оказывающие влияние на величину обобщенной наработки, можно разделить на экстенсивные, к которым следует отнести время (t) и количество (Q) потребленной электроэнергии, а также интенсивные - качество (C) потребленной электроэнергии, климатические (температура, влажность) и иные условия эксплуатации (K), качество обслуживания (L) и пр.

Функционал наработки в временном эквиваленте представим зависящим от ряда параметров интеграла функции (коэффициента) наработки по времени:

$$\tau(K, L, C, Q, t) = \int_L^T d\tau = \int_0^T D(K, L, C, Q, t) dt . \quad (5.29)$$

При построении описывающей возникновение ПЭВ общей модели, принимаем ряд ограничений относительно основных факторов, определяющих конкретный вид функционала (5.29) наработки при эксплуатации электроприборов. В качестве основного предположения принимаем сходные условия эксплуатации электроприборов, которые не приводят к существенным отличиям показателей их эксплуатационной надежности. Тогда вариации общего износа при эксплуатации электрооборудования, имеющего близкие значения возраста (T) и потребленной энергии (Q), согласно [204, 205], допустимо представить как:

$$\delta\tau \approx \Psi(K, L, C, Q, t)\delta t + \Phi(K, L, C, Q, t)\delta Q . \quad (5.30)$$

Отсюда следует, что основные составляющие приращения функционала наработки, обусловленные энтропийными процессами, связанными с

трансформацией и диссипацией потребленной в процессе эксплуатации энергии, а также с развивающимися во времени деградационными изменениями (процессами «старения» ЭРМ), принимают вид:

$$\Delta\tau \approx \Psi(K, L, C, Q, t)\Delta t + \Phi(K, L, C, Q, t)W\Delta t \quad (\Delta\tau \ll \tau) . \quad (5.31)$$

Как правило, при интенсивной эксплуатации электроприбора износ в основном зависит от объема потребленной энергии, и с хорошим приближением выполняется соотношение:

$$\Psi(K, L, C, Q, t) \ll \Phi(K, L, C, Q, t)W . \quad (5.32)$$

Согласно модифицированной формуле Аррениуса-Эйринга [216] интенсивность отказов ЭРЭ определяется мультипликативной функцией:

$$\lambda = K_{HTЦ} \cdot \lambda_H \cdot \frac{kT}{h} \cdot \exp\left(-\frac{S_0}{k}\right) \cdot \exp[f(H)] , \quad (5.33)$$

где λ_H - номинальное значение интенсивности отказов; T - температура, $K_{HTЦ}$ - коэффициент учета совместного влияния электрической нагрузки, температуры и параметров циклирования (включения и выключения) на интенсивность отказов, S_0 - энтропия отказа, $f(H)$ - функция влияния энергетической нагрузки.

Использование приближения функции влияния энергетической нагрузки экспоненциальной функцией относительного изменения нагрузок от номинального режима, в соответствии с [216], позволяет представить вторую составляющую функционала (5.31) в виде:

$$\Phi(K, L, C, Q, t) = \frac{\varphi_n(K, L, C, Q, t)}{W_0} \exp\left(\eta \left| \frac{W - W_0}{W_0} \right| \right) , \quad (5.34)$$

где

$$\varphi_n(K, L, C, Q, t)$$

представляет функцию (коэффициент), учитывающий условия эксплуатации, η - коэффициент ускорения наработки по отклонению от номинального режима.

При небольших отклонениях от номинального режима:

$$\left| \frac{W - W_0}{W_0} \right| = \left| \frac{\Delta W}{W_0} \right| \rightarrow +0$$

с хорошим приближением выполняется соотношение:

$$\begin{aligned}
d\tau(K, L, C, Q, t) &\cong \frac{\varphi_n}{W_0} \exp\left(\eta \left|\frac{W - W_0}{W_0}\right|\right) W \delta t \approx \\
&\approx \frac{\varphi_n}{W_0} \left(1 + \eta \left|\frac{\Delta W}{W_0}\right|\right) \left(1 + \left|\frac{\Delta W}{W_0}\right|\right) W_0 \delta t \approx \varphi_n \left(1 + (\eta + 1) \left|\frac{\Delta W}{W_0}\right|\right) \delta t.
\end{aligned} \quad (5.35)$$

Для удобства дальнейших вычислений выразим функцию (коэффициент) наработки в виде:

$$D(K, L, C, Q, t) = \frac{d\tau(K, L, C, Q, t)}{d t} = \varphi_n \left(1 + (\eta + 1) \left|\frac{\Delta W}{W_0}\right|\right). \quad (5.36)$$

В принятом приближении интенсивной эксплуатации электроприбора принимается следующая интерпретация наработки – как времени непрерывной работы электроприбора при нагрузке, соответствующей эксплуатации в номинальном режиме. Поэтому, при моделировании отказов электрооборудования, эксплуатируемого в примерно одинаковых условиях (близких к стандартным), допустимо в (5.35, 5.36) считать коэффициент $\varphi_n = 1$, и в дальнейшем использовать функцию (коэффициент) наработки в виде:

$$D = \frac{d\tau}{d t} = \left(1 + (\eta + 1) \left|\frac{\Delta W}{W_0}\right|\right). \quad (5.37)$$

В соответствии с интерпретацией общей наработки, вероятность возникновения отказа определенного вида для каждого типа электротехнического изделия определяется функцией распределения, соответствующей значению функционала наработки в заданный момент времени. Вместе с тем, для решения большинства типовых задач по определению различных параметров надежности и безопасности эксплуатации электротехнических изделий достаточно, как правило, исследования изменений функций распределения отказов в течение заданных временных интервалов. Приведем некоторые соображения, которые могут составлять основу создания экспериментальных методик по определению сроков пожаробезопасной эксплуатации электрооборудования и оценки ПЭВ.

Компоненты ПЭВ, связанные с недопустимыми параметрами качества электроэнергии, согласно (5.29–5.37) должны интерпретироваться как дополнительный ущерб, возникающий при эксплуатации электрооборудования, обусловленный превышением значений реальной наработки над значением наработки при

стандартных параметрах электроснабжения.

Вероятность возникновения пожароопасных отказов при эксплуатации электрооборудования в нормальном режиме (в пределах пожаробезопасного ресурса) с допустимыми параметрами качества электроэнергии (стандартных параметрах электроснабжения), согласно (3.52) определяется значениями функционала наработки в моменты времени начала и завершения рассматриваемого интервала:

$$\begin{aligned} \Delta F_i^{aw}(t; t + \Delta t) &= F_i^{aw}(\tau(t) + \Delta\tau) - F_i^{aw}(\tau(t)), \\ \Delta W = 0 &\rightarrow \Delta\tau = \varphi_n \Delta t, \end{aligned} \quad (5.38)$$

$$\Delta F_i^{aw}(t; t + \Delta t) = F_i(\tau(t) + \varphi_n \Delta t) - F_i(\tau(t)).$$

Вероятность возникновения пожароопасных отказов при эксплуатации электрооборудования в нормальном режиме с отклонениями от допустимых параметров качества электроэнергии (нестандартных параметрах электроснабжения), с учетом изменения наработки согласно (3.52), соответствует временному интервалу:

$$\begin{aligned} \Delta F_i^{uw}(t; t + \Delta t) &= F_i^{uw}(\tau(t) + \Delta\tau) - F_i^{uw}(\tau(t)), \\ \Delta W \neq 0 &\rightarrow \Delta\tau = \varphi_n \left(1 + (\eta + 1) \left| \frac{\Delta W}{W_0} \right| \right) \Delta t, \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$\Delta F_i^{uw}(t; t + \Delta t) = F_i \left(\tau(t) + \varphi_n \left(1 + (\eta + 1) \left| \frac{\Delta W}{W_0} \right| \right) \Delta t \right) - F_i(\tau(t)).$$

В случае эквивалентности начальных условий, понимаем их как равенство значений соответствующих начальному моменту времени функционалов наработки:

$$F_i^{uw}(\tau(t_0)) = F_i^{aw}(\tau(t_0)) = F_i(\tau(t_0)).$$

Тогда избыточная вероятность возникновения пожароопасных отказов:

$$\begin{aligned} \Delta^+ F_i^{uw}(t; t + \Delta t) &= \Delta F_i^{uw}(t; t + \Delta t) - \Delta F_i^{aw}(t; t + \Delta t) = \\ &= F_i \left(\tau(t) + \varphi_n \left(1 + (\eta + 1) \left| \frac{\Delta W}{W_0} \right| \right) \Delta t \right) - F_i(\tau(t) + \varphi_n \Delta t). \end{aligned} \quad (5.40)$$

При непостоянном отклонении параметров качества электроэнергии

определение наработки требует вычисления интеграла (5.29), поэтому избыточная вероятность возникновения пожароопасных отказов может быть найдена в соответствии с:

$$\tau_2^{aw}(t_2) = \tau_1(t_1) + \varphi_n \Delta t ,$$

$$\tau_2^{uw}(t_2) = \tau_1(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} D(K, L, C, Q, t) dt , \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} \Delta^+ F_i^{uw}(t_1; t_2) &= \Delta F_i^{uw}(t_1; t_2) - \Delta F_i^{aw}(t_1; t_2) = \\ &= F_i(\tau_2^{uw}(t_2)) - F_i(\tau_2^{aw}(t_2)) . \end{aligned}$$

В случае задания среднего ущерба от пожара $\langle U \rangle$, использование выражений (5.38–5.41) избыточной вероятности возникновения пожароопасных отказов позволяет определить одну из компонент ПЭВ, обусловленную эксплуатацией электрооборудования в нормальном режиме при нестандартных параметрах электроснабжения в течение заданного временного интервала следующим образом:

$$FED_{uw}(t; t + \Delta t) = \langle U \rangle \cdot \Delta^+ F_i^{uw}(t; t + \Delta t) \quad (5.42)$$

Особенный интерес представляет выделение компонент ПЭВ, связанных с превышением пределов пожаробезопасного ресурса, возникающего раньше запланированного предельного срока эксплуатации вследствие эксплуатации электрооборудования с недопустимыми отклонениями параметров качества электроэнергии.

Определим возможную избыточную вероятность возникновения пожароопасных отказов электрооборудования с запланированным предельным сроком эксплуатации. На рисунке 5.8 показаны результаты оценки влияния значительных (порядка 10%) постоянных отклонений параметров качества электроэнергии на основе использования (5.39–5.40) на пожаробезопасный ресурс электрооборудования.

Избыточная вероятность возникновения пожароопасных отказов при эксплуатации в течение запланированного срока представляет, согласно (3.29), разность функций распределения пожароопасных отказов при реальных и стандартных параметрах электроснабжения, соответствующих моменту достижения

запланированного предельного срока эксплуатации. Введение обозначений для запланированного предельного срока эксплуатации электрооборудования и достигнутых величин наработки при стандартных и нестандартных параметрах электропитания, позволяет представить избыточную вероятность возникновения пожароопасных отказов при эксплуатации в течение запланированного срока в виде:

$$\begin{aligned} \tau^{aw}(t^*) &= \varphi_n t^* \\ \tau^{uw}(t^*) &= \int_0^{t^*} D(K, L, C, Q, t) dt \\ \Delta^+ F^{uw}(t_1; t_2) &= \Delta F_i^{uw}(t_1; t_2) - \Delta F_i^{aw}(t_1; t_2) = \\ &= F_i(\tau^{uw}(t^*)) - F_i(\tau^{aw}(t^*)). \end{aligned} \quad (5.43)$$

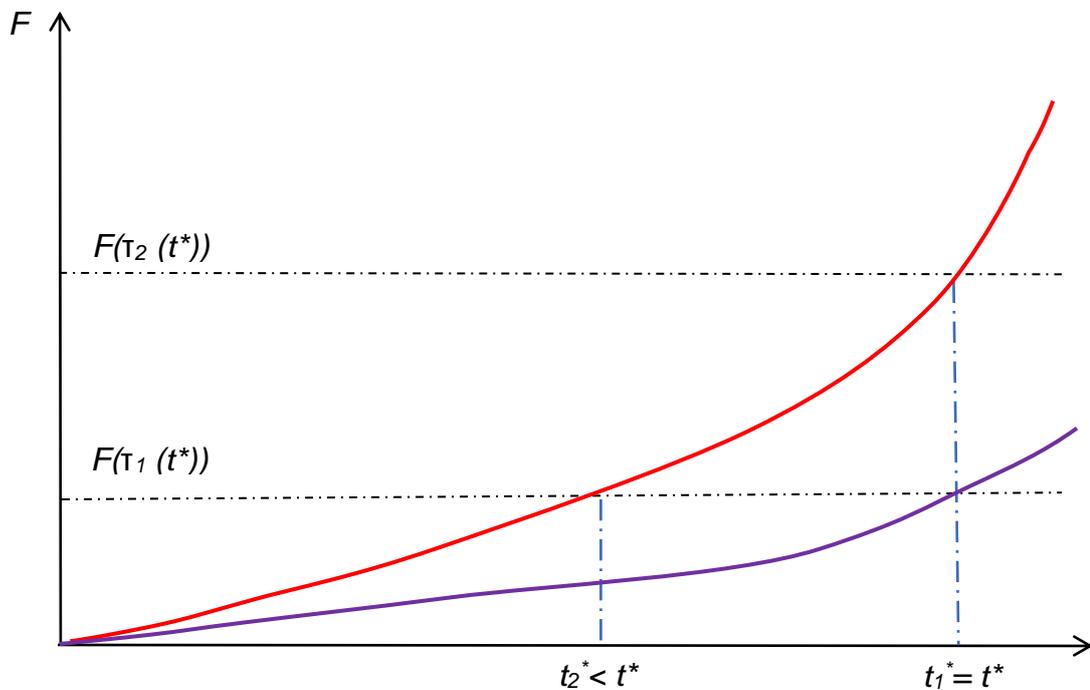


Рисунок 5.8 – Оценка влияния постоянных отклонений параметров качества электроэнергии на пожаробезопасный ресурс электрооборудования

Построенная модель ПЭВ (5.38–5.43) описывает влияние показателей качества потребляемой электроэнергии на динамику пожароопасных отказов электрооборудования, может быть положена в основу создания экспериментальных методик по определению сроков пожаробезопасной эксплуатации электрооборудования и оценки показателей ПЭВ.

5.5 Стохастическое моделирование геодинамической устойчивости природно-технических систем

Интерес к стохастическому моделированию геодинамической устойчивости территорий объясняется не только практической ценностью и обоснованностью прогностической информации о динамике опасных геодинамических процессов (ОГП), но также и возможностью ее визуализации в виде «точечно-площадного» распределения локальных вероятностно-временных показателей геодинамического риска для относительно малой протяженности территорий и объектов.

Постановка задачи исследования состоит в создании универсальных математических моделей, позволяющих по набору доступных данных о состоянии геологической среды идентифицировать и количественно оценивать в прогностическом смысле угрозы возникновения ЧС геодинамического происхождения, а также комплексной методики точечно-площадного районирования территорий, прогнозирования геодинамической устойчивости и проявлений опасных геодинамических процессов.

Формальная постановка задачи управления рисками ЧС геодинамического происхождения представляется в виде существенно модифицированной представленной ранее комбинаторной задачи многокритериальной оптимизации (1.11). При этом необходимо учитывать достаточно сложную структуру функциональных и/или неявных связей между совокупностью критериев управления, отражающих последствия D возможных ЧС геодинамического происхождения, с одной стороны, и совокупностью управляемых параметров (r_j, X_{g_j}) , показателей уязвимости (S_j^k) при k -м состоянии геологической среды для объектов защиты (C_j) , связанных с j -м элементом природно-технической системы и, а также иных переменных, характеризующими локальные вероятностно-временные и интенсивные показатели геодинамического риска $(V_j^k(r))$, что позволяет составить следующую систему уравнений и условий:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\forall i: D_i \rightarrow \min, \quad \mathbf{D} = (D_1, \dots, D_i, \dots, D_I)^T \in R_{I \times 1}, \quad i \in \{1, \dots, I\}; \\
\forall \mathbf{r}_j \in \{\mathbf{r}_{jv}\} \in \Omega, \quad j \in \{1, \dots, J\}, \quad v = \overline{1, \dots, \bar{V}_j}; \\
\forall x_{g_j}: \quad x_{g_j} \in \mathbf{X}_{g_j}, \quad g_j \in \{1_j, \dots, G_j\}, \\
\quad \quad \quad x_{\bar{g}_j} \in \mathbf{X}_{\bar{g}_j}, \quad \bar{g}_j \in \{\bar{1}_j, \dots, \bar{G}_j\}, \\
\mathbf{X}_j = \{\mathbf{X}_{g_j} \cup \mathbf{X}_{\bar{g}_j}\} = \{x_{1_j}, \dots, x_{g_j}, \dots, x_{G_j}, x_{\bar{1}_j}, \dots, x_{\bar{g}_j}, \dots, x_{\bar{G}_j}\} \in R_{(G_j + \bar{G}_j) \times 1}; \\
\forall q: \quad \varphi_q(\mathbf{X}_j, \mathbf{r}_j) \leq b_q, \quad q = \overline{1, \dots, \bar{Q}}; \\
\bigcup_{j=1}^J (\mathbf{X}_j, \mathbf{r}_j) \rightarrow \mathbf{D} : \quad \mathbf{D} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \iint_{\Omega} \mathbf{S}_j^k(\mathbf{r}) \mathbf{V}_j^k(\mathbf{r}) \mathbf{C}_j \delta^2(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) d\sigma; \\
\mathbf{C}_j = (c_1^j, \dots, c_m^j, \dots, c_M^j)^T \in R_{M \times 1}, \quad m \in \{1, \dots, M\}, \\
\mathbf{S}_j^k = (s_{mf}^{kj}), \quad \mathbf{V}_j^k(\mathbf{r}) = v^k(\mathbf{r}) (\delta_{ml} \tau_m^j),
\end{array} \right. \quad (5.44)$$

где используются обобщенные дельта-функции $\delta^2(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j)$ для локализации отдельных элементов природно-технической системы на территории Ω .

При построении стохастической модели принимаются, согласно [172], следующие предположения о физическом характере ОГП:

- динамика геологической среды определяется в любой момент времени некоторым энергетическим параметром состояния $E(t)$, количественно характеризующим энергию протекающих в геологической среде ОГП;

- количественные оценки изменения компонент энергетического параметра состояния $E(t)$ возможны на основе анализа полевых (наблюдательных) данных о состоянии геологической среды;

- наблюдаемые для некоторой достаточно протяженной территории последовательности пребывания геологической среды в четырех геодинамических состояниях могут быть представлены простейшими потоками событий;

Известные стохастические модели оценки геодинамического риска предполагают применение результатов расчетов напряженно-деформированного состояния геологической среды, выполнение которых далеко не всегда правомерно [241]. Кардинальное отличие предлагаемой стохастической модели состоит в

использовании, согласно первому и второму предположениям, информации о современных вертикальных и горизонтальных движениях земной коры (СВДЗК и СГДЗК), вполне достоверной и доступной для многих регионов [241].

Особенностью предлагаемой стохастической модели, основанной на вероятностном представлении различных геодинамических состояний выделенного объема геологической среды и переходов между ними, заключается в увеличении числа рассматриваемых известными моделями [241, 242] состояний геологической среды с трех до четырех, приведенных на рисунке 5.9, которые характеризуются следующим образом:

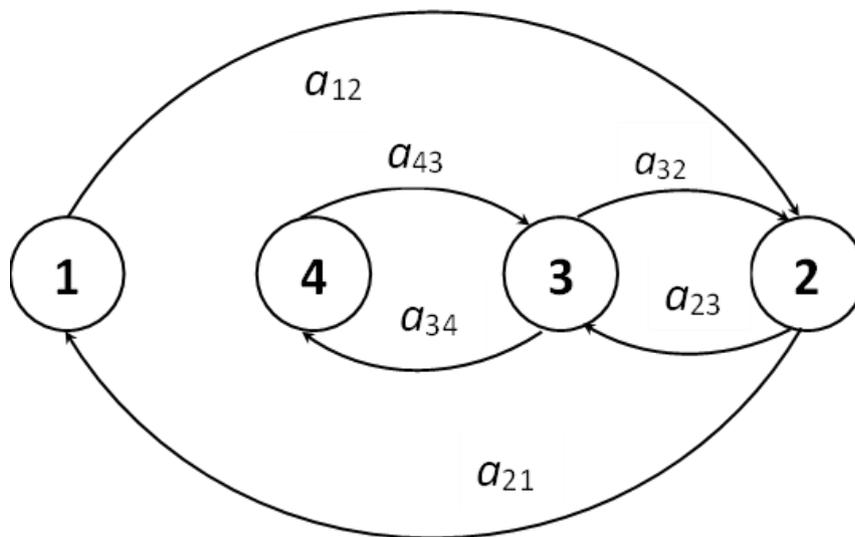


Рисунок 5.9 – Состояния геологической среды и переходы между ними

- 1 – устойчивого равновесия, в котором отсутствуют проявления каких-либо ОГП;
- 2 – с наиболее вероятными проявлениями оползневых и криповых ОГП (интенсивности определяются по СГДЗК);
- 3 – с весьма вероятными проявлениями обвально-просадочных ОГП, (интенсивности определяются с учетом СВДЗК);
- 4 – с наиболее опасными проявлениями ОГП (интенсивности определяются с учетом сдвиговых напряжений).

Переходы между указанными состояниями, обусловлены физическими процессами в геологической среде, соответствующие интенсивности определяются на основании комплексной оценки энергетических параметров в деформируемых породах:

$$a_{12} = \dot{u}_r, \quad a_{23} = \dot{u}_r + \dot{u}_z, \quad a_{34} = \dot{u}_r + \dot{u}_z + E_\rho, \quad (5.45)$$

$$a_{21} = \dot{u}_r - D_{E_\rho}, \quad a_{32} = \dot{u}_r + \dot{u}_z - D_{E_\rho}, \quad a_{43} = E_\rho + \dot{u}_r + \dot{u}_z - S_E,$$

где D_{E_ρ} – интенсивность диссипации упругой энергии E_ρ ; S_E – интенсивность диссипации энергии ОГП; $\dot{u}_r = \frac{2\mu u_r^2}{3}$, $\dot{u}_z = \frac{2\mu u_z^2}{3}$ – приведенные к энергетическим единицам значения СГДЗК и СВДЗК. Для оценки D_{E_ρ} требуются значения модулей сдвига μ и вязкости η , которые устанавливаются по существующим методикам [243] для элементарных ячеек геологической среды размером $1^\circ \times 1^\circ$ и с шагом в 1 км на глубинах $0 \div 80$ км. Оценка S_E основана на анализе имеющихся данных о произошедших в пределах оцениваемого объёма геологической среды сейсмических событиях.

Система дифференциальных уравнений Колмогорова, соответствующих приведенному на рисунке 5.9 графу переходов:

$$\begin{cases} dp_1/dt = -a_{12}p_1(t) + a_{21}p_2(t), \\ dp_2/dt = a_{12}p_1(t) - (a_{21} + a_{23})p_2(t) + a_{32}p_3(t), \\ dp_3/dt = a_{23}p_2(t) - (a_{32} + a_{34})p_3(t) + a_{43}p_4(t), \\ dp_4/dt = a_{34}p_3(t) - a_{43}p_4(t), \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1, \end{cases} \quad (5.46)$$

где $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$ – вероятности нахождения геологической среды в состояниях 1, 2, 3, 4 соответственно.

Предполагая установление в системе предельного стационарного режима, из (5.46) определяются финальные вероятности состояния геологической среды:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{a_{21}a_{32}a_{43}}{\theta}, & p_2 = \frac{a_{12}a_{32}a_{43}}{\theta}, \\ p_3 = \frac{a_{12}a_{23}a_{43}}{\theta}, & p_4 = \frac{a_{12}a_{23}a_{34}}{\theta}, \end{cases} \quad (5.47)$$

где

$$\theta = [(a_{21} + a_{12})a_{32} + a_{12}a_{23}]a_{43} + a_{12}a_{23}a_{34}.$$

В качестве модельного региона рассматривалась территория части Ирана, являющейся в высокой степени сейсмически активной. Выбор региона был обусловлен тем, что по нему были известны пространственные распределения физических показателей прочностных свойств верхних слоев геологической среды – величин модуля сдвига μ (в ед. 10^{10} Па) и плотности ρ (в г/см^3).

Для численной оценки интенсивностей переходов (5.46), использовались данные СГДЗК и СВДЗК на поверхности модельного региона (рисунок 5.10 (а, б)), а также данные о распределении аномального гравитационного поля в изостатической редукции (рисунок 5.11 (а,б)).

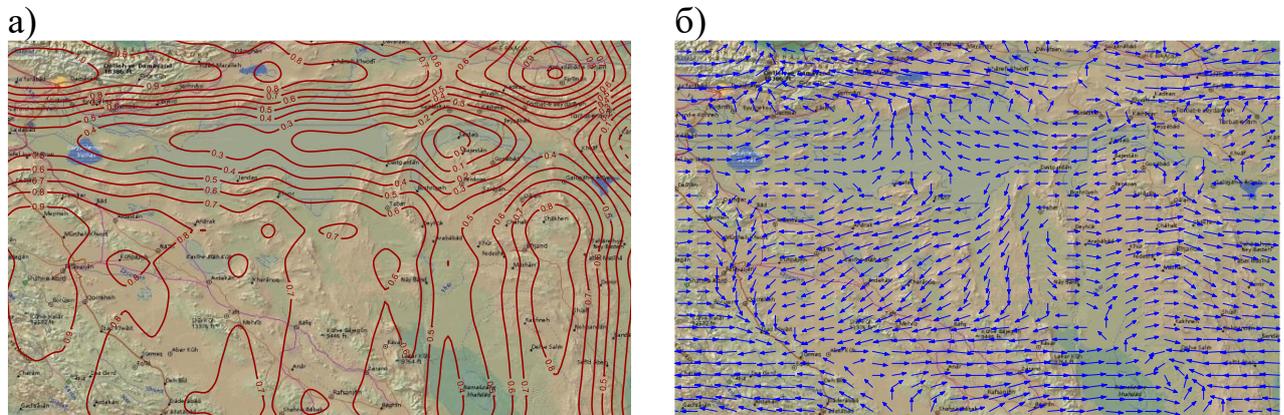


Рисунок 5.10– СВДЗКе (а) и СГДЗК (б) на территории модельного региона

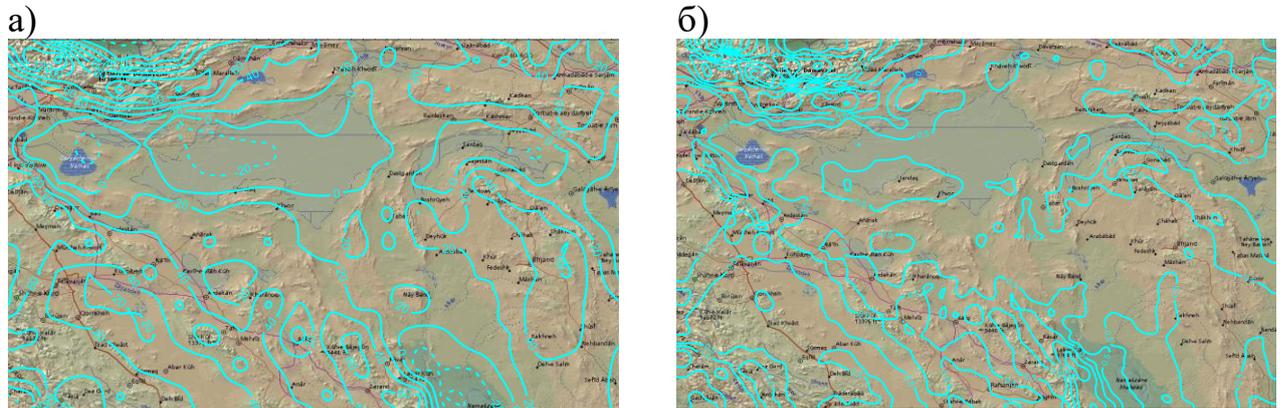


Рисунок 5.11– Значения аномального гравитационного поля (а - в мГал) и горизонтальных градиентов аномального гравитационного поля (б - в мГал/10 км) для модельного региона

При этом по данным о горизонтальных градиентах СГДЗК и СВДЗК определялись дополнительные сдвиговые напряжения:

$$\tau = \mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right], \quad (5.48)$$

где τ – дополнительное сдвиговое напряжение; μ – модуль сдвига; v_x, v_y – проекции векторов СГДЗК на координатные оси X и Y , v_z – СВДЗК.

В качестве локальных вероятностно-временных показателей геодинамического риска предлагается использовать распределение значений финальных вероятностей (5.48) наиболее опасного состояния геологической среды p_4 , отображая результаты вычислений на карте эквипотенциального распределения (ЭР) «точечно-площадного» геодинамического риска. Вычисления проводились с использованием программы GeoCalc v.1.0 (геодинамический калькулятор).

На рисунке 5.12 представлена карта ЭР геодинамического риска на территории модельного региона, с отображением эпицентров произошедших землетрясений. Аналогичные карты ЭР геодинамического риска выполнены для части территории Кавказа (территория, прилегающая г. Сочи) и для части территории Центрального федерального округа России (рисунки 5.13 и 5.14).

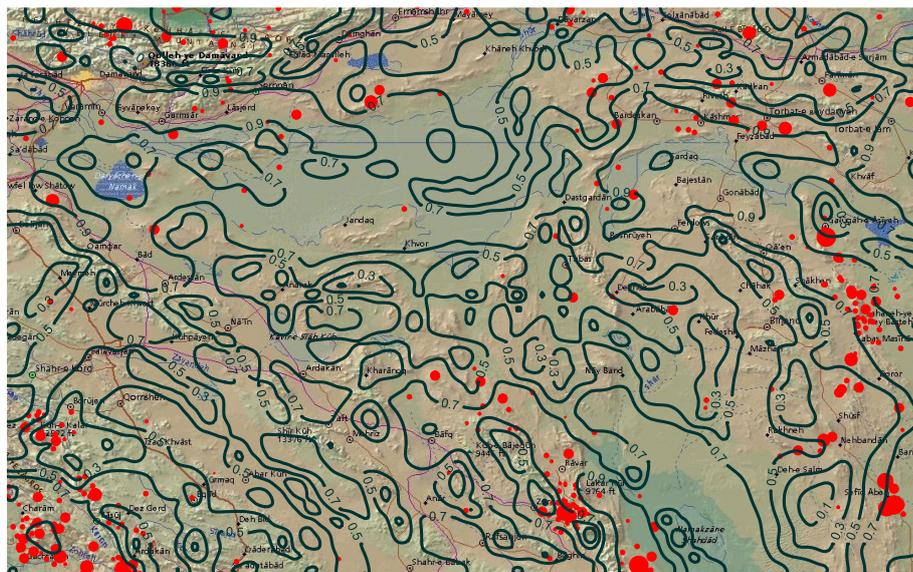


Рисунок 5.12 – ЭР геодинамического риска для территории модельного региона

Сравнительный анализ распределений ЭР геодинамического риска и эпицентров произошедших землетрясений показывает, что большинство эпицентров произошедших землетрясений расположено в зонах с высокими значениями геодинамического риска. Предлагаемая модель является более достоверной по оценочным и прогностическим показателям, чем известные стохастические модели [241, 242].

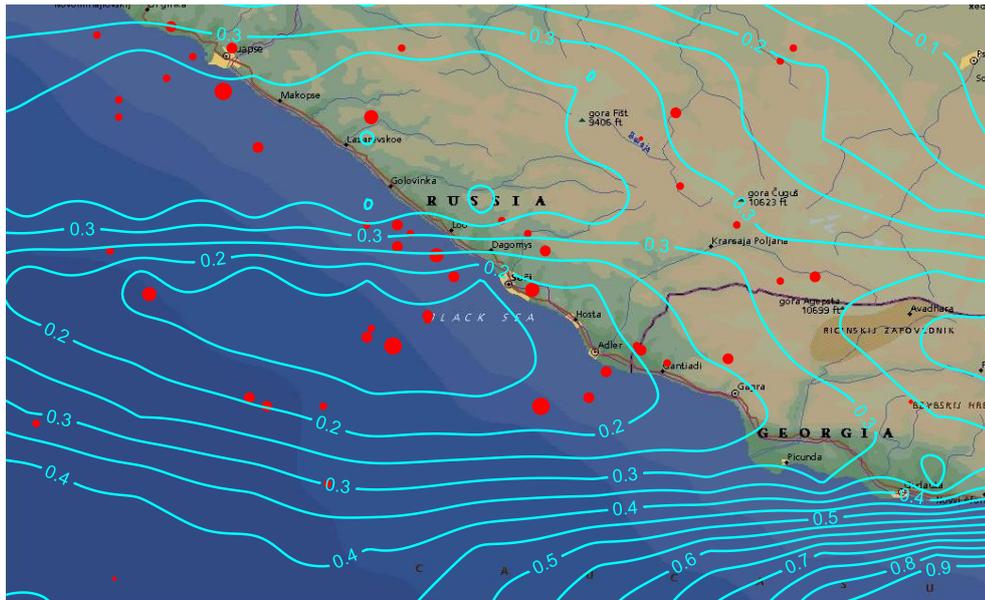


Рисунок 5.13 – ЭР геодинамического риска для территории, прилегающей к г. Сочи

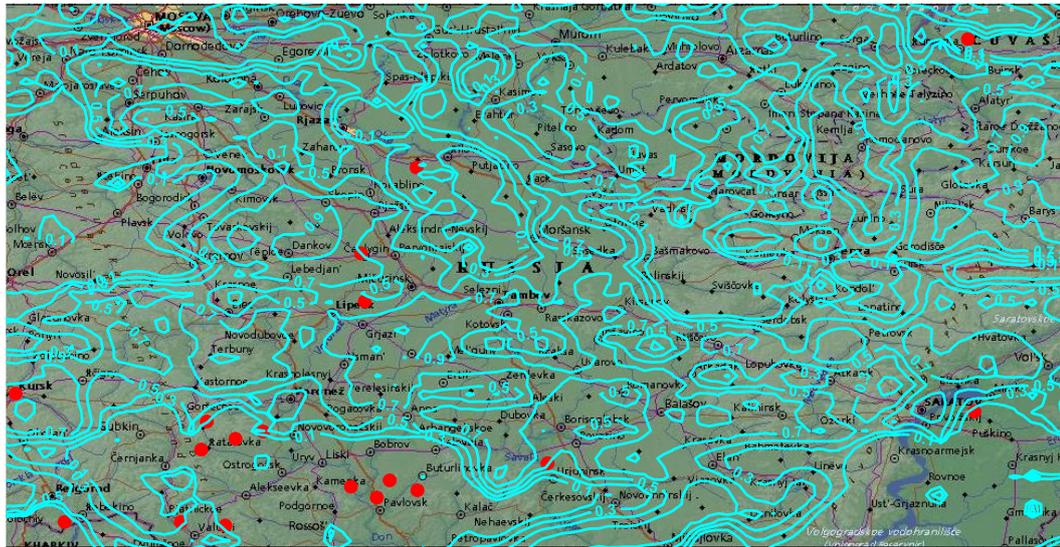


Рисунок 5.14 – ЭР геодинамического риска для территории части ЦФО РФ

Таким образом, результаты стохастического моделирования на основе количественного анализа переходов между четырьмя различными геодинамическими состояниями геологической среды с использованием наблюдательных данных о проявлениях опасных геодинамических процессов показывают возможность адекватной оценки локальных вероятностно-временных показателей геодинамического риска и их применения для точно-площадной оценки и ранжирования территорий природно-технических систем по уровню геодинамической опасности.

5.6 Моделирование динамики функционирования и защитных свойств фильтрующе-поглощающих элементов

Широкое распространение на отечественном и зарубежных рынках средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) фильтрующего действия нередко сопровождается отсутствием необходимого исследования характеристик защитного действия фильтрующе-поглощающих элементов (ФПЭ) от разнообразных токсичных примесей. Проверка защитных свойств ФПЭ СИЗОД проводится в настоящее время для ограниченного набора тестируемых веществ (хлорид водорода (HCl), цианид водорода (HCN), акролеин (C₃H₄O), монооксид углерода (CO) и др.), в соответствии с [244, 245], что обуславливает актуальность создания универсальных методов и средств испытаний ФПЭ.

Представляется перспективным развитие методов испытаний ФПЭ СИЗОД, основанных на предварительной нейтронной активации тестируемых проб, например, находящейся в любом агрегатном состоянии (газообразном, жидком, твердом) токсической примеси [231–233]. Нейтронно-активационный анализ (НАА) является высокочувствительным методом определения ультрамикроколичеств нестабильных изотопов в различных материалах и средах. Аналитическим сигналом в НАА служит гамма-излучение радиоактивных ядер, образовавшихся в процессе предварительного облучения исследуемого образца тепловыми нейтронами.

Автором в [231] предложен способ применения НАА для определения качественных характеристик и количественных параметров защитного действия ФПЭ от токсичных примесей в воздушной среде. Для реализации предложенного в [231] способа НАА спроектировано представленная на рисунке 5.15 техническое устройство.

Техническое устройство, реализующее предлагаемый способ НАА представляет испытательный стенд, разделенный на четыре зоны. Первая зона предназначена для нейтронной активации тестируемых токсичных проб любым из доступных способов. Во второй зоне готовится воздушная смесь с заданной концентрацией токсичного вещества. В третьей зоне расположен ФПЭ, обеспечивающий

фильтрацию и очистку воздушной смеси. В четвертую зону поступает отфильтрованная и очищенная воздушная смесь. Процедура качественного и количественного анализа присутствия и концентрации токсичной пробы в отфильтрованной смеси и в фильтрующих элементах основана на обработке результатов локальных измерений радиационного фона в различных зонах стенда.

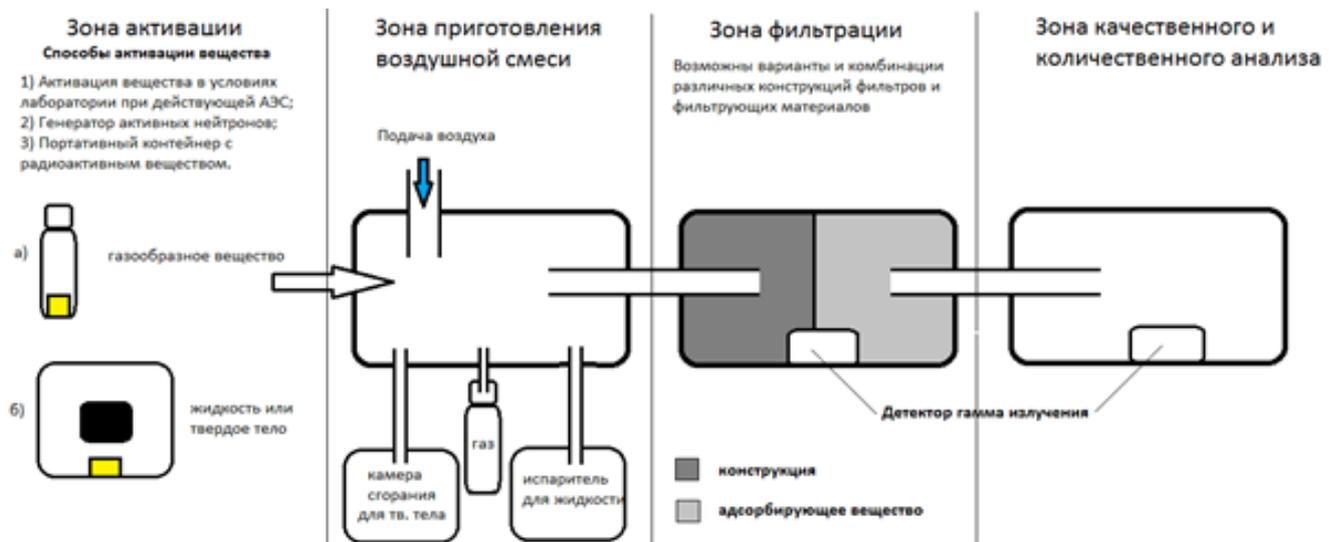


Рисунок 5.15 – Устройство стенда испытаний ФПЭ СИЗОД с предварительной нейтронной активацией тестируемых проб

Качественный анализ защитного действия определенного набора фильтрующих и фильтрующе-поглощающих элементов заключается в регистрации детекторами установленного порогового уровня гамма-излучения при непрерывном/дискретном заполнении камеры исследования определенным количеством отфильтрованной воздушной смеси. Количественный анализ защитного действия определенного набора фильтрующих и фильтрующе-поглощающих элементов может проводиться на основе автоматизированной обработки в соответствии с определенным алгоритмом результатов измерений количества прошедшей через фильтрующий элемент смеси, а также непрерывной регистрации гамма-излучения детекторами.

Информационно-аналитическое обеспечение автоматизации количественного анализа эффективности ФПЭ СИЗОД требует разработки соответствующих моделей, алгоритмов и программ. Приведем основные элементы предлагаемой

дискретно-событийной модели, предназначенной для последующего создания программного продукта имитационного моделирования процессов функционирования ФПЭ СИЗОД.

Процесс фильтрации воздушной смеси ФПЭ СИЗОД в виде каскадной схемы представлен на рисунке 5.16. В общем случае ФПЭ включает некоторый набор элементов-сорбентов [246–248] с определенными текущими параметрами абсорбции токсичной примеси.

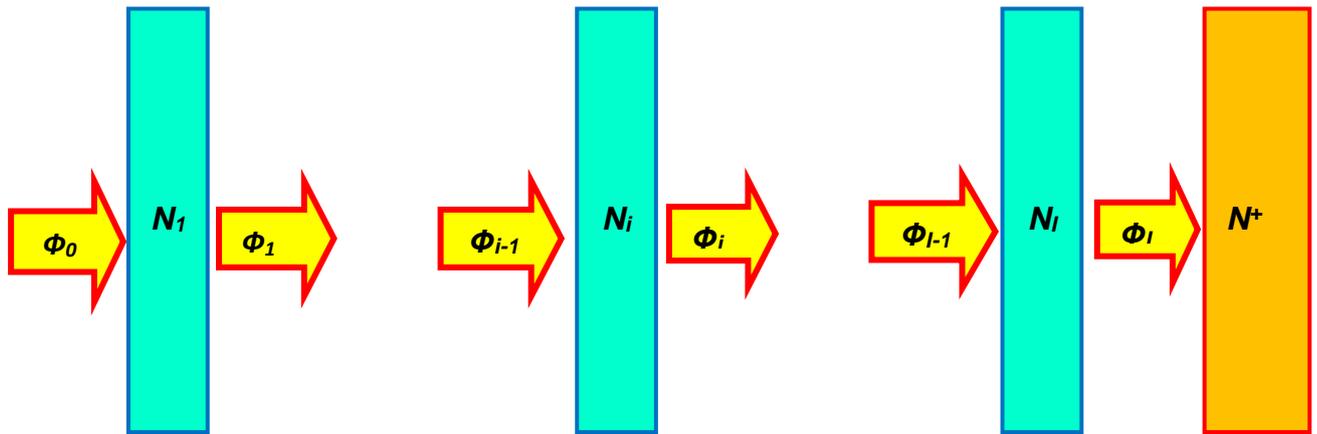


Рисунок 5.16 – Схема процесса фильтрации ФПЭ СИЗОД

В качестве основного параметра абсорбции отдельных элементов-сорбентов ФПЭ в предлагаемой модели введены текущие вероятности молекулярного прохождения (A) и поглощения (\bar{A}) токсичной примеси:

$$P(A_i) = \left(\frac{N_i}{N_i^*} \right)^{\gamma_1}, \quad P(\bar{A}_i) = 1 - \left(\frac{N_i}{N_i^*} \right)^{\gamma_1}, \quad (5.49)$$

где N_i – количество абсорбированных молекул, N_i^* – предельное количество абсорбированных молекул для i -го элемента-сорбента ФПЭ.

Пространство элементарных событий, связанных с прохождением через последовательно расположенные элементы-сорбенты ФПЭ, либо с молекулярным поглощением на одном из элементов-сорбентов можно определить следующим образом:

$$\Omega = \{\bar{A}_1, A_1 \bar{A}_2, \dots, A_1 \dots \bar{A}_i, \dots, A_1 \dots A_i \dots \bar{A}_n, A_1 \dots A_i \dots A_I\}, \quad (5.50)$$

$$|\Omega| = n + 1.$$

Текущие интенсивности входящих и исходящих потоков токсичной примеси на входе и выходе каждого элемента-сорбента ФПЭ определяются в соответствии с (5.49) отношением текущего и предельных количеств абсорбированных молекул.

Моделирование изменения количества абсорбированных молекул для элементов-сорбентов ФПЭ, а также изменения количества прошедших через все последовательно расположенные элементы-сорбенты ФПЭ проводится на основе решения системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_1}{dt} = \Phi_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{N_1}{N_1^*}\right)^{\gamma_1}\right), \\ \frac{dN_2}{dt} = \Phi_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{N_2}{N_2^*}\right)^{\gamma_2}\right) = \Phi_0 \cdot \left(\frac{N_1}{N_1^*}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_2}{N_2^*}\right)^{\gamma_2}\right), \\ \dots \dots \dots, \\ \frac{dN_i}{dt} = \Phi_{i-1} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_i}{N_i^*}\right)^{\gamma_i}\right) = \Phi_0 \cdot \left(\frac{N_1}{N_1^*}\right)^{\gamma_1} \cdot \dots \cdot \left(\frac{N_{i-1}}{N_{i-1}^*}\right)^{\gamma_{i-1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_i}{N_i^*}\right)^{\gamma_i}\right), \\ \dots \dots \dots, \\ \frac{dN_I}{dt} = \Phi_{I-1} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_I}{N_I^*}\right)^{\gamma_I}\right) = \Phi_0 \cdot \left(\frac{N_1}{N_1^*}\right)^{\gamma_1} \cdot \dots \cdot \left(\frac{N_{I-1}}{N_{I-1}^*}\right)^{\gamma_{I-1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_I}{N_I^*}\right)^{\gamma_I}\right), \\ \frac{dN^+}{dt} = \Phi_I = \Phi_0 \cdot \left(\frac{N_1}{N_1^*}\right)^{\gamma_1} \cdot \dots \cdot \left(\frac{N_{I-1}}{N_{I-1}^*}\right)^{\gamma_{I-1}} \cdot \left(\frac{N_I}{N_I^*}\right)^{\gamma_I}. \end{array} \right. \quad (5.51)$$

где Φ_0 , Φ_I – входящий и выходящий потоки ФПЭ, γ_i – параметры, определяющие динамику абсорбции, Φ_i – выходящий поток для i -го элемента-сорбента ФПЭ.

Параметры динамики абсорбции отдельных элементов-сорбентов ФПЭ могут быть определены экспериментально. Например, по данным локальных измерений радиационного фона возможно произвести оценку параметров, определяющие динамику абсорбции для отдельных элементов-сорбентов ФПЭ.

В общем случае при нестационарном потоке возможно численное решение системы (5.51) на основе применения различных численных методов решения

5.7 Выводы по пятой главе

1. Эффективность различных вариантов вложения финансовых средств, трудовых и иных ресурсов, направленных на совершенствование систем пожарной безопасности и противопожарной защиты, рекомендуется проводить на основе моделирования многокомпонентного пожарного риска и сравнительного анализа достижимых уровней ожидаемых социально-экономических потерь.

2. Вероятностные характеристики функционирования систем обеспечения пожарной безопасности и противопожарной защиты в жилом секторе могут быть определены на основе предложенной методики и алгоритмов, реализованных в интегрированном программном комплексе анализа многокомпонентных рисков.

3. Стохастическое моделирование динамики развития инцидентов, аварий и катастроф по каскадному сценарию в системе «транспортное средство-опасный груз» с учетом данных текущего мониторинга позволяет установить вероятностные характеристики своевременности и эффективности возможных целенаправленных воздействий при оперативном реагировании на инциденты и применять предлагаемую прикладную модель в информационно-аналитической подсистеме прогнозирования рисков и поддержки управления при транспортировке опасных грузов в условиях неполной информации.

4. Экспериментальные методики по определению сроков пожаробезопасной эксплуатации электрооборудования и оценки основных параметров ПЭВ могут быть основаны на дискретно-событийном моделировании с учетом влияния недопустимых отклонений показателей качества потребляемой электроэнергии на отдельные компоненты пожарно-электрического вреда.

5. Поиск оптимальных вариантов использования сил и средств при масштабных кризисных ситуациях может быть основан на дискретно-событийном моделировании и алгоритме прогнозирования потребности привлечения ресурсов, реализованных в программном продукте, предназначенном для имитационного моделирования функционирования систем массового обслуживания с переменным числом каналов в условиях прогнозируемого нестационарного потока требований.

6. Проведение точечно-площадной оценки территорий по локальным вероятностно-временным показателям геодинамического риска возможно по результатам стохастического моделирования, основанного на представлении геологической среды в различных геодинамических состояниях с учетом связи интенсивностей переходов между ними и наблюдательными данными об энергетических параметрах ряда геофизических процессов.

7. Количественный анализ эффективности фильтрующе-поглощающих элементов может быть выполнен на основе моделирования динамики процессов фильтрации токсичных примесей с учетом измеряемых уровней остаточной радиоактивности в предлагаемом устройстве испытания ФПЭ СИЗОД с предварительной нейтронной активацией токсичных примесей.

Предлагаемые методики, алгоритмы и программные продукты могут быть использованы в информационно-аналитических системах поддержки риск-ориентированного управления в социотехнических системах и оперативного реагирования в чрезвычайных ситуациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решалась актуальная задача построения математических моделей и обоснования новых аналитических и численных методов исследования структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах. Решаемая задача имеет важное фундаментальное значение для развития таких отраслей знаний как математическая кибернетика и исследование операций, и прикладное значение, например, для информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в различных системах обеспечения безопасности.

В ходе исследования получены новые научно обоснованные решения ряда задач прогнозирования угроз и их последствий, представляющие интерес для исследования различных природных, техногенных и антропогенных рисков, а также построения математических моделей и алгоритмов риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях.

1. Предложен метод моделирования структуры многокомпонентных рисков, основанный на матричном представлении стохастической связи композиции установленных вероятностных характеристик уязвимости и состояний ОЗ, параметров рассматриваемых источников угроз и вариантов функционирования СОБ с набором возможных последствий.

2. Предложен численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков, основанный на преобразовании значений ранговой шкалы экспертных оценок вероятностей возможных исходов при воздействии ОФ на ОЗ в количественную шкалу отношений в соответствии с положениями репрезентативной теории измерений.

3. Предложена общая методика определения вероятностных характеристик функционирования СОБ, основанная на дискретно-событийном моделировании срабатывания технических средств защиты от ОФ.

4. Построена общая модель процессов риск-ориентированного управления, основанная на постановке задач многокритериальной комбинаторной оптимизации

использования ресурсов и сравнительном анализе эффективности мероприятий, направленных на обеспечение безопасности социотехнических систем.

5. Построена общая модель динамики опасных отказов технических объектов, основанная на представлении связи параметров наборов источников процессов деградации с обобщенной наработкой интегральным функционалом от значимых эксплуатационных факторов.

6. Предложен метод моделирования «каскадных» аварий и катастроф, а также построена стохастическая модель прогнозирования аварийных и критических состояний при локальных инцидентах, отражающая вероятностные характеристики своевременности и эффективности целенаправленных воздействий при оперативном реагировании.

7. Построены дискретно-событийная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов и алгоритм прогнозирования потребности привлечения ресурсов при масштабных кризисных ситуациях для определения оптимальных вариантов использования сил и средств.

8. Построена модель пожарно-электрического вреда, описывающая влияние показателей качества потребляемой электроэнергии на динамику пожароопасных отказов электрооборудования.

9. Построена модель точечной оценки и районирования территорий природно-технических систем по уровню вероятностно-временных показателей геодинамического риска, основанные на комплексной оценке физических параметров опасных геодинамических процессов по наблюдательным данным.

10. Построена модель динамики процессов фильтрации с учетом измеряемых уровней остаточной радиоактивности в предлагаемом устройстве испытания фильтрующе-поглощающих элементов с предварительной нейтронной активацией токсичных примесей.

11. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ и алгоритмов поддержки управления рисками в социотехнических системах, в котором реализованы предложенные численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок, а также модели и

алгоритмы анализа эффективности распределения ресурсов в СОБ и прогнозирования динамики кризисных ситуаций.

12. Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в области обеспечения различных видов безопасности для исследования, прогнозирования и управления природными, техногенными и антропогенными рисками, при проектировании информационно-аналитических систем и программно-аппаратных средств поддержки риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях, а также реализации образовательных программ высшего образования по направлениям: «Прикладная математика», «Прикладная информатика», «Техносферная безопасность» «Информационная безопасность» и др.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АСНР – аварийно-спасательные и другие неотложные работы
- ИПД – источники процессов деградации
- ЛВЖ – легковоспламеняющаяся жидкость
- МАИ – метод анализа иерархий
- МКО – многокритериальная оптимизация
- ОГ – опасный груз
- ОГП – опасный геодинамический процесс
- ОЗ – объект защиты
- ОФ – опасные факторы
- ОФП – опасные факторы пожара
- ПБ – пожарная безопасность
- ПЗ – противопожарная защита
- ПОО – потенциально опасный объект
- ПОО-ИАК – потенциально опасный объект – инцидент, авария, катастрофа
- ПСП – пожарно-спасательные подразделения
- ПЭВ – пожарно-электрический вред
- СИЗОД – средство индивидуальной защиты органов дыхания
- СМО – система массового обслуживания
- СОБ – система обеспечения безопасности
- ТО – технический объект
- ТС – транспортное средство
- ФЗО – функция защиты объектов
- ФПЭ – фильтрующе-поглощающий элемент
- ЧС – чрезвычайная ситуация
- ЭРМ – электрорадиоэлемент
- QRA – quantitative risk assessment
- PHF-IAC – potentially hazardous facility – incident, accident, catastrophe
- TSS – the theory of scenario structuring

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сато, С. Реинжиниринг окружающей среды / С. Сато, Х. Кумамото. – СПб.: Бизнес-пресса, 2002. – 237 с.
2. Харари, Ю. Н. Homo Deus: Краткая история будущего / Ю. Н. Харари. – М.: Синдбад, 2018. – 496 с.
3. Акимов, В. А. Исследование чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера современными научными методами / В. А. Акимов, М. В. Бедило, С. П. Суцев. – М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. – 179 с.
4. Акимов, В. А. Научные основы общей теории безопасности / В. А. Акимов // Технологии гражданской безопасности. – 2017. – Т.14. – № 4 (54). – С. 4–10.
5. Акимов, В. А. Проблемы безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира / В. А. Акимов // Технологии гражданской безопасности. – 2018. – Т.18. – № 4 (58). – С. 4–12.
6. Белозеров, В. В. Синергетика безопасной жизнедеятельности / В. В. Белозеров. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2015. – 420 с.
7. Белозеров, В. В. К вопросу о техносферной безопасности / В. В. Белозеров, В. М. Гаврилей, Ю. В. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 3(31). – С. 48–57.
8. Quantitative Bases for Developing a Unified Index of Harm (ICRP PUBLICATION 45) // Количественное обоснование единого индекса вреда: Публикация № 45 МКРЗ: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат 1989. – 88 с.
9. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. – М.: Академия, 2008. – 368 с.
10. Управление рисками техногенных и природных чрезвычайных ситуаций (пособие для руководителей муниципальных образований) / Под общ. ред. М. И. Фалева. – М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 222 с.
11. Акимов, В. А. Оценка состояния науки в Российской Федерации по вопросам исследования техногенных угроз / В. А. Акимов // Технологии гражданской безопасности. – 2018. – Т.15. – № 1 (55). – С. 4–10.

12. Сосунов, И. В. Развитие национальной стандартизации в области гражданской обороны, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций / И. В. Сосунов, В. В. Федченко, А. С. Кузмичев // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12. – №1. – С. 28–34.
13. Крапухин, В. В. Международная стандартизация в области гражданской защиты / В. В. Крапухин, Т. Л. Ляховец // Технологии гражданской безопасности. – 2014. – Т. 11. – №1. – С. 52–57.
14. Олтян, И. Ю. Как уменьшить опасность бедствий / И. Ю. Олтян // Гражданская защита. – 2019. – № 7 (527). – С. 56–57.
15. Акимов, В. А. Создание и внедрение в РФ федеральной государственной информационной системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: оценка социально – экономического эффекта от реализации проекта и некоторые выводы по результатам исследования / В. А. Акимов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 4. – С. 13–22.
16. Плющиков, В. Г. Международные программы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций / В. Г. Плющиков, В. П. Авдотьин, Е. В. Арефьева, И. Ю. Олтян и др. – М.: РУДН, 2018. – 256 с.
17. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 годы. – ООН, 2015. – 40 с.
18. Олтян, И. Ю. Реализация Сендайской рамочной программы по снижению риска бедствий в Российской Федерации. Итоги пятилетия / И. Ю. Олтян, Е. В. Арефьева, В. В. Крапухин, А. В. Верескун, М. Н. Котосонова, М. А. Балер. – М.: ВНИИ ГО ЧС (ФЦ), 2021. – 344 с.
19. Белозеров, В. В. Классификация объектов повышенной опасности и вероятностно-физические модели их устойчивости и безопасности / В. В. Белозеров, С. Л. Загускин, Ю. В. Прус, Л. К. Самойлов, Н. Г. Топольский, В. Н. Труфанов // Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 8. – С. 34–40.
20. Белозеров, В. В. Адаптивные системы подавления энтропии в техносфере / В. В. Белозеров, Е. И. Богуславский, В. В. Пашинская, Ю. В. Прус // Успехи

современного естествознания. – 2006. – № 11. – С. 59–62.

21. Назаров, А. А. Параметрический метод определения комплексного показателя защищенности от техногенной чрезвычайной ситуации на территории ЗАТО / А. А. Назаров, А. В. Рыбаков, Н. В. Мартинович // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2020. – № 2(17). – С. 72–79.

22. Rybakov, A. V. On the integrated assessment of the technogenic risk of accidents on the territory of a city / A. V. Rybakov, M. V. Lebedeva, V. I. Shmyrev, E. V. Ivanov // Journal of Emergency Management. – 2020. – V 18. – N 2. – Pp. 105–111.

23. Назаров, А. А. Подходы к выбору рациональных параметров элементов системы мониторинга чрезвычайных ситуаций техногенного характера при построении комплексной системы безопасности жизнедеятельности населения / А. А. Назаров // Техносферная безопасность. – 2021. – № 1(30). – С. 123–132.

24. Директива Совета Европейского Союза 2008/114/ЕС от 8 декабря 2008 г. о европейских критических инфраструктурах и мерах по их защите). – URL: <https://base.garant.ru/70333008>

25. Organizational Resilience: Security, Preparedness, and Continuity Management Systems—Requirements with guidance for use (ASIS SPC.1-2009). – American National Standards Institute, 2009. – 66 p.

26. Labaka, L. Resilience framework for critical infrastructures: An empirical study in a nuclear plant / L. Labaka, J. Hernantes, J. M. Sarriegi // Reliability Engineering and System Safety. – 2015. – N 141. – Pp. 92–105.

27. Cassotta, S. Cyber Threats, Harsh Environment and the European High North (EHN) in a Human Security and Multi-Level Regulatory Global Dimension: Which Framework Applicable to Critical Infrastructures under «Exceptionally Critical Infrastructure Conditions» (ECIC)? / S. Cassotta, R. Sidortsov, C. Pursiainen, M. Goodsite // Beijing Law Review. – 2019. – N 10. – Pp. 317–360.

28. Pursiainen, C. H. Critical Infrastructure Resilience Index / C. H. Pursiainen, B. Red. – In: «Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice». – CRC Press, 2017. – Pp. 2183–2190.

29. Holling, C. S. Resilience and stability of ecological systems / C. S. Holling // Annual

Review of Ecology and Systematics. – 1973. – N 4 (1). – Pp. 1–23.

30. Hollnagel, E. Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management / E. Hollnagel. – England: CRC Press, 2014. – 187 p.

31. Хенли, Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.

32. Костерев, В. В. Надежность технических систем и управление риском: учебное пособие / В. В. Костерев. – М.: МИФИ, 2008. – 280 с.

33. Акимов, В. А. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. – М.: Деловой экспресс, 2002. – 368 с.

34. Анализ риска и проблемы безопасности. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности / Под ред. К. В. Фролова. – М.: «Знание», 2006. – 640 с.

35. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. Ч. 4. Научно-методическая база анализа риска и безопасности / Науч. руковод. К. В. Фролова. – М.: «Знание», 2007. – 864 с.

36. Ковалевич, О. М. Риск в техногенной сфере / О. М. Ковалевич. – М.: МЭИ, 2006. – 152 с.

37. Микеев, А. К. Пожар: социальные, экономические, экологические проблемы / А. К. Микеев. – М.: «Пожнаука», 1994. – 385 с.

38. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварии на опасных производственных объектах» (утверждено приказом Ростехнадзора от 11.04.2016 № 144).

39. «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» (IEC 31010:2019 "Risk management - Risk assessment techniques", NEQ). ГОСТ Р 58771–2019.

40. Haimes, Y. Y. Risk Modeling, Assessment, Management / Y. Y. Haimes. – N. Y.: Wiley, 2016. – 689 p.

41. Брушлинский, Н. Н. Триада «опасность – риск – безопасность» / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Е. А. Клепко, С. Ю. Попков, В. А. Белов // Проблемы анализа риска. – 2013. – Т. 10. – № 4. – С. 42–49.

42. Пожарные риски. Вып. 1. Основные понятия / Под ред. Н. Н. Брушлинского. – М.: ВНИИПО, 2004. – 47 с.
43. Брушлинский, Н. Н. Основы теории пожарных рисков и ее приложения / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Е. А. Клепко, В. А. Белов, О. В. Иванова, С. Ю. Попков. – М.: Академия ГПС, 2012. – 192 с.
44. Брушлинский, Н. Н. Индивидуальный пожарный риск: понятие и вычисление / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2013. – № 5. – С. 30–41.
45. Брушлинский, Н. Н. Анализ основных пожарных рисков в странах мира и в России / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, М. П. Григорьева // Пожаробезопасность. – 2017. – Т.26. – № 2. – С. 72–80.
46. Brushlinsky, N. N. Modeling the process of fire and rescue services activities / N. N. Brushlinsky, S. V. Sokolov, P. Wagner // Novel Approaches in Risk, Crisis, and Disaster Management. – Nova Science Publishers, Inc., 2018. – Pp. 181–304.
47. Брушлинский, Н. Н. Какова "стоимость" пожаров в современном мире? / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29. – № 1. – С. 79–88.
48. Пожарные риски. Динамика, управление, прогнозирование / Под ред. Н. Н. Брушлинского, Ю. Н. Шебеко. – М.: ВНИИПО, 2007. – 370 с.
49. Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н. Н. Брушлинского, А. Я. Корольченко. – М.: «Пожнаука», 2000. – 482 с.
50. Соколов, С. В. Управление рисками гибели людей при пожарах в жилых домах городских поселений / С. В. Соколов, Д. В. Костюченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 1. – С. 61–74.
51. Харисов, Г. Х. Экономический эквивалент стоимости человеческой жизни / Г. Х. Харисов. – М.: Академия ГПС, 2016. – 66 с.
52. Харисов, Г. Х. Обоснование нормативного значения и расчетной величины индивидуального пожарного риска в зданиях и сооружениях / Г. Х. Харисов, А. В. Фирсов. – М.: Академия ГПС, 2014. – 225 с.
53. Харисов, Г. Х. Обоснование оптимального значения индивидуального пожар-

- ного риска в Российской Федерации / Г. Х. Харисов, А. В. Фирсов // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2018. – № 7(211). – С. 36–42.
54. Фирсов, А. В. Математическая модель для обоснования нормативных значений индивидуального пожарного риска в зданиях и сооружениях / А. В. Фирсов // *Технологии техносферной безопасности*. – 2013. – № 1(47). – С. 13.
55. Якуш, С. Е. Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы / С. Е. Якуш, Р. К. Эсманский // *Проблемы анализа риска*. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 8–27.
56. Якуш, С. Е. Анализ пожарных рисков. Часть II: Проблемы применения / С. Е. Якуш, Р. К. Эсманский // *Проблемы анализа риска*. – 2009. – Т. 6. – № 4. – С. 26–46.
57. Meacham, B. J. Understanding Risk: Quantification, Perceptions, and Characterization / B. J. Meacham // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2004. – N 14. – Pp. 199-227.
58. Hurley, M. J. Fire Hazard Analysis Techniques/ M. J. Hurley, R. W. Bukowski. – In: *Fire Protection Handbook, 20th Edition* / Ed. A. E. Cote. – Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA), 2008. – Ch. 7. – Pp. 3/125–133.
59. Hasofer, A. M. Risk Analysis in Building Fire Safety Engineering / A. M. Hasofer, V. R. Beck, I. D. Bennetts. – Burlington, Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd., 2007. – 189 p.
60. Yung, D. Principles of Fire Risk Assessment in Buildings / D. Yung. – N.Y.: J. Wiley & Sons, 2008. – 227 p.
61. Meacham, B. J. A Risk-Informed performance-based approach to building regulation / B. J. Meacham // *Journal of Risk Research*. – 2010. – V 13, I 7. – Pp. 877–893.
62. Meacham, B. J. Addressing Risk and Uncertainty in Performance-based Fire Protection Engineering / B. J. Meacham // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2001. – N 10. – Pp. 16–25.
63. Hall, J. R. Overview of Standards for Fire Risk Assessment / J. R. Hall // *Fire Science and Technology*. – 2006. – N 25. – Pp. 55–62.
64. Hall, J. R. Fire Risk Analysis / J. R. Hall, J. M. Watts. – In: *Fire Protection Handbook* / Ed. A. E. Cote. – Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA), 2008. – Ch. 8. – Pp. 3/135–143.

65. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (Second Edition) /Center for Chemical Process Safety of the Institute of Chemical Engineers. – N. Y.: A John Wiley&Sons, Inc., Publication, 2000. –784 p.
66. Kumamoto, H. Satisfying Safety Goals by Probabilistic Risk Assessment / H. Kumamoto. – Berlin: Springer, 2007. – 263 p.
67. Обухов, Ф. В. Пожарная безопасность: Реф. обзор по материалам IV Международ. семинара пожарной охраны / Ф. В. Обухов. – М.: Недра, 1975. – 192 с.
68. Forney, C. L. Fire Risk Assessment Method: guide to the risk methodology software / C. L. Forney, W. W. Jones. – National Bureau of Standards, 1990. – 60 p.
69. Benichou, N. FIERA system: a fire risk assessment tool to evaluate fire safety in industrial buildings and large spaces / N. Benichou, A. H. Kashef, I. Reid, G.V. Hadjisophocleous, D. A. Torvi, G. Morinville // Journal of Fire Protection Engineering. – 2005. – N 15. – Pp. 145–172.
70. Bukowski, R. W. Fire risk assessment method: description of methodology / R. W. Bukowski, S. W. Stiefel, J. R. Hall, F. B. Clarke. – Quincy, MA: National Fire Protection Assn, 1990. – 86 p.
71. Evaluation of fire hazard and determining protective measures (according to method M. Gretener) / Association of Cantonal Institutions for Fire Insurance. – Fire Prevention Service for Industry and Trade, 1973. – 87 p.
72. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. – N. Y.: American Institute of Chemical Engineers, 1994. – 387 p.
73. Evaluation en vue de la détermination de la grandeur des compartiments coupe-feu/ Justificatif de sécurité pour affectations industrielles et artisanales - Méthode de calcul. – Berne by VKF / AEAI / AICAA, 2003. – 29 p.
74. Fontana, M. Swiss Rapid Risk Assessment Method / M. Fontana. – Zurich: Institute of Structural Engineering, 1984. – 81 p.
75. Fraser-Michel, J. An Object-Oriented Simulation (CRISP II) for Fire Risk Assessment / J. Fraser-Michel // Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium. – International Association for Fire Safety Science, 1994. – Pp. 793–804.
76. Gretener, M. Attempt to calculate the fire risk of industrial and other objects / M.

Gretener // Third International Fire Protection Symposium. – Eindhoven, 1968 – Pp. 34 – 38.

77. Hasofer, A. M. Risk Analysis in Building Fire Safety Engineering / A. M. Hasofer, V. R. Beck, I. D. Bennetts. – Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007. – 189 p.

78. Hostikka, S. Probabilistic Fire Simulator. Theory and User's Manual for Version 1.2 / S. Hostikka, O. Keski-Rahkonen, T. Korhonen. – Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2003. – 77 p.

79. Kaizer, J. Experiences of the Gretener Method / J. Kaizer // Fire Safety Journal. – 1980. – V 2. – Pp. 213-222.

80. Johansson, H. Fire Risk Evaluator / H. Johansson // Ett datorprogram för värdering av investeringar i brandskydd. Rapporten har finansierats av BRANDFORSK. Rapport 3130. – Lund: IAFSS, 2004. – 37 p.

81. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. – NFPA 551. – National Fire Protection Association (NFPA), 2022. – 31 p.

82. Fire risk assessment. Guidance and a recommended methodology. – PAS 79:2007. – UK: British Standards Institution. – 109 p.

83. Nystedt, F. A. Quantified Fire Risk Design Method / F. A. Nystedt // Journal of Fire Protection Engineering. – 2001. – N 10. – Pp. 41-45.

84. Karlsson, B. Repeatability Tests of a Fire Risk Index Method for Multi-storey Apartment Buildings / B. Karlsson, B. Tomasson // Fire Safety Science-Proceedings of the Eighth International Symposium. – Lund: IAFSS, 2005. – Pp. 901-912.

85. Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires. – Part 2: Design fires. – ISO TS 16733-2-2021

86. Rasbash, D. Evaluation of Fire Safety / D. Rasbash, G. Ramachandran, B. Kandola, J. Watts, M. Law. – N.Y.: J. Wiley & Sons, 2004. – 462 p.

87. SFPE Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design. – Bethesda, MD: Society of Fire Protection Engineers, 2006.

88. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Section 5 – Fire Risk Analysis. – Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2002.

89. Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials

(liquids and gases) – ‘Yellow Book’CPR 14E / Editors: C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings. – Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 1996. – 870 p.

90. Yung, D. A description of the probabilistic and deterministic modeling used in FiRECAM / D. Yung, G. V. Hadjisophocleous, G. Proulx // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. – 1999. – N 1. – Pp. 18–26.

91. Zhao, L. The definition of scenarios for the CESARE-RISK model / L. Zhao, V. Beck // Proceedings of the Fifth International Symposium «Fire Safety Science». – IAFSS, 1997. – Pp. 655–666.

92. Watts, J. M. Fire Risk Indexing / J. M. Watts // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Ch. 10. Section 5, Fire Risk Analysis. – Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2002. – Pp. 5/125–142.

93. Гэлаи, Д. Основы риск-менеджмента / Д. Гэлаи, М. Кроуи, В. Б. Минасян, Р. Марк. – М.: Юрайт, 2016. – 390 с.

94. Картвелишвили, В. М. Риск-менеджмент. Методы оценки риска / В. М. Картвелишвили, О. А. Свиридова. – М.: РЭУ, 2017. – 120 с.

95. Прус, Ю. В. Моделирование структуры и динамики техногенных и пожарных рисков в социотехнических системах / Ю. В. Прус, А. Р. Колесникова, Е. А. Клепко, В. М. Шаповалов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 4 (56). – С.16.

96. Прус, Ю. В. Структура и тензорные характеристики техногенных рисков / Ю. В. Прус // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 1(3). – С. 264–266.

97. Прус, Ю. В. Моделирование техногенных рисков в социотехнических системах на основе векторно-матричного представления / Ю. В. Прус // Управленческие науки в современном мире. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 124–127.

98. Прус, Ю. В. О векторно-матричном представлении пожарных и техногенных рисков при моделировании социотехнических систем / Ю. В. Прус, А. Р. Колесникова, Е. А. Клепко, В. М. Шаповалов // Материалы XXII-й международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем. – М.: РГГУ, 2014. – С. 245–250.

99. Абдурагимов, И. М. Еще раз о принципиальной невозможности выполнения расчетов пожарных рисков детерминированными методами / И. М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 6. – С. 13–23.
100. Ларичев, О. И. Проблемы принятия решений с учетом факторов риска и безопасности / О. И. Ларичев // Вестник АН СССР. – 1987. – Т. 57. – № 11. – С. 38–45.
101. Черешкин, Д. С. Применение методов искусственного интеллекта для анализа риска в социально-экономических системах / Д. С. Черешкин, Г. В. Ройзензон, В. Б. Бритков // Информационное общество. – 2020. – № 3. – С. 14–24.
102. Черешкин, Д. С. Интеллектуальные методы анализа рисков / Д. С. Черешкин, Г. В. Ройзензон, В. Б. Бритков // Труды Кольского научного центра РАН. – 2020. – Т. 11. – № 8 (11). – С. 165–170.
103. Асанов, А. А. Метод многокритериальной классификации ЦИКЛ и его применение для анализа кредитного риска / А. А. Асанов, П. В. Борисенков, О. И. Ларичев, Е. В. Нарыжный, Г. В. Ройзензон // Экономика и математические методы. – 2001. – Т. 37. – № 2. – С. 14–21.
104. Цыгичко, В. Н. Управление рисками кризисных ситуаций в социально-экономических системах / В. Н. Цыгичко, Д. С. Черешкин // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2020. – Т. 70. – № 2. – С. 64–70.
105. Петровский, А. Б. Многокритериальный выбор с уменьшением размерности пространства признаков: многоэтапная технология ПАКС / А. Б. Петровский, Г. В. Ройзензон // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – № 4. – С. 88–103.
106. Многокритериальные задачи принятия решений / под ред. Д. М. Гвишвини, С. В. Емельянова. – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
107. Кини, Р. Л. Размещение энергетических объектов: выбор решений / Р. Л. Кини. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
108. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
109. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.

110. Емельянов, С. В. Многокритериальные методы принятия решений / С. В. Емельянов, О. И. Ларичев. – М.: Знание, 1985. – 32 с.
111. Ларичев, О. И. Свойства методов принятия решений в многокритериальных задачах индивидуального выбора / О. И. Ларичев // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 2. – С. 146–158.
112. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2006. – 391 с.
113. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Физматлит. – 2007. – 256 с.
114. Лотов, А. В. Многокритериальные задачи принятия решений / А. В. Лотов, И. И. Поспелова. – М.: Макс Пресс, 2008. – 197 с.
115. Прус, М. Ю. Матричное представление техногенных, природных и пожарных рисков / М. Ю. Прус // Материалы XXVII-й международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 237–242.
116. Прус, Ю. В. Исследование эффективности систем противопожарной защиты на основе матричного представления пожарных рисков / Ю. В. Прус, А. А. Чистякова, М. Ю. Прус // Техносферная безопасность. – 2020. – № 3 (28). – С. 44–62.
117. Prus, Y. V. Matrix representation of emergency risks / Y. V. Prus, V. V. Tatarinov, M. Y. Prus // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V 2383. – I 1. – P.020005 (1–7).
118. Prus, Y. V. Method of Determining Expected Losses from Fires in the Residential Sector / Y. V. Prus, V. V. Tatarinov, M. Y. Prus, A. A. Chistiakova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V 2383. – I 1. – P.040020 (1–7).
119. Prus, Y. V. Relationship and Probabilistic Characteristics of Basic Fire Protection Functions / Y. V. Prus, V. V. Tatarinov, M. Y. Prus, A. A. Chistiakova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V 2383. – I 1. – P.040018 (1–8).
120. Прус, М. Ю. Математические основы стохастического моделирования многокомпонентных рисков в системах обеспечения безопасности / М. Ю. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 4(94). – С. 125–143.
121. Прус, М. Ю. Приложения теории многокомпонентных рисков к задачам

векторной оптимизации рискориентированного управления в системах обеспечения безопасности / М. Ю. Прус, М. С. Жубанов, И. А. Лобанов, Ю. В. Прус // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. «Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: проблемы управления рисками и обеспечения безопасности социально-экономических и социально-политических систем и природно-техногенных комплексов». Том 2. – М.: ГУУ, 2022. – С. 95–101.

122. Kaplan, S. The Quantitative Definition of Risk / S. Kaplan, B. J. Garrick // Risk Analysis. – 1981. – V1. – I 1. – Pp. 11–27.

123. Kaplan, S. New tools for failure & risk analysis. An Introduction to Anticipatory Failure Determination (AFD) and The Theory of Scenario Structuring / S. Kaplan, S. Visnepolschi, B. Zlotin, A. Zusman. – Ideation International Inc., 1999. – 86 p.

124. Kaplan, S. Fitting Hierarchical Holographic Modeling into the Theory of Scenario Structuring, and a Resulting Refinement to the Quantitative Definition of Risk / S. Kaplan, Y. Y. Haimes, B. J. Garrick // Risk Analysis. – 2001. – V 21. – I 5. – Pp. 807–807.

125. Шишмарёв, В. Ю. Надежность технических систем: учебник для вузов / В. Ю. Шишмарёв. – М.: Юрайт, 2022. – 289 с.

126. Андреев, А. В. Теоретические основы надежности технических систем / А. В. Андреев, В. В. Яковлев, Т. Ю. Короткая. – СПб.: СППУ, 2018. – 164 с.

127. Яковлев, В. В. Риск в природно-технической среде / В. В. Яковлев. – СПб.: СППУ, 2015. – 510 с.

128. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 207 с.

129. Манов, Н. А. Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием / Н. А. Манов, Е. В. Сеннова, М. Г. Сухарев и др. – М.: РГУНГ, 2000. – 374 с.

130. Пантелеев, В. А. Вероятностный анализ безопасности третьего уровня как средство поддержки принятия решений о размещении АЭС / В. А. Пантелеев, М. Д. Сегаль, А. Е. Пименов // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – № 4. – С. 188–192.

131. Пантелеев, В. А. Метод описания сценариев каскадных и межсистемных ава-

рий с учетом вероятностных факторов / В. А. Пантелеев, И. А. Кириллов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 5. – С. 53–61.

132. Johansen, C. Probabilistic multi-scale modeling of interdependencies between critical infrastructure systems for resilience / C. Johansen, I. Tien // Sustainable and Resilient Infrastructure. – 2018. – V 3. – N 1. – Pp. 1–15.

133. Haines, Y. Y. On the definition of resilience in systems / Y. Y. Haines // Risk Analysis. – 2009. – N 29(4). – Pp. 498–501.

134. Haines, Y. Y. Models for risk management of systems of systems / Y. Y. Haines // International Journal of System of Systems Engineering. – 2008. – N 1. – Pp. 222–236.

135. Wang, S. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework / S. Wang, L. Hong, X. Chen // Physica A: Statistical Mechanics and its applications. – 2012. – V 391. – N11. – Pp. 3323–3335.

136. Stapelberg, R. F. Infrastructure systems interdependencies and risk informed decision making (RIDM): impact scenario analysis of infrastructure risks induced by natural, technological and intentional hazards / R. F. Stapelberg // Journal of Systemics Cybernetics and Informatics. – 2008. – V 6. – N 5. – Pp. 21–27.

137. Dueñas-Osorio, L. Cascading failures in complex infrastructure systems / L. Dueñas-Osorio, S. M. Vemuru // Structural safety. – 2009. – V 31. – N 2. – Pp. 157–167.

138. Lu, L. Vulnerability of interdependent urban infrastructure networks: Equilibrium after failure propagation and cascading impacts / L. Lu, X. Wang, Y. Ouyang, J. Roningen, N. Myers, G. Calfas // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2018. – V 33. – N 4. – Pp. 300–315.

139. Buldyrev, S. V. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks / S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Pau, H. E. Stanley, S. Havlin // Nature. – 2010. – N 464(7291). – Pp. 1025–1028.

140. Hickford, A. J. Resilience engineering: theory and practice in interdependent infrastructure systems / A. J. Hickford, S. P. Blainey, A. H. Ortega, R. Plant // Environment Systems and Decisions. – 2018. – V 38. – Pp. 278–291.

141. Ouyang, M. A mathematical framework to optimize critical infrastructure resilience against intentional attacks/ M. Ouyang, Y. Fang // Computer-Aided Civil and

Infrastructure Engineering. – 2017. – V 32. – N 11. – Pp. 909–929.

142. Farsangi, E. N. Resilient Structures and Infrastructure / E. N. Farsangi, I. Takewaki, T. Yang, A. Astandeh-Asl. – Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. – 497 p.

143. Губина, Т. А. Физический смысл барьеров безопасности в методе «Анализ барьеров безопасности» / Т. А. Губина, А. А. Алексеев, А. С. Мосолов // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30. – № 8 (177). – С. 26–28.

144. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных аварий на потенциально опасных объектах / М. Ю. Прус, А. А. Кондратюк, Ю. В. Прус, В. С. Путин // Матер. IV-й междунар. науч.-практ. конф. «Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра». – М.: РГГУ, 2021. – С. 55–61.

145. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев развития аварий и катастроф / М. Ю. Прус // Матер. XXIX-й междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 411–420.

146. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций / М. Ю. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 1 (95). – С. 170–195.

147. Архипова, Н. И. Управление в чрезвычайных ситуациях / Н. И. Архипова, В. В. Кульба. – М.: РГГУ, 2008. – 316 с.

148. Кульба, В. В. Использование сценарного и индикаторного подходов для управления живучестью, стойкостью и безопасностью сложных технических систем / В. В. Кульба, Д. А. Кононов, С. А. Косяченко, А. А. Кочкаров, Д. С. Сомов. – М.: ИПУ РАН, 2011. – 116 с.

149. Шульц, В. Л. Управление техногенной безопасностью на основе сценарного и индикаторного подходов / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов, Д. С. Сомов. – М.: ИПУ РАН, 2013. – 116 с.

150. Schultz, V. L. Regional security: Analysis of the emergency management effectiveness based on the scenario approach / V. L. Schultz, V. V. Kulba, A. B. Shelkov, I. V. Chernov, O. A. Zaikin // Advances in Systems Science and Applications. – 2017. – V 17. – N 1. – Pp. 9–24.

151. Kulba, V. V. Scenario Analysis in the Management of Technogenic Safety / V. V.

- Kulba, A. B. Shelkov, I. V. Chernov, O. A. Zaikin // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – V 49. – N 12. – Pp. 1267–1271.
152. Шульц, В. Л. Методы сценарного анализа угроз эффективному функционированию систем организационного управления / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов // Тренды и управление. – 2013. – № 1. – С. 6–30.
153. Kulba, V. V. Scenario analysis in the management of regional security and social stability / V. V. Kulba, A. B. Shelkov., I. V. Chernov, O. A. Zaikin // Intelligent Systems Reference Library. – 2016. – V 98. – Pp. 249–268.
154. Kulba, V. V. Scenario Research of Complex Manufacturing Systems' Vulnerability / V. V. Kulba, D. A. Kononov, L. B. Kofoed, O. A. Zaikin // IFAC-Papers Online. – 2016. – V. 49. – N 12. – P. 372–377.
155. Schultz, V. L. Decision support system on social stability governance based on scenario approach / V. L. Schultz, V. V. Kulba, Z. K. Avdeeva, A. B. Shelkov, I. V. Chernov // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – V 7. – N 2. – P. 240–242.
156. Magruk, A. Uncertainties, knowledge, and futures in foresight studies – A case of the industry 4.0 / A. Magruk // Foresight and STI Governance. – 2020. – V 14. N 4. – P. 20–33.
157. Ascough, J. C. Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making / J. C. Ascough, H. R. Maier, J. K. Ravalico, M. W. Strudley // Ecological Modelling. – 2008. – N 219 (3–4). – P. 383–399.
158. Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн. /под ред. В. Л. Шульца, В. В. Кульбы. – М.: Наука, 2012. – Кн.1 – 304 с., Кн.2 – 358 с.
159. Шульц, В. Л. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов. – М.: Наука, 2015. – 542 с.
160. Семенов, С. С. Методы и модели принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем / С. С. Семенов, Е. М. Воронов, А. В. Полтавский, А. В. Крянев. – М.: Ленанд, 2020. – 520 с.

161. Зацаринный, А. А. Ситуационные центры развития в полисубъектной среде / А. А. Зацаринный, Н. И. Ильин, К. К. Колин, В. Е. Лепский, Г. Г. Малинецкий, Д. А. Новиков, А. Н. Райков, С. Н. Сильвестров, Б. Б. Славин // Проблемы управления. – 2017. – № 5. – С. 31–42.
162. Бауэр, В. П. Прорывное ситуационное управление / В. П. Бауэр, А. А. Зацаринный, Н. И. Ильин, К. К. Колин, В. Е. Лепский, Г. Г. Малинецкий, А. Н. Райков, С. Н. Сильвестров // Проблемы управления. – 2018. – № 5. – С. 31–38.
163. Бауэр, В. П. Подход к разработке средств моделирования для федеральной системы управления рисками / В. П. Бауэр, С. Н. Сильвестров, В. В. Смирнов // Инновации. – 2018. – № 6(236). – С. 14–20.
164. Зацаринный, А. А. Информационное взаимодействие в распределённых системах ситуационного управления / А. А. Зацаринный, А. П. Сучков. – М.: Торус Пресс, 2021. – 268 с.
165. Зацаринный, А. А. Система обмена данными: люди, события, факты / А. А. Зацаринный. – М.: Торус Пресс, 2021. – 516 с.
166. Ильин, Н. И. Новый этап развития ситуационных центров органов государственной власти / Н. И. Ильин // Мягкие измерения и вычисления. – 2019. – № 9(22). – С. 4–7.
167. Гончаренко, В. И. Мониторинг распространения лесных пожаров группировкой беспилотных летательных аппаратов / В. И. Гончаренко, Лэ Луо, М. Ю. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 4 (62). – С. 154–163.
168. Прус, М. Ю. Панорамный радиометрический комплекс раннего обнаружения очага лесного пожара / М. Ю. Прус, А. В. Клыгин // Матер. междунар. научно-практич. конфер. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» – М.: Академия ГПС, 2016. – С. 198–200.
169. Прус, М. Ю. Облачные сервисы в системе управления службами экстренного реагирования / М. Ю. Прус, Ю. И. Ходаренкова // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 1–1(4). – С. 248–251.
170. Волков, П. В. Инфокоммуникационное обеспечение в аппаратно-программном

комплексе «Безопасный город» на базе центров управления в кризисных ситуациях / П. В. Волков, М. Ю. Прус, А. Ю. Сарафонов, Т. И. Тангиев, Ю. И. Ходаренкова // Матер. XXIV-й междунар. научн.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: Академия ГПС, 2015. – С. 33–36.

171. Прус, М. Ю. Инфокоммуникационное обеспечение в территориальных системах безопасности: проблемы и перспективы развития / М. Ю. Прус // Матер. III-й школы-семинара молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности». – Ч 2. – Елец: ЕГУ, 2016. – С. 40–44.

172. Попов, А. Н. Стохастическое моделирование геодинимической устойчивости территорий / А. Н. Попов, М. Ю. Прус, Л. В. Краснова // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – № 2 (68). – С. 71–74.

173. Беленький, В. М. Оценка безопасности труда с использованием методов регрессионного анализа и нейронных сетей / В. М. Беленький, М. Ю. Прус, В. Г. Спиридонов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4 (68). – С. 278–283.

174. Прус, М. Ю. Алгоритм выбора объекта закупки путём решения задачи многокритериальной оптимизации / М. Ю. Прус, А. В. Прокушин, А. А. Погонин // Матер. XXVI-й междунар. научн.-техн. конф. «Системы безопасности», 2017. – М.: Академия ГПС. – С. 92–94.

175. Melnikov, V. F. Multi-heuristic and game approaches in search problems of the graph theory / V. F. Melnikov, E. A. Melnikova, S.V. Pivneva, N. P. Churikova, V. A. Dudnikov, M. Y. Prus // Сб. тр. IV-й междунар. конф. и мол. школы «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2018)». – Самара: Новая техника, 2018. – С. 2884–2892.

176. Прус, М. Ю. Об объективизации экспертных оценок вероятностей редких событий / М. Ю. Прус, М. С. Жубанов, И. А. Лобанов., Ю. В. Прус // Матер. XXX-й междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 111–118.

177. Прус, М. Ю. Численный метод определения вероятностных характеристик индивидуальных многокомпонентных рисков / М. Ю. Прус, М. С. Жубанов, Ю. В. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 4 (98). – С. 144–157.

178. Айвазян, С. А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 608 с.
179. Глотов, В. А. Векторная стратификация / В. А. Глотов, В. В. Павельев. – М.: Наука, 1984. – 132 с.
180. Ларичев, О. И. Противоречивые свойства методов индивидуального выбора / О. И. Ларичев // Доклады Академии Наук. – 2001. – Т. 378. – № 2. – С. 168–172.
181. Belton, V. On a shortcoming of Saaty's method of analytical hierarchies / V. Belton, A. E. Gear // Omega. – 1983. – V 11. – N 3. – Pp. 228–230.
182. Triantaphyllou, E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP / E. Triantaphyllou // Journal of Multi-criteria Decision Analysis. – 2001. – V 10. – N 1. – Pp. 11–25.
183. Подиновский, В. В. О некорректности метода анализа иерархий / В. В. Подиновский, О. В. Подиновская // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – С. 8–13.
184. Lootsma, F. A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART / F. A. Lootsma // Journal Multi-Criteria Decision Analysis. – 1993. – V 2. – Pp. 87–110.
185. Орлов, А. И. Экспертные технологии и их применение при оценивании вероятностей редких событий / А. И. Орлов, Ю. Г. Савинов, А. Ю. Богданов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 3. – С. 63–69.
186. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. – М.: Экзамен, 2006. – 671 с.
187. Гейзенберг, В. Физика и философия. Часть и целое / В. Гейзенберг. – М.: Наука, 1989. – 400 с.
188. Бунге, М. Философия физики / М. Бунге. – М.: Прогресс, 1975. – 348 с.
189. Thurstone, L. L. Psychophysical analysis / L. L. Thurstone // American Journal of Psychology. – 1987. – V 100. – N 3–4. – Pp. 587–609.
190. Гусев, А. Н. Психологические измерения. Теория. Методы. Учебное пособие / А. Н. Гусев, И. С. Уточкин. – М.: «Аспект Пресс», 2011. – 319 с.
191. Минько, В. М. Численные методы в охране труда / В. М. Минько, Н. А. Евдокимова. – Калининград: КГТУ, 2017. – 200 с.

192. Романчук, В. М. Субъективное оценивание вероятности / В. М. Романчук // Информатика. – 2018. – Т. 15. – № 2. – С. 74–82.
193. Романчук, В. М. Об эквивалентности законов Фехнера и Стивенса / В. М. Романчук // Журнал Белорусского государственного университета. Философия. Психология. – 2019. – № 3. – С. 97–102.
194. Саати, Т. Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений / Т. Л. Саати // Cloud of Science. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 5–39.
195. Шикин, Е. В. Математические методы и модели в управлении / Е. В. Шикин, А. Г. Чхартишвили. – М.: КДУ, 2009. – 439 с.
196. Таранцев, А. А. Регрессионный анализ и планирование испытаний в задачах принятия решений / А. А. Таранцев. – СПб.: ИПТ РАН, 2017. – 174 с.
197. Таранцев, А. А. Методы многопараметрической оптимизации в задачах выбора решений / А. А. Таранцев, К. Ю. Шилин. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС, 2019. – 31 с.
198. Ногин, В. Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 4. – С. 73–82.
199. Noghin, V. D. Pareto set reduction based on an axiomatic approach with application of some metrics / V. D. Noghin // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2017. – V 57. – N 4. – Pp. 645–652.
200. Ногин, В. Д. Многокритериальный выбор на нечетком множестве как задача поиска компромисса / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2018. – № 3. – С. 91–99.
201. Рожнов, А. В. Развитие виртуальной семантической среды интеграцией компонентов тренажёрных комплексов различного назначения / А. В. Рожнов, М. Ю. Прус, Нгуен Ба Туан // Матер. XXV-й междунар. научн.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: АГПС, 2016. – С. 68–72.
202. Прус, М. Ю. Применение технологий иммерсивного телеприсутствия для мониторинга и диагностики технического состояния потенциально опасных объектов

/ М. Ю. Прус, А. Н. Попов // Матер. III-й междунар. конф. «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур (SAFETY 2017)». – Екатеринбург: УФУ, 2017. – С. 82–90.

203. Прус, М. Ю. Математические основы стохастического моделирования динамики эксплуатационных рисков в социотехнических системах / М. Ю. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 2 (96). – С. 161–179.

204. Минеев, Е. Н. Об оценке показателей надёжности электрических аппаратов защиты электросети / Е. Н. Минеев, М. Ю. Прус // Матер. XXIV-й междунар. науч.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: АГПС, 2015. – С. 296–300.

205. Бутузов, С. Ю. Методика оценки показателей надёжности электрических аппаратов защиты электросети / С. Ю. Бутузов, Е. Н. Минеев, М. Ю. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3 (67). – С. 33–39.

206. Периков, А. В. Моделирование пожарно-электрического вреда в системе качества потребляемой электроэнергии / А. В. Периков, М. Ю. Прус // Матер. VII-й Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы соверш. инж. систем обеспечения пожарной безопасности объектов». – Иваново: ИПСА ГПС, 2020. – С. 319–323.

207. Прус, М. Ю. Моделирование пожароопасных отказов электрооборудования и оценка пожарно-электрического вреда / М. Ю. Прус, А. В. Периков // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 3 (97). – С. 190–201.

208. Кирсанов, А. А. Система поддержки управления безопасностью автомобильных перевозок опасных грузов / А. А. Кирсанов, М. Ю. Прус, Д. С. Туниеков // Матер. XIII-й междунар. конф. «Соврем. информ. технологии в образовании, науке и промышленности». – М.: РГСУ, 2019. – С. 131–133.

209. Кирсанов, А. А. Системы информирования об автомобильной аварии / А. А. Кирсанов, М. Ю. Прус, Д. С. Туниеков // Матер. XXVII-й междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 372–377.

210. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев развития аварий и катастроф / М. Ю. Прус // Матер. XXIX-й междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 411–420.

211. Белозеров, В. В. Синергетика безопасности инженерных систем жилых зданий / В. В. Белозеров, Т. Б. Долаков, С. Н. Олейников, А. В. Периков // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 2. – С. 15–20.
212. Korneev, N. V. Model of power quality system using electric meter suppressor of fire and electric damage and hazards in the residential sector / N. V. Korneev, Y. V. Prus, A. V. Perikov, N. M. Smolenskaya, V. V. Smolenskii // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Yekaterinburg, 2020. – P. 012024.
213. Белозеров, В. В. Синергетика безопасности жизнедеятельности в жилом секторе / В. В. Белозеров, Т. Б. Долаков, С. Н. Олейников, А. В. Периков. – М.: ИД Академии Естествознания, 2017. – 184 с.
214. Белозеров, В. В. Нанотехнологии "интеллектуализации" учета энергоресурсов и подавления пожарно-энергетического вреда в инженерных системах жилых зданий. Часть I / В. В. Белозеров, В. В. Белозеров, Т. Б. Долаков, М. А. Никулин, С. Н. Олейников // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13. – № 2. – С. 95–107.
215. Белозеров, В. В. Нанотехнологии "интеллектуализации" учета энергоресурсов и подавления пожарно-энергетического вреда в инженерных системах жилых зданий. Часть II / В. В. Белозеров, И. В. Ворошилов, А. Н. Денисов, М. А. Никулин, С. Н. Олейников // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 171–180.
216. Белозеров, В. В. О вероятностно-физическом подходе к вопросу надежности и безопасности изделий электронной техники / В. В. Белозеров // Электроника и электротехника. – 2018. – № 3. – С. 17–50.
217. Белозеров, В. В. Классификация объектов повышенной опасности и вероятностно-физические модели оценки их устойчивости и безопасности / В. В. Белозеров, С. Л. Загускин, Ю. В. Прус, Л. К. Самойлов, Н. Г. Топольский, В. Н. Труфанов // Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 8. – С. 34–40.
218. Буйло, С. И. Современные методы диагностики материалов и изделий из них / С. И. Буйло, В. В. Белозеров, С. И. Босый, Ю. В. Прус. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2007. – 192 с.
219. Воробьев, В. Л. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств / В. Л. Воробьев. – М.: Наука, 1989. – 160 с.

220. Груничев, А. С. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность / А. С. Груничев, В. А. Кузнецов, Е. В. Шипов. – М: Советское радио, 1969. – 288с.
221. Яншин, А. А. Теоретические основы конструирования, технология и надежность ЭВА / А. А. Яншин. – М.: Радио и связь, 1983. – 312 с.
222. Литвинский, И. Е. Обеспечение безотказности микроэлектронной аппаратуры на этапе производства / И. Е. Литвинский. – Минск, Беларусь, 1989. – 191 с.
223. Парфенов, Е. М. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие / Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, В. П. Усачов. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
224. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности /ГОСТ Р 27.013—2019 (МЭК 62308:2006). – М.: Стандартинформ, 2019. – 42 с.
225. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных /ГОСТ Р 50779.27–2017 (МЭК 61649:2008). – М.: Стандартинформ, 2017. – 58 с.
226. Сеницын, В. В. Моделирование системы поддержки принятия управленческих решений при ликвидации автомобильных аварий с опасным грузом / В. В. Сеницын, В. В. Татаринов, Ю. В. Прус, А. А. Кирсанов // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 2 (84). – С. 84–90.
227. Сеницын, В. В. Совершенствование процессов управления в системе обеспечения безопасности автомобильных перевозок опасных грузов / В. В. Сеницын, В. В. Татаринов, Ю. В. Прус, А. А. Кирсанов // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 1(83). – С. 50–60.
228. Kirsanov, A. A. Decision support software for chemical accident elimination management / A. A. Kirsanov, V. V. Tatarinov, Y. V. Prus // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – V. 2195. – N 1. – P. 020076.
229. Алехин, Е. М. Имитационное моделирование систем массового обслуживания с переменным числом каналов обслуживания / Е. М. Алехин, Ю. В. Прус, М. Ю. Прус // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017663686, 11.12.2017.
230. Прус, М. Ю. Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов / М. Ю. Прус, А. С. Мосолов // Матер. XI-й междунар.

конф. «Соврем. инф. техн. в образовании, науке и промышленности», 2018. – М.: РГСУ. – С. 161–164.

231. Егоров, И. А. Способ и устройство оценки эффективности защитного действия фильтрующих элементов и/или устройств / И. А. Егоров, М. Ю. Прус, Ю. В. Прус, Т. Ю. Еремина // Патент на изобретение RU 2646949 С2, 12.03.2018.

232. Прус, М. Ю. Определение защитных свойств фильтрующе-поглощающих элементов методом нейтронной активации / М. Ю. Прус // Матер. IV-й шк.-сем. молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности», 2017. – Севастополь: СГУ. – С. 104–108.

233. Прус, М. Ю. Применение нейтронной активации для исследования защитных свойств фильтрующе-поглощающих СИЗОД / М. Ю. Прус, И. А. Егоров // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы техносферной безопасности» – М.: Академия ГПС, 2017. – С. 273–277.

234. Рынок труда: учебник / Под ред. Н. А. Буланова, Н. А. Волгина. – М.: Экзамен, 2003. – 480 с.

235. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях различных классов функциональной пожарной опасности (приложение к приказу МЧС России от 31 июня 2009 г. № 382).

236. Постановление Правительства РФ от 17 августа 2007 г. N 522 «Об утверждении Правил определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека».

237. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123–ФЗ.

238. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 480 с.

239. Хомоненко, А. Д. Нейросетевая аппроксимация характеристик многоканальных немарковских систем массового обслуживания / А. Д. Хомоненко, Е. Л. Яковлев // Труды СПИИ РАН. –2015. –Вып. 4(41). – С. 81–93.

240. Рыжиков, Ю. И. Теория очередей и управление запасами / Ю. И. Рыжиков. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

241. Моделирование геодинамических рисков в чрезвычайных ситуациях / под ред. К.М. Бондаря, В. А. Минаева, А. О. Фаддеева. – Хабаровск: ДВЮИ МВД России, 2014. – 124 с.
242. Минаев, В. А. Оценка природно-техногенного риска на основе динамических моделей / В. А. Минаев, Н. Г. Топольский, А. О. Фаддеев, Р. О. Степанов, Д. С. Грачев // Технологии техносферной безопасности. – 2020. – № 2 (88). – С. 8–21.
243. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю. О. Кузьмин, В. С. Жуков. – М.: Горная книга, 2012. – 264 с.
244. Средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие. Метод определения времени защитного действия фильтрующе-поглощающих коробок по оксиду углерода / ГОСТ 12.4.160–90. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
245. Средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие. Методы определения времени защитного действия фильтрующе-поглощающих коробок по парообразным вредным веществам углерода / ГОСТ 12.4.158–90. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 16 с.
246. Лукьянов А. Б. Физическая и коллоидная химия / А. Б. Лукьянов. – М.: Химия, 1988. – 287 с.
247. Дубинин, М. М. Теория физической адсорбции газов и паров и адсорбционные свойства адсорбентов различной природы и пористой структуры / М. М. Дубинин // Изв. АН СССР Отд. хим. и наук о материалах. – 1960. – № 7. – С. 1153–1161.
248. Лопаткин, А. А. Теоретические основы физической адсорбции / А. А. Лопаткин. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 344 с.
249. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холл и Дж. Уатт. – М.: Мир, 1979. – 312 с.

Приложение А

Программа для ЭВМ «Моделирование многокомпонентных рисков» (Описание и листинг)

Программа предназначена для поддержки риск-ориентированного управления и оценки ожидаемых для рассматриваемого множества объектов в течение определенного временного интервала социально-экономических потерь от воздействия исследуемых опасных факторов.

Программа содержит базу знаний, формируемую на основе проведения процедур экспертной оценки частных условных вероятностей событий, связанных с наступлением определенных последствий воздействия опасных факторов на объекты защиты, а также аналитического расчета вероятностей возможных вариантов фактического выполнения совокупности функций защиты.

При небольших количествах вариантов распределения затрат и ресурсов, а также компонент вектора «ожидаемых потерь» программа позволяет проводить сравнительный анализ визуально представленных показателей многокомпонентными рисками.

```
from itertools import product
from dataclasses import make_dataclass
import random
import pandas as pd

c = {
    'c1': 'Категория 1',
    'c2': 'Категория 2',
    'c3': 'Категория 3',
    'c4': 'Категория 4',
    'c1*': 'Категория 1 обученная и подготовленная',
    'c2*': 'Категория 2 обученная и подготовленная',
    'c3*': 'Категория 3 обученная и подготовленная',
    'c4*': 'Категория 4 обученная и подготовленная'
}

d = {
    'd1': 'Без травм',
    'd2': 'Легкие травмы',
    'd3': 'Тяжелые травмы',
    'd4': 'Летальный исход'
```

```

}

#количество функций
limit = 7

functions = []

#заполняем всевозможные сочетания функций
for x in range(pow(2,limit)):
    functions.append(
        '0'*(limit-len(str(bin(x))[2:]))+str(bin(x))[2:]
    )

func_probs = [
    # ОП
    (0,'0', 0.2),
    (0,'1', 0.8),

    # АП
    (1,'0', 0.1),
    (1,'1', 0.9),

    # ОУЭ
    (2,'0', 0.2),
    (2,'1', 0.8),

    # ПДЗ
    (3,'0', 0.2),
    (3,'1', 0.8),

    # ПО
    (4,'0', 0.05),
    (4,'1', 0.95),

    # Пути эвакуации
    (5,'0', 0.2),
    (5,'1', 0.8),

    # Аварийные выходы
    (6,'0', 0.25),
    (6,'1', 0.75)
]

func_probs = [
    # ОП
    (0,'0', 0.2),
    (0,'1', 0.8),

    # АП
    (1,'0', 0.1),
    (1,'1', 0.9),

```

```

# ОУЭ
(2,'0', 0.2),
(2,'1', 0.8),

# ПДЗ
(3,'0', 0.2),
(3,'1', 0.8),

# ПО
(4,'0', 0.05),
(4,'1', 0.95),

# Пути эвакуации
(5,'0', 0.2),
(5,'1', 0.8),

# Аварийные выходы
(6,'0', 0.25),
(6,'1', 0.75)
]

Row = make_dataclass("Row", [
    ("category", str),
    ("functions", str),
#    ("probs", float),
    ("damage", str),
    ("value", float)
])

data = []
t=0
for cat in c.keys():
    for func in functions:
        #----- заменить на заполнение из внешнего источника-----
        probs = [random.uniform(0,1) for i in range(len(d.keys()))]
        tmp = probs.copy()
        for i, val in enumerate(probs):
            probs[i]=val/sum(tmp)
        #-----

        keys = list(d.keys())

        for x in range(len(d.keys())):
            r = Row(cat, func,
#                fp.get(f),
                keys[x], probs[x])
            data.append(r)

Row = make_dataclass("Row", [
    ("category", str),
    ("functions", str),

```

```

# ("probs", float),
  ("damage", str),
  ("value", float)
])

data = []
t=0
for cat in c.keys():
  for func in functions:
    #----- заменить на заполнение из внешнего источника-----
    probs = [random.uniform(0,1) for i in range(len(d.keys()))]
    tmp = probs.copy()
    for i, val in enumerate(probs):
      probs[i]=val/sum(tmp)
    #-----

    keys = list(d.keys())

    for x in range(len(d.keys())):
      r = Row(cat, func,
#         fp.get(f),
          keys[x], probs[x])

data.append(r)

equipment = '0100001'

pK = 2.6*0.01

times = {
  'c1':0.6,
  'c2':0.8,
  'c3':0.2,
  'c4':0.1,
  'c1*':0.7,
  'c2*':0.1,
  'c3*':0.3,
  'c4*':0.9
}

possibilities = get_func_list(equipment)

print(possibilities)

```

Приложение Б

Примеры формирования базы знаний и сравнительного анализа эффективности решений при управлении рисками

Проектирование систем поддержки управления многокомпонентными рисками предусматривает создание базы данных, базы знаний и комплекса алгоритмов информационно-аналитической поддержки решений для рассматриваемой предметной области.

Некоторые результаты моделирования многокомпонентных рисков реализованы в алгоритмах расчета ожидаемых потерь, интегрированных в едином программном комплексе, включающем четыре модуля:

- определения на основе парных сравнений частных локальных условных вероятностей (5.12),
- расчета локальных условных вероятностей (5.17),
- расчета компонент (5.18) локального «вектора ожидаемых потерь»,
- расчета компонент (5.19) интегрального «вектора ожидаемых потерь».

База знаний предметной области формируется в результате функционирования первого и второго модуля. Информационно-аналитическая поддержка решений при управлении рисками основана на функционировании третьего и четвертого модуля программного комплекса.

Приведем пример выполнения указанных процедур для предметной области «Управление пожарными рисками в жилом секторе».

1. Формирование базы знаний предметной области «Управление пожарными рисками в жилом секторе». В базу знаний входит набор частных локальных условных вероятностей, на основе которого формируется набор локальных усредненных условных вероятностей наступления последствий воздействия ОФП.

1.1. Процедуры парных сравнений в диалоговой системе "MPRIORITY 1.0" для определения субъективных значений частных локальных условных вероятностей (5.12) представлены на рисунке Б.1 в виде общей схемы и соответствующей определенному набору выполнения $[E_1 E_2 E_3 E_4 E_5 E_6]$ совокупности функций ПЗ.

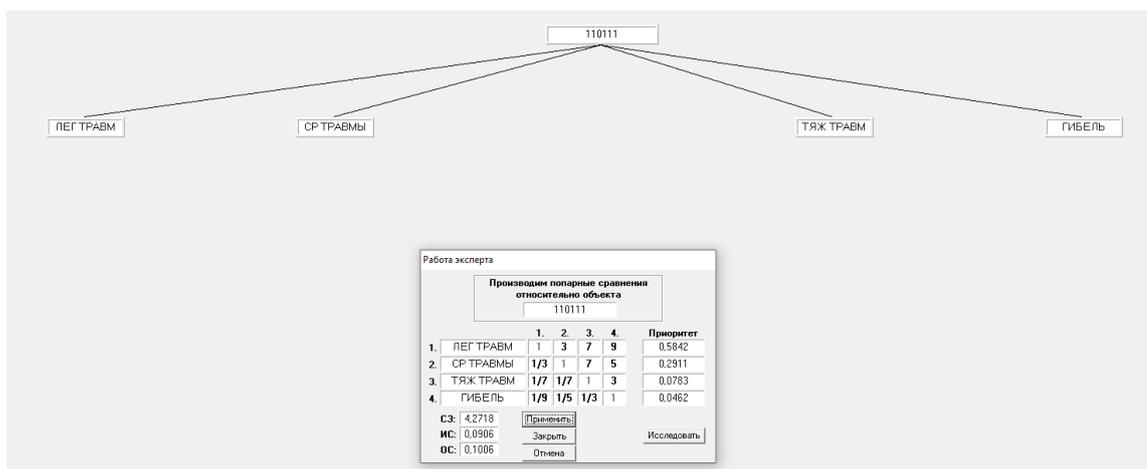


Рисунок Б.1 – Процедура определения субъективных частных условных вероятностей наступления последствий воздействия ОФП

1.2. Процедура преобразования компонент нормированного главного собственного вектора для полученной матрицы парных сравнений (2.15) с целочисленной фундаментальной шкалой отношений в некоторые адаптированные к исследуемому виду рисков компоненты нормированного вектора в соответствии с (2.19). Функциональная связь результатов субъективной оценки с объективными значениями частных условных вероятностей задавалась параметром $\theta=1,8$.

1.3. Моделирование процессов выполнения функций ПЗ и определение численных значений вероятностей возможных вариантов выполнения функций ПЗ с использованием данных из таблиц 5.2–5.6 при заданном варианте конфигурации СОПБ $[R_1^k R_2^k R_3^k R_4^k R_5^k R_6^k]$.

1.4. Процедура вычисления в соответствии с (5.17) локальных усредненных условных вероятностей наступления последствий воздействия ОФП, представлена трехуровневой иерархией в виде графа на рисунке Б.2.

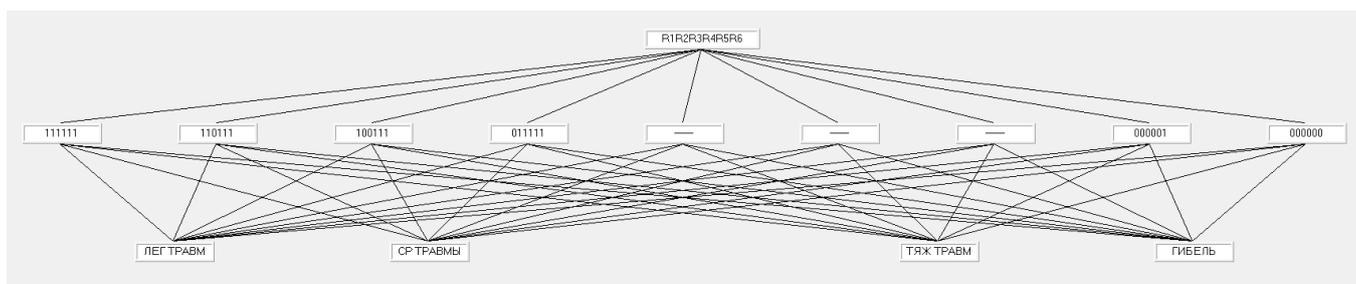


Рисунок Б.2 – Процедура вычисления локальных усредненных условных вероятностей наступления последствий воздействия ОФП

В качестве примера приведем фрагмент расчета локальных условных вероятностей наступления j -го вида последствий воздействия ОФП для подгрупп $c_{i^0}^k$ и $c_{i^*}^k$ для здания с СОПБ, характеризуемой идентификатором [111111].

Подстановка в (5.17) численных значений вероятностей выполнения функций ПЗ по данным таблиц 5.2–5.6, соответствующих заданному варианту конфигурации СОПБ здания (технических систем и факторов, влияющих на спасение людей) с идентификатором [111111], позволяет получить для элементов матриц (5.17), следующие выражения:

$$\begin{aligned} \langle s_{i^0}^k \rangle = & s_{i^0}^{111111} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{111110} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{111101} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{111100} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^0}^{111011} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{111010} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{111001} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{111000} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{101111} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{101110} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^0}^{101101} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{101100} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{101011} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{101010} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{101001} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{101000} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^0}^{011111} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{011110} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{011101} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{011100} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{011011} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{011010} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^0}^{011001} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{011000} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{001111} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{001110} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{001101} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{001100} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^0}^{001011} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{001010} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{001001} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{001000} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{000111} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{000110} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^0}^{000101} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{000100} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{000011} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^0}^{000010} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^0}^{000001} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^0}^{000000} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle s_{i^*}^k \rangle = & s_{i^*}^{111111} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{111110} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{111101} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{111100} 0,576 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^*}^{111011} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{111010} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{111001} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{111000} 0,576 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{101111} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{101110} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^*}^{101101} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{101100} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{101011} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{101010} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{101001} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{101000} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^*}^{011111} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{011110} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{011101} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{011100} 0,144 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{011011} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{011010} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^*}^{011001} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{011000} 0,144 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{001111} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{001110} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{001101} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{001100} 0,036 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^*}^{001011} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{001010} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{001001} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{001000} 0,036 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{000111} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{000110} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + \\ & + s_{i^*}^{000101} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{000100} 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,2 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{000011} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + \\ & + s_{i^*}^{000010} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,25 + s_{i^*}^{000001} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,75 + s_{i^*}^{000000} 0,1 \cdot 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,25 \end{aligned}$$

Аналогично вычисляются элементы матриц (5.17) для других вариантов

конфигураций СОПБ (технических систем и факторов, влияющих на спасение людей) со значениями идентификаторов $[R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6]^k$.

2. Алгоритмы сравнительного анализа эффективности решений для предметной области «Управление пожарными рисками в жилом секторе»

2.1. Вычисление компонент локального «вектора ожидаемых потерь» для отдельного здания по (5.18) при подстановке результатов расчетов матричных элементов (5.17), а также данных из таблицы 5.7.

2.2. Вычисление компонент интегрального «вектора ожидаемых потерь» при суммировании локальных «векторов ожидаемых потерь» для всех жилых зданий, расположенных на территории.

2.3. Процедура сравнительного анализа эффективности управленческого решения основана на вычислении компонент интегрального «вектора ожидаемых потерь» для текущего и рассматриваемых достижимых вариантов состояния СОПБ и подготовленности населения.

Рассмотрим пример выбора варианта модернизации технических систем ПЗ для одного здания.

Сравнительный анализ эффективности различных вариантов основан на сопоставления ожидаемого снижения по видам ущерба и потерь, отраженных на диаграммах рисунков Б.3 и Б.4.

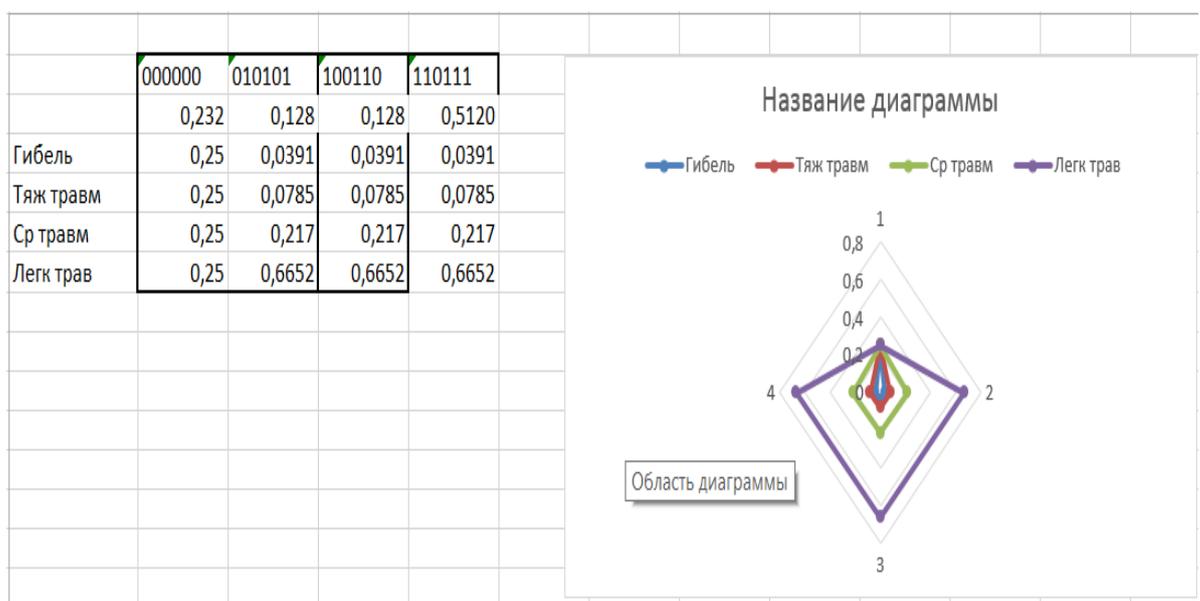


Рисунок Б.3 – Ожидаемые потери защиты для текущего состояния СОПБ

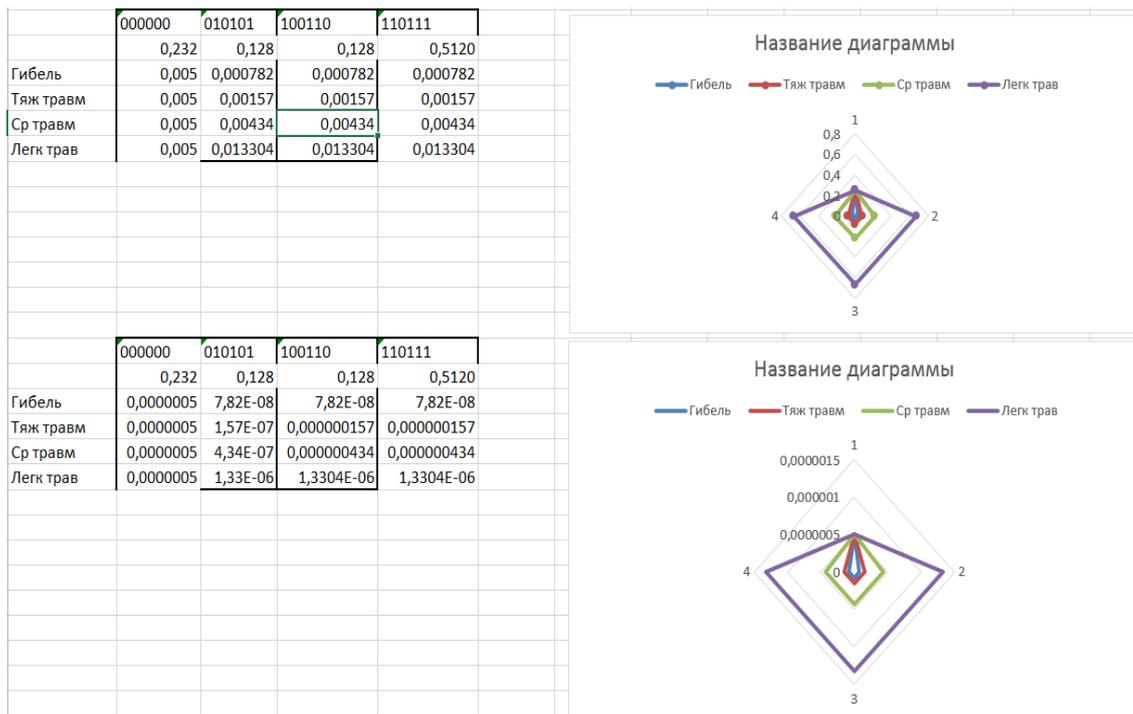


Рисунок Б.4 – Ожидаемые потери защиты для достижимых состояний СОПБ

Пример сравнительного анализа эффективности мероприятий, направленных на модернизацию СОПБ в жилом секторе на некоторой модельной территории (таблица 5.7), представлен на рисунке Б.5 в виде лепестковой диаграммы.

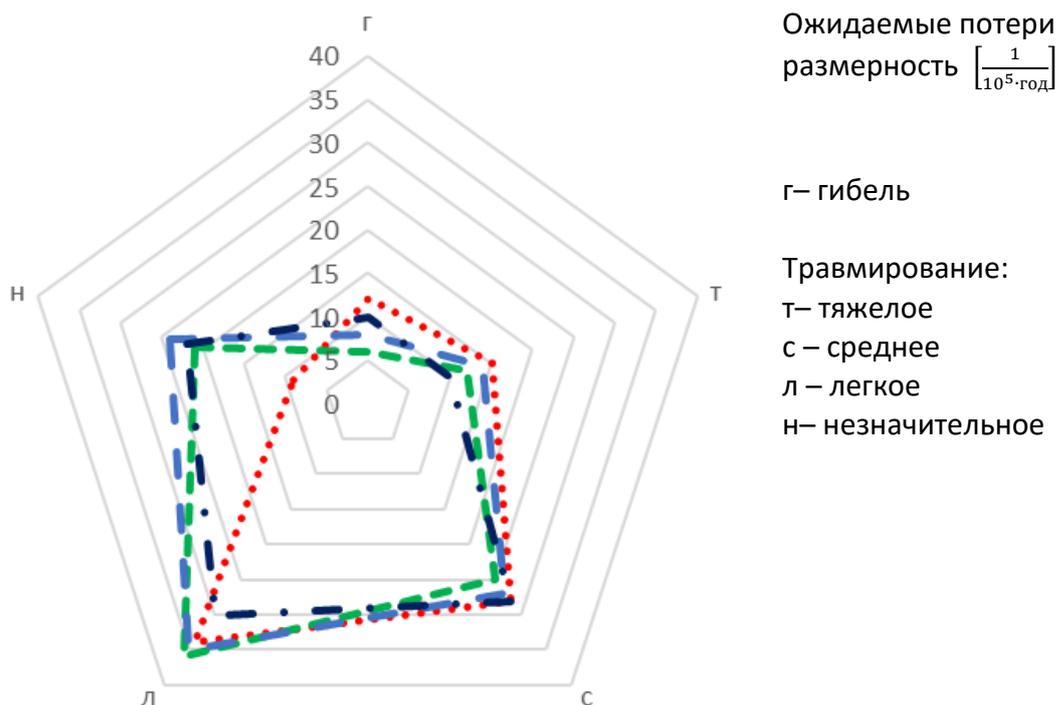


Рисунок Б.5 – Ожидаемые потерь при различных вариантах использования ресурсов

Приложение В

Патент на изобретение «Способ и устройство оценки эффективности защитного действия фильтрующих элементов и/ или устройств»

RUSSIAN FEDERATION



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 646 949**⁽¹³⁾ **C2**

(51) Int. Cl.
G01T 1/16 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G01T 1/16 (2006.01)

(21)(22) Application: 2016134615, 24.08.2016

(24) Effective date for property rights:
24.08.2016

Registration date:
12.03.2018

Priority:

(22) Date of filing: 24.08.2016

(43) Application published: 28.02.2018 Bull. № 7

(45) Date of publication: 12.03.2018 Bull. № 8

Mail address:

119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova, Fond "Natsionalnoe intellektualnoe
razvitie"

(72) Inventor(s):

Egorov Ilya Aleksandrovich (RU),
Prus Mikhail Yurevich (RU),
Prus Yuriy Vitalevich (RU),
Eremina Tatyana Yurevna (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU)
(RU)

(54) METHOD AND DEVICE FOR EVALUATING EFFICIENCY OF PROTECTIVE ACTION OF FILTER ELEMENTS AND/OR DEVICES

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: group of inventions relates to means of radiochemical neutron-activation analysis (NAA) of air-cleaning processes (air mixture) from various kinds of toxic impurities by filtering and filtering-absorbing elements of respiratory organs protection means and other air cleaning devices. The method for evaluating the degree of protective action efficiency of filtering elements or devices comprises stages for activating a sample of toxic material by a flow of thermal neutrons, the activated sample of toxic substance is mixed with atmospheric air, the prepared air mixture is supplied under pressure for filtration, the prepared air mixture is filtered through filtering elements or devices. The

pulses of activation of gamma-radiation detectors of air mixture before, during and after filtration are registered, the filtered mixture is discharged into the environment, and protective action efficiency of the filter elements or devices is estimated from the ratio of the activation intensities of the gamma-radiation detectors in the prepared and filtered mixtures.

EFFECT: possibility for testing and obtaining qualitative and quantitative information on the degree of protective action efficiency of the filter elements, and means for protecting respiratory organs and other air cleaning devices.

17 cl, 3 dwg

RU 2 646 949 C 2

RU 2 646 949 C 2



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2646949

СПОСОБИ И УСТРОЙСТВО ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И/ИЛИ УСТРОЙСТВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU)*

Авторы: *Егоров Илья Александрович (RU), Прус Михаил Юрьевич (RU), Прус Юрий Витальевич (RU), Еремина Татьяна Юрьевна (RU)*

Заявка № 2016134615

Приоритет изобретения 24 августа 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 12 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 августа 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Г

Программа для ЭВМ «Имитационное моделирование систем массового обслуживания с переменным числом каналов обслуживания»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU 2017663686

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2017663686 Дата регистрации: 11.12.2017 Номер и дата поступления заявки: 2017660610 19.10.2017 Дата публикации: 11.12.2017 Контактные реквизиты: Алехин Евгений Михайлович; 8-916-964-63-70; k-post1@yandex.ru	Авторы: Алехин Евгений Михайлович (RU), Прус Юрий Витальевич (RU), Прус Михаил Юрьевич (RU) Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:
«Имитационное моделирование систем массового обслуживания с переменным числом каналов обслуживания»

Реферат:

Программа предназначена для имитационного моделирования динамики систем массового обслуживания с переменным числом каналов обслуживания. Данная имитационная компьютерная модель предназначена для исследования процессов обслуживания потока заявок с предварительно заданной интенсивностью. Модель позволяет осуществить подбор оптимального числа каналов обслуживания, обеспечивающих необходимое качество обслуживания при допустимых затратах на содержание системы. Программа может быть установлена на персональном компьютере, ноутбуке, планшете и использоваться в процессе принятия решения по обоснованию требуемого количества каналов обслуживания при ожидаемой интенсивности потока заявок. Программа позволяет задавать один из трех режимов работы: с постоянным числом каналов, с изменением в зависимости от определенного количества заявок в очереди и с изменением в зависимости от определенного количества свободных каналов. Программа осуществляет ввод, обработку и отображение результата.

Тип реализующей ЭВМ:	IBM PC - совмест. ПК
Язык программирования:	C++
Вид и версия операционной системы:	Windows 2000/XP/Vista/7/8/10/
Объем программы для ЭВМ:	61,44 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017663686

«Имитационное моделирование систем массового обслуживания с переменным числом каналов обслуживания»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (RU)*

Авторы: *Алехин Евгений Михайлович (RU), Прус Юрий Витальевич (RU), Прус Михаил Юрьевич (RU)*

Заявка № 2017660610

Дата поступления 19 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 декабря 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев