

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

*На правах рукописи*



Тараканов Денис Вячеславович

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОДДЕРЖКИ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ  
НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ЗДАНИИ**

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Специальность: 05.13.10 – «Управление в социальных  
и экономических системах» (технические науки)

Научный консультант:  
заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
Топольский Николай Григорьевич

Москва – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ.....	13
1.1. Статистический анализ обстановки с пожарами в зданиях России.....	15
1.1.1. Анализ средней площади зданий.....	15
1.1.2. Анализ количества пожаров в зданиях и ущерба от них .....	18
1.1.3. Количество крупных пожаров в зданиях .....	19
1.1.4. Анализ гибели и травмирования пожарных на пожарах в зданиях.....	22
1.1.5. Анализ технической готовности систем мониторинга пожара .....	23
1.2. Теоретические основы управления пожарными подразделениями.....	27
1.2.1. Основные понятия и закономерности управления на пожаре.....	28
1.2.2. Методы принятия управленческих решений на пожаре .....	30
1.3. Системы поддержки принятия управленческих решений.....	33
1.3.1. Анализ систем поддержки управления .....	33
1.3.2. Подходы к разработке систем поддержки управления .....	43
1.3.3. Основные требования к системам поддержки управления .....	44
1.4. Модели действий пожарных подразделений в зданиях .....	47
1.4.1. Вероятностные модели .....	49
1.4.2. Детерминированные модели .....	53
1.5. Системы мониторинга пожара в здании .....	58
1.5.1. Информационные системы мониторинга пожара .....	58
1.5.2. Классификация систем мониторинга пожара в здании.....	59
1.6. Анализ подходов к разработке процедур поддержки управления.....	63
1.6.1. Принцип парето-оптимальности управленческих решений.....	63
1.6.2. Свертка векторного критерия .....	65
1.6.3. Модификация векторного критерия.....	68
1.6.4. Комбинированные процедуры поддержки управления .....	70
Выводы по главе 1 .....	74

ГЛАВА 2. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ЗДАНИИ .....	76
2.1. Концепция мониторинга и прогнозирования динамики пожара .....	77
2.1.1. Функции мониторинга динамики пожара .....	77
2.1.2. Методы моделирования мониторинга динамики пожара.....	79
2.2. Модель мониторинга пожара на основе теории клеточных автоматов.....	80
2.2.1. Система уравнений динамики параметров мониторинга .....	83
2.2.2. Аналитические решения системы уравнений .....	87
2.3. Метод моделирования динамики параметров мониторинга пожара.....	90
2.3.1. Структура метода моделирования мониторинга пожара.....	91
2.3.2. Содержание метода моделирования мониторинга пожара.....	92
2.4. Метод количественной оценки результатов мониторинга пожара.....	97
2.4.1. Структура метода оценки результатов мониторинга пожара.....	97
2.4.2. Содержание метода оценки результатов мониторинга пожара .....	98
2.5. Модель оценки состояний пожара по результатам мониторинга .....	104
2.5.1. Исходные положения и утверждения моделирования .....	104
2.5.2. Количественная оценка состояний пожара по мониторингу .....	109
Выводы по главе 2.....	112
ГЛАВА 3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ПОЖАРА.....	114
3.1. Общая модель многокритериальной поддержки принятия решений.....	115
3.1.1. Формальная задача многокритериального выбора.....	115
3.1.2. Свойства многокритериальной задачи выбора .....	117
3.2. Исследование модели ранжирования управленческих решений .....	121
3.2.1. Многокритериальная постановка задачи ранжирования .....	121
3.2.2. Результаты исследования модели.....	122
3.3. Исследование модели теоретико-множественного анализа решений.....	129
3.3.1. Многокритериальная постановка задачи.....	129
3.3.2. Результаты исследования теоретико-множественной модели .....	130
3.4. Разработка метода поддержки принятия управленческих решений.....	136

3.4.1. Структура метода поддержки принятия управленческих решений .....	137
3.4.2. Содержание метода поддержки принятия управленческих решений .....	138
Выводы по главе 3 .....	146
<b>ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ</b>	
<b>ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ.....</b>	
4.1. Формализация задачи управления пожарными подразделениями .....	149
4.1.1. Системный анализ действий пожарных подразделений.....	152
4.1.2. Критерии выбора управленческих решений .....	154
4.1.3. Варианты управленческих решений .....	157
4.2. Разработка количественных шкал критериев.....	163
4.2.1. Количественная шкала условий видимости .....	163
4.2.2. Количественная шкала критериев движения .....	166
4.3. Многокритериальный анализ управленческих решений .....	171
4.3.1. Постановка многокритериальной задачи .....	171
4.3.2. Методика многокритериального анализа управленческих решений .....	173
4.4. Многоагентное моделирование поддержки управления .....	176
4.4.1. Элементы и структура многоагентной модели .....	177
4.4.2. Моделирование поддержки принятия управленческих решений .....	179
Выводы по главе 4.....	184
<b>ГЛАВА 5. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ</b>	
<b>ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ.....</b>	
5.1. Архитектура программно-аппаратного комплекса .....	187
5.1.1. Функциональная структура системы поддержки управления .....	187
5.1.2. Алгоритмическая структура системы поддержки управления .....	189
5.2. Система мониторинга и моделирования динамики пожара .....	192
5.2.1. Подсистема сбора и обработки результатов мониторинга .....	193
5.2.2. Подсистема моделирования параметров мониторинга пожара .....	196
5.3. Система многокритериального анализа управленческих решений .....	199
5.3.1. Структура системы многокритериального анализа.....	199
5.3.2. Программная реализация процедур многокритериального анализа .....	201

5.4. Система моделирования поддержки управления .....	208
5.4.1. Моделирование мониторинга динамики пожара в здании .....	208
5.4.2. Моделирование действий пожарных подразделений.....	213
5.5. Методические рекомендации по применению системы .....	220
5.5.1. Способы применения системы поддержки управления.....	220
5.5.2. Технология применения системы при тушении пожара в здании .....	222
5.5.3. Технология применения системы на пожарно-тактических учениях .....	224
Выводы по главе 5.....	225
<b>ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ</b>	
<b>УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ .....</b>	
6.1. Общие положения оценки эффективности.....	227
6.2. Исследование эффективности системы поддержки управления .....	230
6.2.1. Условия экспериментального исследования.....	230
6.2.2. Количественные значения показателей эффективности.....	232
6.3. Эффективность действий пожарных подразделений .....	240
6.3.1. Показатель эффективности действий пожарных подразделений .....	240
6.3.2. Эффективность применения системы поддержки управления .....	241
6.4. Оценка противопожарной защиты зданий с применением системы.....	244
6.4.1. Структура метода оценки противопожарной защиты зданий.....	245
6.4.2. Результаты оценки эффективности применения системы.....	246
Выводы по главе 6.....	252
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>253</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>256</b>
Приложение 1. Статистические данные по пожарам в зданиях.....	298
Приложение 2. Регрессионные модели действий по тушению пожара .....	310
Приложение 3. Статистический анализ результатов исследования .....	315
Приложение 4. Экономическая оценка системы поддержки управления.....	322
Приложение 5. Акты внедрения результатов исследования .....	331

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Обстановка с пожарами в России определяет необходимость постоянного повышения уровня готовности к борьбе с ними. Подавляющее количество пожаров происходит в зданиях. Каждый год прямой ущерб от пожаров в зданиях измеряется десятками миллиардов рублей, а человеческие жертвы превышают десять тысяч человек в год.

Одним из направлений повышения эффективности борьбы с пожарами в зданиях является совершенствование управления пожарными подразделениями. Качество управления напрямую зависит от своевременного получения необходимой для принятия решений информации. Современные системы дистанционного мониторинга пожара способны обеспечить должностных лиц пожарных подразделений объективной информацией о динамике пожара в здании, однако существующие формализованные процедуры принятия решений не позволяют использовать данную информацию в процессе управления.

Таким образом, актуальность диссертации заключается в противоречии между характером информации, получаемой от систем дистанционного мониторинга динамики пожара, и существующими процедурами поддержки принятия управленческих решений по спасанию людей и ликвидации пожаров в зданиях.

**Степень разработанности темы исследования.** В области управления пожарными подразделениями созданы теоретические положения, позволяющие использовать результаты математического моделирования действий пожарных подразделений по тушению пожаров для поддержки принятия решений. Существенный вклад в их разработку внесли отечественные ученые: Н.Г. Топольский, Н.Н. Брушлинский, Ю.В. Прус, С.В. Соколов, А.А. Таранцев, Е.А. Мешалкин, С.А. Качанов, С.В. Агеев, С.Н. Нехорошев, В.В. Терехнев, В.М. Климовцов, А.П. Абрамов, Ф.В. Демехин, А.Н. Членов, А.В. Федоров, Л.Т. Танклевский, И.Г. Малыгин, А.В. Матюшин, Т.А. Буцынская, А.П. Чуприян, А.А. Порошин и зарубежные ученые: P. Dollar, V. Robaud, G. Cottrell, S. Belongie, G. Doretto, R. Fablet, Ye Kim Sung и др.

Однако, теоретические и практические вопросы использования результатов мониторинга динамики пожара при управлении пожарными подразделениями в зданиях остались открытыми. Поэтому научная проблема, решаемая в диссертации, заключается в разработке теоретических положений поддержки управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях, оборудованных системами дистанционного мониторинга динамики пожара. Многопараметрическая структура результатов дистанционного мониторинга динамики пожара и специфика принятия решений при управлении пожарными подразделениями, заключающаяся в одновременном решении нескольких задач пожаротушения, определяют необходимость разработки теоретических положений поддержки управления на основе методов теории многокритериальной оптимизации.

**Объектом исследования** в диссертации являются пожары в зданиях, оборудованных системами дистанционного мониторинга, а **предметом исследования** – процессы управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в этих зданиях.

**Цель исследования** – повышение эффективности управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях путем создания и использования многокритериальных моделей и методов поддержки управления на основе дистанционного мониторинга динамики пожара.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач.

1. Анализ специфики управления пожарными подразделениями с учетом информации о динамике пожара и результатов моделирования действий пожарных подразделений по тушению пожаров в зданиях.

2. Разработка многокритериальной модели динамики параметров пожара в здании на основе информации, получаемой от систем дистанционного мониторинга.

3. Разработка многокритериального метода поддержки принятия решений по управлению пожарными подразделениями с использованием результатов мониторинга динамики пожара в здании.

4. Моделирование задач управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях с применением разработанных многокритериальных моделей и методов поддержки управления.

5. Разработка системы информационной поддержки управления пожарными подразделениями на основе многокритериальных моделей и методов.

6. Оценка эффективности системы информационной поддержки управления пожарными подразделениями с использованием количественных показателей качества информационного обеспечения действий по тушению пожаров в зданиях и тактических возможностей пожарных подразделений.

**Научная новизна** работы заключается в обосновании и создании следующих новых многокритериальных моделей и методов поддержки управления пожарными подразделениями с применением результатов мониторинга пожара в здании:

1. Модель дистанционного мониторинга динамики пожара в виде клеточного автомата, в которой изменение состояний пожара осуществляется на основе аналитических решений совокупности дифференциальных уравнений динамики параметров пожара в зависимости от времени его развития.

2. Метод поддержки принятия управленческих решений, представляющий собой парето-оптимальную процедуру многокритериального анализа вариантов действий пожарных подразделений, оцениваемых с использованием информации от систем дистанционного мониторинга пожара в здании.

3. Модель многокритериального анализа маршрутов движения участников тушения пожара в здании, учитывающая относительную важность трех критериев: протяженность маршрута; условия видимости; степень воздействия опасных факторов пожара на пожарных.

4. Система поддержки управления пожарными подразделениями, позволяющая в едином комплексе реализовать совокупность разработанных многокритериальных моделей и методов поддержки управления на основе результатов дистанционного мониторинга динамики пожара в здании и многоагентного моделирования действий пожарных подразделений.



**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в разработке моделей и методов поддержки принятия решений для повышения эффективности управления силами и средствами пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях, оборудованных системой дистанционного мониторинга динамики пожара.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана система информационной поддержки управления пожарными подразделениями с применением результатов дистанционного мониторинга динамики пожара в здании в совокупности с результатами математического моделирования действий по тушению пожаров.

2. Модернизирована система дистанционного мониторинга динамики пожара в здании за счет разработки и внедрения новых устройств многопараметрического контроля факторов пожара для информационного обеспечения управления пожарными подразделениями.

3. Разработана процедура адаптивного проектирования системы дистанционного мониторинга динамики пожара в здании с учетом моделирования развития опасных факторов пожара на основе теории клеточных автоматов.

4. Разработан комплекс компьютерных обучающих программ для тренажеров по отработке действий при тушении пожаров в зданиях и сооружениях, а также для развития навыков управления пожарными подразделениями должностными лицами пожарно-спасательных гарнизонов.

5. Разработаны методические рекомендации по повышению эффективности действий подразделений пожарной охраны при ликвидации пожаров в зданиях с использованием информации от систем поддержки управления.

**Методология и методы исследования.** При решении научной проблемы использованы методы теории управления и принятия решений, системного анализа и синтеза иерархических структур управления, исследования операций, клеточных автоматов, дифференциального исчисления, многокритериальной оптимизации, теории метрических шкал измерений, а также элементов теории вероятностей и математической статистики, многоагентного моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Многокритериальная модель динамики параметров пожара в здании на основе результатов дистанционного мониторинга, позволяющая представить результаты мониторинга динамики пожара в количественном виде для их использования в процессе поддержки управления пожарными подразделениями.

2. Многокритериальный метод поддержки принятия решений по управлению силами и средствами пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях, учитывающий количественный характер информации о динамике пожара, получаемой от системы дистанционного мониторинга.

3. Результаты многокритериального моделирования задач управления пожарными подразделениями при анализе маршрутов движения участников тушения пожара в здании с учетом относительной важности критериев протяженности, условий видимости и степени воздействия опасных факторов пожара.

4. Система информационной поддержки управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях, созданная с применением разработанных многокритериальных моделей и методов.

5. Методические рекомендации по применению системы поддержки управления при тушении пожаров в зданиях и проведении пожарно-тактических учений с использованием сил и средств пожарных подразделений.

6. Результаты исследования эффективности системы информационной поддержки управления при тушении пожаров в зданиях на основе комплекса количественных показателей качества информационного обеспечения действий по тушению пожаров и тактических возможностей пожарных подразделений.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается применением апробированных методов и средств исследования, внутренней непротиворечивостью и согласованностью с результатами других исследователей, сравнением теоретических данных с результатами экспериментальных исследований.

Теоретические и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, ИПУ РАН, 2014 г.), «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2011 г.); «Системы безопасности» (Москва, АГПС МЧС России, 2008, 2010, 2013, 2014, 2016 гг.); «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, ИПСА МЧС России 2008, 2012 –2017 гг.); «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (Балашиха, ВНИИПО МЧС России, 2009 г.), «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации», (Москва, АГПС МЧС России, 2015, 2016 гг.) и всероссийских научно-практических конференциях с международным участием: «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» (Воронеж, ВИ ГПС МЧС России, 2014 г.), «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности» (Иваново, ИПСА МЧС России 2015, 2018 гг.), «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, ВИ ГПС МЧС России, 2016 г.).

**Практическая реализация результатов исследования.** Разработанные многокритериальные модели и методы поддержки управления пожарными подразделениями на основе дистанционного мониторинга динамики пожара в здании использованы:

– в Департаменте готовности сил и специальной пожарной охраны и Научно-техническом управлении МЧС России при разработке рекомендаций по повышению эффективности действий подразделений пожарной охраны при ликвидации пожаров в зданиях с использованием систем поддержки управления;

– в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности ООО «НПО “Этернис”» при модернизации кумулятивной системы пожарной сигнализации и пожаротушения «Гарант-Р», конструировании и изготовлении новых устройств контроля факторов пожара с автоматизированной системой адаптивного проектирования и мониторинга пожара для управления пожаротушением;

– в научной и учебной деятельности ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» при разработке критериев оперативной и технической готовности сил и средств пожарно-спасательных подразделений МЧС России, разработке учебно-методических материалов для изучения дисциплин на кафедре информационных технологий в составе УНК АСИТ;

– в производственной деятельности АО «Дыхательные системы – 2000» при создании обучающих компьютерных программ по тренажерным комплексам для подготовки специалистов пожарных подразделений к действиям по тушению пожаров в зданиях и сооружениях;

– в научной деятельности ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» при разработке функционального тренажера для пожарных и спасателей, привлекаемых к действиям по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций радиационного характера при эксплуатации атомных электростанций и разработке автоматизированной информационной системы организации связи и оповещения при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 86 работ, в том числе 37 работ – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, научная монография, патенты на изобретение и полезную модель, 11 свидетельств Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ и 34 работы – в других научных изданиях.

**Личный вклад автора.** Все результаты, выносимые на защиту получены автором лично, из совместных работ с соавторами в диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 340 страницах текста, включает в себя 25 таблиц, 81 рисунок, список литературы из 325 наименований, 5 приложений.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ**

Концепция обеспечения безопасности в Российской Федерации [69] (далее – концепция безопасности) определяет перечень угроз общественной безопасности, к одной из которых относятся пожары. Для устойчивого социально-экономического развития страны и минимизации потерь от пожаров осуществляется совершенствование информационного обеспечения служб экстренного реагирования России. Для этого в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации № 2446-р [70] разработана концепция единого информационного пространства в части, касающейся оперативного управления пожарными подразделениями, которая заключается в создании системы поддержки управления.

В действительности пожары относятся к одному из наиболее опасных деструктивных событий, возникающих при жизнедеятельности человечества. Ежегодно прямой материальный ущерб от пожаров в Российской Федерации измеряется миллиардами рублей, более десяти тысяч человек гибнут на пожарах [30, 31].

Стоит отметить, что большинство пожаров происходят в зданиях. Для своевременного обнаружения пожара в здании используются системы активной противопожарной защиты, в том числе пожарная сигнализация, позволяющая на современном этапе развития осуществлять дистанционный мониторинг динамики пожара. Результаты подобного мониторинга имеют особое значение при принятии первых решений руководителем тушения пожара. Важность этих решений определяет возможность ликвидировать пожар на начальной стадии его развития или же является основой для эффективного наращивания дополнительных пожарных подразделений.

Информация, получаемая от систем мониторинга, может существенно повысить эффективность принимаемых управленческих решений [47, 244]. Однако методов, моделей и алгоритмов использования результатов мониторинга в про-

цесс управления в настоящий момент не разработано. Поэтому в качестве гипотезы в диссертации выдвинуто предположение, состоящее в том, что разработка моделей, методов и алгоритмов мониторинга динамики пожара в здании в совокупности с моделями действий пожарных подразделений и методами теории многокритериальной оптимизации в виде системы интеллектуальной поддержки управления повысит эффективность действий пожарных подразделений и приведет к снижению прямого материального ущерба и человеческих жертв от пожаров в зданиях.

Для доказательства данной теоретической гипотезы необходимо:

– выполнить анализ обстановки с пожарами в зданиях на территории России, включая показатели геометрических характеристик современных зданий, количество пожаров в зданиях, в том числе крупных пожаров, а также рассмотреть динамику технической готовности систем пожарной автоматики при пожарах в зданиях;

– рассмотреть существующие направления совершенствования управленческой деятельности при тушении пожаров, уделить особое внимание вопросам создания систем поддержки управления и составляющих их подсистем сбора и обработки информации для принятия решений;

– проанализировать основные подходы к разработке процедур поддержки принятия решений, как основы для создания систем поддержки управления. Сформулировать основные тенденции развития теории поддержки управления и рассмотреть их математическую основу, включая понятия оптимальности по Парето;

– сформулировать задачи исследования, комплексное решение которых позволит решить научную проблему, заключающуюся в противоречии между характером информации о динамике пожара в здании, получаемой от систем пожарного мониторинга, и существующими формализованными процедурами принятия управленческих решений по спасанию людей и ликвидации пожаров в зданиях.

## **1.1. Статистический анализ обстановки с пожарами в зданиях России**

В настоящее время решение задачи, состоящей в поиске очага пожара в здании, носит вероятностный характер. Так, в соответствии с общепринятой методикой, опубликованной в работе [128], вероятность обнаружения очага пожара или пострадавшего человека, находящегося без движения, с использованием звеньев газодымозащитной службы пожарно-спасательных подразделений зависит от площади зоны поиска в здании.

### **1.1.1. Анализ средней площади зданий**

Развитие внутренних объемно-планировочных решений современных зданий определяет тенденцию увеличения их общей строительной площади, а также общего строительного объема. В приложении 1 (таблица П1.1) представлены данные о реализации строительства зданий и введении их в эксплуатацию в Российской Федерации за период 2001–2015 гг. Общая площадь здания определяется как сумма площадей всех этажей здания (включая технические, мансардные, цокольные и подвальные), измеренных в пределах внутренних поверхностей наружных стен, а также площадей балконов и лоджий. Площади помещений определяются по их размерам, измеряемым между отделанными поверхностями стен и перегородок в уровне пола.

Анализируемые показатели, а именно: число зданий, введенных в эксплуатацию в год, общая строительная площадь всех зданий, введенных в эксплуатацию за год, будем считать абсолютными показателями результатов строительства в Российской Федерации.

Анализ динамики абсолютных показателей строительства за период 2001–2015 гг. представлен на рисунках 1.1 и 1.2.

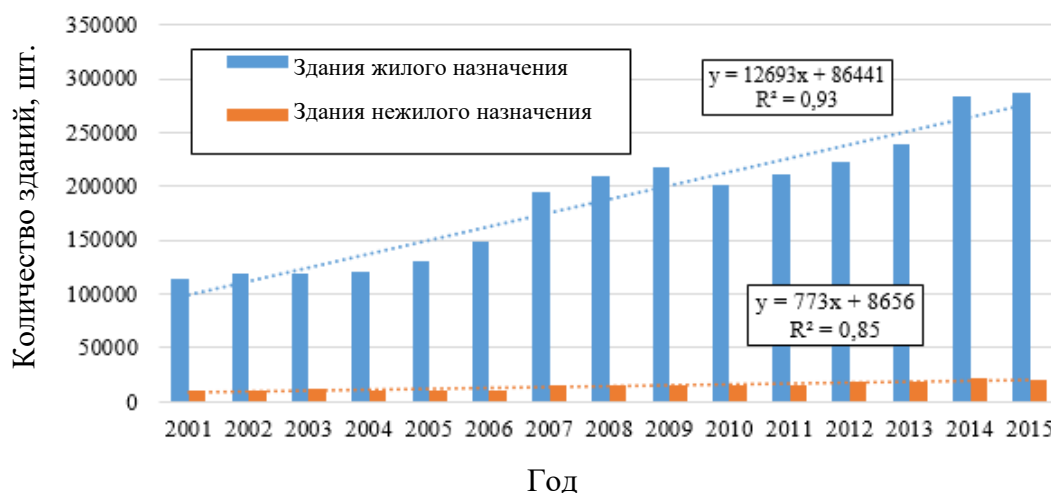


Рисунок 1.1 – Количество зданий, введенных в эксплуатацию по годам

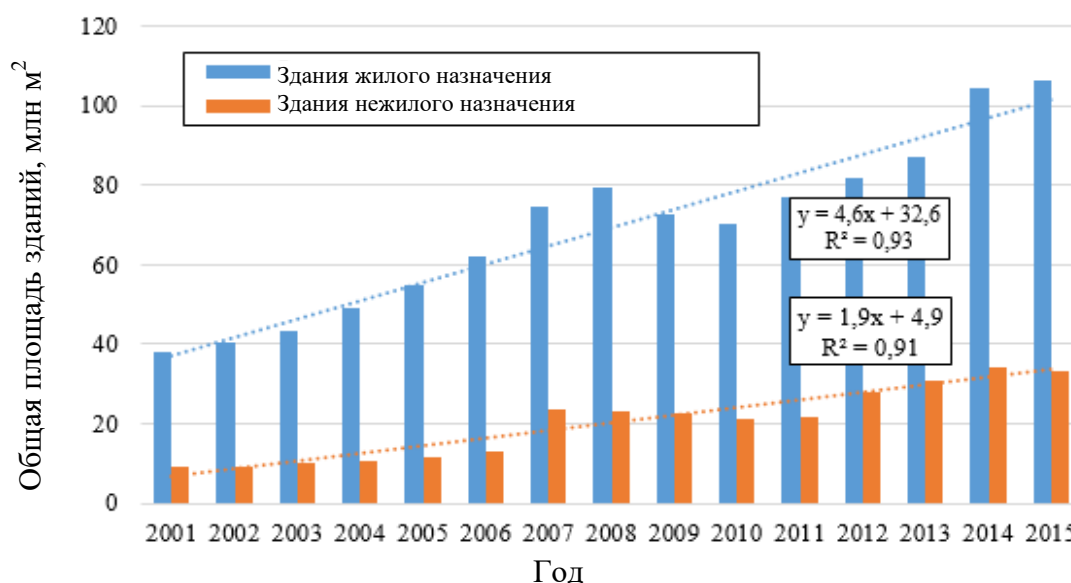


Рисунок 1.2 – Общая строительная площадь зданий

Анализируя данные, можно сделать вывод: используя математическую модель на основе линейной регрессии, с достаточной для объективного вывода точностью можно утверждать, что наблюдается общая тенденция увеличения количества зданий, ежегодно вводимых в эксплуатацию. Причем для зданий жилого назначения в среднем на территории Российской Федерации вводится в эксплуатацию 12600 зданий в год, в свою очередь для зданий нежилого назначения эта цифра гораздо скромнее и составляет 773 здания в год. Анализ данных, представленных на рисунке 1.2, свидетельствует о том, что ежегодно вводится в эксплуатацию более чем 4,6 млн м<sup>2</sup> строительной площади жилых зданий и более чем 1,9 млн м<sup>2</sup> строительной площади нежилых зданий.



Рассмотрим относительный показатель результатов строительства на территории России: средняя общая площадь одного здания, представляющая собой отношение общей площади всех зданий определенной группы введенных в эксплуатацию к общему количеству зданий, введенных в эксплуатацию для данной группы.

Результаты анализа относительного показателя – средней площади одного здания, введенного в эксплуатацию в конкретном году за период 2001–2015 гг., представлены на рисунке 1.3.

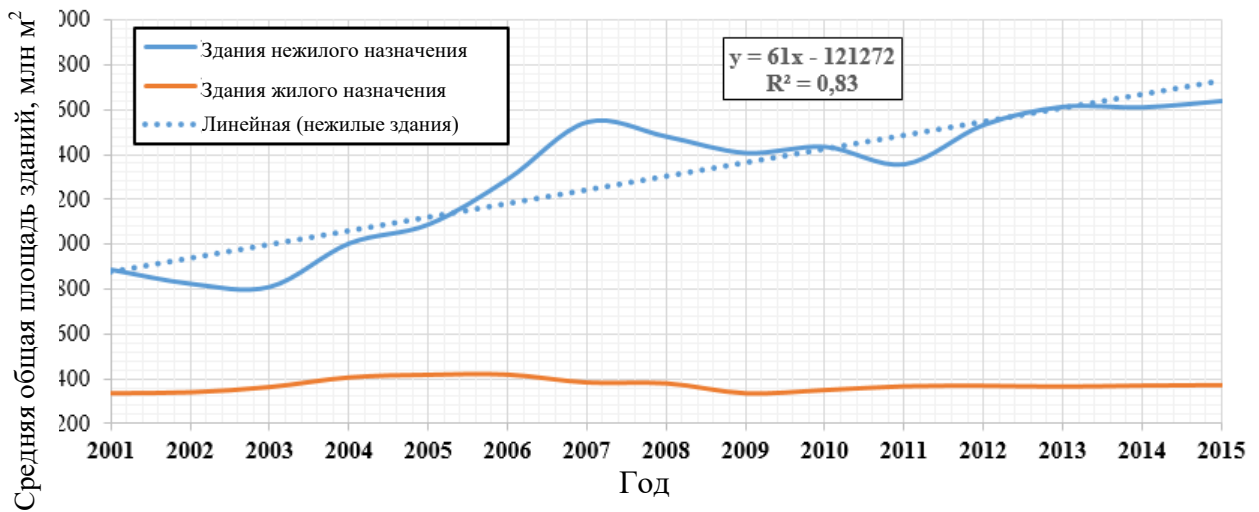


Рисунок 1.3 – Средняя общая площадь одного здания

Вывод: для зданий жилого назначения изменения относительного показателя результатов строительства незначительны, то есть средняя площадь одного жилого здания за последние 15 лет практически не изменилась и находится в пределах от 340 до 420 м<sup>2</sup>. Противоположная статистическая картина наблюдается для зданий нежилого назначения, где средняя общая строительная площадь одного здания увеличилась вдвое: с 885 м<sup>2</sup> (2001 г.) до 1 640 м<sup>2</sup> (2015 г.). При этом для зданий нежилого назначения имеются основания утверждать, что средняя общая площадь одного здания в данной группе неизменно растет и ежегодно увеличивается в среднем на 61 м<sup>2</sup>. В свою очередь процентное увеличение общей площади здания составляет 6–10 % по сравнению с прошлогодним значением, например, по данным на 2004 и 2005 гг.

Тенденция увеличения общей площади зданий приводит к существенному снижению возможности своевременно обнаружить очаг пожара или пострадавшие

го человека при ведении разведки пожара с использованием сил и средств пожарно-спасательных подразделений, а следовательно, определяет повышение ущерба от пожаров в зданиях. Для подтверждения данного вывода проведем анализ показателей ущерба от пожаров в зданиях за аналогичный период 2001–2015 гг.

### 1.1.2. Анализ количества пожаров в зданиях и ущерба от них

Предположение, состоящее в том, что увеличение общей площади зданий, не предназначенных для постоянного проживания людей, приводит к повышению ущерба от пожаров, требует обоснования. Для подтверждения данного вывода проведен анализ показателей ущерба от пожаров в зданиях за период 2001–2015 гг. В приложении 1 (таблица П1.2) представлены обобщенные показатели обстановки с пожарами в зданиях. Результаты анализа количества пожаров в жилых зданиях и зданиях другого функционального назначения за период 2001–2015 гг. представлены на рисунке 1.4, данные об ущербе от пожаров в зданиях за аналогичный период – на рисунке 1.5.

При первичном графическом анализе количества пожаров, происходящих в зданиях, и ущерба от них очевидно, что преобладающее число пожаров возникает в жилых зданиях. Количество вводимых в эксплуатацию задний жилого назначения в 15 раз превышает число зданий, вводимых в эксплуатацию в России с другим функциональным назначением.

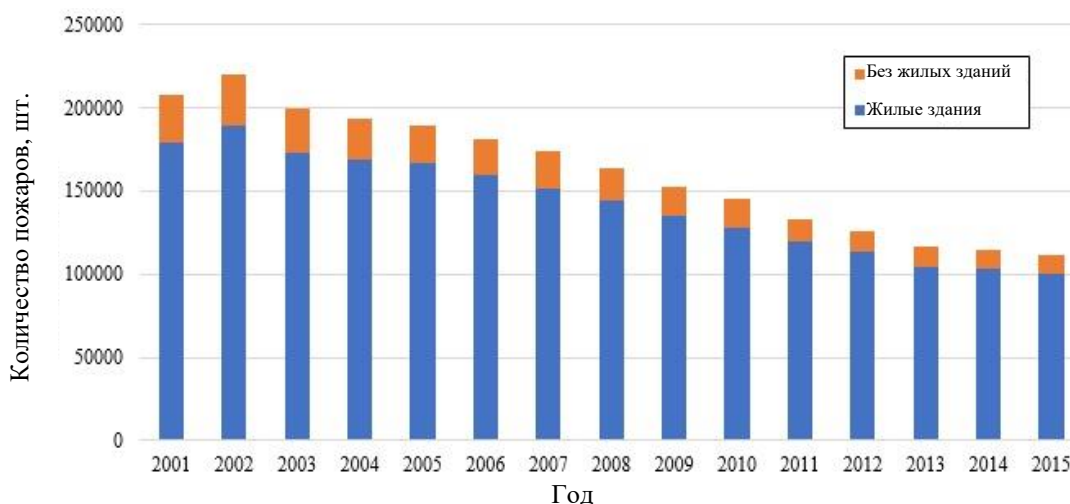


Рисунок 1.4 – Динамика количества пожаров в зданиях

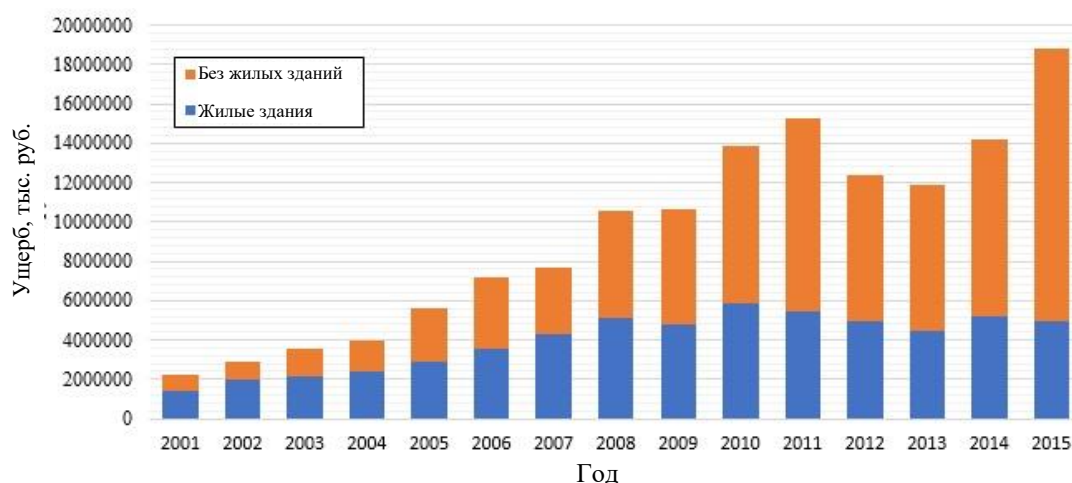


Рисунок 1.5 – Динамика ущерба от пожаров в зданиях

Так, за рассматриваемый период анализа 2001–2015 гг. в жилых зданиях произошло 2 135 906 пожаров, в свою очередь во всех остальных зданиях – 291 940 пожаров, то есть число пожаров в жилых зданиях в 7,3 раза больше числа пожаров во всех остальных зданиях. При этом ущерб, нанесенный пожарами в жилых зданиях, составил 60 млрд руб., а ущерб от пожаров, произошедших в нежилых зданиях – 81 млрд руб. Общий ущерб от пожаров в жилых зданиях за период 2001–2015 гг. в 1,4 раза меньше, чем в зданиях другого функционального назначения. В свою очередь средний ущерб от одного пожара в жилом здании составляет 28 тыс. руб. и 280 тыс. руб. в нежилых зданиях, что в 10 раз больше.

### 1.1.3. Количество крупных пожаров в зданиях

Под крупным пожаром понимаем пожар, ущерб от которого превысил критическое значение, устанавливаемое уполномоченными органами учета и анализа числа пожаров и ущерба от них. Обобщенные показатели обстановки с крупными пожарами в зданиях на территории России представлены в приложении 1 (таблица П1.3).

Стоит отметить, что количество крупных пожаров с точки зрения ущерба от них невелико и находится в пределах 100–200 пожаров в год. Однако, средняя «стоимость» одного крупного пожара в здании изменяется динамично. В 2001 г. минимальная «стоимость» крупного пожара составляла всего 342 тыс. руб., а в 2015 году уже более чем 20 млн руб., то есть данная характеристика претерпела

масштабные изменения, оцениваемые несколькими десятками порядков ее значений. Конечно, на данную экономическую ситуацию влияют в основном социально-экономические факторы развития России, однако фактор увеличения общей площади зданий, а соответственно, и увеличение общей стоимости материальных ценностей, расположенных на данной площади, также немаловажен. На рисунке 1.6 показана динамика количества крупных пожаров в жилых зданиях и зданиях другого функционального назначения, на рисунке 1.7 – показатели ущерба от крупных пожаров в зданиях.

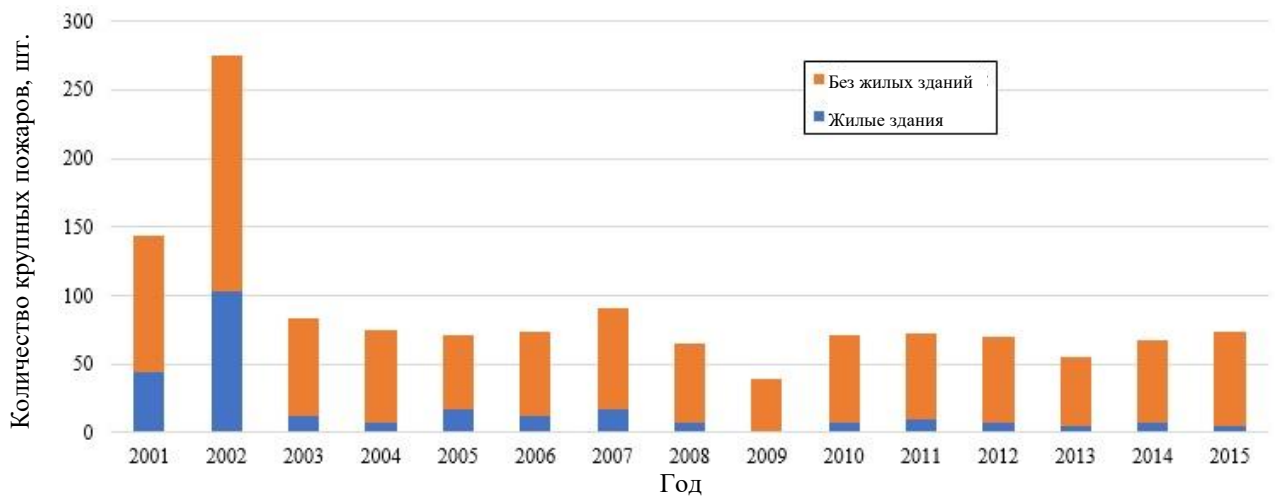


Рисунок 1.6 – Динамика количества крупных пожаров в зданиях

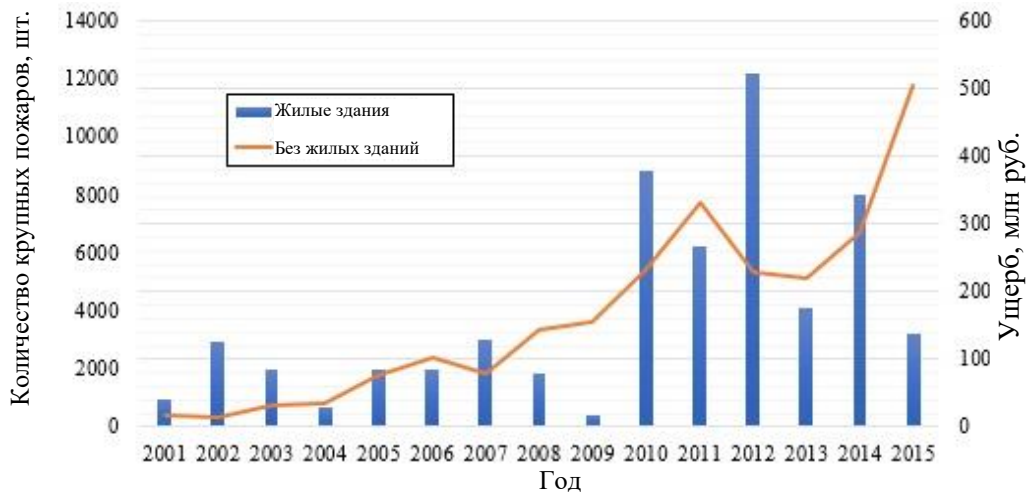


Рисунок 1.7 – Динамика ущерба от крупных пожаров в зданиях

Анализируя данные на рисунках 1.6 и 1.7, можно сделать вывод о том, что за рассматриваемый период в жилых зданиях произошел 261 крупный пожар общим ущербом 2,5 млрд руб., а средний ущерб от одного крупного пожара в жилом здании составляет 9,6 млн руб. Во всех остальных зданиях произошло 1 067 круп-

ных пожаров, общий ущерб от которых составил 57,4 млрд руб., средний ущерб от одного крупного пожара – 53,8 млн руб., то есть количество крупных пожаров в жилых зданиях в 4 раза меньше, чем во всех остальных зданиях. При этом ущерб от крупных пожаров в жилых зданиях в 23 раза меньше, чем ущерб от крупных пожаров в зданиях другого функционального назначения.

Проведен анализ структуры ущерба от пожаров зданиях, динамика которой представлена на рисунках 1.8 и 1.9.

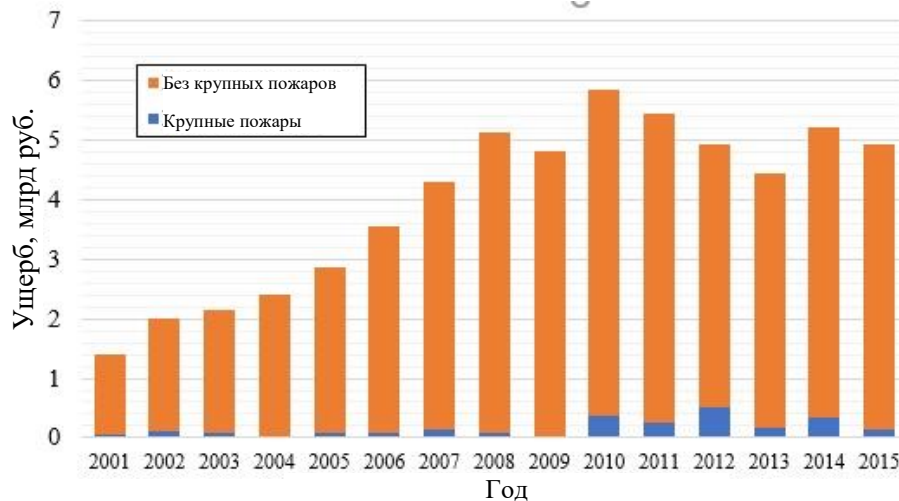


Рисунок 1.8 – Структура ущерба от пожаров в жилых зданиях

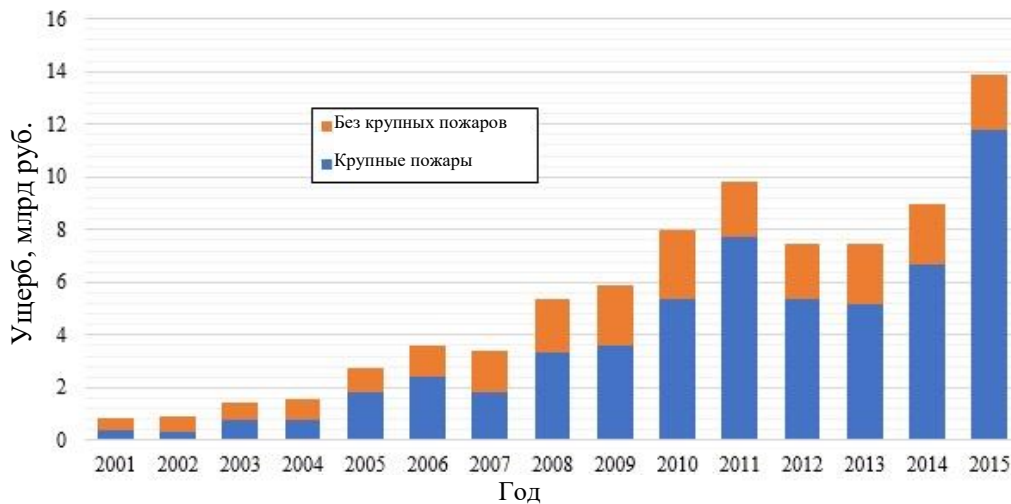


Рисунок 1.9 – Структура ущерба от пожаров в нежилых зданиях

Результаты анализа показали, что в зданиях жилого назначения доля ущерба от крупных пожаров пренебрежимо мала в сравнении с долей ущерба без учета крупных пожаров. Обратную картину можно наблюдать для зданий другого функционального назначения, здесь доля ущерба от крупных пожаров является определяющей, то есть в зданиях различного функционального назначения (за ис-

ключением жилых зданий) прямой материальный ущерб от крупных пожаров является определяющим фактором, иллюстрирующим общую экономическую обстановку с пожарами на территории Российской Федерации.

#### 1.1.4. Анализ гибели и травмирования пожарных на пожарах в зданиях

Анализ гибели и травмирования пожарных показал, что в период 1995–2016 гг. на пожарах получили травмы 3 355 пожарных, из них при тушении пожаров в зданиях – 2 930, погибли 233 пожарных, из них в зданиях – 194. Относительные показатели, характеризующие количество случаев гибели и травмирования пожарных в зданиях к общему числу случаев, представлены на рисунке 1.10. Статистические данные по гибели и травмированию пожарных на пожарах в России представлены в приложении 1 (таблицы П1.4 и П1.5)

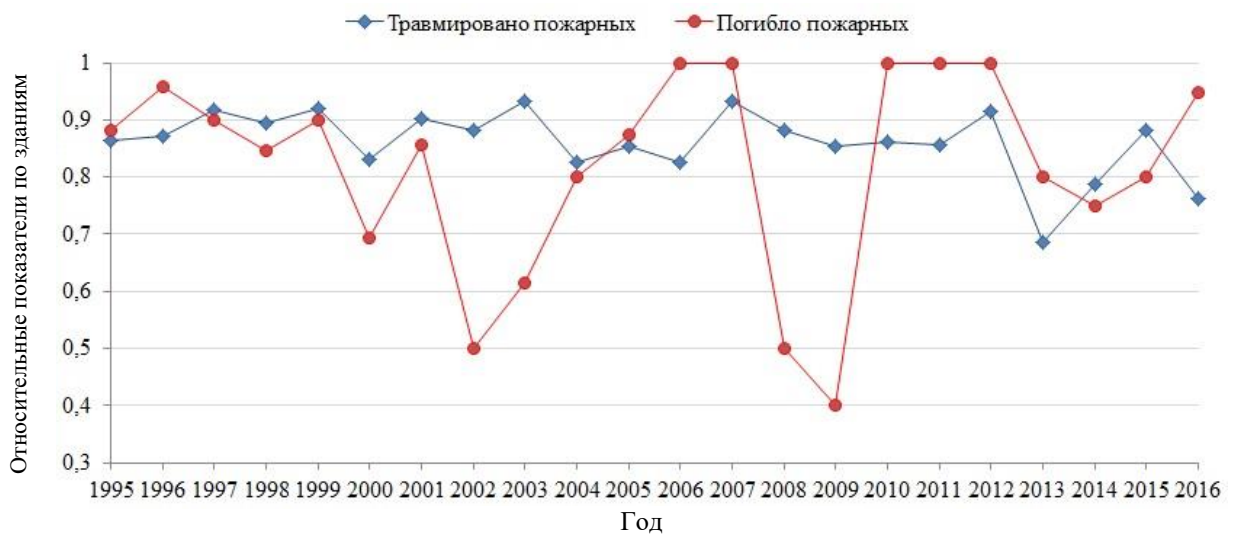


Рисунок 1.10 – Распределение относительных показателей гибели и травмирования пожарных в зданиях

Таким образом, пожары в зданиях для участников тушения пожара являются наиболее опасными с точки зрения наличия факторов риска, получения травм при реализации действий по тушению пожара или в фатальном случае погибнуть при реализации боевых действий.

### 1.1.5. Анализ технической готовности систем мониторинга пожара

В соответствии с п. 12. Боевого устава пожарной охраны установки пожарной сигнализации и пожаротушения относятся к средствам для ведения боевых действий пожарными подразделениями [127]. Однако возможность использования данных средств при тушении пожара определяется технической готовностью системы пожарной автоматики решать задачи по назначению. Поэтому проведен анализ показателя технической готовности автоматической пожарной сигнализации за последние 25 лет в период 1993–2017 гг.

По данным приложения 1 (таблицы П.1.6 – П1.10) проведен анализ общего количества пожаров, произошедших в зданиях, оборудованных автоматической пожарной сигнализацией (рисунок 1.11).

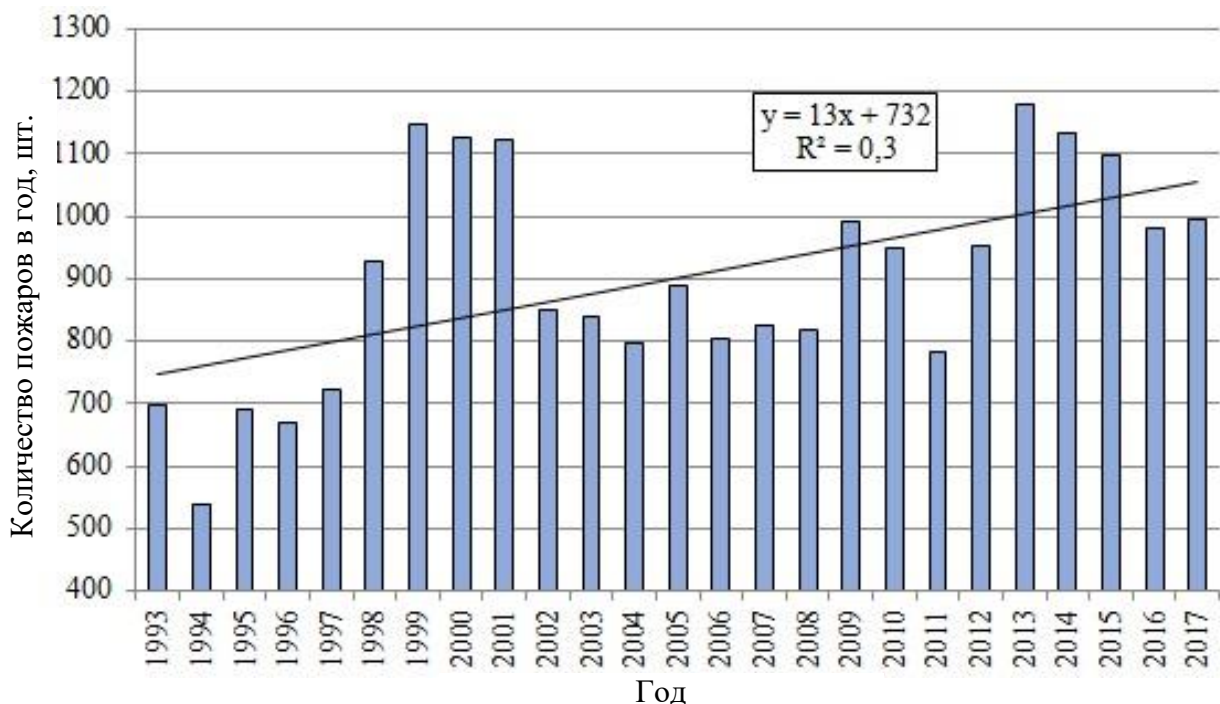


Рисунок 1.11 – Количество пожаров в зданиях, оборудованных автоматической пожарной сигнализацией

На рисунке 1.12. представлен анализ общего количество пожаров, на которых автоматическая пожарная сигнализация была работоспособна.

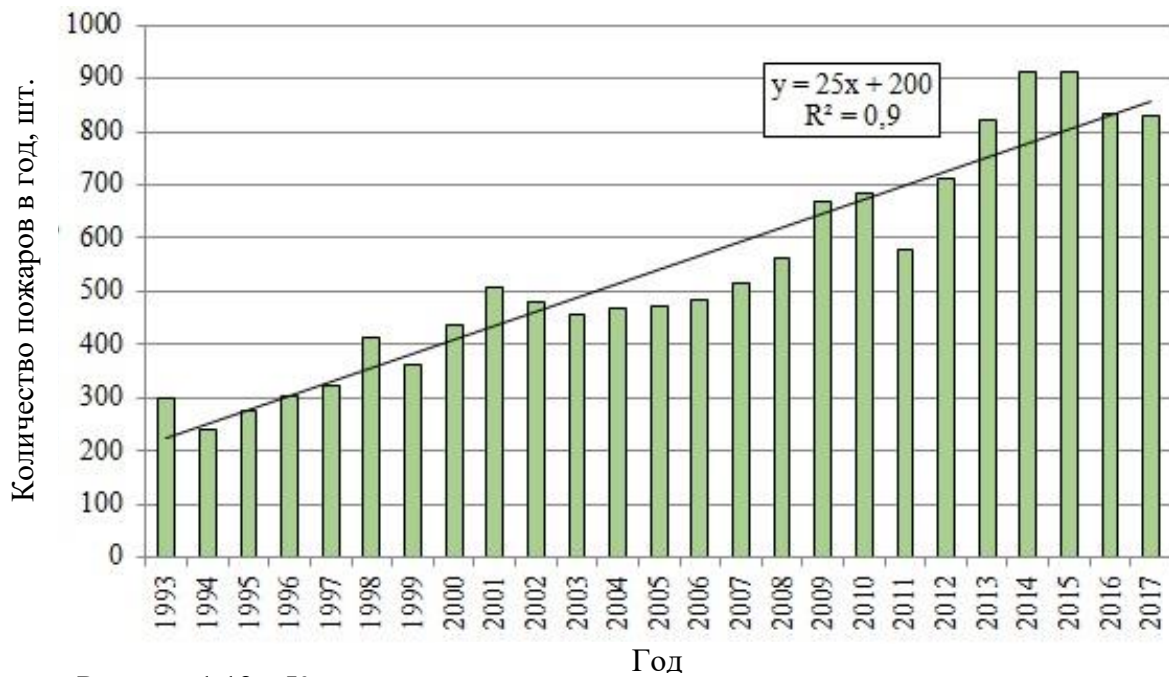


Рисунок 1.12 – Количество пожаров, на которых автоматическая пожарная сигнализация была работоспособна

Представленные результаты позволяют заключить, что рассмотренные случаи пожаров предусматривали использование автоматической пожарной сигнализации в качестве источника дополнительной информации при тушении пожаров.

На основе абсолютных значений технической готовности рассмотрим относительный показатель

$$P = (N+)/N, \quad (1.1)$$

где  $(N+)$  – количество пожаров, на которых АПС работоспособна, шт.;  $N$  – общее количество пожаров, шт.

Тогда динамика относительного показателя технической готовности системы может быть достаточно хорошо аппроксимирована экспоненциальной зависимостью:

$$P = P_* + (P_0 - P_*) \exp\left(\frac{a}{1-n} \cdot \tau^{n+1}\right). \quad (1.2)$$

где  $P_*$  – максимальное значение показателя технической готовности системы;  $P_0$  – начальное значение показателя технической готовности системы;  $a$ ,  $n$  – константы модели.

Результаты обработки данных по технической готовности систем пожарной сигнализации в России за 25 лет их эксплуатации представлены в таблице 1.1.



Таблица 1.1 – Показатели модели технической готовности АПС

Показатели модели	Вид здания			
	Жилые	Промышленные	Социальные	Торговые
$a$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
$n$	4	2	2	2
$P_0^{\min}$	0,05	0,45	0,4	0,4
$P_*^{\min}$	0,75	0,80	0,8	0,75
$P_0^{\max}$	0,300	0,60	0,55	0,55
$P_*^{\max}$	1,000	0,95	0,95	0,9
$P_0^{cp}$	0,175	0,525	0,475	0,475
$P_*^{cp}$	0,875	0,875	0,875	0,825
$R^2$ (по средней)	0,88	0,90	0,96	0,88

Графическая интерпретация применения экспоненциальной модели для анализа относительного показателя технической готовности АПС представлены на рисунках 1.13–1.16 для зданий различного назначения.

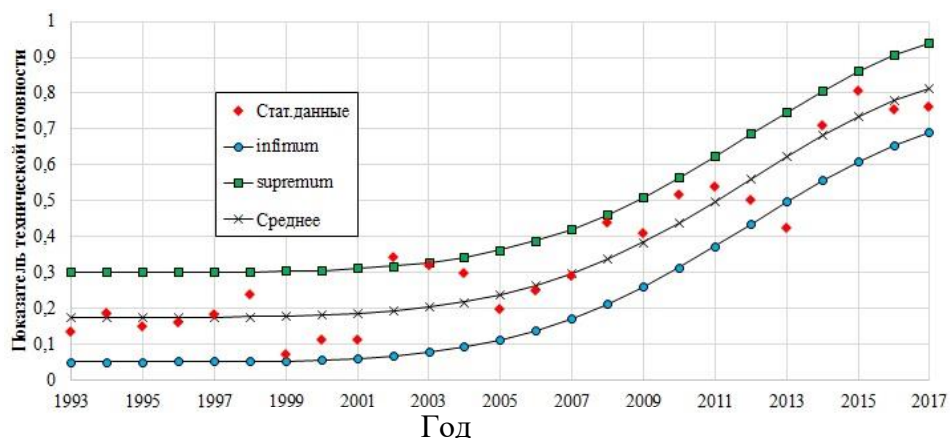


Рисунок 1.13 – Анализ технической готовности АПС для зданий жилого назначения

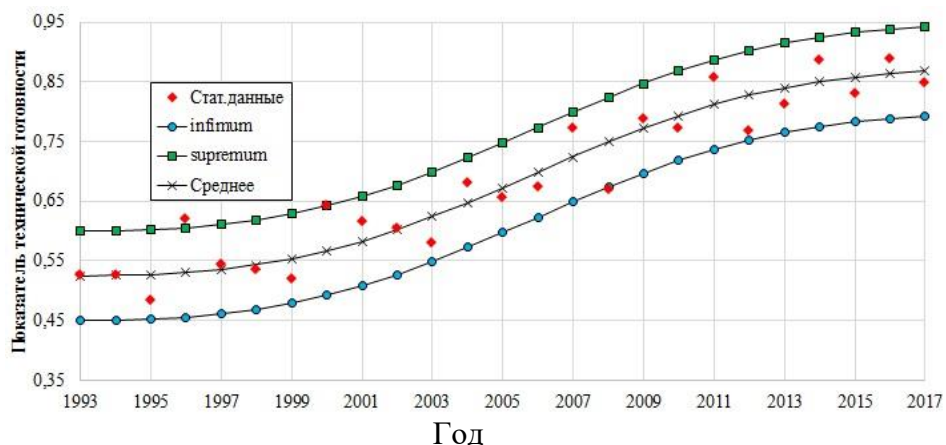


Рисунок 1.14 – Анализ технической готовности АПС для промышленных зданий

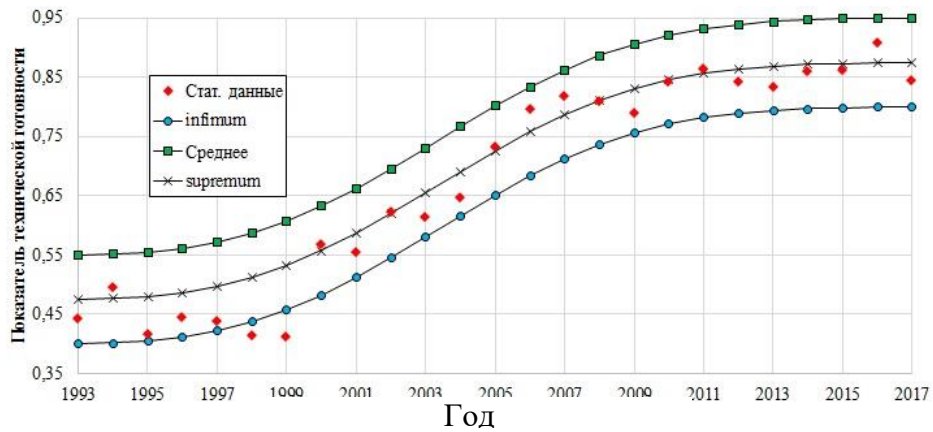


Рисунок 1.15 – Анализ технической готовности АПС для социальных зданий

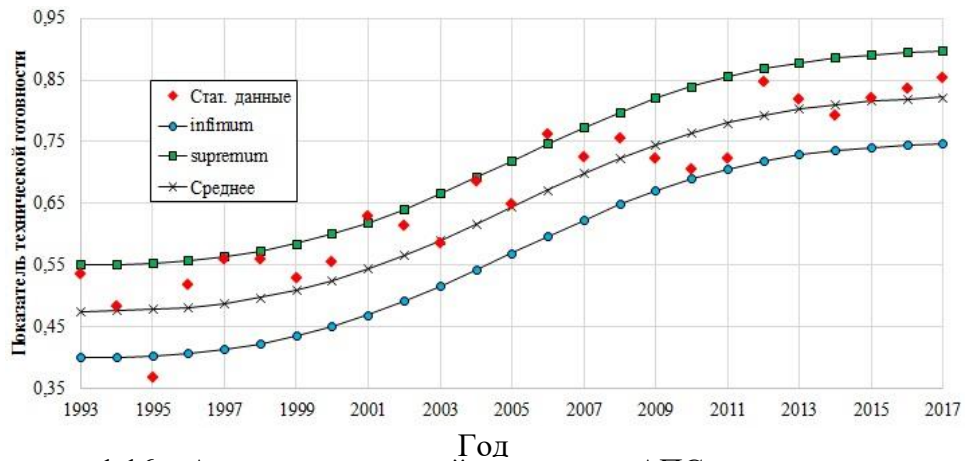


Рисунок 1.16 – Анализ технической готовности АПС для торговых зданий

Таким образом, можно утверждать, что показатель технической готовности систем пожарной сигнализации за последние 25 лет увеличился вдвое – с 0,44 до 0,88, что определяет возможность использования данных систем в процессе тушения пожаров.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что в большинстве случаев гибель и травмирование пожарных наблюдается при реализации ими действий по тушению пожаров в зданиях.

При статистическом анализе количества пожаров и количества крупных с экономической точки зрения пожаров в зданиях, а также прямого материального ущерба от них в период 2001–2015 гг. можно сделать следующие выводы:

- подавляющее число пожаров происходят в зданиях жилого назначения, однако средний прямой материальный ущерб от одного пожара в зданиях другого функционального назначения более чем в 10 раз превышает значение по данному показателю для жилых зданий;

– за анализируемый период количество крупных пожаров, произошедших в жилых зданиях, в 4 раза меньше, чем количество крупных пожаров, произошедших в зданиях другого функционального назначения. При этом общий ущерб от крупных пожаров в жилых зданиях в 23 раза меньше, чем ущерб от крупных пожаров в зданиях другого функционального назначения;

– для жилых зданий прямой материальный ущерб от крупных пожаров, произошедших в них, не является определяющим, так как не превышает 5 % от общего прямого материального ущерба. Обратную картину можно наблюдать для зданий другого функционального назначения. Здесь прямой материальный ущерб от крупных пожаров является определяющим и составляет более чем 65 % от общего прямого материального ущерба от пожаров.

Стоит отметить, что данный вывод подтверждает порядок высылки дополнительных сил и средств подразделений пожарно-спасательных гарнизонов, определяемый документами предварительного планирования. Так, для большинства из рассматриваемых зданий в документах планирования предусмотрен повышенный ранг пожара.

## **1.2. Теоретические основы управления пожарными подразделениями**

Управление пожарно-спасательными подразделениями при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций определяет наличие проблем, связанных, в первую очередь, с отсутствием достоверной информации, необходимой для принятия рациональных решений и средствами оперативной обработки данной информации [220, 221]. Имеющиеся системы, средства и методы информационного обеспечения должностных лиц системы управления определяют сложность структуры и многообразие форм информационных потоков. Поэтому информационная система при ликвидации пожаров обеспечивает информацией решение широкого круга задач, организацию и осуществление многих сложных мероприятий, связанных с подготовкой и руководством пожарно-спасательными подразделениями в ходе ведения действий по тушению пожаров в сложных условиях интен-

сивно меняющейся обстановки на пожаре. Это побуждает использовать методы системного анализа, исследования операций и многокритериальной оптимизации для решения задач, связанных с совершенствованием деятельности должностных лиц при управлении пожарно-спасательными подразделениями на пожарах, крупных пожарах и при чрезвычайных ситуациях.

Из общей теории систем известно, что повышение уровня рационализации в методах управленческой деятельности определяет повышение качества управления в целом. Поэтому организация и методы работы оперативных должностных лиц системы управления, создаваемой на пожаре, находятся в прямой зависимости от уровня научного обоснования принимаемых управленческих решений [220].

### **1.2.1. Основные понятия и закономерности управления на пожаре**

Современные тенденции развития управления на пожаре зависят от качества информационного обеспечения механизмов принятия решений. Однако увеличение объемов информации, поступающей в систему управления из различных источников таких, как результаты разведки пожара, системы противопожарной защиты здания, математические модели, определяет снижение оперативности принимаемых решений, а в некоторых случаях определяет противоречия между результатами объективной оценки обстановки на пожаре и результатами математического моделирования. Поэтому информационные потоки связаны с должностными лицами системы управления на пожаре через инструмент количественного, оперативного анализа информации – систему поддержки управления [220].

Методы применения системы поддержки управления при решении задач управления на пожаре основаны на организационных функциях данной системы, которые в общем случае сводятся к следующему:

*во-первых*, для качественного решения управленческих задач обеспечить должностных лиц системы управления необходимым и достаточным объемом

объективной информации для принятия решения – функция интеллектуального анализа данных для принятия решений;

*во-вторых*, задачи управления необходимо представить в виде рациональной последовательности для непосредственного решения, так как перечень задач управления достаточно широк особенно при тушении крупных пожаров и не предусматривает одномоментного разрешения – функция упорядочивания задач управления по уровням важности;

*в-третьих*, при управлении необходимо создать условия для оперативного решения задач управления – функция удобного представления данных пользователю системы.

Анализ практики применения систем поддержки управления определяет решение комплекса проблем, связанных с распределением функций системы между различными должностными лицами системы управления. Решение данных проблем носит организационный характер и в основном сводится к распределению обязанностей между должностными лицами системы управления на пожаре. Однако при тушении пожаров в начальной стадии развития, когда к месту пожара прибыло только первое пожарное подразделение, а основные силы и средства находятся в процессе следования к месту пожара весь перечень работ, связанных с управлением, реализуется одним должностным лицом – руководителем тушения пожара. В этот наиболее важный этап управленческой деятельности обеспечить качественную реализацию задач управления с использованием системы поддержки управления возможно лишь при учете в ней всех трех организационных функций.

При управлении силами и средствами пожарных подразделений на начальном этапе тушения пожара с использованием системы поддержки управления необходимо произвести учет особенностей управления, которые сводятся к системе следующих требований [220]:

- использование рационального подхода к процессу принятия решений с исключением заведомо субъективных факторов принятия решений;
- оперативное и последовательное решение задач управления;

- хранение информации, на основе которой были приняты решения для их обоснования в процессе анализа реализации боевых действий;
- прогнозирование новых задач управления для назначения вновь прибывших на пожар должностных лиц ответственными за их выполнение;
- анализ результатов управленческой деятельности на каждом этапе сосредоточения сил и средств пожарных подразделений.

В современных условиях управления пожарными подразделениями с использованием систем поддержки управления особое значение приобретают вопросы организации взаимодействия должностных лиц системы управления на пожаре при реализации функций и управленческих задач. Во многих практических случаях система поддержки управления охватывает широкий перечень задач управления и предусматривает вовлечение в процесс управления не только должностных лиц на пожаре, но и должностных лиц пожарно-спасательного гарнизона – диспетчерский состав, обеспечивающий решение задач сосредоточения сил и средств к месту пожара. Поэтому необходимо рассмотреть методы принятия управленческих решений, в том числе методы принятия решений с использованием системы поддержки управления.

### **1.2.2. Методы принятия управленческих решений на пожаре**

Совершенствование управленческой деятельности путем внедрения в процесс принятия решений системы поддержки управления определяет повышение эффективности работы должностных лиц системы управления на пожаре [223]. Важное значение в практике применения систем поддержки управления на пожаре приобрели методы, формы и процедуры принятия решений, представляющие собой комплексный инструментарий и одновременно отдельную категорию управления пожарными подразделениями. Широкий перечень задач управления, решаемых должностными лицами системы управления, определяет многообразие методов поддержки принятия решений. Поэтому возникает необходимость поиска новых механизмов и методов поддержки принятия решений на базе информации

от технических средств наблюдения и контроля за параметрами пожара, развития и тушения пожаров – средств мониторинга и их совокупности, автоматизированных систем мониторинга динамики пожара.

Общеизвестно, что метод поддержки принятия решений представляет собой совокупность формализованных процедур решения задач управления, возникающих в процессе функционирования системы управления, каждая из которых направлена на достижение цели системы управления в целом [220].

Поэтому научное обоснование и разработка новых методов поддержки принятия решений является одной из важнейших проблем теории управления пожарными подразделениями. Решение проблемы носит прогностический характер и предусматривает поэтапное рассмотрение следующих задач:

- анализ методов поддержки принятия решений в смежных с пожаротушением научных областях;
- адаптация, совершенствование и модификация методов под специфику реализации боевых действий на пожаре;
- экспериментальное исследование эффективности применения методов в рамках исследовательских пожарно-тактических учений.

Основываясь на объемах и содержании задач управления с учетом специфики взаимодействия должностных лиц системы управления между собой и участниками тушения пожара в процессе тушения пожара можно заключить, что в практике управленческой деятельности существует два основных направления формализации задач управления и разработки соответствующих им методов поддержки принятия решений.

Первое направление связано с обеспечением процесса управления, реализуемого одним должностным лицом системы управления на пожаре – руководителем тушения пожара. Данное направление предусматривает формализацию задач сбора, обработки и отображения информации, необходимой для оперативного принятия решения. Важной составляющей данного направления является учет результатов планирования боевых действий для возможного делегирования полномочий по управлению должностным лицам, прибывающим к месту пожара.

Второе направление предусматривает разработку методов поддержки принятия решений, предполагающих взаимодействие нескольких должностных лиц системы управления. Существенное отличие методов поддержки принятия решений, разрабатываемых в рамках данного направления, заключается в отличии организации управления одним должностным лицом от организации управления группой должностных лиц, которое в рамках организации пожаротушения является весомым.

Методы первого направления определяют четкость формализации, но существенно ограничены по времени реализации. Поэтому их применение в процессе тушения пожара жестко регламентировано, должны быть разработаны методические рекомендации по применению методов. Вопросы применения методов должны быть рассмотрены на пожарно-тактических учениях либо при решении пожарно-тактических задач. При этом стоит отметить, что важность принимаемых решений с использованием методов, разработанных в рамках первого направления, имеет больший приоритет по сравнению с методами второго направления.

Методы поддержки принятия решений, создаваемые в рамках второго направления, более сложны с организационной точки зрения. Это связано с большим объемом задач управления, реализуемых в методах. Стоит отметить, что практическая отработка вопросов применения методов второго направления также носит субъективный характер, так как прогнозирование возможной обстановки на крупном пожаре практически сводится к формированию предположений относительно возможного наличия факторов риска при решении задач пожаротушения. Одной из наиболее важных особенностей поддержки управления групп должностных лиц является обеспечение их взаимодействия в процессе выработки решений. Стоит отметить, что уровень профессионального мастерства должностных лиц, прибывших на крупный пожар, много выше уровня профессионального мастерства должностного лица, принимающего первые решения на тушение и задачи поддержки управления умелыми руководителями в основном отходят на второй план и зачастую носят рекомендательный характер.



Обобщая результаты анализа подходов к разработке методов поддержки принятия решений, можно заключить, что особую важность в процессе управления приобретают методы первого направления, обеспечивающие необходимое качество управленческой деятельности первого руководителя тушения пожара.

### **1.3. Системы поддержки принятия управленческих решений**

Методы поддержки принятия решений определяют реализацию в себе сложных математических моделей, связанных с получением больших объемов зачастую противоречивой информации. В этой связи для принятия решений с использованием сложных, многоплановых, многоэтапных процедур принятия решений при тушении пожара должна быть обеспечена соответствующая степень достоверности результатов математического моделирования. Тогда при использовании результатов моделирования должностному лицу на пожаре необходимо переработать существенный объем информации, и в соответствии с этим возникает проблема снижения оперативности принимаемых решений, которая обостряется интенсивной динамикой параметров пожара, особенно на начальном этапе пожаротушения.

Решение проблемы снижения оперативности принимаемых решений предусматривает использование системы поддержки принятия решений. Поэтому целесообразно провести анализ существующих систем поддержки принятия решений и идентифицировать ее составляющие иерархические подсистемы.

#### **1.3.1. Анализ систем поддержки управления**

Системы поддержки принятия решений (СППР) при управлении силами и средствами пожарно-спасательных подразделений на крупных пожарах стали широко использовать с 2000 гг. К внедрению в практику пожаротушения нового инструментария управления побуждали успехи использования СППР в других областях науки и техники. К 2000 гг. СППР успешно зарекомендовали себя в: меди-

цине [36, 257]; управлении авиатранспортом [20, 52, 75, 93, 116, 233, 234] и железнодорожным транспортом [43, 53, 55, 274]; военном деле [8, 54, 62, 115]; энергетике [18, 164], то есть в тех отраслях жизнедеятельности человечества, где принятие решений обусловлено повышенной ответственностью.

Прежде чем приступить к анализу систем поддержки управления, необходимо дать пояснение данному феноменологическому объекту в контексте общей теории управления пожарно-спасательными подразделениями при ликвидации пожаров.

Рассмотрим пожарную охрану как совокупность территориально разрозненных подразделений и организаций [112] различной ведомственной принадлежности, предназначенных для профилактики пожаров и реализации действий по тушению пожаров. Подразумевается, что действия по спасанию людей являются одним из видов действий пожарно-спасательных подразделений пожарной охраны. Оперативное подразделение пожарной охраны – силы и средства основной тактической единицы на пожаре, в большинстве случаев это личный состав пожарной охраны в количестве нескольких отделений на нескольких пожарных автомобилях основного или специального назначения. Под информационной поддержкой управления понимается совокупность моделей процессов, связанных с пожаротушением, как источника информации, а также алгоритмы и методы обработки полученной информации. Фраза «поддержка управления» в данном контексте означает теоретическое обеспечение эффективного управления путем практической реализации формализованных процедур принятия решений при управлении. Система поддержки управления – это феномен, связанный с рациональным взаимодействием моделей, алгоритмов и методов поддержки управления. Во многих практических случаях система поддержки управления представляет собой программную реализацию совокупности моделей, алгоритмов и методов поддержки управления, поэтому имеет функциональную и алгоритмическую структуру.

На основе анализа литературных источников выявлено, что одной из первых систем поддержки управления была «Автоматизированная система поддерж-

ки принятия решений при привлечении пожарных подразделений на пожары». Теоретические основы данной информационной системы были разработаны и опубликованы в 1996 году [57, 243]. Система предназначена для рационально обоснованного выбора подразделения пожарной охраны, из которого производится высылка оперативных подразделений, количественной оценке маршрута следования к месту пожара на основе текущего и фактического количества пожарной техники, находящейся в подразделении на момент поступления вызова. Побудительным мотивом для разработки системы являлся практический вопрос: если пожарная техника и личный состав выедут для ликвидации пожара из места постоянной дислокации, тогда как действовать, если в зоне ответственности данного подразделения пожарной охраны произойдет еще один пожар? При ответе на данный вопрос использовалась теория принятия решений в условиях риска и неопределенности. Задача анализа вариантов управленческих решений поставлена как классическая задача многокритериального выбора. Варианты решений генерировались на основе теории графов, векторные оценки управленческих решений носили вероятностный характер. В данной автоматизированной системе поддержки управления дополнительную информацию о важности критериев выбора, выраженную коэффициентами важности, получали с использованием формализованных вербально-количественных процедур в рамках экспертного подхода. Процесс выбора наилучшей стратегии поведения лица, принимающего решение при реализации выбора конкретного варианта управленческого решения, производился на основе комплексного критерия, представляющего собой сумму частных критериев с учетом дополнительной информации о важности критериев.

После решения задачи своевременного прибытия оперативных подразделений к месту пожара возник вопрос об их достаточности для решения всей совокупности частных задач пожаротушения, поэтому в 2002 году была разработана «Система поддержки принятия решений по определению ранга пожара» [64, 245]. Стоит отметить, что ранг пожара – это условный признак сложности пожара, определяющий допустимые варианты номера вызова оперативных подразделений пожарной охраны в необходимом для успешной ликвидации пожара количествен-

ном и качественном составе. Система решает задачу управления в двух формальных постановках: детализированная задача принятия решений, учитывающая одиннадцать количественных и качественных показателей выбора ранга пожара; экспресс задача, основанная на пяти количественных параметрах выбора. Необходимость постановки двух задач обусловлена тем, что ранг пожара может быть определен при планировании применения сил и средств пожарной охраны, а также может быть повышен руководителем тушения пожара на основе оценки обстановки на пожаре. И так как оперативность принятия решений – основная функция управления оперативными подразделениями, то сбор информации по одиннадцати параметрам затруднен, поэтому в данной системе выбраны пять основных количественных показателей для ее оперативного применения. Формально задача определения ранга пожара была поставлена как «классическая многокритериальная задача о назначениях», где заданной совокупности значений по параметрам выбора необходимо назначить наилучший, в известном смысле, ранг пожара. В качестве источника вариантов управленческого решения в системе использовалось конечное число рангов пожара, отличающееся по значениям для различных территорий, охраняемых от пожаров территориальными подразделениями пожарной охраны. Оценка вариантов решений производилась на основе информации, получаемой с помощью органов чувств человека, а именно участников тушения пожара и очевидцев происшествия. В качестве средства анализа оценок вариантов использовался комплексный критерий, представляющий собой сумму произведений частных параметров на коэффициенты важности, получаемые путем реализации экспертных моделей. Широта применения системы в решении задач управления силами и средствами пожарно-спасательных подразделений позволила сформировать методологические основы разработки экспертных систем поддержки решений [226, 227].

Рассматривая специфику управления пожарно-спасательных подразделений после определения необходимого количества сил и средств, потребных для тушения пожара, руководитель тушения пожара вырабатывает план действий, поэтому в работах [1–4] в 2002 году сформулированы принципы выработки плана дей-

ствий при тушении пожаров на базе прецедентов. Важным научным результатом этих работ является формирование принципов создания структуры системы поддержки управления тушением пожаров, которые определяют необходимость ее создания как совокупности взаимоувязанных модулей с возможностью трансформирования под конкретные задачи управления. Предложенная концепция прошла апробацию десятилетиями практического использования, что в сфере информационных технологий является достаточным временным критерием для утверждения ее как неоспоримого постулата при выборе способа разработки системы поддержки управления действиями по ликвидации пожаров.

На современном этапе эволюции систем поддержки управления можно утверждать, что в первом приближении их алгоритмическая структура состоит из четырех основных подсистем:

- подсистемы генерации вариантов управленческих решений – множество вариантов выбора. Процесс генерации вариантов решений осуществляется, как правило, на основе теоретических моделей дискретной математики, графов и сетей, а также комбинаторики;

- подсистема базы данных с количественными оценками допустимых вариантов управленческих решений по нескольким критериям выбора. База данных пополняется моделями детерминированного характера;

- подсистема базы знаний с количественными значениями показателей важности критериев выбора, получаемых на основе обработки экспертных мнений и математических моделей;

- подсистема анализа оценок вариантов управленческих решений с учетом важности критериев выбора. Целью данной подсистемы является реализация процедур выбора лучшего варианта управленческого решения или сужения множества исходных вариантов решений до заданных размеров.

После решения задачи о необходимом количестве пожарных подразделений исследования в области поддержки управления действиями на пожаре были направлены на реализацию процедур эффективного использования пожарных подразделений при решении основной задачи [121–123]. В 2003 году разработан

обобщенный критерий боевой готовности подразделений пожарной охраны, предложена система частных критериев: критерий запущенности пожара как функция от количества пожарной техники, привлекаемой к тушению пожара, количества участников тушения пожара и фактического расхода подачи огнетушащих веществ на тушение пожара; критерии скорости локализации и ликвидации пожара [121]. Предложены процедуры выбора способов ликвидации пожара на основе данных критериев. Разработанные теоретические основы не были реализованы в виде компьютерной программы, но модель системы поддержки управления очевидно разработана, так как сформированные критерии и рекомендации по их использованию в процессе управления не предусматривали излишних вычислительных процедур, а основная калькуляционная нагрузка приходилась на этап планирования применения сил и средств подразделений пожарной охраны для ликвидации пожаров.

Итак, в качестве источника генерации вариантов в системе предусматривалась комбинаторная зависимость количества вариантов управленческих решений по применению пожарных подразделений в зависимости от имеющихся допустимых способов их эффективного использования. Оценка вариантов решений по разработанным критериям выбора представляла собой сумму произведений частных показателей выбора на коэффициенты важности, которые рассчитывались на основе регрессионных зависимостей, получаемых путем статистического анализа фактов тушения пожара.

В 2008 году произведена разработка системы поддержки управления при выборе мест установки пожарной техники на водоисточники [219]. Задача управления поставлена как задача многокритериального выбора при двух критериях: расстояние от входа в здание до места расположения водоисточников; водоотдача водопроводной сети. Допустимые варианты в задаче получают путем комбинаторных моделей на основе анализа количества водоисточников и количества единиц пожарной техники; выбор вариантов осуществляется на основе теоретико-множественного анализа векторных оценок с использованием векторной функции, построенной на линейных комбинациях параметров выбора с учетом коэф-

фициентов относительной важности критериев, получаемых экспертным путем. Цель поддержки управления в данной задаче сводится к сужению множества допустимых вариантов до трех, из которых руководителю тушения пожара необходимо произвести окончательный выбор.

В 2010 году разработан метод поддержки решений [169] и компьютерная система [198], его реализующая при решении задачи принятия решений по распределению оперативных подразделений пожарной охраны между участками тушения крупного пожара.

В качестве теоретической основы для системы выступала теория многокритериального выбора на основе понятия оптимальности по Парето. Количество вариантов в задаче определялось как количество размещений конечного числа оперативных подразделений между конечным числом участков тушения пожара. Векторные оценки вариантов определялись на основе критерия скорости локализации и ликвидации пожаров, а относительные коэффициенты важности рассчитывались путем попарного сравнения парето-оптимальных векторных оценок. Целью системы поддержки управления являлось компактное представление множества допустимых вариантов решений и упорядочении вариантов внутри множества на основе линейной свертки критериев с учетом весовых коэффициентов важности, рассчитанных на основе количественной информации об их относительной важности. В данной системе впервые разработана многоуровневая процедура анализа, предусматривающая упорядочение вариантов внутри множеств на основе результатов их ранжирования. Метод получил широкое развитие и был использован в качестве теоретической основы для разработки систем поддержки решений по управлению пожарно-спасательными подразделениями при ликвидации крупных природных пожаров и техногенных чрезвычайных ситуаций [148], и программно-аппаратного комплекса для поддержки решений при ликвидации радиационных аварий [34, 147]

В 2011 году был разработан метод поддержки управления и система поддержки принятия решений по организации спасательных работ и тушения пожаров в зданиях повышенной этажности [16]. Задача имеет многокритериальную

постановку, количество вариантов в задаче лимитируется допустимыми способами спасения людей и тушения пожара, векторные оценки вариантов носят вероятностный характер, выбор варианта осуществляется на основе аддитивной функции от временных показателей. В данной модели отсутствуют коэффициенты важности временных показателей, однако, осуществив их нормировку по времени для разных критериев, представляется возможным определить и их относительную важность.

В 2013 году в работе [160] были представлены модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров в морских портах на базе нечетких нейронных сетей, а также разработана «Интеллектуальная система поддержки принятия решения на базе нечетких нейронных сетей для руководителя тушения пожара на территории Калининградского морского торгового порта» [161]. В рассматриваемой системе поддержки управления при выборе маршрутов движения пожарных внутри здания на примере портовых сооружений авторы использовали теорию графов – сетевую модель движения пожарных и нейронный сети для реализации алгоритмов выбора маршрутов движения. В качестве критерия оценки результативности выбора маршрутов движения предложено использовать математические модели, оценивающие динамику площади пожара и высоты задымленной зоны в помещении. В этот же период выпущена монография, обобщающая зарубежный опыт навигации пожарных внутри здания, в которой теоретически представлены алгоритмы выбора вариантов движения пожарных и предложен метод анализа маршрутов движения пожарных [58].

В общей совокупности процессов поддержки управления в чрезвычайных ситуациях и при ликвидации пожаров к настоящему времени сложилась тенденция разработки и внедрения систем поддержки управления в виде программных средств. Наиболее известные программные средства для поддержки управления представлены ниже.

Комплекс программ для поддержки принятия решений в условиях крупных пожаров и ЧС [59–61, 225, 235–238] предназначена для совершенствования



управления в части, касающейся организации действий по тушению пожара, спасательных работ, эвакуации людей из зданий. Компьютерная система [238] дополнена расчетом требуемого времени для реализации спасательных работ из высотных зданий.

Решение вопросов комплексной поддержки управления при организации тушения природных пожаров и чрезвычайных ситуаций, а также принятие решений по организации защиты критически важных объектов Российской Федерации от возможного воздействия факторов чрезвычайных ситуаций природного характера реализовано в программном продукте [68].

Управление и организация реагирования сил и средств пожарно-спасательных подразделений, а также сил и средств других министерств и ведомств на пожары, аварии, чрезвычайные ситуации и другие деструктивные события реализовано в компьютерной системе [273]. Программа дополнена отдельным модулем, позволяющим решать задачи обобщения, анализа и визуализации полученных данных по реагированию на деструктивные события в городах с привязкой к интернет-картографическим серверам [262].

Обеспечение необходимо уровня пожарной безопасности на объектах противопожарной защиты также является деятельностью, требующей методической поддержки при управлении рискообразующими факторами. В программном средстве [111] предпринята попытка с использованием технологий «консолидированного анализа результатов моделирования развития опасных факторов пожара и эвакуации людей из здания» сформировать рекомендации по управлению рескообразующими факторами, и реализовать мероприятия, направленные на уменьшение значений пожарного риска.

Программные комплексы [111] и [15] предназначены для решения задач поддержки принятия решений при борьбе за живучесть объектов морской техники. В программном средстве [111] реализованы математические модели и алгоритмы принятия решений об устойчивости объектов морской техники к различным угрозам, включая пожары, на основе оценки текущих и прогнозных значений параметров опасностей [15].

Организация совершенствования управления дежурно-диспетчерскими службами за счет внедрения методов и моделей поддержки принятия решений реализованы в программном продукте [276]. Рассматриваемый программный продукт реализует методологию информационно-аналитической поддержки управления и принятия решений персоналом диспетчерских служб критически важных и потенциально опасных объектов, включая вопросы их взаимодействия с другими оперативными службами различных министерств и ведомств в рамках Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Современные тенденции автоматизации управленческой деятельности при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций явились побудительным мотивом для разработки алгоритмов, методов и методики расчета параметров в системе управления безопасностью участников тушения пожара, работающих в условиях воздействия опасных факторов пожара в зданиях [45, 187, 236]. Методы реализованы в виде компьютерной системы [165], в задачи которой входит поддержка принятия решений при управлении безопасностью пожарных, работающих в непригодной для дыхания среде. Рассматриваемая компьютерная система построена по клиент-серверной технологии, приложение клиента реализовано в виде программного средства [213] для мобильных устройств и/или планшетов постового на посту безопасности. Данное клиентское приложение предназначено для автоматизации работы поста безопасности на пожаре и осуществляет поддержку принятия решений по подаче команды «на выход из непригодной для дыхания среды».

Внесение изменений в нормативную базу планирования и организации пожаротушения на территории Российской Федерации в части, касающейся разработки электронных вариантов документов планирования, инициировали необходимость разработки компьютерных систем моделирования и принятия решений по планированию тушения пожаров в зданиях. Теоретические аспекты планирования действий по тушению пожаров в зданиях с использованием автоматизированных систем поддержки принятия решений рассмотрены в работах [56, 182,

186, 190]. Компьютерная система поддержки принятия решений при планировании действий по тушению пожаров реализована в виде программного продукта [205]. В качестве метода моделирования процессов развития и тушения пожаров в зданиях по аналогии с подходами, опубликованными в [205], был использован интегральный метод моделирования пожаров. В работе [56] произведено сравнение интегральной и полевой моделей пожаров при планировании оперативно-тактических действий пожарно-спасательных подразделений в зданиях. Было показано, что оперативность расчета динамики пожара в интегральной модели позволяет использовать ее для поддержки принятия решений. Для решения данной задачи разработана «Система моделирования параметров развития и тушения пожаров в зданиях» [166].

Ретроспектива разработки и внедрения в практику тушения пожаров систем поддержки принятия решений позволяет определить основные подходы к разработке систем и наполнению их подсистем информацией для принятия решений.

### **1.3.2. Подходы к разработке систем поддержки управления**

Ориентированные на практику пожаротушения системы поддержки принятия решения, решающие задачи информационного сопровождения управленческой деятельности определим как системы информационного обеспечения действий по тушению пожара. Имеются три основные концепции их разработки:

- разработка глобальной информационной системы, имеющей информационную базу, охватывающую все направления управления на крупном пожаре;
- создание интегральной информационной системы как совокупности функциональных информационных подсистем;
- разработка локальной информационной системы, в которой реализованы только те процедуры информационного сопровождения боевых действий, для решения которых адресно (локально) направлена система в целом.

Первые два варианта концепции изначально были предложены в работах [1–4, 89–91], но под воздействием практики претерпели эволюцию и определили третий вариант создания.

Анализ первого и второго варианта концепции разработки информационной системы применим в практике управления группой должностных лиц системы управления и здесь второй вариант концепции предпочтительнее, по мнению разработчиков.

Третий вариант концепции предусматривает решение локальных жестко формализованных и упорядоченных задач управления и поэтому предлагается как основной для разработки информационной системы первого руководителя тушения пожара. Стоит отметить, что локальный характер концепции не предусматривает исключение поиска общего в частных задачах управления. Здесь необходимо отталкиваться от понятий теории систем, в которой теоретические основы создания одной локальной информационной системы применимы и для решения аналогичных задач пожаротушения.

### **1.3.3. Основные требования к системам поддержки управления**

Анализ концепций формирования информационных систем поддержки управления при тушении пожаров показал жизнеспособность двух основных вариантов: создание интегральной информационной системы; разработка локальной информационной системы. Однако особенности реализации действий пожарных подразделений определили систему требований, предъявляемых к информационным системам, способным к функционированию в боевом режиме (рисунок 1.17).

Предложенный третий вариант разработки информационной системы не подвергался принципиальному анализу в совокупности существующих требований, поэтому цель данного исследования состоит в определении необходимого и достаточного количества требований для успешного применения, разрабатываемых по новому варианту систем поддержки управления в процессе боевой работы пожарных подразделений.



Рисунок 1.17 – Требования для информационных систем поддержки управления

Наиболее важным с практической точки зрения управления является полное информационное сопровождение реализации задач управления. Поэтому первое требование к информационной системе заключается в том, что информационная система должна обеспечивать сопровождение всех задач управления, непосредственно определяющих результат тушения пожара. Данное требование справедливо для интегральных и локальных информационных систем с различием, состоящем в том, что локальная система ограничена по количеству решаемых задач

управления, поэтому выполнение первого требования обеспечит надлежащее качество решения только локальных, частных задач управления.

Совокупность задач управления при тушении пожаров носит прогнозный характер. Реализация решения одной задачи является основанием для возникновения новых задач, схожих по структуре с исходной. Поэтому для локальной и интегральной информационных систем поддержки управления необходимо выполнение второго требования: информационная система должна обеспечивать сопровождение всех задач управления, непосредственно определяющих результат тушения пожара.

В реализации управленческой деятельности на пожаре априори принято, что информационные системы не должны быть ориентированы только на конкретного пользователя, так как выезд на пожары осуществляется в режиме дежурных смен (или караулов) и роль руководителя тушения пожара в районе и подрайоне выезда пожарных подразделений будут выполнять разные люди. Данное утверждение справедливо как для тушения крупных пожаров, так и для тушения пожаров в начальной стадии развития. Таким образом, третье требование, предъявляемое к информационной системе, состоит в том, что информационная система должна быть универсальной и способной к адаптации под специфику реализации различных по структуре задач управления.

При управлении на пожаре группой должностных лиц необходима дифференциация информации по уровням их иерархии в процессе управления, но для локальной системы, когда все задачи управления возложены на одно должностное лицо, иерархия еще не создана. Поэтому четвертое требование к информационной системе, состоящее в обеспечении агрегирования задач управления по уровням иерархии ее пользователей, применимо только к интегральной информационной системе.

Пятое и заключительное требование к информационной системе поддержки управления состоит в том, что информационная система должна предусматривать максимальное удобство представления данных для потребителя информации. Данное требование справедливо ко всем информационным системам, целью со-

здания которых является повышение оперативности и качества принимаемых управленческих решений.

Анализ системы требований показал, что система поддержки управления должна быть разработана в виде оптимальной совокупности функциональных подсистем: информационного обеспечения действий по тушению пожаров; аналитической обработки информации для принятия решений; визуализации результатов информационно-аналитического сопровождения управления. Поэтому необходимо провести анализ моделей действий по тушению пожаров как источника информации и моделей поддержки принятия решений как аналитической составляющей системы поддержки управления.

#### **1.4. Модели действий пожарных подразделений в зданиях**

Концептуальным подходом к формальному описанию действий пожарных подразделений является теория сетевого планирования, сформировавшаяся под воздействием теоретического обобщения методов исследования операций, а также моделей и методов решения многокритериальных задач управления.

Стоит отметить, что теория сетевого планирования в контексте моделирования действий по ликвидации пожаров в зданиях с целью их исследования и совершенствования рассматривается как гносеологический, проблемно ориентированный подход к моделированию конечных, структурированных процессов. В качестве инструментария моделирования выступает сетевая структура, анализ результатов моделирования – сетевой график. Сетевая структура представляет собой совокупность состояний исследуемой системы и работ (мероприятий), обеспечивающих переход системы из одного состояния в другое [59, 65]

Каждое состояние системы, как и каждая работа в системе, определяется набором свойств. Например, при рассмотрении системы действий по ликвидации пожара в здании состояние системы может являться: состояние «пожар локализован», а свойствами данного состояния будут: отсутствие угрозы пожара людям, включая участников тушения пожара; отсутствие развития пожара, то есть усло-

вие, определяющее уменьшение площади пожара и отсутствие необходимости привлечения дополнительных пожарно-спасательных подразделений для ликвидации пожара. Для перехода системы управления в состояние «пожар локализован» необходимо выполнить определенный набор работ.

Рассмотрим работу, связанную с подачей огнетушащих веществ. Для реализации данной работы необходимо иметь ресурсы, то есть пожарную технику и личный состав и обеспечить выполнение мероприятий, направленных на приведение пожарной техники в состояние готовности для решения основной задачи пожаротушения. Тогда работа по подаче огнетушащих веществ для локализации пожара будет характеризоваться ресурсами и временем выполнения [143].

Таким образом, при моделировании действий по ликвидации пожаров в зданиях моделируемой характеристикой является временной интервал, необходимый для успешной реализации действия. Выбор видов, способов и приемов практической реализации действий основывается на минимизации данного количественного критерия.

В соответствии с классическими методами сетевого моделирования модели действий по ликвидации пожаров в зданиях могут быть: вероятностные, детерминированные [223]. Общая классификация моделей оперативно-тактических действий сил и средств пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях представлена на рисунке 1.18.

В практике моделирования действий по ликвидации пожаров вероятностные модели используются для решения задач нормирования продолжительности реализации работ на пожарах. Детерминированные модели используются в качестве теоретической основы для разработки систем поддержки принятия решений.



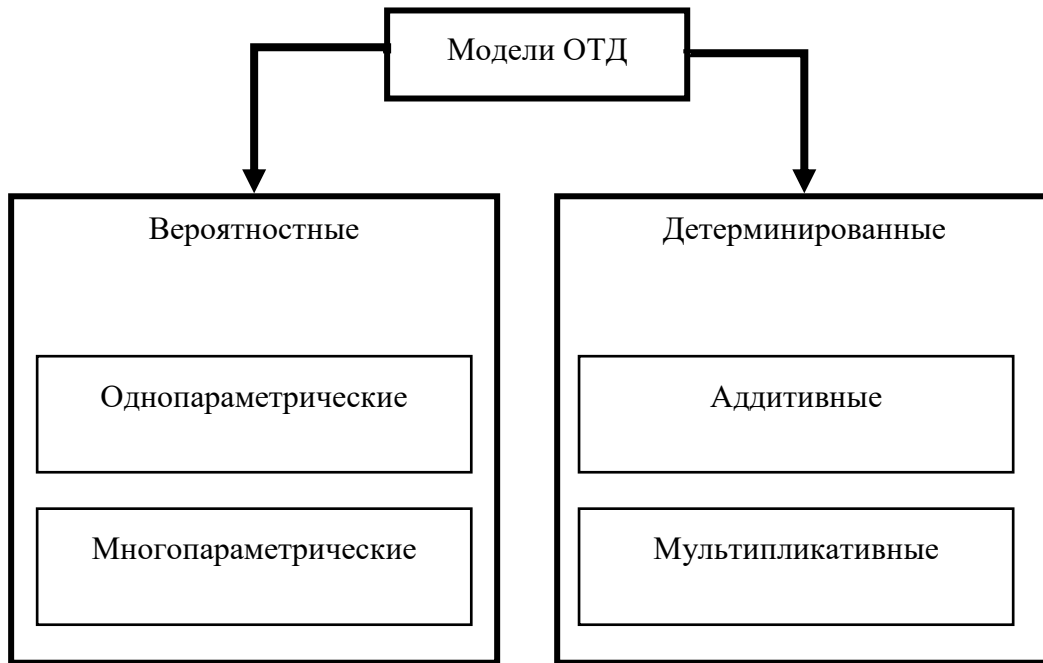


Рисунок 1.18 – Классификация моделей оперативно-тактических действий

#### 1.4.1. Вероятностные модели

Вероятностные модели представляют время реализации действий как случайную величину, а в качестве результата моделирования сопоставляют исходным данным интервал значений. Ширина интервала определяется вероятностью события, состоящего в том, что на практике продолжительность действий находится за пределами полученного интервала значений [66].

Среди всей совокупности вероятностных моделей оперативно-тактических действий представляется возможным их классифицировать по количеству параметров модели, необходимых для расчета продолжительности оперативно-тактических действий. Под параметрами любой вероятностной модели следует понимать вероятностные оценки: среднее значение случайной величины и стандартное отклонение как степень разброса данных. Поэтому вероятностные модели по количеству вероятностных оценок, необходимых для расчета продолжительности оперативно-тактических действий, следует классифицировать как однопараметрические и многопараметрические.

Однопараметрическая модель действий основывается на экспоненциальном законе распределения случайной величины. В соответствии с данным законом распределения вероятность события, состоящего в том, что моделируемый параметр  $s$  будет находиться в интервале  $s_1$  и  $s_2$  определяется по формуле

$$P\{s_1 \leq s < s_2\} = \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{s^*} \cdot \exp\left(-\frac{s}{s^*}\right) ds = \exp\left(-\frac{s_1}{s^*}\right) - \exp\left(-\frac{s_2}{s^*}\right), \quad (1.3)$$

где  $P$  – вероятность события, состоящего в том, что моделируемый параметр  $s$  будет находиться в интервале  $s_1$  и  $s_2$  при среднем значении  $s^*$ .

При вероятностном моделировании интерпретация результатов основана на понятии риска  $\varepsilon$ , то есть вероятности события, состоящего в том, что моделируемый параметр  $s$  будет находиться за пределами интервала  $s_1$  и  $s_2$ . Тогда очевидна связь риска  $\varepsilon$  с вероятностью  $P$ , которая определяется соотношением  $\varepsilon = 1 - P$ .

В практике вероятностного моделирования для экспоненциальной модели принимают, что минимальное значение интервала равно нулю, то есть  $s_1 = 0$ , в этом случае вероятность  $P$  определяется по формуле

$$P\{s_1 \leq s < s_2\} = \exp\left(-\frac{s_1}{s^*}\right) - \exp\left(-\frac{s_2}{s^*}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{s_2}{s^*}\right). \quad (1.4)$$

Тогда значение риска для экспоненциальной модели будет равно:

$$\varepsilon = 1 - P\{s_1 \leq s < s_2\} = \exp\left(-\frac{s_2}{s^*}\right).$$

Управление значением моделируемого параметра осуществляется путем минимизации значений риска до приемлемого уровня.

Поэтому в тех случаях, когда вероятностная модель с одним параметром не применима для описания случайного процесса используются вероятностные модели с несколькими параметрами, как правило со средним значением и стандартным отклонением, которые в практике моделирования называют многопараметрическими вероятностными моделями. Это модели, основанные на законах распределения случайных величин Вейбулла – Гнеденко, Эрланга и Гаусса [223].

Наиболее часто в практике моделирования действий по тушению пожаров в зданиях применяется нормальная модель, основанная на Гауссовом распределе-

нии случайной величины (нормальный закон распределения случайной величины) с плотностью [223]

$$P(s_1 < s < \tau_2) = \int_{s_1}^{s_2} f(s) ds = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{s_1}^{s_2} \exp\left(-\frac{(s-s^*)^2}{2\sigma^2}\right) dt, \quad (1.5)$$

где  $P$  – вероятность события, состоящего в том, что моделируемый параметр  $s$  будет находится в интервале  $s_1$  и  $s_2$  при среднем значении  $s^*$  и стандартном отклонении  $\sigma$ .

Исходя из симметрии нормального закона распределения случайной величины, результат моделирования может быть представлен в виде интервала

$$s = s^* \pm k\sigma. \quad (1.6)$$

Значения  $k$  зависят от величины риска  $\varepsilon$ , например, при  $\varepsilon = 0,01$   $k = 2,6$  или при  $\varepsilon = 0,005$   $k = 2,8$  и т. п.

Нормальная модель как наиболее яркий представитель многопараметрических вероятностных моделей используется в качестве инструмента нормирования, планирования и анализа действий по тушению пожаров на этапах сосредоточения и введения сил и средств пожарно-спасательных подразделений. Для анализа специфики моделирования действий по тушению пожаров в зданиях на основе многопараметрических вероятностных моделей рассмотрим следующие нормальные модели, представленные в таблице 1.2.

Рассмотренные вероятностные модели действий по тушению пожаров применяются в практике моделирования при нормировании, планировании, хронометраже и анализе действий по тушению пожаров в зданиях силами пожарно-спасательных подразделений. Однако данный вид моделей не применяется для решения задач повышения эффективности управления в режиме реального времени, так как их вероятностная природа не позволяет получить четких рекомендаций для результативной реализации действий по тушению пожара на практике. Это связано с тем, что результатом моделирования выступает не конкретное значение моделируемого параметра, а его интервальная оценка или оценка сверху/снизу для интервала значений в соответствии с особенностью постановки экстремальной задачи моделирования.

Таблица 1.2. – Виды вероятностных моделей действий по тушению пожара

№	Наименование модели	Закон распределения	Параметры модели	
1	Модель поиска места работы в здании звеньями газодымозащитной службы [128]	Э	S	Необходимое время поиска места работы, мин
			S*	Среднее время поиска места работы, мин
			ε	Риск не обнаружить место работы в здании за требуемое время
2	Модель расчетной продолжительности пожара в здании [29]	Э	S	Расчетная продолжительность тушения пожара в здании, ч
			S*	Средняя продолжительность тушения пожара в здании, ч
			ε	Риск не потушить пожар за расчетное время
3	Модель для оценки необходимого расхода огнетушащих веществ для тушения пожаров в зданиях [85]	Э	S	Необходимый расход огнетушащих веществ, с <sup>-1</sup>
			S*	Средний расход огнетушащих веществ для зданий, с <sup>-1</sup>
			ε	Риск недостатка огнетушащих веществ для эффективных действий по тушению пожара
4	Модель скорости движения пожарных автомобилей к месту вызова [95]	Н	S	Нормативная скорость движения пожарных автомобилей, км·ч <sup>-1</sup>
			S*	Средняя скорость пожарных автомобилей по спидометру, км·ч <sup>-1</sup>
			σ	Стандартное отклонение скорости движения пожарных автомобилей, км·ч <sup>-1</sup>
			ε	Риск прибытия к месту пожара за время, превышающее требуемое
5	Модель действий по тушению пожаров в зданиях [210]	Н	S	Минимально допустимое время реализации действий, с
			S*	Среднее время реализации действий по тушению пожара, с
			σ	Стандартное отклонение времени реализации действий по тушению пожара, с
			ε	Риск невыполнения действий по тушению пожара за минимально допустимое время
6	Модель времени защиты участников тушения пожара в здании от воздействия ОФП с использованием СИЗОД [45, 187]	Н	S	Нормативное потребление дыхательной смеси при работе в СИЗОД, л·мин <sup>-1</sup>
			S*	Среднее потребление дыхательной смеси при работе в СИЗОД, л·мин <sup>-1</sup>
			σ	Стандартное отклонение потребления дыхательной смеси при работе в СИЗОД, л·мин <sup>-1</sup>
			ε	Риск воздействия ОФП на участников тушения пожара

Поэтому в практике моделирования действий по тушению пожара для целей повышения эффективности управления действиями пожарно-спасательных подразделений в режиме реального времени широкое применение получили детерминированные модели.

### 1.4.2. Детерминированные модели

Детерминированные модели основаны на методах исследования операций и разрабатываются путем выявления количественной связи между моделируемым параметром  $S$  и факторами, влияющими на данный параметр, в данном случае – частные показатели  $S_i$ , то есть:

$$S = f(S_0, S_1, S_2, \dots, S_n), \quad (1.7)$$

где  $S$  – моделируемый параметр реализации действий по тушению пожара;  $S_0$  – начальное значение моделируемого параметра;  $S_i, i = 1, \dots, n$  – частные параметры модели.

В практике моделирования действий по тушению пожаров дезертированная модель в качестве частных параметров использует вероятности реализации тех или иных процессов и степень их влияния на моделируемый параметр  $S$ , а многие детерминированные модели в том или ином смысле получены методами регрессионного или корреляционного анализа, имеющими вероятностную природу.

Поэтому в первом приближении можно заключить, что в основе детерминированных моделей лежат понятия среднего арифметического и среднего геометрического значения моделируемого параметра. Поэтому в основном детерминированные модели подразделяются на два вида основных вида:

– аддитивные модели, представляющие моделируемый параметр  $s$  в виде суммы произведений значений отдельных показателей и коэффициентов их важности – аналог среднего арифметического значения параметра;

– мультипликативные модели, где моделируемый параметр представлен произведением частных показателей, возведенных в степень значений коэффициентов важности – аналог среднего геометрического.

В общем случае аддитивные и мультипликативные модели с учетом коэффициентов влияния частных показателей на моделируемый параметр записываются следующим образом [223]:

*аддитивная модель действий (A)*

$$s = s_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i; \quad (1.8)$$

*мультипликативная модель действий (M)*

$$s = s_0 \prod_{i=1}^n s_i^{\alpha_i}, \quad (1.9)$$

где  $s$  – моделируемый параметр;  $s_i$  – частный параметр, влияющий на моделируемый параметр  $s$ ;  $\alpha_i$  – коэффициент влияния  $i$ -го параметра на результат моделирования.

Наиболее часто встречающиеся в практике моделирования действий по тушению пожаров в зданиях детерминированные модели, а также их частные параметры и их коэффициенты влияния представлены в таблице 1.3.

Рассмотренные модели охватывают весь перечень действий по тушению пожаров в зданиях, начиная с момента высылки сил и средств пожарно-спасательных подразделений и заканчивая ликвидацией пожара с учетом реализации частных действий по тушению пожара, связанных с реализацией аварийно-спасательных работ.

Широкое применение детерминированных моделей действий по тушению пожара в зданиях позволяет использовать данный вид модели в качестве информационной компоненты при разработке единой модели управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров в зданиях на основе мониторинга пожара.

Таблица 1.3 – Основные детерминированные модели действий по тушению пожаров в зданиях

№ п/п	Наименование модели	Вид модели	Параметры модели		Коэффициент модели	
			<i>i</i>	<i>S</i>	$\alpha$	$S_0$
1	Модель работоспособности пожарной техники для оценки успеха выполнения задач пожаротушения в зданиях, сооружениях [32]	М	1	Критерий готовности пожарной техники на дежурстве	1,0	1,0
			2	Критерий надежности подготовки пожарной техники к применению на пожаре	1,0	
			3	Критерий надежности применения пожарной техники на пожаре	1,0	
			4	Критерий приспособленности пожарной техники к личному составу	1,0	
2	Модель скорости следования пожарно-спасательных подразделений в городской дорожной сети на основе данных мониторинга «ГЛОНАС» [159]	М	1	Коэффициент влияния расстояния до места вызова	1,0	1,0
			2	Коэффициент влияния типа пожарного автомобиля	1,0	
			3	Коэффициент влияния месяца года	1,0	
			4	Коэффициент влияния дня недели	1,0	
			5	Коэффициент влияния времени суток	1,0	
3	Модель спасательных работ для зданий с использованием спец. техники: автолестниц и телескопических подъемников [17]	А	1	Продолжительность подготовки средства спасания	1,0	0,0
			2	Продолжительность передислокации средства спасания	1,0	
			3	Продолжительность перемещения людей из здания	1,0	
4	Модель ранжирования маршрутов поиска людей на открытых пространствах [241]	А	1	Показатель «расстояние до участка поиска», представляет собой квадрат расстояния	0,5	0,0
			2	Показатель «вероятность местонахождения объекта поиска», величина обратная квадрату вероятности поиска	0,5	
5	Модель спасания людей из здания с помощью эластичного рукава [17]	М	1	Высота спуска людей	1,0	0,2 13
			2	Число спасаемых людей	1,0	
			3	Коэффициент, учитывающий подготовку к спасанию с помощью эластичного рукава	1,0	

Продолжение таблицы 1.3

6	Модель спасания людей из здания с помощью телескопического подъемника / автолестницы [17]	М	1	Высота спуска людей	1,0	0,35 / 1,36
			2	Число спасаемых людей	1,0	
			3	Коэффициент, учитывающий подготовку к спасанию	1,0	
7	Модель анализа времени движения пожарных в здании [188]	М	1	Показатель обратный протяжённости маршрута	0,8	1
			2	Условия видимости на маршруте движения	0,2	
8	Модель развертывания сил и средств пожарных подразделений для горизонтального участка [120]	А	1	Расстояние развертывания сил и средств, не более 1 км.	0,34	-15
			2	Масса ПТО, переносимого пожарными, не более 48 кг	-0,1	
			3	Произведение параметров.	$3,8 \cdot 10^{-3}$	
9	Модель развертывания сил и средств пожарно-спасательных подразделений на этажах здания [120]	А	1	Высота развертывания сил и средств, не более 45 м	2,03	-2,5
			2	Масса пожарно-технического оборудования, переносимого пожарными, не более 48 кг	0,98	
			3	Произведение параметров	0,038	
10	Модель развертывания сил и средств на этажах здания с использованием спасательной веревки / способом опускания рукавной линии вниз с этажа расположения разветвления [210]	М	1	Высота размещения разветвления в здании	1,0	4,5 / 4,4
			2	Коэффициент влияния массы пожарного оборудования	1,0	
			3	Коэффициент влияния физической усталости пожарных	1,0	
			4	Коэффициент влияния температуры окружающей среды	1,0	
			5	Коэффициент влияния уклона местности	1,0	
			6	Коэффициент влияния возраста пожарных	1,0	
			7	Коэффициент влияния времени суток	1,0	
			8	Коэффициент влияния снежного покрова	1,0	
11.	Модель нормативного расхода по подаче огнетушащих веществ [123]	А	1	Численность личного состава пожарного подразделения	0,142	2,23
			2	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	2,56	
12	Модель площади тушения пожара пожарным подразделением [123]	А	1	Расход подаваемых огнетушащих веществ	3,2	-26,2
			2	Численность личного состава пожарного подразделения	4,04	
			3	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	11,75	
13	Модель скорости локализации пожара пожарным подразделением [121]	А	1	Расход подаваемых огнетушащих веществ	0,03	1,17
			2	Численность личного состава пожарного подразделения	0,01	
			3	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	0,02	



Окончание таблицы 1.3

14	Модель скорости ликвидации пожара пожарными подразделениями [123]	А	1	Расход подаваемых огнетушащих веществ	0,04	0,76
			2	Численность личного состава пожарного подразделения	0,02	
			3	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	0,18	
15	Модель времени локализации пожара пожарными подразделениями [122]	А	1	Расход подаваемых огнетушащих веществ	0,20	10,5
			2	Численность личного состава пожарного подразделения	0,09	
			3	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	5,38	
16	Модель времени ликвидации пожара пожарными подразделениями [123]	А	1	Расход подаваемых огнетушащих веществ	0,20	11,7
			2	Численность личного состава пожарного подразделения	0,76	
			3	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	8,00	
17	Модель эффективности реализации действий по тушению пожаров [123]	А	1	Время свободного развития пожара	0,010	0,00
			2	Время локализации пожара	0,005	
			3	Время ликвидации пожара	0,013	
18	Модель-аналог эффективности реализации действий по тушению пожаров [122]	А	1	Расход подаваемых огнетушащих веществ	0,036	0,00
			2	Численность личного состава пожарного подразделения	0,053	
			3	Количество приборов подачи огнетушащих веществ	0,003	

Примечание: А – аддитивная модель; М – мультипликативная модель.

## **1.5. Системы мониторинга пожара в здании**

Рассматривая существующие системы мониторинга пожара (далее – системы), исходя из специфики принятия решений при управлении на пожарах, в первом приближении можно выделить два основных вида систем, рассматриваемых ниже.

К одному из перспективных видов относятся системы, позволяющие проводить сбор информации для принятия решений с помощью средств объективного дистанционного мониторинга состояния пожаров в зданиях.

### **1.5.1. Информационные системы мониторинга пожара**

Система информационного мониторинга пожара предназначена только для сбора, обработки и хранения результатов мониторинга и обеспечивает идентификацию состояния пожара в здании [47, 48]. Системы предназначены для решения двух основных задач: 1 – констатация и прогноз развития пожара в здании; 2 – оценка результативности действий по тушению пожара в здании. Функция прогноза развития пожара в здании предназначена для оценки динамики параметров пожара с целью принятия решений о возможности его тушения имеющимися техническими системами или силами и средствами пожарно-спасательного подразделения. Внедрение системы прогнозного мониторинга обусловлено использованием для принятия управленческих решений прогнозных значений параметров, полученных на основе текущих значений с использованием соответствующих прогнозных математических моделей. Функция оценки результативности тушения пожара предназначена для оценки результатов действий по тушению пожара по заданным критериям результативности. В общем случае данный вид систем мониторинга обеспечивает потребителя результатов мониторинга данными, позволяющими сделать вывод о том, насколько эффективно участники тушения пожара выполняют поставленные перед ними задачи.

В общей концепции управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров в зданиях под мониторингом пожара понимают процесс непрерывного или дискретного сбора данных о динамике пожара, включая обработку, анализ, а также представление (визуализацию, аудиолизацию) данных с целью обеспечения системы управления действиями по тушению пожара и других потребителей результатами мониторинга, полной и дифференцированной по иерархии управления информацией о возникновении и прогнозе развития пожара. Потребителями результатов мониторинга являются должностные лица и структуры управления, непосредственно использующих результаты мониторинга для принятия решений, направленных на локализацию и ликвидацию пожара в здании. В основном практика тушения пожаров в зданиях показывает, что потребителями результатов мониторинга являются руководитель тушения пожара, должностные лица нештатной структуры управления действиями на пожаре (оперативный штаб пожаротушения), должностные лица центра управления в кризисных ситуациях МЧС России, а также другие структуры, заинтересованные в результатах мониторинга состояния пожара [151].

### **1.5.2. Классификация систем мониторинга пожара в здании**

Мониторинг пожара в здании осуществляется с использованием средств мониторинга, то есть технических устройств, предназначенных для решения задач получения, обработки, хранения и передачи данных, включая представление данных потребителю результатов мониторинга [151]. Средства мониторинга классифицируются по виду, способу размещения в здании, а также по назначению и характеру использования. По способу размещения средства мониторинга разделяют на стационарные (технические устройства, не предусматривающие изменение их позиции в процессе мониторинга), и мобильные (технические устройства, предусматривающие возможность перемещения, изменения позиции в пространстве) при реализации мониторинга, посредством участников тушения пожара пожарной и приспособленной для средств пожаротушения техники и технических средств.

По назначению средства мониторинга подразделяются на средства съема данных; средства передачи данных; устройства представления данных; устройства и блоки оперативной обработки данных; устройства хранения данных. Взаимодействие средств мониторинга происходит с использованием проводных и беспроводных линий связи. Совокупность средств мониторинга, включая структуры их взаимодействия, предназначенная для обеспечения потребителей результатов мониторинга информацией о возникновении и прогнозе развития пожара является системой мониторинга пожара в здании.

Системы мониторинга классифицируются по четырем основным признакам:

1. По функциям мониторинга:
  - монофункциональные;
  - полифункциональные;
2. По удаленности мониторинга:
  - локальные;
  - дистанционные;
3. По количеству параметров мониторинга:
  - однопараметрические;
  - многопараметрические;
4. По способу мониторинга:
  - дискретные;
  - непрерывные.

Общая классификация систем мониторинга представлена на рисунке 1.19.

Анализируя системы мониторинга по функциям мониторинга, выделяют монофункциональную систему, рассматривая ее как вид систем мониторинга, включающих в себя реализацию только одной из функций мониторинга пожара. В свою очередь многофункциональная система мониторинга пожара реализует одновременно нескольких функций мониторинга пожара.



Рисунок 1.19 – Классификация систем мониторинга пожара в здании

Система локального мониторинга реализуется внутри здания и предусматривает схему информационного обмена, где все данные получаемые средствами мониторинга дублируются на средства отображения данных без каких-либо изменений, поэтому основным преимуществом данной схемы является скорость передачи данных, и простота в их обработке. Недостатком данной системы является автономность данных, заключающаяся в том, что если в течение времени система мониторинга отказала в качественном выполнении своей функции, то результаты мониторинга будут утеряны [151].

Система дистанционного мониторинга осуществляет сбор данных, формирование данных и их передачу потребителям мониторинга, которые находятся удаленно за пределами здания. Процесс передачи данных производится по беспроводной связи с обязательным дублированием данных на устройствах их централизованного хранения [143].

Реализуемая схема мониторинга позволяет хранить все результаты мониторинга централизованно, поэтому доступ к данным можно обеспечить из любого места, где имеется выход в сеть, поэтому системы дистанционного мониторинга предусматривают наличие удаленно расположенной базы данных – сервера. Централизованная база данных позволяет обеспечить результатами мониторинга одновременно всех его потребителей, в том числе и оперативные службы пожарно-спасательных подразделений, реагирующие на пожары и чрезвычайные ситуации в зданиях. Однако схема дистанционного мониторинга, предусматривающая передачу данных по сети, не применима в зданиях, к которым предъявляются повышенные требования по защите информации. Для данного случая предусматриваются методы шифрования результатов мониторинга, что снижает скорость передачи данных и качество информационного обеспечения результатами мониторинга его потребителей [143].

Однопараметрические системы мониторинга осуществляют наблюдение за одним параметром с использованием порогового средства мониторинга, как правило, пожарного извещателя. Это может быть параметр мониторинга температура газовой среды или оптическая плотность дыма в защищаемом системой помеще-

нии, взятые каждый в отдельности. В качестве информационных компонент данных систем выступают обычные пожарные извещатели. В свою очередь многопараметрические системы производят контроль сразу нескольких параметров пожара и в качестве информационных компонент данных систем выступают многопараметрические пожарные извещатели.

Рассматривая в качестве классификатора способ реализации мониторинга, разделяют дискретную систему мониторинга и систему непрерывного мониторинга. В основе первого вида систем лежит способ реализации дискретного мониторинга, представляющего собой вид наблюдения за состоянием пожара, осуществляемый в заданные моменты времени и имеющий конечное число значений состояний пожара. В альтернативном случае непрерывный мониторинг пожара обеспечивает потребителя результатов мониторинга поступлением информации о динамике пожара в виде непрерывно меняющейся свои значения функции [143].

## **1.6. Анализ подходов к разработке процедур поддержки управления**

Анализ структуры систем поддержки управления, применяемых для решения задач тушения пожаров, показал, что, помимо информационной составляющей (моделей оперативно-тактических действий), на правах подсистемы в систему входит аналитическая составляющая, обеспечивающая непосредственный выбор вариантов управления. Данные подсистемы рассматриваются ниже.

### **1.6.1. Принцип парето-оптимальности управленческих решений**

Многопараметрическая основа детерминированных моделей боевых действий пожарных подразделений определила непосредственную связь в системе поддержки управления моделей действий на этапе получения информации и многокритериальных моделей оптимизации управленческих решений. В общем случае многокритериальные модели оптимизации представляются в виде процедуры многокритериального выбора вариантов решений, которая включает в себя работу

с тремя основными элементами: множество вариантов ( $X=\{x_1, \dots, x_n\}$ ), векторный критерий ( $F=\{f_1, \dots, f_m\}$ ) и систему предпочтений ( $\Pi$ ). Поэтому проведем анализ подходов к решению процедур многокритериального выбора, применяемых в практике разработки систем поддержки управления. При анализе многокритериальных моделей выбора вариантов ограничимся понятиями оптимальности по Парето, так как множество вариантов представляет собой конечный набор, состоящий из  $n$  элементов. В этом случае понятия оптимальности по Борвейну и оптимальности по Парето совпадают [124–126].

Независимо от применения различных подходов к решению многокритериальных задач окончательный выбор всегда будет производиться среди эффективных вариантов – оптимальных по Парето [105–109]. Множество парето-оптимальных вариантов задается условием:

$$P_F(X)=\{x^* \in X \mid \text{не существует такого } x \in X, \text{ что } F(x) \geq F(x^*)\}, \quad (1.10)$$

где  $F=\{f_1, \dots, f_m\}$  – векторный критерий.

Интерпретировать данное условие необходимо следующим образом. Пусть  $x^*$  парето-оптимальный вариант и  $F(x^*)$  – векторная оценка варианта  $x^*$ . Если для любого  $x \in P_F(X)$ , отличного от  $x^*$ , выполняется неравенство:

$$f_i(x) > f_i(x^*), \quad (1.11)$$

то обязательно должна найтись хотя бы один компонент векторного критерия  $F$  с номером  $j$ , для которой верно

$$f_j(x^*) > f_j(x). \quad (1.12)$$

В общем случае могут найтись компоненты векторного критерия  $F$  с номером  $s$ , для которой выполняется равенство

$$f_s(x) = f_s(x^*). \quad (1.13)$$

Тогда анализируемые подходы к решению многокритериальных задач являются способами поиска наилучшего решения среди оптимальных по Парето. В свою очередь непарето-оптимальные варианты в задачах оптимизации рассматриваться не будут.



### 1.6.2. Свертка векторного критерия

Одним из наиболее распространенных подходов к поддержке принятия решений в задачах, связанных с управлением при тушении пожаров, включая мероприятия, направленные на обеспечение безопасности людей при тушении пожаров, является подход, основанный на сведении многокритериальной задачи к однокритериальной. При этом в качестве теоретической основы данного подхода выступают теорема Карлина и Гермейера [102, 126].

Теорема Карлина [109] утверждает следующее. Пусть множество вариантов управленческих решений  $X \subset R^n$  удовлетворяет условию выпуклости, то есть для любых вариантов  $x', x'' \in X$  и  $\alpha \in [0, 1]$  вариант  $x \in X$ , где  $x = \alpha x' + (1 - \alpha)x''$ , а компоненты векторного критерия  $f_1, \dots, f_m$  вогнуты, то есть  $f(\alpha x' + (1 - \alpha)x'') \leq \alpha f(x') + (1 - \alpha)f(x'')$ , то для любой эффективной точки  $x^0$  достигается максимум функции  $\Phi(x) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x)$ , где  $\lambda_i \geq 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ .

Ассортимент методов и их реализация в виде систем поддержки принятия решений достаточно широк, поэтому ограничимся анализом наиболее известных систем поддержки принятия решений и их методологических основ.

Система поддержки принятия решений при выборе ранга пожара [64, 227–230]. Формальное представление многокритериальной задачи предусматривает формирование набора множеств:

- множества рангов пожара  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ , где  $k$  – количество рангов;
- множество параметров, определяющих ранг пожара  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ ;
- множество значений данных параметров  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ .

При отнесении значений  $f(x)$  к классу ранга пожара  $p$  используется функция

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i f_i(x), \quad (1.14)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициенты, пропорциональные вкладу  $i$ -го критерия в оценку объекта при отнесении его к конкретному рангу пожара.

Система поддержки управления эвакуацией людей из зданий при пожаре [142]. В качестве модели многокритериального выбора маршрутов движения авторы использовали метрику евклидова пространства [277, 278]:

$$\varphi = \langle a; b; l \rangle, \quad a, b, l \in (0, 1], \quad (1.15)$$

где  $a$  – показатель величины плотности людского потока;  $b$  – показатель динамики опасных факторов пожара;  $l$  – показатель протяженности маршрутов движения.

В многокритериальной задаче каждый возможный вариант движения людей при эвакуации по маршрутам  $x$  характеризуется трехмерной векторной оценкой  $x \Rightarrow \{a(x), b(x), l(x)\}$ . Наиболее безопасным (наилучшим) участком маршрута движения является участок  $x$ , имеющий минимальное значение, определяемое с использованием функции

$$\varphi(x_i) = \left( \alpha a(x_i)^2 + \beta b(x_i)^2 + \gamma l(x_i)^2 \right)^{1/2}, \quad (1.16)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – коэффициенты важности показателей  $a, b, l$ ;  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .

Легко доказать, что данная модель соответствует теореме Карлина. Для этого заменим  $\varphi^2(x_j) = \Phi(x_j)$ ;  $a^2(x_j) = f_1(x_j)$ ;  $b^2(x_j) = f_2(x_j)$ ;  $l^2(x_j) = f_3(x_j)$ ;  $\alpha = \lambda_1$ ;  $\beta = \lambda_2$ ;  $\gamma = \lambda_3$ , тогда окончательно получим

$$\Phi(x_j) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i f_i(x_j). \quad (1.17)$$

Таким образом, многокритериальный выбор в данной системе поддержки управления основан на теоретической модели, сформулированной Карлиным.

В работе [148] предложено использовать аналогичный метод расчета «весовых» коэффициентов при решении задачи выбора лучшего варианта использования пожарных подразделений при ликвидации чрезвычайных ситуаций, вызванных природными пожарами. Особенностью модели по сравнению с моделью из работы [169] является использование в виде обобщенного критерия мультипликативной функции:

$$\Phi(x) = \prod_{i=1}^M f_i(x)^{\omega_i}, \quad (1.18)$$

где  $f_i$  – критерий результативность действий пожарных подразделений;  $\omega_i$  – весовой коэффициент важности.

Результативность действий пожарных подразделений оценивается с помощью программного комплекса [148] и задается множеством параметров

$$f_i = \langle v_p, Q, V_{\text{ликв}}, N_{\text{л/с}}, N_{\text{ств}}, N_{\text{ПА}} \rangle, \quad (1.19)$$

где  $v_p$  – линейная скорость распространения природного пожара, м·мин<sup>-1</sup>;  $Q$  – расход огнетушащего вещества, л·мин<sup>-1</sup>;  $V_{\text{ликв}}$  – прогнозируемая скорость ликвидации природного пожара, м·мин<sup>-1</sup>;  $N_{\text{л/с}}$  – количество личного состава пожарных подразделений;  $N_{\text{ств}}$  – количество задействованных приборов подачи огнетушащих веществ;  $N_{\text{ПА}}$  – количество мобильных средств пожаротушения.

В данной системе поддержки управления при многокритериальном выборе используется теорема Карлина. Для доказательства данного утверждения достаточно произвести над функцией  $\Phi(x) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x)$  простейшие преобразования и представить ее в мультипликативном виде [103]:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x') \geq \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) \Leftrightarrow \ln \prod_{i=1}^m f_i^{\lambda_i}(x') \geq \ln \prod_{i=1}^m f_i^{\lambda_i}(x) \Leftrightarrow \prod_{i=1}^m f_i^{\lambda_i}(x') \geq \prod_{i=1}^m f_i^{\lambda_i}(x).$$

Однако теорема Карлина имеет ограничения, связанные с выпуклостью множества вариантов и вогнутостью компонентов векторного критерия. Для проверки данных свойств элементов модели используется теорема Гермейера.

Теорема Гермейера [169] утверждает следующее. Если  $x^0$  – парето-оптимальный вариант решения и значения оценок данного варианта по каждой компоненте векторного критерия положительны  $f_i(x^0) > 0$   $i = 1, \dots, m$ , тогда найдутся такие параметры  $\lambda_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ , доставляющие максимум функции

$$\Phi(x) = \min_{1 \leq i \leq m} \lambda_i f_i(x).$$

На основе данной теоремы разработана система поддержки принятия решений о высылке сил и средств пожарных подразделений к месту вызова [57, 243]. Многокритериальная модель высылки сил и средств включала в себя следующие характеристики «городской среды». Функция комплексного критерия имеет вид

$$H(x, y, \xi) = \min \left( \frac{t_l^i w_c^i \xi}{c^i + w_t^l} \right), \quad (1.20)$$

где:  $t_1^i$  - время прибытия подразделений  $i$  на место происшествия  $l$ ;  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$  - коэффициенты состояний среды  $\xi_i \geq 0$ ;  $\sum_{i=1}^m \xi_i = 1$ ;  $c_1^j, c_2^j, \dots, c_m^j$  - относительный показатель наличия техники  $j$ -го типа;  $w_t^l$  - коэффициент важности по критерию времени следования  $w_t^l \in [0;1]$ ;  $w_c^i$  - коэффициент важности техники в  $i$ -м подразделении  $w_c^i \in [0;1]$ .

Проведенный анализ показал, что основные системы поддержки управления и теоретические модели многокритериального выбора базируются на теоретических основах теории многокритериальной оптимизации.

### 1.6.3. Модификация векторного критерия

Модификация критериев выбора основана на замене исходного векторного критерия  $F$  на новый векторный критерий  $G$  с учетом показателей относительной важности. Данный подход основан на свойстве векторных оценок парето-оптимальных вариантов управленческих решений.

Рассмотрим произвольные оценки двух парето-оптимальных вариантов  $f_1(x'), \dots, f_m(x')$  и  $f_1(x''), \dots, f_m(x'')$ . По определению множества Парето [109] должны найтись два непустых множества номеров компонент векторного критерия  $I_A, I_B \in I = \{1, 2, \dots, m\}$  таких, что

$$f_i(x') > f_i(x''), \forall i \in I_A; f_j(x') < f_j(x''), \forall j \in I_B; f_s(x') = f_s(x''), \forall s \in I \setminus (I_A \cup I_B).$$

В качестве теоретической основы для методов многокритериального выбора в рамках данного подхода выступает теорема, сформулированная В.Д. Ногиним и В.В. Подиновским [105–110].

Теорема Ногина-Поддиновского [109] утверждает следующее. Пусть известно, что  $x' \succ x''$  и отношение предпочтения  $P$  удовлетворяет аксиоматической модели. Тогда для любого множества выбранных вариантов  $C(X)$  справедливо включение

$$C(X) \subset P_g(X) \subset P_f(X), \quad (1.21)$$

где  $P_f(X)$  – парето-оптимальные варианты по критерию  $f_1, \dots, f_m$ ;  $P_g(X)$  – парето-оптимальные варианты по критерию  $g_1, \dots, g_p$ .

Векторный критерий  $g$  может быть образован из функций  $f_1, \dots, f_m$ . Для этого используются преобразования В.Д. Ногина и В.В. Поддиновского.

Преобразование В.Д. Ногина [109]. Данное преобразование предусматривает модификацию исходного векторного критерия в новый по формулам:

$$f_i \quad \forall i \in I \setminus I_B, \quad g_{ij} = \theta_{ij} f_i + (1 - \theta_{ij}) f_j \quad \forall i \in I_A, j \in I_B. \quad (1.22)$$

Преобразование В.В. Поддиновского [109] сводится к следующему

$$f_i \quad \forall i \in I \setminus I_B, \quad g_0 = \min_{i \in I_A} \frac{f_i}{w_i} + \min_{j \in I_B} \frac{f_j}{w_j}. \quad (1.23)$$

В формулах используются показатели важности, которые определены следующим образом на основе предпочтения  $x' \succ x''$ :

$$w_i = f_i(x') - f_i(x'') > 0 \quad (\forall i \in I_A); \quad w_j = f_j(x'') - f_j(x') > 0 \quad (\forall j \in I_B). \quad (1.24)$$

Нормированная шкала относительной важности критериев

$$\theta_{ij} = \frac{1}{1 + (w_i / w_j)} \quad (\forall i \in I_A, j \in I_B). \quad (1.25)$$

С использованием теории эквивалентности [124, 126] представляется возможным представить преобразование Ногина В.Д. в мультипликативной форме следующим образом

$$f_i \quad \forall i \in I \setminus I_B, \quad g_{ij} = f_i^{\bar{\theta}_{ij}} \cdot f_j^{1-\bar{\theta}_{ij}} \quad \forall i \in I_A, j \in I_B, \quad (1.26)$$

где  $\bar{\theta}_{ij} = \frac{1}{1 + \log_{\bar{w}_j} \bar{w}_i}$  ( $\forall i \in I_A, j \in I_B$ ) – логарифмический аналог нормированной

шкалы относительной важности критериев;

$$\bar{w}_i = \frac{f_i(x')}{f_i(x'')} > 1 (\forall i \in I_A), \quad \bar{w}_j = \frac{f_j(x'')}{f_j(x')} > 1 (\forall j \in I_B) \quad \text{– параметры выбора.}$$

В рамках данного подхода разработан аддитивный метод модификации векторного критерия для поиска наилучшего решения в системе поддержки принятия решений при тушении крупных пожаров [147].

#### 1.6.4. Комбинированные процедуры поддержки управления

В практике решения многокритериальных задач широкое применение получили комбинированные процедуры, основанные одновременно на модификации векторного критерия и свертке критериев выбора в обобщенную функцию.

Теоретической основой комбинированных процедур поддержки принятия решений выступают последние достижения в области многокритериальной оптимизации. В общем случае учет количественной важности критериев и его модификация с целью теоретико-множественного анализа вариантов решений во многих практических случаях недостаточен. Поэтому возникли и получили развитие комбинированные процедуры, предусматривающие сужение множества Парето и выбор варианта на основе сверток критериев. Для этого Ногиным В.Д. в работах [103, 104] доказана следующая теорема.

Пусть выполнены требования теоремы Ногина-Поддиновского и применен метод модификации векторного критерия  $F_m$  в векторный критерий  $G_p$  по Ногину и множество вариантов  $X \in R^n$  соответствует требованиям теоремы Карлина. Тогда для любого множества выбранных вариантов  $S(X)$  имеет место включение

*для аддитивного случая*

$$C(X) \subset \left\{ x^* \in X \mid \sum_{i=1}^p \lambda_i g_i(x^*) \geq \sum_{i=1}^p \lambda_i g_i(x) \right\}; \quad (1.27)$$

для мультипликативного случая

$$C(X) \subset \left\{ x^* \in X \mid \prod_{i=1}^p g_i^{\lambda_i}(x^*) \geq \prod_{i=1}^p g_i^{\lambda_i}(x) \right\}, \quad (1.28)$$

где вектор  $\lambda$  принимает значение в пределах  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_p) > 0$ ,  $\sum_{i=1}^p \lambda_i = 1$ .

В системе поддержки принятия решений по распределению пожарных подразделений по участкам тушения крупного пожара используется следующая многокритериальная задача, решаемая на основе аддитивного обобщенного критерия. Так, при расстановке  $N$  пожарных подразделений по  $M$  участкам ликвидации пожара получаем количество вариантов  $K=N \cdot M$ . Каждый вариант расстановки характеризуется векторной оценкой  $f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)\}$ . Выбор наилучшего варианта производится на основе значений аддитивной функции [169]

$$\Phi(x) = \sum_{s=1}^m \lambda_s f_s(x), \quad s = 1, 2, \dots, m, \quad (1.29)$$

где  $f_s$  – критерий эффективности ликвидации пожара на участке с номером  $s$ ;  $\lambda_s$  – коэффициенты важности критерия с номером  $s$ .

Для определения весовых показателей  $\lambda$  в работе [169] предлагается следующий метод. На первом этапе для частных критериев вводятся номера  $I = \{1, 2, \dots, m\}$ , с использованием которых критерии разбиваются по группам важности с номерами  $i$ , принадлежащими подмножеству номеров векторного критерия  $I_A$ , (тогда  $a$  – количество критериев с номерами  $i$ ), а также вводятся критерии с номерами  $j$ , принадлежащими подмножеству номеров векторного критерия  $I_B$  (тогда  $b$  – количество критериев с номерами  $j$ ).

На втором этапе выявляется набор нормированных показателей относительной важности критериев  $\theta_{ij}$  для всех  $i \in I_A, j \in I_B$ .

На третьем этапе рассчитывается набор положительных параметров  $\omega_s$ ,  $s = 1, 2, \dots, m$ , характеризующих важность решаемых задач на участках тушения пожара с учетом требований нормировки  $\sum_{s=1}^m \lambda_s = 1$ .

Коэффициенты  $\omega_s$  вычисляются по формулам:

– для каждого критерия с номером  $i \in I_A$  (группа  $A$ ):

$$\lambda_i = \frac{1 + \Theta_i}{a \cdot (1 + b)}, \quad (1.30)$$

где  $\Theta_i = \sum_j \theta_{ij}$ ,  $\forall j \in I_B$ ;

– для каждого критерия с номером  $j \in I_B$  (группа  $B$ ):

$$\lambda_j = \frac{a - \Theta_j}{a \cdot (1 + b)}, \quad (1.31)$$

где  $\Theta_j = \sum_i \theta_{ij}$ ,  $\forall i \in I_A$ .

В данной модели поддержки принятия решений при формализации задачи многокритериального выбора одновременно используется теория относительной важности критериев в совокупности с преобразованием Ногина и линейная свертка критериев по Карлину.

Таким образом, анализ подходов к решению многокритериальных задач оптимизации управленческих решений, применяемых в системах поддержки управления пожарными подразделениями показал, что в качестве критериев для принятия решений в созданных системах поддержки управления используются результаты математического моделирования действий пожарных подразделений, представленные в количественной форме в виде многопараметрических аддитивных и мультипликативных моделей. В свою очередь выбор вариантов управленческих решений основывается на понятиях оптимальности по Парето и прикладных теоремах Карлина, Ю.Б. Гермейера, В.Д. Ногина и В.В. Подиновского.

Исходя из проведенного анализа специфики управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях с применением систем поддержки



управления и результатов мониторинга динамики пожара для доказательства основной теоретической гипотезы исследования необходимо:

– разработать метод и модель мониторинга пожара в здании для возможности использования результатов мониторинга в процессе управления пожарными подразделениями. Для этого необходима разработка модели, позволяющей в количественной форме применять результаты мониторинга в процессе поддержки принятия решений в совокупности с результатами математического моделирования действий по тушению пожаров;

– разработать совокупность моделей многокритериального анализа управленческих решений и метод поддержки принятия решений на основе результатов мониторинга пожара. Решение данной задачи основывается на теоретическом обобщении моделей многокритериальной оптимизации управленческих решений с использованием оптимальности по Парето;

– апробировать многокритериальные модели, методы и алгоритмы поддержки принятия решений, для чего необходимо произвести постановку, формализацию и решение частных задач управления пожарными подразделениями с применением результатов мониторинга динамики пожара в здании;

– разработать систему и программно-аппаратный комплекс поддержки управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в здании. При разработке системы учитывать перечень требований, предъявляемых к информационным системам поддержки управления, а также выполнить моделирование системы для развития навыков практического использования системы;

– провести комплексную оценку эффективности применения системы поддержки управления на основе результатов мониторинга пожара при управлении пожарными подразделениями. Для решения данной задачи исследования необходимо разработать процедуру комплексной оценки эффективности и критерии эффективности применения системы поддержки управления.

## Выводы по главе 1

В результате исследования, проведенного в первой главе диссертации, получены следующие основные выводы.

1. Анализ обстановки с пожарами в зданиях России показал, что наблюдается тенденция увеличения площади зданий, вводимых в эксплуатацию ежегодно на 7-10 %. Крупные пожары в зданиях наносят колоссальный ущерб государству, измеряемый миллиардами рублей ежегодно. Пожары в зданиях представляют особую опасность для пожарных, так как их травмирование и гибель в основном наблюдается при тушении пожаров в зданиях.

Проведен анализ технической готовности систем противопожарной защиты зданий в части реализации функций обнаружения пожара. Показано, что относительный показатель технической готовности автоматической пожарной сигнализации увеличился более чем в два раза: с 0,42–0,44 (1993 г.) до 0,86–0,88 (2017 г.).

2. Определено, что одним из основных направлений повышения эффективности действий по тушению пожаров в зданиях является совершенствование управленческой деятельности путем внедрения методов поддержки управления, повышающих оперативность принимаемых управленческих решений. Выявлены два основных подхода к разработке методов поддержки управления: первый подход направлен на повышение эффективности деятельности руководителя тушения пожара; второй направлен на повышение эффективности взаимодействия должностных лиц оперативного штаба пожаротушения, создаваемого на пожаре.

3. Выполнен анализ структуры систем поддержки управления. Показано, что все существующие системы состоят из совокупности подсистем. Задачами каждой из подсистем являются сбор информации для принятия решений и ее аналитическая обработка с использованием процедур многокритериальной оптимизации. Определены требования к разработке систем поддержки управления, применяемых для повышения качества управления на начальном этапе тушения пожара.

4. Проведен анализ моделей действий пожарных подразделений, которые в настоящее время являются единственным источником информации для систем поддержки принятия решений. Определено, что основные детерминированные модели действий могут быть представлены в аддитивной форме.

5. Выполнен анализ систем мониторинга динамики пожара в здании. Показано, что современные системы мониторинга могут выступать в качестве информационной основы для систем поддержки принятия решений. Предложена классификация систем мониторинга и определены направления дальнейшего технического развития.

6. Проведен анализ моделей многокритериального выбора управленческих решений, выступающих в качестве теоретической основы для разработки методов поддержки принятия решений. Показано, что все модели базируются на понятии партео-оптимальности управленческих решений, а подходы к решению задач выбора сводятся к свертке векторного критерия или его модификации путем использования информации об относительной важности критериев. Проанализирована практика применения теорем Ю.Б. Гермейера, В.Д. Ногина, В.В. Подиновского при решении многокритериальных задач поддержки управления. Определена эволюция методов многокритериального выбора в комбинированные процедуры многокритериальной оптимизации.

7. Определен перечень задач, обеспечивающих решение, поставленной в диссертации научной проблемы: разработать модель мониторинга пожара в здании для возможности использования результатов мониторинга в процессе управления пожарными подразделениями; разработать совокупность моделей многокритериального анализа управленческих решений и метод поддержки принятия решений на основе результатов мониторинга пожара; разработать систему и программно-аппаратный комплекс поддержки управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в здании; провести оценку эффективности применения системы поддержки управления на основе результатов мониторинга пожара при управлении пожарными подразделениями.

## **ГЛАВА 2. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ЗДАНИИ**

В главе раскрыто основное содержание этапов разработки модели мониторинга и прогнозирования динамики пожара в здании для поддержки управления пожарными подразделениями. Основная задача разработки многопараметрической модели и методов мониторинга состоит в количественном представлении результатов мониторинга для их дальнейшего использования в многокритериальных моделях поддержки принятия решений. При разработке модели и методов рассмотрены общие положения о системах мониторинга, применение которых возможно для решения задач поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями, участвующими в ликвидации пожаров на начальных этапах их развития.

Проведен анализ существующих практических функций систем мониторинга динамики пожара в здании, на основе которого поставлены задачи для разработки методов мониторинга пожара. Проанализированы основные подходы к моделированию процесса мониторинга состояния пожара в здании и выбран подход, в наибольшей степени удовлетворяющий информационным потребностям должностных лиц, реализующих управление пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров в зданиях.

Предложены концептуальные идеи по разработке методов прогнозирования динамики параметров мониторинга пожара и рассмотрена концепция цифровой обработки результатов мониторинга с возможностью математического моделирования параметров мониторинга важных для управления, но не оцениваемых системой мониторинга

Сформированы предложения по цифровой обработке результатов мониторинга для случая размытых границ состояний пожара, используемых в классических системах пожарной автоматики.

## **2.1. Концепция мониторинга и прогнозирования динамики пожара**

Общая концепция мониторинга и прогнозирования динамики пожара сводится к реализации практических функций мониторинга, для чего создаются теоретические модели и методы. Поэтому анализ функций мониторинга является важным этапом при выборе теоретической основы для разработки модели мониторинга динамики пожара в здании.

### **2.1.1. Функции мониторинга динамики пожара**

Специфика реализации систем мониторинга зависит от его видов и специфики основных функций, а именно: сбор информации, получение прогнозов, оценка безопасности и оценка результативности [47,48].

Исходя из реализации одной или нескольких функций системы мониторинга подразделяются на монофункциональные и многофункциональные. Основные функции мониторинга динамики пожара в здании и системы, их реализующие.

Первой и основной функцией мониторинга является сбор информации о динамике пожара для целей управления техническими средствами пожарной автоматики, а также пожарными подразделениями [283–286, 309].

Система информационного мониторинга пожара предназначена только для сбора, обработки и хранения результатов мониторинга и обеспечивает констатацию состояния пожара в здании. Таким образом, данный вид систем мониторинга необходим для информационного обеспечения функций прогноза динамики параметров пожара и оценки критериев результативности действий по тушению пожара. В общем случае данные функции мониторинга выходят за границы задач, решаемых системой информационного мониторинга [311, 313].

Второй функцией мониторинга является контроль за результативностью технических систем пожарной автоматики и действий пожарно-спасательных подразделений. Контроль реализуется посредством анализа динамики параметров мониторинга пожара [315].

Система мониторинга результативности тушения пожара предназначена для оценки результатов действий по тушению пожара по заданным критериям результативности. В общем случае данный вид систем мониторинга обеспечивает потребителя результатов мониторинга данными, позволяющими сделать вывод о том, насколько эффективно участники тушения пожара выполняют или выполнили поставленные перед ними задачи [318].

Третья функция мониторинга определяет возможность оценки условий безопасной работы участников тушения пожара в процессе выполнения действий, направленных на локализацию и ликвидацию пожаров, а также спасание людей и имущества в здании при пожаре. Система мониторинга безопасности участников тушения пожара предназначена для наблюдения за изменением значений параметров безопасности участников тушения пожара, а также извещения потребителей результатов мониторинга о достижении параметров безопасности критических для участников тушения пожара значений. Данный вид систем относится к системе безопасности пожарных, которые в качестве критериев безопасности используют не только показатели физического состояния, но и параметры окружающей среды пожара – температуру, условия видимости [283, 286].

Для полной реализации функций мониторинга при выборе теоретической основы для разработки моделей и методов мониторинга необходимо:

- обеспечить применение результатов моделирования в режиме реального времени с учетом динамики пожара;
- выполнить моделирование процесса мониторинга динамики пожара в здании для проектирования систем и моделирования ее работы;
- произвести обработку результатов мониторинга с возможностью восполнения недостающих фрагментов данных, отсутствующих по техническим либо иным причинам;
- представить результаты мониторинга в количественной форме с учетом метрологического анализа информационных компонент систем пожарной автоматики.

### 2.1.2. Методы моделирования мониторинга динамики пожара

При разработке модели дистанционного мониторинга состояния пожара в здании необходимо произвести обоснованный выбор метода моделирования мониторинга пожара в здании. Для этого рассмотрим основные подходы моделирования мониторинга состояния пожара в здании: модель соответствия требуемым значениям; модель взаимодействия входных и выходных параметров; процессная модель мониторинга; динамическая модель мониторинга.

Метод оценки соответствия состояния – это один из наиболее распространенных методов мониторинга состояния пожара, основанный на системе принципов определения возникновения пожара на объекте, оборудованном системой мониторинга. На основе данного метода разрабатывается модель оценки состояния пожара в здании. Возникновение пожара в данной модели соответствует ситуации, когда один или несколько параметров, контролируемых системой мониторинга пожара, примет значение, превышающее заранее заданные критические значения. Например, если в качестве контролируемого параметра пожара рассмотреть температуру газовой среды с критическим значением  $t = 64$  °С, то в случае, если измерение данного параметра средством мониторинга превысит данное значение, система мониторинга трактует данное событие как пожар. Достоинством данной модели мониторинга является простота реализации, а недостатком – ограниченные возможности интерпретации результатов мониторинга.

Метод мониторинга пожара, построенный на принципе «вход – выход» – определяет в процесс мониторинга по схеме «черного ящика» и используется при моделировании изменения критических значений. Данный метод используется для средств мониторинга с функцией самодиагностики. На основе самодиагностики средства мониторинга самостоятельно изменяют критические значения контролируемого параметра пожара. Достоинством метода является повышенная объективность результатов мониторинга, недостатком – необходимость использования дополнительных цифровых моделей обработки результатов, существенно расширяющих диапазон допустимых значений контролируемого параметра.

Динамический метод моделирования мониторинга пожара подразумевает описание процесса изменения значений мониторинга пожара посредством систем дифференциальных уравнений. Модель мониторинга построена на основе метода предназначена для контроля как одного, так и нескольких параметров пожара. Процесс мониторинга состоит в том, что после достижения контролируемого параметра своего критического значения, средство мониторинга фиксирует это событие и продолжает непрерывное наблюдение за динамикой его значений, где каждому диапазону значений присваивается определенное число, соответствующее состоянию пожара. Достоинством данной модели мониторинга является большее чем одно контролируемое состояние пожара и возможность моделирования динамики нескольких контролируемых системой мониторинга параметров пожара. Недостатком данной модели является сложность реализации.

В целях теоретического обобщения существующих моделей необходимо произвести разработку аналитического способа моделирования динамики параметров пожара в процессе дистанционного мониторинга состояний пожара в помещении и здании в целом. При этом в качестве основы для теоретического обобщения будет рассмотрена модель клеточных автоматов и интегральный метод моделирования пожара в помещении [21–25, 253, 316, 317].

## **2.2. Модель мониторинга пожара на основе теории клеточных автоматов**

Модель клеточного автомата – это дискретная математическая модель, включающая в себя совокупность ячеек, каждая из которых на рассматриваемый дискретный момент времени может находиться в одном из многих состояний [316]. Множество возможных состояний клеток клеточного автомата счётно. Клетки клеточного автомата могут быть различной целочисленной размерности. В рассматриваемой компьютерной модели применение модели клеточного автомата необходимо для визуализации результатов работы систем мониторинга состояния пожара в здании. В такой постановке задачи работа системы мониторинга пред-



ставляется как процесс функционирования сложной динамической системы, внутренние процессы в которой описываются с помощью концепции «серый ящик». Процессы распространения дыма в компьютерной модели описываются системой дифференциальных уравнений, аналогичной модели «гибели-размножения» как частного случая записи системы уравнений Колмогорова. Эта замена обусловлена аналогией уравнений пожара в интегральной модели и системы уравнений А.Н. Колмогорова при определенных упрощениях и допущениях. Данная замена необходима, так как общая система уравнений интегральной модели пожара не имеет аналитического решения [66, 67].

*Описание модели «клеточный автомат»*

Каждая зона контроля с одним средством измерения системы мониторинга состояния пожара в здании представляется в виде ячейки клеточного автомата размерностью 3, 4 и 6 (рисунок 2.1) и с конечным числом состояний

$$\{B_0, B_1, \dots, B_k\}. \quad (2.1)$$

Каждому состоянию системы соответствует диапазон значений параметра пожара (оптической плотности дыма, температуры газовой среды)

$$\{p_0, p_1, \dots, p_k\}. \quad (2.2)$$

Система находится в состоянии  $S_i$ , если результат измерения  $p_k$  принадлежит интервалу  $p_k \in [p^1, p^2)$ . Проверка условия осуществляется для каждого дискретного момента времени. Таким образом, необходимо задать функцию, описывающую динамику контролируемого системой мониторинга параметра пожара, чтобы иметь возможность получения конкретного значения  $p_k$ .

При формировании записи уравнений, описывающих динамику параметра  $p$ , структуру взаимодействия клеток в модели удобно представить в виде ориентированного графа.

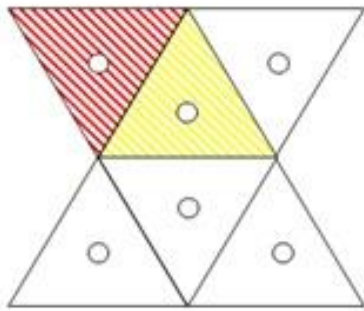
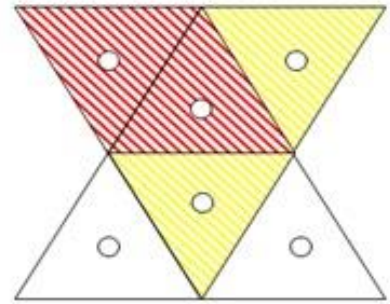
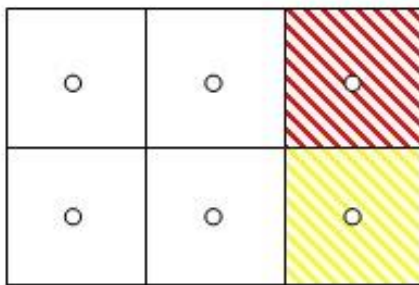
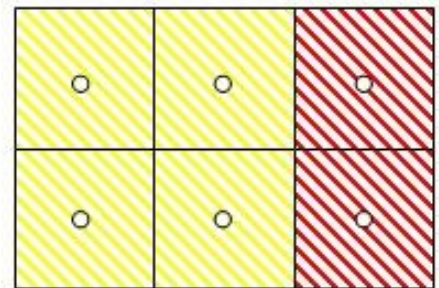
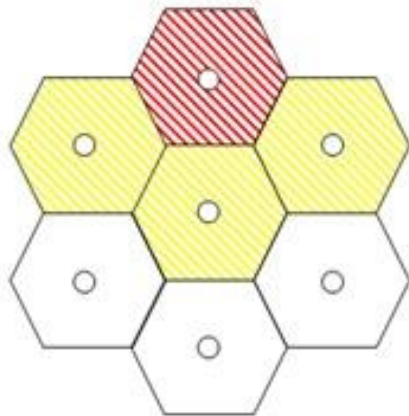
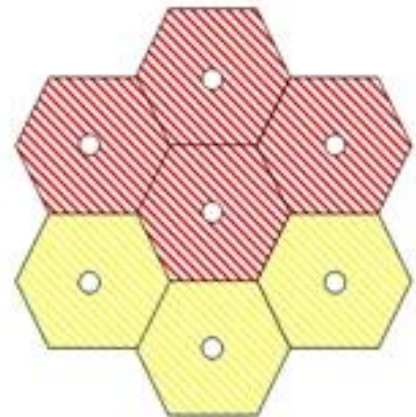
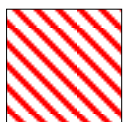
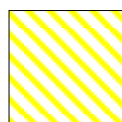
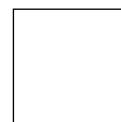
Размерность модели  $n = 3$  $\tau$  $\tau + \Delta\tau$ Размерность модели  $n = 4$  $\tau$  $\tau + \Delta\tau$ Размерность модели  $n = 6$  $\tau$  $\tau + \Delta\tau$  $B_2$  $B_1$  $B_0$ 

Рисунок 2.1 – Визуализация результатов работы модели «клеточный автомат»

### 2.2.1. Система уравнений динамики параметров мониторинга

Специфика мониторинга пожара в здании с использованием средств пожарной автоматики определяет деление общей площади мониторинга на зоны контроля и наблюдение за одним или несколькими параметрами пожара в каждой конкретной зоне. Результаты мониторинга представляют собой совокупность состояний наблюдаемого параметра в каждой конкретной зоне контроля. Принципиальная схема мониторинга и его иерархическая структура представлена на рисунке 2.2

Таким образом, специфика мониторинга пожара в здании позволяет заключить, что каждый конкретный вариант действий по тушению пожара в здании, основанный на результатах мониторинга, будет характеризоваться  $m$  показателями наблюдений, для каждого из которых получена векторная оценка для  $n$  зон контроля [143].

Для принятия решений на основе результатов многопараметрического мониторинга пожара необходимо иметь представление о динамике каждого из параметров мониторинга. Для получения такой информации в системе мониторинга пожара необходимо математическая модель, описывающая в первом приближении процесс изменения параметров мониторинга во времени. Концепция мониторинга пожара предусматривает разделение объекта мониторинга на зоны контроля и рассмотрение каждой из зон контроля в отдельности с учетом одновременного наблюдения за несколькими параметрами пожара. Поэтому оценка динамики параметров мониторинга возможна на основе теории клеточных автоматов, где совокупность зон и параметров контроля может быть описана системой дифференциальных уравнений [143].

Тогда каждая из зон контроля является отдельным объектом клеточного автомата с разделением по функциональным особенностям на начальную зону контроля, в которой интенсивность динамики параметра мониторинга имеет наибольшие значения, и смежные зоны контроля.

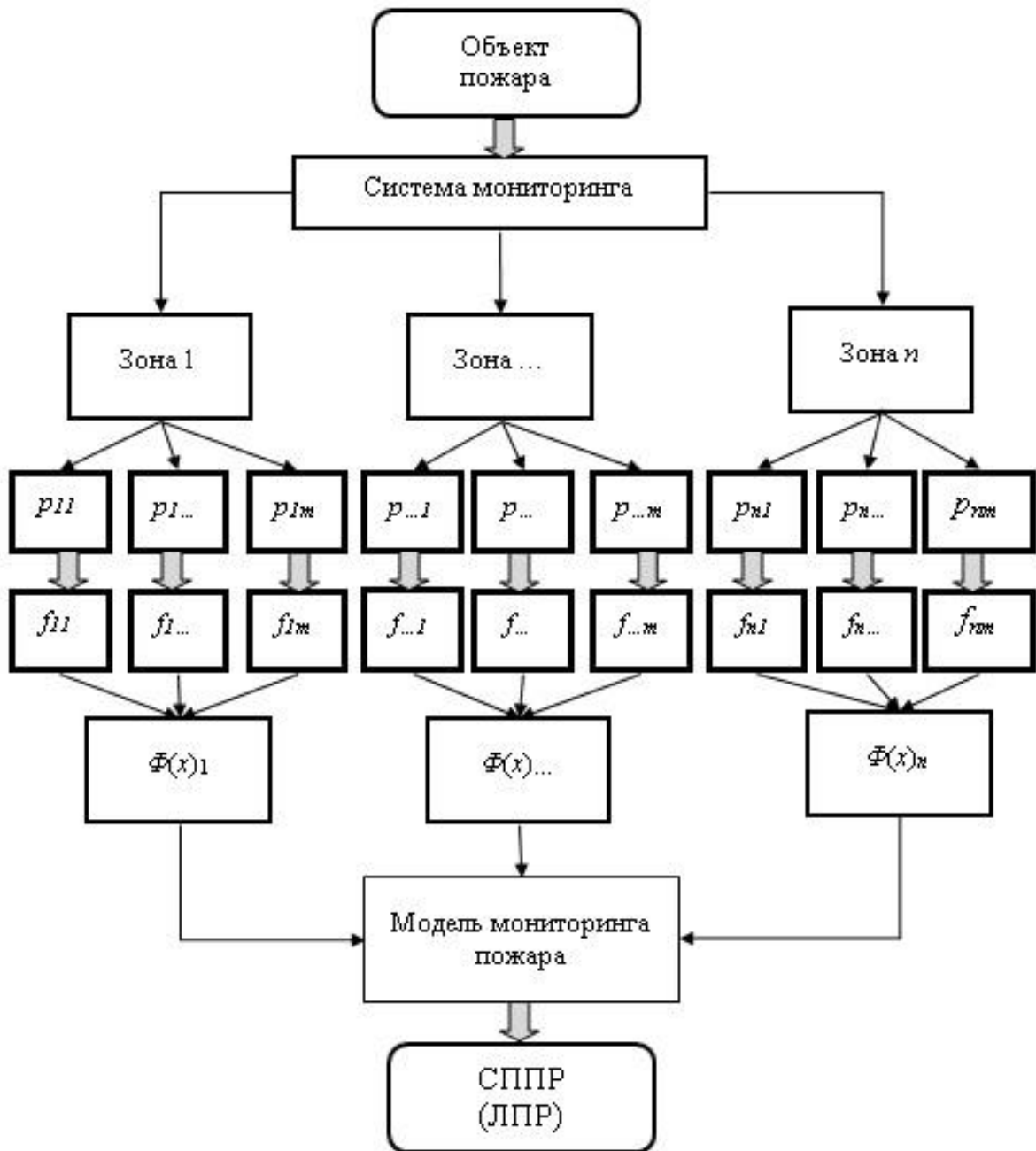


Рисунок 2.2 – Принципиальная применения результатов мониторинга пожара в системе поддержки принятия решений

На основе общего подхода к составлению уравнений состояния по А.Н. Колмогорову [66, 67] предлагается способ формирования системы уравнений динамики пожара для ячеек модели клеточного автомата (МКА) для общего случая, включающего возможность входа среды пожара в ячейку из нескольких соседних ячеек.

### *Этап 1. Формирование системы уравнений*

Для каждой ячейки клеточного автомата записывается отдельное уравнение. Система будет содержать столько уравнений, сколько ячеек содержит модель клеточного автомата.

### *Этап 2. Формирование дифференциального уравнения для ячейки*

2.1. Формирование левой части уравнения. Левая часть дифференциального уравнения состоит из производной параметра пожара по времени с индексом рассматриваемой ячейки.

2.2. Формирование правой части уравнения для ячеек, кроме начальной.

Правая часть уравнения представляет собой сумму положительных и отрицательных членов. Количество положительных членов равно количеству «входов» в рассматриваемую ячейку, количество отрицательных и положительных членов равны между собой. Каждый отрицательный член равен произведению коэффициента  $n$  с индексом ячейки, из которой производится «вход», и индексом рассматриваемой ячейки, на интенсивность нарастания параметра пожара с индексом рассматриваемой ячейки, а также значению параметра пожара в ячейке, из которой осуществляется «вход» в рассматриваемую ячейку модели клеточного автомата.

Набор отрицательных членов представляет собой совокупность всех положительных членов, у которых соответствующие параметры пожара заменены на безразмерный параметр пожара с индексом рассматриваемой ячейки.

Рассмотрим формирование правой части уравнения для начальной ячейки.

Для начальной ячейки правая часть уравнения представляет собой сумму положительного и отрицательного членов. Положительный член равен произведению порогового значения параметра пожара на интенсивность нарастания параметра пожара с индексом начальной ячейки. Отрицательный член равен произведению параметра пожара с номером начальной ячейки на интенсивность нарастания с тем же индексом.

Обобщая полученные результаты моделирования динамики параметров пожара в зонах контроля, сформируем общую систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_0}{d\tau} &= Z_0(\tau)p^* - Z_0(\tau)p_0; \\ \frac{dp_1}{d\tau} &= n_{0;1}Z_1(\tau)p_0 - n_{0;1}Z_1(\tau)p_1; \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dp_k}{d\tau} &= n_{(k-1);k}Z_k(\tau)p_{k-1} - n_{(k-1);k}Z_k(\tau)p_k. \end{aligned} \right. \quad (2.3)$$

где  $p_j$  – значение параметра пожара в зоне контроля с номером  $j$ ;  $p^*$  – пороговое значение параметра пожара;  $Z_j$  – интенсивность динамики параметра пожара в зоне с номером  $j$ ;  $\tau$  – время.

Решение системы уравнений относительно одной ячейки записывается следующим образом

$$p_j - p^0 = p_{j-1} \left[ 1 - \exp(-n_{j-1;j}Z_j) \right]. \quad (2.4)$$

Общее решение системы уравнений для дискретного случая записывается системой уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} p_0 - p^0 &= p^* [1 - \exp(-Z_0(\tau))]; \\ p_1 - p^0 &= p_0 [1 - \exp(-n_{0;1}Z_1(\tau))]; \\ &\dots\dots\dots \\ p_k - p^0 &= p_{k-1} [1 - \exp(-n_{(k-1);k}Z_k(\tau))] \end{aligned} \right. \quad (2.5)$$

При использовании системы решений (2.5) для моделирования динамики параметров пожара используются следующие значения для функции  $p$ :

– при моделировании динамики температуры ( $T$ ) в зонах контроля:

$$p = \beta, \quad p_0 = \beta_0 = 1, \quad p^* = \beta^*, \quad T = \frac{T^0}{\beta}; \quad (2.6)$$

– при моделировании динамики видимости ( $\Omega$ ) в зонах контроля:

$$p = \xi, \quad p_0 = \xi_0 = 0, \quad p^* = \xi^*, \quad \Omega = \frac{\Omega_0}{\xi}. \quad (2.7)$$

Рассмотренная система уравнений позволяет в первом приближении описать динамику параметров среды при пожаре в здании только для случая каскадного расположения зон контроля – ячеек клеточного автомата, представленной на рисунке 2.3.

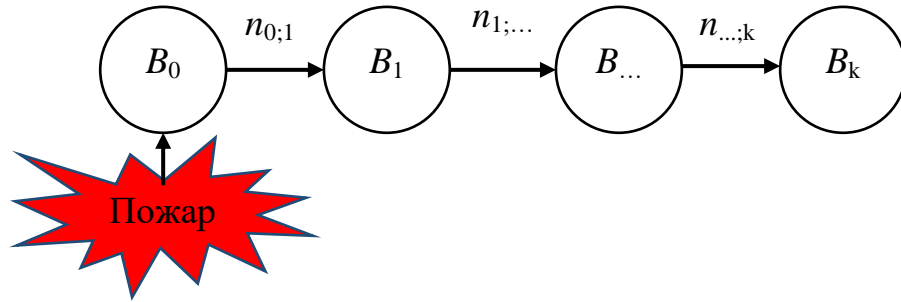


Рисунок 2.3 – Графовая модель мониторинга клеточных автоматов

В случае если в ячейку входит среда из нескольких соседних ячеек, то система уравнений и ее решение не применимы. Это накладывает определенные ограничения на процесс моделирования динамики параметров пожара в ячейках модели клеточных автоматов.

### 2.2.2. Аналитические решения системы уравнений

Произведем аналитическое решение системы уравнений мониторинга для общего случая моделирования динамики пожара в здании для модели клеточных автоматов. Для этого рассмотрим применение метода для ячеек, изображенных на рисунке 2.4, которые являются элементами ориентированного графа соответствующего модели клеточного автомата.

Запишем дифференциальное уравнение для клетки с номером 0, изображенной на рисунке 2.4, а):

$$\frac{dp_0}{d\tau} = Z_0(\tau)p^* - Z_0(\tau)p_0. \quad (2.8)$$

Анализируя дифференциальное уравнение, можно заключить, что газовая среда очага пожара, модель которой по истечении определенного времени полностью удаляется из ячейки в соседние смежные ячейки.

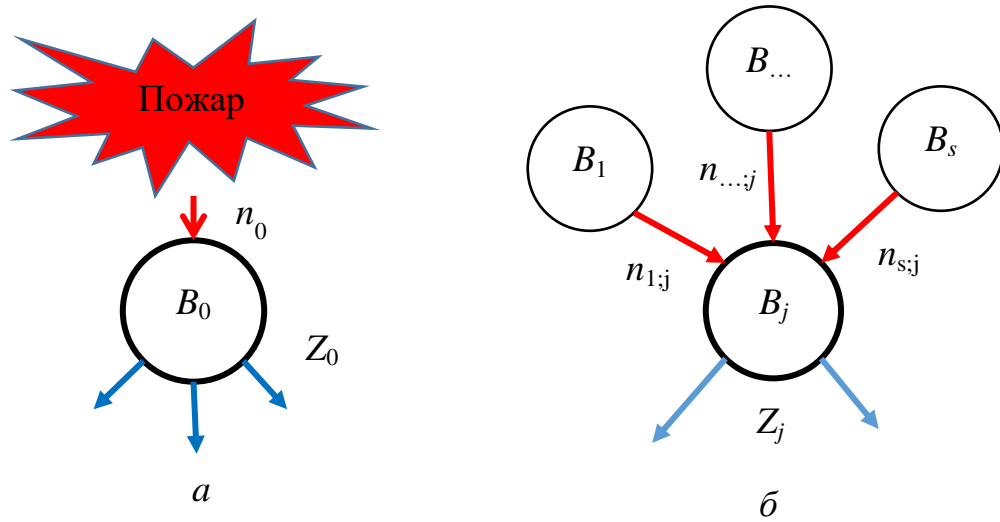


Рисунок 2.4 – Элементы ориентированного графа

Для ячейки, изображенной на рисунке 2.4, б, уравнение, описывающее динамику параметра пожара, записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dp_j}{d\tau} = & Z_j(\tau)n_{1;j}p_i + Z_j(\tau)n_{...;j}p_{...} + Z_j(\tau)n_{s;j}p_s - \\ & - Z_j(\tau)n_{1;j}p_j - Z_j(\tau)n_{...;j}p_j - Z_j(\tau)n_{s;j}p_j. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Анализируя выражение (2.9), очевидно, что в левой части уравнения находится производная параметра пожара по времени, а в правой части уравнения находится  $s$  положительных членов и  $s$  отрицательных членов.

Сокращенно выражение (2.9) записывается следующим образом:

$$\frac{dp_j}{d\tau} = Z_j(\tau) \sum_{i=1, \dots, s} n_{i;j} p_i - Z_{j0}(\tau) \sum_{i=1, \dots, s} n_{i;j} p_j. \quad (2.10)$$

Приближенная оценка динамики параметра пожара для ячейки, изображенной на рисунке 2.4 а, записывается так:

$$p_0 - p^0 = p^* [1 - \exp(-Z_0(\tau))]. \quad (2.11)$$

В свою очередь, аналитическое решение для ячейки (рисунок 2.4 б) произведено методом Ньютона с допущениями, аналогичными системе уравнений (2.3).



Таким образом функция, описывающая динамику параметра пожара в ячейке клеточного автомата с номером  $j$ , записывается следующим образом:

$$p_j(\tau) - p^0 = \frac{\sum_{i=1, \dots, s} n_{i;j} p_i(\tau)}{\sum_{i=1, \dots, s} n_{i;j}} \left[ 1 - \exp \left( -Z_j(\tau) \cdot \sum_{i=1, \dots, s} n_{i;j} \right) \right], \quad (2.12)$$

где  $s$  – количество входящих в ячейку связей.

В формуле (2.12) имеется коэффициент  $n$ . Рассчитать данный коэффициент можно на примере клетки клеточного автомата с размерностью 4. Допустимые значения коэффициента  $n$  определяются по формуле

$$n = \frac{1}{\sum_{j=1, 2, \dots, k} n_j}, \quad (2.13)$$

где  $n_j$  – коэффициент  $n$  для клеток окрестности,  $k$  – количество клеток окрестности. То есть, для размерности  $n=4$  получаем множество значений  $n = (1/1) 1, (1/2) 0,5, (1/3) 0,33$  и  $(1/4) 0,25$ . При этом сумма  $n$  для клетки должна быть не более 1. Например, для клеток с размерностью  $n = 4$  расчет коэффициентов показан на рисунке 2.5. Коэффициент  $n$  принимается равным:  $n = 1$ , если газовая среда из основной клетки переходит полностью в смежную (рисунок 2.5, а):  $n = 0,5$  если половина газовой среды переходит в смежную клетку, например, при оценке динамики состояния пожара в коридоре, когда клетка очага пожара не является тупиковой (рисунок 2.5, б). Константы  $n$  для расчета параметров  $Z$  изображены на рисунке 2.5.

Разработанная модель динамики параметров мониторинга пожара с использованием совокупности теоретических основ клеточных автоматов и уравнений динамики состояний А.Н. Колмогорова [66, 67] является базисным научным результатом для разработки методов прогнозирования, обработки и моделирования результатов мониторинга пожара в здании.

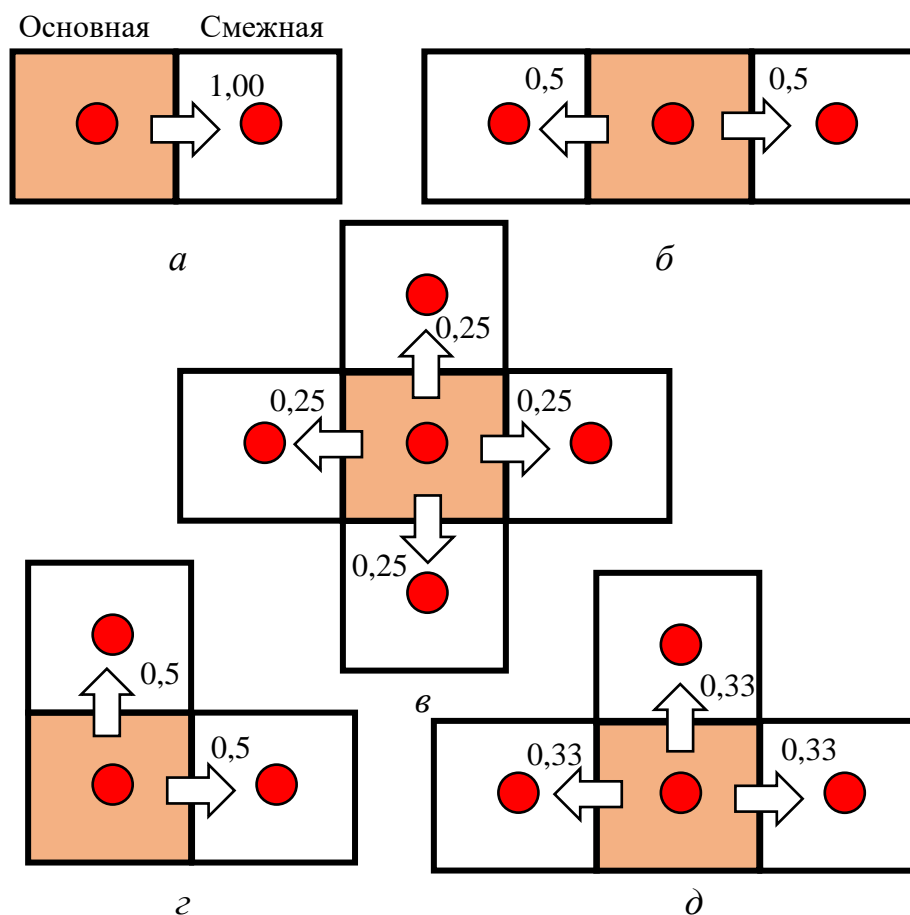


Рисунок 2.5 – Иллюстрация взаимодействия клеток автомата

### 2.3. Метод моделирования динамики параметров мониторинга пожара

Прогнозирование динамики параметров является одной из важнейших функций системы мониторинга. На основе прогнозирования решается комплекс задач адаптивного проектирования системы мониторинга с учетом условий ее практической эксплуатации. В качестве теоретической основы метода прогнозирования используется модель клеточных автоматов в совокупности с аналитическими решениями системы уравнений мониторинга пожара. Особую роль метод прогнозирования играет в процессе подготовки сотрудников противопожарной службы при использовании результатов мониторинга в практической деятельности, связанной с принятием управленческих решений.

### 2.3.1. Структура метода моделирования мониторинга пожара

Метод прогнозирования динамики параметров мониторинга представляет собой последовательную реализацию этапов моделирования параметров мониторинга, замкнутую в цикл. Динамика параметров мониторинга определяется на основе анализа взаимодействия зон контроля системы мониторинга. Таким образом, метод прогнозирования состоит из двух основных этапов: анализ структуры модели клеточных автоматов; моделирование динамики параметров мониторинга [143].

На первом этапе метода определяется основная зона контроля и смежные с основной зоны, строится совокупность аналитических решений системы уравнений клеточных автоматов, и для каждого дискретного момента времени определяются следующие параметры: интенсивность динамики пожара  $Z$  и количественные значения общего параметра мониторинга  $p(\tau)$ .

На втором этапе метода с использованием зависимостей (2.4) и (2.5) на основе общего параметра мониторинга  $p(\tau)$  определяются значения функций параметров ( $\xi$ ,  $\beta$ ) и значения самих параметров мониторинга ( $T$ ,  $\Omega$ ).

Цикличность процесса прогнозирования позволяет, изменяя значения интенсивности динамики параметра  $Z$  во времени, производиться прогноз значений параметров мониторинга ( $T$ ,  $\Omega$ ).

Общая структура метода прогнозирования динамики параметров мониторинга пожара представлена на рисунке 2.6.

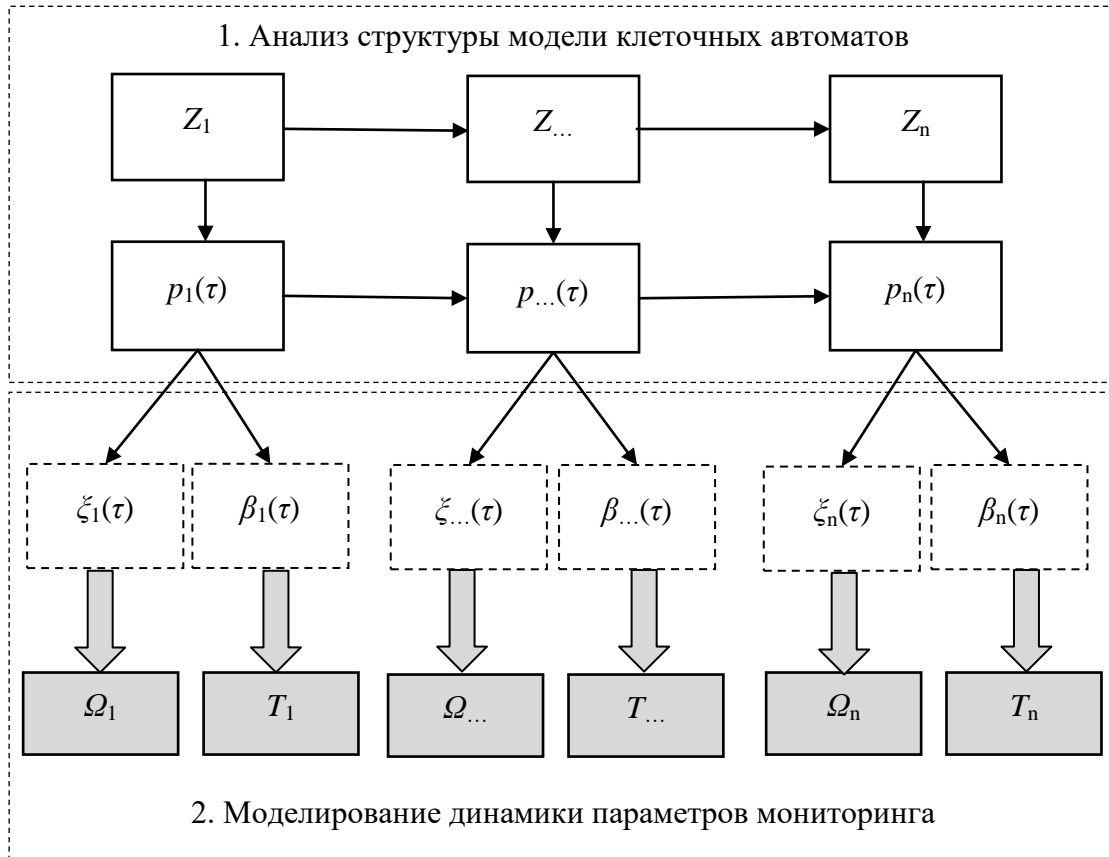


Рисунок 2.6. – Структура метода моделирования динамики параметров мониторинга пожара

### 2.3.2. Содержание метода моделирования мониторинга пожара

Каждый из этапов метода прогнозирования включает в себя вычислительные операции, связанные с определением количественных значений параметров клеточной модели мониторинга.

Для начала прогнозирования динамики параметров мониторинга необходимо задать функцию времени, оценивающую динамику пожара в здании  $Z(\tau)$ .

Анализ структуры клеточного автомата позволяет определить функцию общего показателя мониторинга пожара для зон контроля с номерами  $i$  по формуле

$$p_i - p^0 = p_{i-1} [1 - \exp(-n_{i-1,i} Z_i(\tau))] \quad (2.14)$$

Затем для каждой  $i$ -й зоны контроля необходимо на основе общего параметра мониторинга определить функции частных параметров мониторинга. Для расчета температуры используются следующие значения параметра  $p$ :

$$p = \beta, \quad p^0 = \beta^0 = 1, \quad p^* = \beta^*. \quad (2.15)$$

Функция динамики температуры записывается следующим образом:

$$\beta_i(\tau) - 1 = \beta_{i-1}(\tau) [1 - \exp(-n_{i-1,i} Z_i(\tau))] \rightarrow T_i = \frac{T^0}{\beta_i}, \text{ К.} \quad (2.16)$$

Для расчета видимости в дыму используются значения параметра  $p$ :

$$p = \xi \text{ (Нп} \cdot \text{м}^{-1}), \quad p^* = \xi^* \text{ (Нп} \cdot \text{м}^{-1}), \quad \Omega = \frac{\Omega_0}{\xi}, \text{ (м)}. \quad (2.17)$$

Функция динамики видимости в дыму определяется так:

$$\xi_i(\tau) = \xi_{i-1} [1 - \exp(-n_{i-1,i} Z_i(\tau))] \rightarrow \Omega_i = \frac{\Omega_0}{\mu_i}. \quad (2.18)$$

Последовательно в зависимости от номера  $i$  рассчитывают значения параметров пожара:

$$\beta_i(\tau), \quad T_i, \quad \xi_i(\tau), \quad \Omega_i(\tau). \quad (2.20)$$

Результат расчета представляется в виде графиков параметров мониторинга пожара от времени.

Рассмотренная совокупность зон контроля системы мониторинга температуры газовой среды в помещении при пожаре, структура взаимодействия зон контроля и соответствующая им модель клеточных автоматов представлены на рисунке 2.7. Необходимо произвести прогноз динамики температуры газовой среды и условий видимости в каждой зоне контроля системы мониторинга.

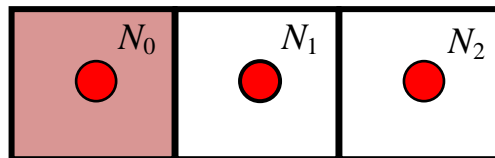


Рисунок 2.7 – Модель клеточных автоматов системы мониторинга

Построим для данной совокупности зон контроля графовую модель, учитывающую специфику распространения продуктов горения между зонами контроля системы мониторинга. Результаты графового анализа модели представлены на рисунке 2.8.

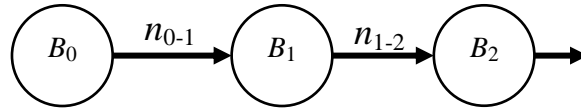


Рисунок 2.8 – Графовая модель системы мониторинга

Результаты анализа графовой модели с использованием функции общего параметра мониторинга и частных параметров ( $T$ ,  $\Omega$ ) даны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Функции параметров мониторинга

№	Функции параметров мониторинга	Параметры мониторинга
Зона контроля $N_1$	$p_1 - p_0 = p^* [1 - \exp(-Z(\tau))]$	
	$\beta_1(\tau) - 1 = 0,4 [1 - \exp(-0,001 \cdot \tau)]$	$T_1 = \frac{T_0}{\beta_1}$
	$\xi_1(\tau) = 4 [1 - \exp(-0,001 \cdot \tau)]$	$\Omega_1 = \frac{\Omega}{\xi_1}$
Зона контроля $N_2$	$p_2 - p_0 = p_1 [1 - \exp(-n_{1,2} Z_0(\tau))];$	
	$\beta_2(\tau) - 1 = \beta_1(\tau) [1 - \exp(-0,0005 \cdot \tau)]$	$T_2 = \frac{T_0}{\beta_2}$
	$\xi_2(\tau) = \xi_1(\tau) [1 - \exp(-0,0005 \cdot \tau)]$	$\Omega_2 = \frac{\Omega}{\xi_2}$
Зона контроля $N_3$	$p_3 - p_0 = p_2 [1 - \exp(-n_{2,3} Z(\tau))].$	
	$\beta_3(\tau) - 1 = \beta_2(\tau) [1 - \exp(-0,0005 \cdot \tau)]$	$T_3 = \frac{T^0}{\beta_3}$
	$\xi_3(\tau) = \xi_2(\tau) [1 - \exp(-0,0005 \cdot \tau)]$	$\Omega_3 = \frac{\Omega}{\xi_3}$

Результаты прогнозирования динамики параметров мониторинга определены при исходных данных:  $\beta^* = 0,4$ ;  $T^* = 750\text{K}$ ;  $\xi^* = 4,0 \text{ Нп} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $\Omega^* = 1 \text{ м}$ .

Динамика значений функций ( $\beta$ ,  $\xi$ ), а также динамика параметров мониторинга ( $T$ ,  $\Omega$ ) представлены на рисунках 2.9–2.12 соответственно.

Разработанный метод позволяет на основе значений интенсивности динамики пожара, которая может быть определена, исходя из анализа темпа роста пожара, оценить динамику и осуществить прогноз количественных значений параметров мониторинга. Специфика реализации метода как циклической вычислительной процедуры подразумевает его использование в виде алгоритмов, реализованных на ЭВМ. При этом расчет аналитических зависимостей для модели клеточных автоматов без использования численных процедур определяет экономию машинного времени, что позволяет использовать метод при оценке динамики параметров мониторинга в режиме реального времени с целью цифровой обработке результатов мониторинга.

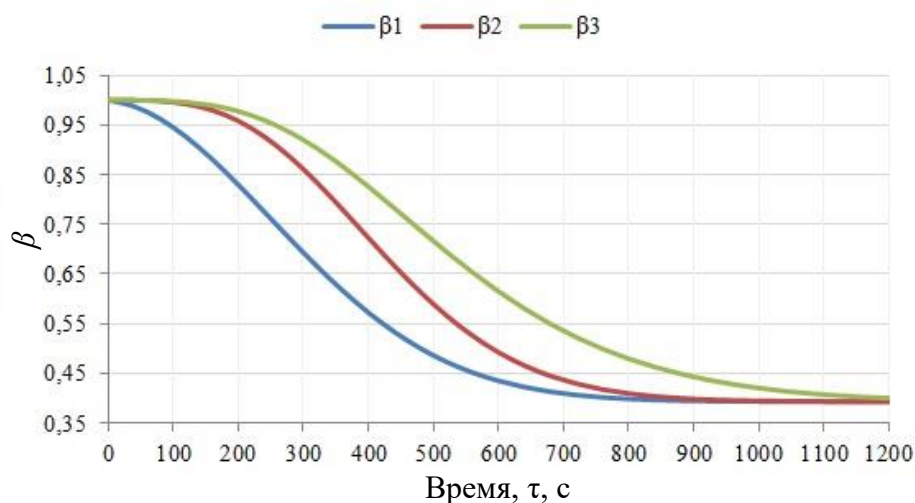


Рисунок 2.9 – Динамика функции  $\beta$

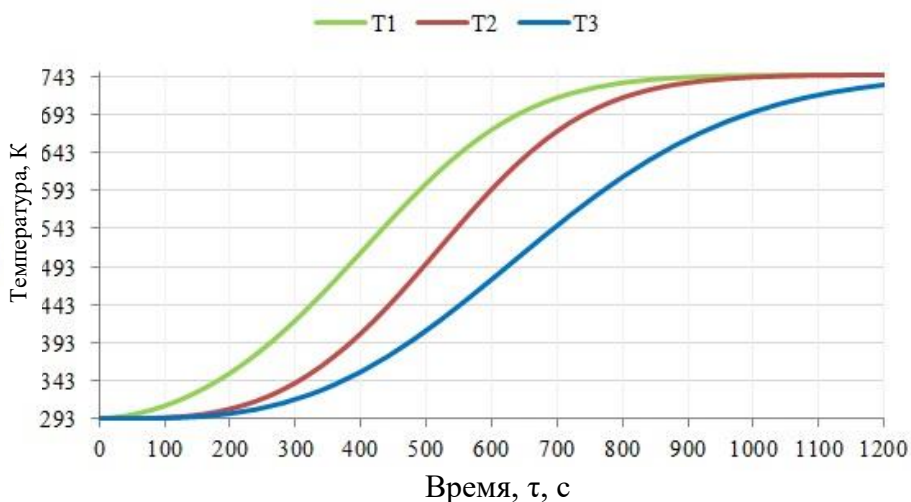
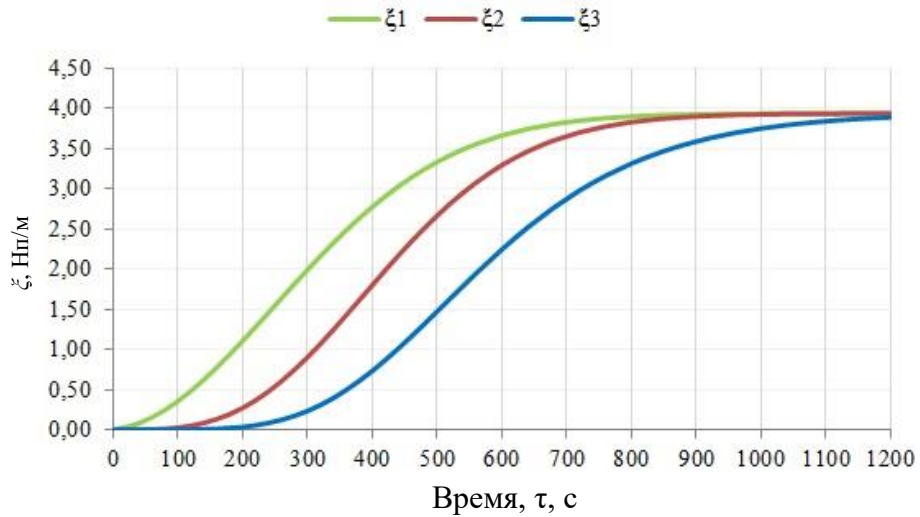
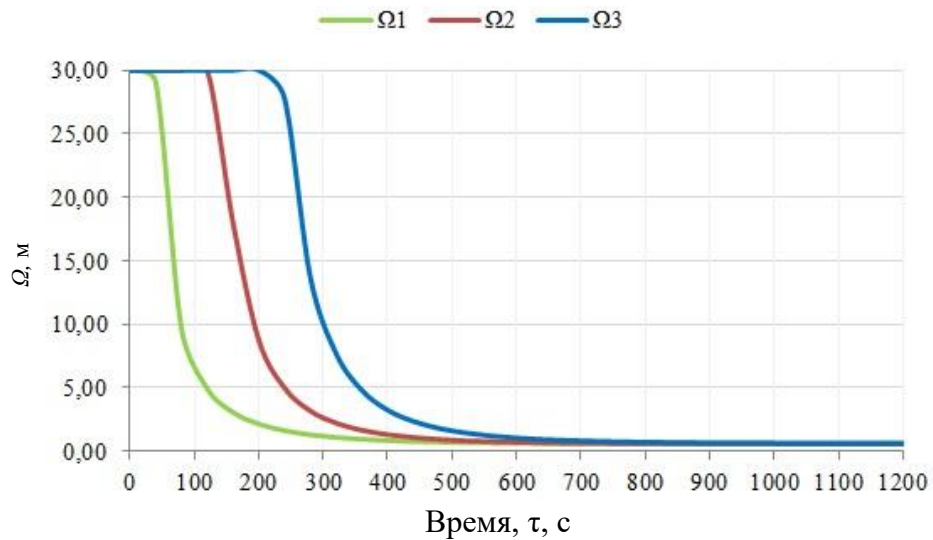


Рисунок 2.10 – Динамика температуры

Рисунок 2.11 – Динамика функции  $\xi$ Рисунок 2.12 – Динамика видимости  $\Omega$ 

Однако данный процесс предусматривает статистический (регрессионный) анализ параметров мониторинга, имеющий свою особенность. Так, на практике достаточно проблематично определить предельные значения функции мониторинга ( $\beta$ ) и максимально возможную температуру ( $T$ ). При эксплуатации систем мониторинга возникают ситуации, связанные с потерей фрагмента данных мониторинга по техническим либо иным причинам. Поэтому для цифровой обработки результатов мониторинга с применением метода прогнозирования необходима разработка метода моделирования динамики параметров мониторинга, предлагаемый в п. 2.4.



## **2.4. Метод количественной оценки результатов мониторинга пожара**

Количественный анализ результатов мониторинга динамики пожара необходим для определения значений контролируемых параметров в моделях поддержки принятия решений. Целью разработки метода количественной обработки и моделирования результатов мониторинга пожара является цифровая обработка данных и восполнение отсутствующих фрагментов данных в системе мониторинга с использованием результатов математического моделирования.

Важной особенностью разработанного метода является возможность моделирования значений косвенных параметров мониторинга по значениям основных параметров, что имеет особое значение для практики применения результатов мониторинга при управлении. Здесь под прямым параметром мониторинга будем понимать параметр, оценка которого производится непосредственно с использованием средств мониторинга, тогда как косвенным параметром будем считать параметр мониторинга, значения которого получены с использованием значений основного параметра расчетным путем.

### **2.4.1. Структура метода оценки результатов мониторинга пожара**

Метод представляет собой процедуру цифровой обработки результатов мониторинга, производимых в режиме реального времени, и предназначен для реализации в виде программы для ЭВМ. Цифровая обработка данных базируется на методологии статистического анализа результатов измерений с помощью регрессионной модели. В этом случае результаты цифровой обработки результатов мониторинга представляют собой случайные величины, принадлежащие фиксированному интервалу значений с заранее заданной вероятностью. Практика цифровой обработки данных показала, что приемлемые по размеру интервалы значений параметров мониторинга получают при доверительной вероятности 0,95 и в исключительных случаях при вероятности 0,99 [119].

Тогда каждый оцениваемый параметр будет характеризоваться кортежем:

$$\langle p(\text{inf}), p^*, p(\text{sup}) \rangle, \quad (2.21)$$

где  $p(\text{inf})$  – оценка снизу для контролируемого параметра (infimum);  $p^*$  – среднее значение контролируемого параметра;  $p(\text{sup})$  – оценка сверху для параметра мониторинга пожара (supremum)

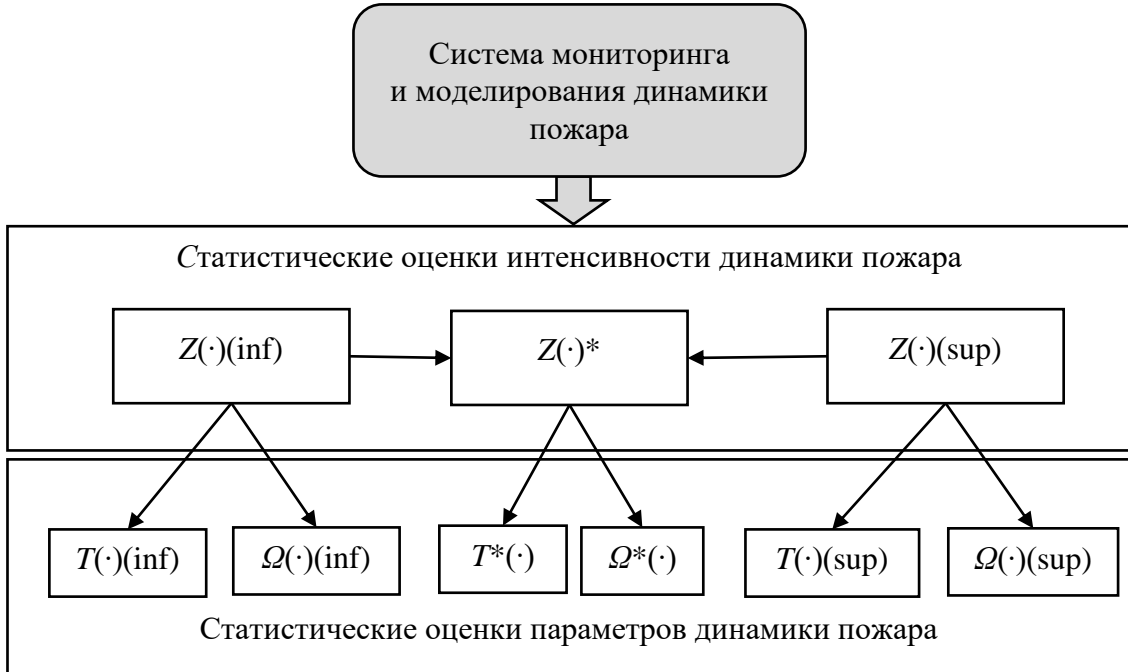


Рисунок 2.13 – Структура количественной оценки результатов мониторинга

В такой постановке задачи с учетом специфики прогнозирования параметров мониторинга пожара метод включает в себя анализ статистических оценок интенсивности динамики пожара и непосредственно параметров мониторинга. Общая структура метода количественной обработки и моделирования результатов мониторинга динамики пожара представлена на рисунке 2.13.

#### 2.4.2. Содержание метода оценки результатов мониторинга пожара

В соответствии с разработанной моделью мониторинга динамики пожара на основе теории клеточных автоматов функция динамики отдельно взятого параметра мониторинга имеет вид функции экспоненциального роста с насыщением

$$p - p_0 = p^* (1 - \exp(-Z(\tau))). \quad (2.22)$$

В качестве основного параметра мониторинга будет использован параметр температуры газовой среды в зоне контроля системы. С помощью формулы (2.6) зависимость динамики температуры можно представить следующим образом

$$T = \frac{T_0 \exp(Z(\tau))}{\left(1 + \frac{T_0}{T^*}\right) \exp(Z(\tau)) - \frac{T_0}{T^*}}. \quad (2.23)$$

Учитывая, что при значениях  $T^*$ , близких к  $T_0$ , то есть на начальном этапе развития пожара, знаменатель дроби близок 1. Тогда можно принять, что динамика температуры в зоне контроля будет представлена функцией

$$T = T_0 \exp(Z(\tau)). \quad (2.24)$$

Далее в каждый дискретный момент времени  $\tau$  значение определяется интенсивность  $Z(\tau)$  по формуле

$$Z(\tau) = \ln\left(\frac{T}{T_0}\right). \quad (2.25)$$

Зная значения  $Z(\tau)$ , можно определить динамику других параметров мониторинга, например, видимости в зонах контроля системы мониторинга

$$\Omega = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-Z(\tau))}. \quad (2.26)$$

Рассмотрим совокупность зон контроля температуры газовой среды в помещении при пожаре. Структура взаимодействия зон контроля и соответствующая им модель клеточных автоматов представлены на рисунке 2.14. Результаты мониторинга температуры для зон контроля  $N_1$  и  $N_3$  представлены в таблице 2.2. Результаты мониторинга для зоны контроля  $N_2$  отсутствуют ввиду потери связи со средством мониторинга. Необходимо по результатам динамики температуры оценить динамику видимости в зонах контроля и восстановить недостающие результаты мониторинга в зоне контроля  $N_2$  путем математического моделирования.

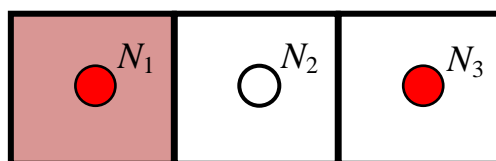


Рисунок 2.14 – Модель клеточных автоматов системы мониторинга

Таблица 2.2 – Исходные данные для моделирования

$\tau$	1	60	120	180	240	300	360	420
$T_1$	20	25	30	30	30	40	50	55
$Z_1$	0,002	0,223	0,405	0,405	0,405	0,693	0,916	1,012
$T_3$	20	21	22	22	23	23	25	25
$Z_3$	0	0,049	0,095	0,095	0,140	0,140	0,223	0,223
$\tau$	480	540	600	660	720	780	840	900
$T$	65	75	85	100	110	130	140	150
$Z_1$	1,179	1,322	1,447	1,609	1,705	1,872	1,946	2,015
$T_3$	26	26	27	28	30	30	32	32
$Z_3$	0,262	0,262	0,300	0,336	0,405	0,405	0,470	0,470

В таблице 2.2 для удобства обработки данных представлены абсолютные значения температуры в дискретные моменты времени  $\tau$  и значения интенсивности динамики пожара  $Z(\tau)$ , рассчитанная по формуле (2.25).

#### *Статистическая обработка результатов мониторинга*

Для статистической обработки результатов мониторинга воспользуемся методом линейной регрессионной статистики. Для этого в качестве изучаемой величины примем интенсивность динамики параметров мониторинга  $Z$ .

По данным таблицы 2.2. можно определить значения коэффициента Пирсона, стандартной ошибки результатов обработки данных (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Регрессионная статистика

Показатели	$Z_1$	$Z_3$
$R$ -квадрат	0,997	0,995
Стандартная ошибка	0,07	0,02
Количество наблюдений	17	17

Высокие значения коэффициента Пирсона говорят о хорошей сходимости результатов цифровой обработки данных по линейной регрессии и наблюдений интенсивности динамики параметров мониторинга  $Z(\tau)$ . Расчет линейной регрессии для параметра  $Z(\tau)$  представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Коэффициенты линейной регрессии параметра Z

$Z_i$	Коэф- фициенты	Ст. ошибка	t-стат	infimum 99,0 %	supremum 99,0 %
$Z_1$	0,00235	$3 \cdot 10^{-5}$	77,5	0,00226	0,00244
$Z_3$	0,00054	$9 \cdot 10^{-6}$	59,1	0,00051	0,00056
$Z_2$	0,00145	-	-	0,00139	0,0015

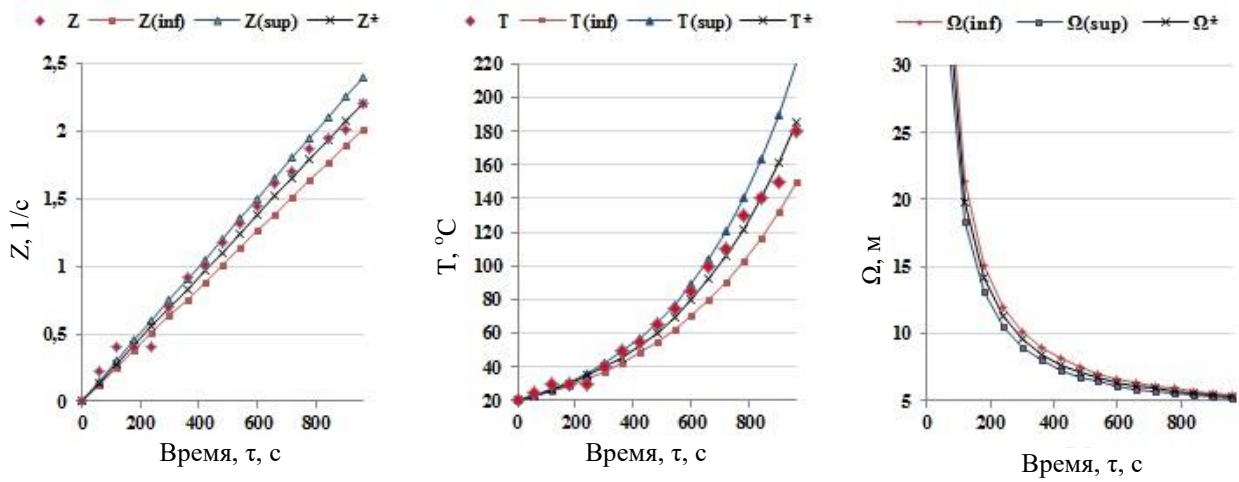
В таблице 2.4 значения параметра  $Z_2(\tau)$  определены с использованием системы уравнений параметров мониторинга для рассматриваемой совокупности зон контроля  $Z_1(\tau)$  и  $Z_3(\tau)$ . Результирующие функции представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Функции параметров мониторинга

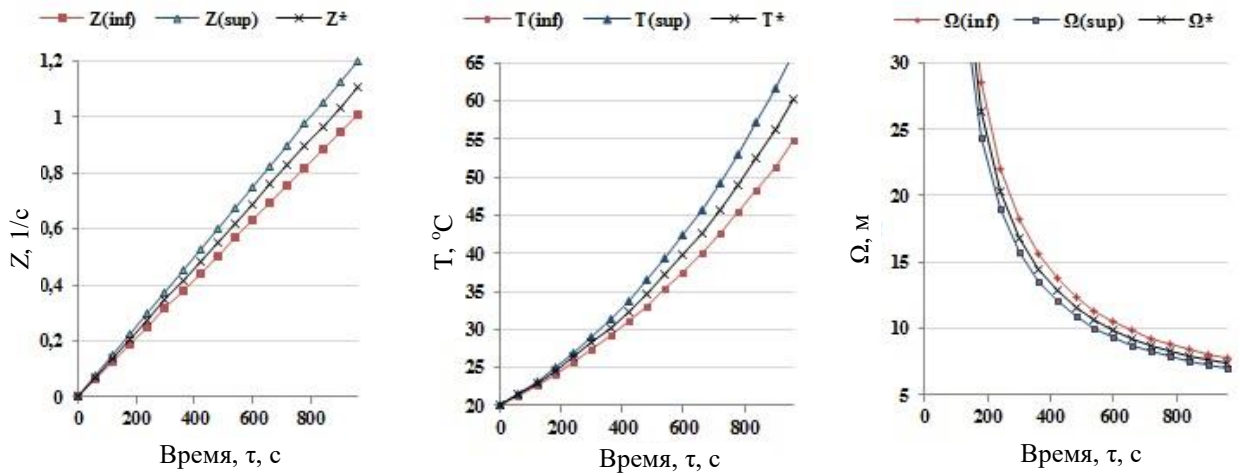
N	Температура – прямой параметр мониторинга	Видимость – косвенный параметр мониторинга
Зона контроля $N_1$ мониторинг	$T_1(\text{sup}) = T_0 \exp(0,00244 \cdot \tau)$	$\Omega_1(\text{sup}) = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00244 \cdot \tau)}$
	$T_1(\text{inf}) = T_0 \exp(0,00226 \cdot \tau)$	$\Omega_1(\text{inf}) = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00226 \cdot \tau)}$
	$T_1^* = T_0 \exp(0,00235 \cdot \tau)$	$\Omega_1^* = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00235 \cdot \tau)}$
Зона контроля $N_2$ мониторинг	$T_3(\text{sup}) = T_0 \exp(0,00056 \cdot \tau)$	$\Omega_3(\text{sup}) = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00056 \cdot \tau)}$
	$T_3(\text{inf}) = T_0 \exp(0,00051 \cdot \tau)$	$\Omega_3(\text{inf}) = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00051 \cdot \tau)}$
	$T_3^* = T_0 \exp(0,00054 \cdot \tau)$	$\Omega_3^* = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00054 \cdot \tau)}$
Зона контроля $N_3$ моделирование	$T_2(\text{sup}) = T_0 \exp(0,0015 \cdot \tau)$	$\Omega_2(\text{sup}) = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00056 \cdot \tau)}$
	$T_2(\text{inf}) = T_0 \exp(0,0014 \cdot \tau)$	$\Omega_2(\text{inf}) = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00051 \cdot \tau)}$
	$T_2^* = T_0 \exp(0,00145 \cdot \tau)$	$\Omega_2^* = \frac{\Omega_0}{1 - \exp(-0,00054 \cdot \tau)}$

При расчете принято, что начальная температура в зонах контроля системы мониторинга –  $T_0 = 20$  °С, а минимальная видимость в зонах контроля  $\Omega_0 = 5$  м.

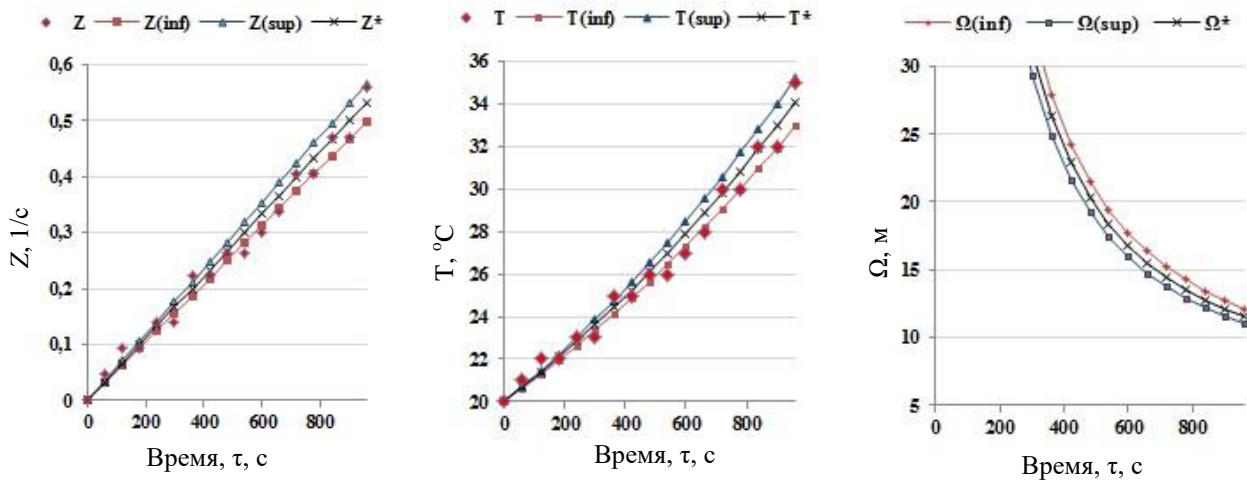
Результаты применения разработанного метода мониторинга динамики пожара по температуре газовой среды представлены на рисунке 2.15.



Параметры для зоны контроля  $N_1$



Параметры для зоны контроля  $N_2$



Параметры для зоны контроля  $N_3$

Рисунок 2.15 – Результаты апробации метода прогнозирования динамики пожара по мониторингу температуры

Анализ средних значений параметров мониторинга динамики пожара представлен на рисунках 2.16 и 2.17.

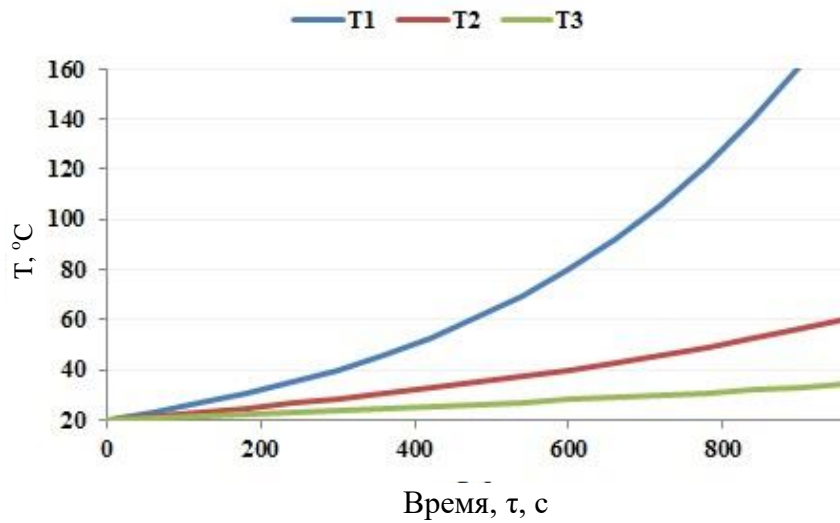


Рисунок 2.16 – Динамика температуры для совокупности зон контроля

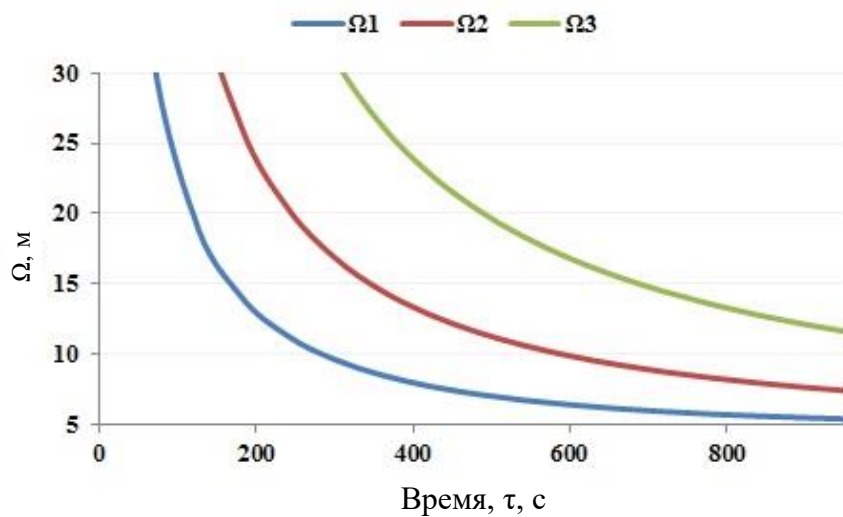


Рисунок 2.17 – Динамика видимости для совокупности зон контроля

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что разработанный метод моделирования параметров мониторинга пожара индуцирует значения косвенных параметров мониторинга, для контроля которых в системе мониторинга отсутствуют средства измерения, а также восстанавливает недостающие данные в системе мониторинга благодаря применению многокритериальной модели мониторинга, в случае их потери по техническим причинам.

## 2.5. Модель оценки состояний пожара по результатам мониторинга

В качестве теоретической основы для разработки модели состояний пожара использована теория клеточных автоматов. Тогда каждая зона контроля системы с одним средством измерения состояния пожара в здании представляется в виде ячейки клеточного автомата. При формировании записи уравнений, описывающих динамику параметра  $p$ , структуру взаимодействия клеток автомата в модели удобно представить в виде ориентированного графа состояний и переходов.

Решение задачи, состоящей в определении значения состояния пожара в рамках данной теории возможно на основе анализа функций принадлежности.

### 2.5.1. Исходные положения и утверждения моделирования

Исходя из анализа специфики метрологического обоснования информационных компонент в системах пожарной автоматики [119] сделан вывод, что в качестве функции принадлежности в динамике пожара из состояния в состояние может быть использована плотность нормально-распределенной случайной величины.

В работе А.А. Таранцевым [208] показана аналогия между плотностью распределения случайной величины и функцией принадлежности [160, 161, 312, 320]. Поэтому при решении задачи оценки состояния пожара по мониторингу параметров пожара необходимо рассматривать экспоненциальную функцию

$$\mu_i = \frac{1}{\Delta p_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(p_k - p_{icp})^2}{2(\Delta p_i)^2}\right), \quad (2.27)$$

где  $p$  – текущее значение контролируемого параметра;  $p_{icp}$  – среднее значение для интервала  $[p_{i1}; p_{i2}]$ ;  $\Delta p_i$  – параметр разброса данных.

Введем обозначение

$$P_{Ai} = \frac{(p_k - p_{icp})^2}{2\Delta p_i^2} \text{ при } p_k \in [p_{i1}; p_{i2}]. \quad (2.28)$$



Тогда окончательно получим функцию принадлежности результатов наблюдений за динамикой параметра пожара при мониторинге:

$$\mu_{Ai} = \frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{Ai}), \quad (2.29)$$

где  $i$  – номер состояния пожара в зоне контроля.

В свою очередь справедливо от интервала значений  $p_k \in [p_{i1}; p_{i2}]$  для состояния  $B_i$  осуществить переход к оценочным параметрам интервала  $p_{i,cp}$  и  $\Delta p_i$ . Рассматривая состояние пожара при мониторинге пожара по параметру температура газовой среды ( $t$ , °C), необходимо иметь данные по среднему значению параметра и параметру разброса данных. На рисунке 2.18 представлена визуализация интервалов значений температуры газовой среды для состояния пожара  $B_i$  с параметрами  $t_{cp} = 50$  °C и  $\Delta t_i = 3, 5, \text{ и } 7$  °C.

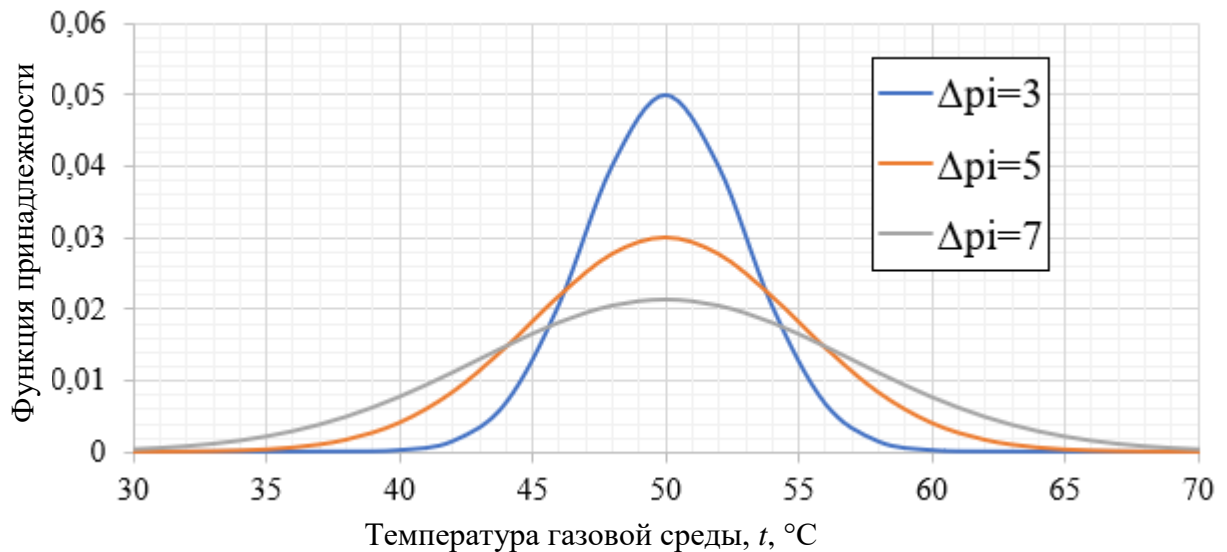


Рисунок 2.18 – Распределение состояний пожара при мониторинге температуры

**Утверждение 2.1.** Пусть  $p_k$  – параметр мониторинга пожара и пусть задано множество значений состояния пожара  $B_i$   $i=1, 2, \dots, n$ , каждому из которых соответствуют оценочные значения параметра мониторинга  $p_{i,cp}$  и  $\Delta p_i$ . Тогда в случае если значение параметра мониторинга пожара  $p_k$  одновременно принадлежит двум смежным состояниям  $B_i$  и  $B_{i+1}$ , то для интервала значений параметра мониторинга  $p_k \in [p_{i,cp}; p_{i+1,cp}]$  справедливо сопоставить промежуточное состояние пожара

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i+1}} \exp(P_i - P_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta p_{i+1}}{\Delta p_i} \exp(P_{i+1} - P_i)},$$

$$P_i = \frac{(p_k - p_{i;cp})^2}{2 \cdot \Delta p_i^2}.$$

**Доказательство.** Пусть оценка промежуточного состояния будет рассчитана по формуле

$$B_{i;i+1} = \frac{\mu_i B_i + \mu_{i+1} B_{i+1}}{\mu_i + \mu_{i+1}}, \text{ и } \mu_i = \frac{1}{\Delta p_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i)$$

или

$$B_{i;i+1} = \frac{\frac{1}{\Delta p_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) B_i + \frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1}) B_{i+1}}{\frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) + \frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1})}.$$

Произведем анализ дроби и разделим ее на два слагаемых:

$$I = \frac{\frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) B_i}{\frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) + \frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1})}, \text{ тогда}$$

$$II = \frac{\frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1}) B_{i+1}}{\frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) + \frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1})}.$$

Рассмотрим первое слагаемое и представим его в следующем виде

$$I = \frac{\frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) B_i}{\frac{1}{\Delta p_i \sqrt{2\pi}} \exp(-P_i) \left( 1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i+1}} \exp(-P_{i+1}) \right)} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i+1}} \exp(P_i - P_{i+1})}.$$

Аналогичное выполним и для второго слагаемого:

$$II = \frac{\frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1}) B_{i+1}}{\frac{1}{\Delta p_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-P_{i+1}) \left(1 + \frac{A}{\Delta p_i} \exp(P_i - P_{i+1})\right)} = \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta p_{i+1}}{\Delta p_i} \exp(P_i - P_{i+1})}.$$

Окончательно получим выражение

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i+1}} \exp(P_i - P_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta p_{i+1}}{\Delta p_i} \exp(P_{i+1} - P_i)},$$

что и требовалось доказать.

**Утверждение 2.2.** Если для утверждения 2.1 справедливо  $\Delta p_i = \Delta p_{i+1}$ , то промежуточное состояние пожара  $B_{i;i+1}$  рассчитывается по формуле

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + (B_i + B_{i+1})A + B_{i+1}A^2}{1 + 2A + A^2}, \quad A = \exp(\Delta P_{i;i+1}), \quad \Delta P_{i;i+1} = P_i - P_{i+1}.$$

**Доказательство.** Рассмотрим формулу по определению промежуточного состояния пожара из утверждения (2.1):

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i+1}} \exp(P_i - P_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta p_{i+1}}{\Delta p_i} \exp(P_{i+1} - P_i)}.$$

В случае если  $\Delta p_i = \Delta p_{i+1}$ , формула примет вид

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \exp(P_i - P_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \exp(P_{i+1} - P_i)}.$$

Перейдем к единой дроби:

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i (1 + \exp(-(P_i - P_{i+1}))) + B_{i+1} (1 + \exp(P_i - P_{i+1}))}{(1 + \exp(P_i - P_{i+1})) (1 + \exp(-(P_i - P_{i+1})))}.$$

Заменим  $\Delta P_{i;i+1} = P_i - P_{i+1}$ , тогда формула примет вид

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i (1 + \exp(-\Delta P_{i;i+1})) + B_{i+1} (1 + \exp(\Delta P_{i;i+1}))}{(1 + \exp(\Delta P_{i;i+1})) (1 + \exp(-(\Delta P_{i;i+1})))}.$$

Выполним простейшие математические преобразования:

– раскроем скобки

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + B_i \exp(-\Delta P_{i;i+1}) + B_{i+1} + B_{i+1} \exp(\Delta P_{i;i+1})}{2 + \exp(\Delta P_{i;i+1}) + \exp(-\Delta P_{i;i+1})};$$

– вынесем за скобки общий множитель  $\exp(-\Delta P_{i;i+1})$

$$B_{i;i+1} = \frac{\exp(-\Delta P_{i;i+1})(B_i + B_i \exp(\Delta P_{i;i+1}) + B_{i+1} \exp(\Delta P_{i;i+1}) + B_{i+1} \exp(2\Delta P_{i;i+1}))}{\exp(-\Delta P_{i;i+1})(1 + 2\exp(\Delta P_{i;i+1}) + \exp(2\Delta P_{i;i+1}))};$$

– выполним группировку слагаемых в числителе

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + (B_i + B_{i+1})\exp(\Delta P_{i;i+1}) + B_{i+1} \exp(2\Delta P_{i;i+1})}{1 + 2\exp(\Delta P_{i;i+1}) + \exp(2\Delta P_{i;i+1})}.$$

– обозначим  $A = \exp(\Delta P_{i;i+1})$  и окончательно получим

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + (B_i + B_{i+1})A + B_{i+1}A^2}{1 + 2A + A^2},$$

что и требовалось доказать.

Утверждение (2.2) полезно при использовании утверждения (2.1) в общем виде для всех значений интервалов, полученных на основе оценочных показателей  $p_{ср;i}$  и  $\Delta p_i$ , включая случай, когда  $B_i = B_{i+1}$ .

Здесь производится переход к обычной модели мониторинга состояний с отсутствием смежности значений, а именно: если

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + (B_i + B_{i+1})A + B_{i+1}A^2}{1 + 2A + A^2} \text{ и } B_i = B_{i+1},$$

тогда

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + 2B_i A + B_i A^2}{1 + 2A + A^2} = B_i \cdot \left( \frac{1 + 2A + A^2}{1 + 2A + A^2} \right) = B_i.$$

Таким образом, соотношение между утверждениями (2.1) и (2.2) доказано, что позволяет применять данные утверждения при количественной оценке результатов мониторинга динамики пожара в здании.

### 2.5.2. Количественная оценка состояний пожара по мониторингу

Рассмотрим процесс цифровой обработки данных для формирования количественной шкалы оценки результатов мониторинга состояний пожара в здании для параметра температуры газовой среды для классической системы пожарной автоматики [44]. Пусть в качестве средства мониторинга используется тепловой кумулятивный пожарный извещатель с диапазоном температур от 20 до 100 °С. Извещатель контролирует температуру газовой среды в защищаемом помещении и рассматривает три состояния: «норма», «внимание», «пожар». В соответствии с разработанной цифровой моделью обработки данных для формирования результатов мониторинга для состояний пожара могут быть введены количественные оценки:  $B_1 = 0$ ;  $B_2 = 1$ ;  $B_3 = 2$ .

Каждому состоянию соответствуют следующие оценочные показатели параметра мониторинга:  $B_1 \rightarrow p_{1\text{ ср}} = 30$  (°С);  $\Delta p_1 = 3$  (°С);  $B_2 \rightarrow p_{2\text{ ср}} = 50$  (°С);  $\Delta p_2 = 5$  (°С);  $B_3 \rightarrow p_{3\text{ ср}} = 70$  (°С);  $\Delta p_3 = 7$  (°С).

При анализе результатов мониторинга пожара по температуре газовой среды воспользуемся функцией для расчета количественной шкалы  $B$  по формуле из утверждения 2.1, то есть

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i+1}} \exp(P_i - P_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta p_{i+1}}{\Delta p_i} \exp(P_{i+1} - P_i)},$$

$$P_i = \frac{(p_k - p_{i;cp})^2}{2 \cdot \Delta p^2},$$

и сравним полученный результат с усредненной шкалой  $B$ , полученной по формуле из утверждения 2.2.

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i + (B_i + B_{i+1})A + B_{i+1}A^2}{1 + 2A + A^2},$$

$$A = \exp(\Delta P_{i;i+1}), \Delta P_{i;i+1} = P_i - P_{i+1} \cdot P_i = \frac{(p_k - p_{spi})^2}{2 \cdot \Delta p_{cp}^2}, \text{ где } \Delta p_{cp} = 5 \text{ °С}$$

Функция принадлежности  $\mu_i$  и количественная шкала для оценки результатов мониторинга представлены на рисунке 2.19.

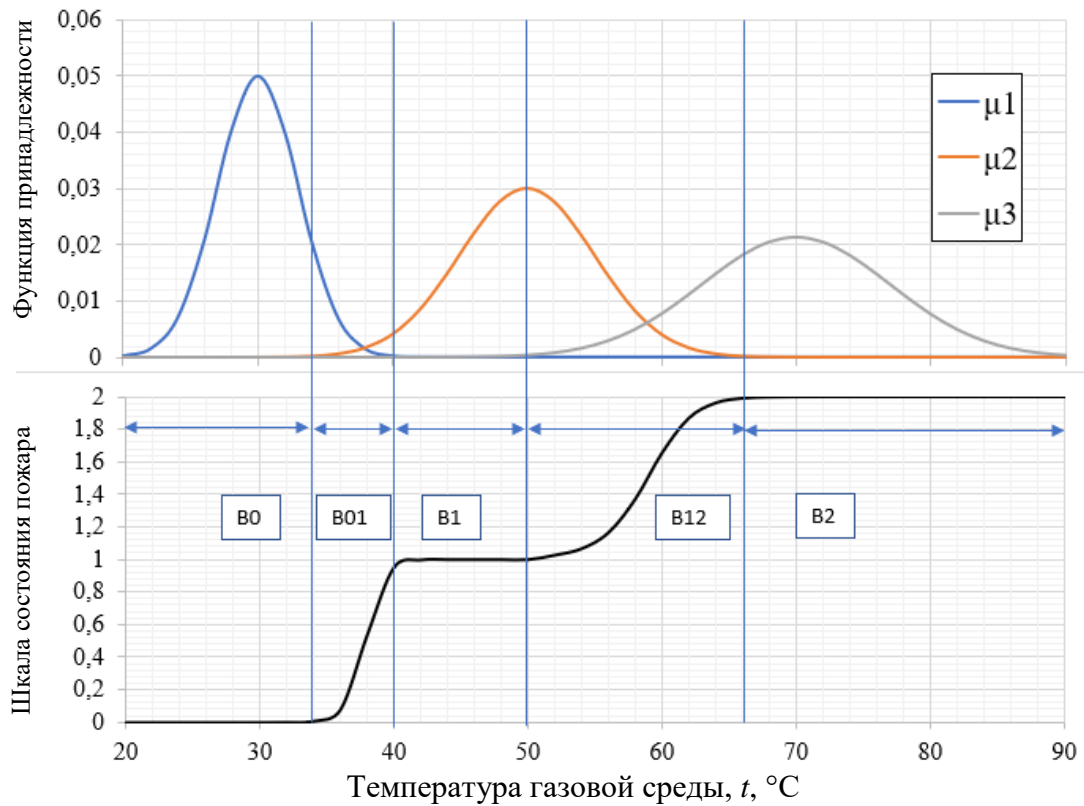


Рисунок 2.19 – Количественная шкала оценки результатов мониторинга пожара

Анализируя данные, иллюстрируемые на рисунке 2.17, можно сделать вывод, что для оценки состояний пожара по шкале  $B_0 = 0$ ;  $B_1 = 1$ ;  $B_2 = 2$  существует два диапазона значений параметра мониторинга  $B_{01}$  и  $B_{12}$ , для которых промежуточные значения определены с использованием утверждения 2.1.

В случае если разброс данных в промежуточных диапазонах зависит от отношений значений параметров разброса данных  $\Delta p_1$ ;  $\Delta p_2$ ;  $\Delta p_3$ , которые могут быть нормализованы по среднему значению разброса для всей совокупности данных  $\Delta p_{cp} = 5$   $^{\circ}\text{C}$ , тогда функция принадлежности будет иллюстрирована на рисунке 2.20 (зависимость по утверждению 2.2).

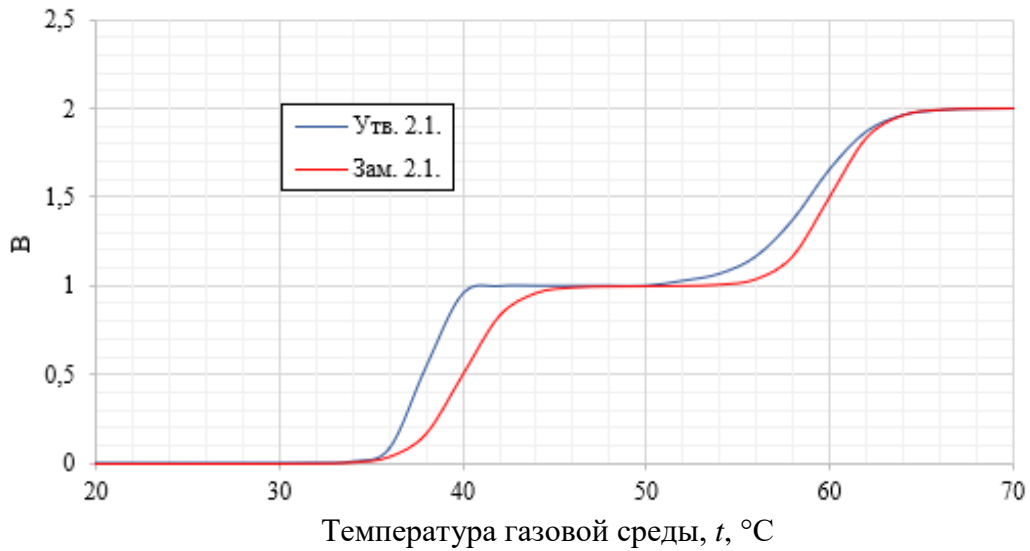


Рисунок 2.20 – Сравнение количественных шкал результатов мониторинга

Рассматривая усредненные значения, наблюдаем существенное отклонение данных на каждом промежуточном этапе оценки результатов мониторинга, которые можно оценить величиной

$$\Delta B = B_1 - B_2, \quad (2.30)$$

где  $B_1$  – результаты оценки результатов мониторинга по утверждению (2.1);  $B_2$  – результаты оценки результатов мониторинга по утверждению (2.2).

Динамика функции отклонения количественной оценки результатов мониторинга  $\Delta B$  в зависимости от контролируемых системой мониторинга состояний пожара представлена на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 – Отклонения оценки результатов мониторинга

Таким образом, использование утверждения 2.2 для оценки результатов мониторинга возможно лишь в случае, когда разбросы данных для рассматриваемых состояний равны между собой. В противном случае для оценки результатов мониторинга может быть использовано только утверждению 2.1.

В общей методологии мониторинга пожара и управления пожарными подразделениями при тушении пожаров на основе результатов мониторинга разработанная цифровая модель выступает в качестве инструментария для формирования векторных оценок вариантов управления.

## **Выводы по главе 2**

В результате исследований, проведенных во второй главе, разработана совокупность новых теоретических результатов, позволяющая на основе многокритериальной модели и методов мониторинга представить в количественном виде результаты мониторинга для их дальнейшего использования в многокритериальных моделях поддержки принятия решений. В процессе исследования получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ концепции мониторинга динамики пожара с учетом практических функций принятия решений в системах мониторинга, на основе которого произведен выбор теоретической основы для разработки многокритериальной модели и методов мониторинга пожара в здании. Показано, что в полной мере обеспечить эффективное решение задач управления в соответствии с функциями мониторинга возможно путем совокупного применения теории клеточных автоматов и уравнений состояний А.Н. Колмогорова при моделировании процесса динамики пожара.

2. Разработана многокритериальная модель мониторинга динамики пожара в здании. Модель представляет собой теоретико-графовую структуру взаимодействия зон контроля системы мониторинга и описывающую данное взаимодействие систему линейных дифференциальных уравнений, для которых в диссертации получено общее аналитическое решение, относительно каждого параметра



мониторинга. Определена количественная связь между функциями мониторинга и его параметрами с использованием оценки интенсивности динамики пожара с использованием теории клеточных автоматов.

3. Разработан метод прогнозирования динамики параметров мониторинга, представляющий собой циклическую процедуру дискретной оценки параметров мониторинга на основе модели интенсивности динамики пожара. Оценка динамика параметров мониторинга в методе определяется на основе анализа графа взаимодействия зон контроля системы мониторинга и моделирования динамики параметров мониторинга в каждой зоне контроля системы мониторинга.

4. Разработан метод количественной оценки и моделирования динамики параметров мониторинга. Метод включает в себя статистическую обработку результатов мониторинга, производимую в режиме реального времени, которая базируется на методологии регрессионного анализа результатов измерений. Результаты цифровой обработки результатов мониторинга представляют собой случайные величины, принадлежащие фиксированному интервалу значений с заранее заданной вероятностью.

5. Разработана модель количественной оценки состояния динамики пожара, позволяющая осуществить переход от интервалов значений параметров мониторинга к количественной шкале, применимой в многокритериальных моделях поддержки принятия решений. В процессе разработки модели формализованы и доказаны утверждения, позволяющие использовать плотность распределения нормальной случайной величины в процессе формирования количественной шкалы параметров мониторинга пожара, для применения результатов мониторинга в процессе поддержки принятия решений при управлении пожарными подразделениями.

### **ГЛАВА 3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ПОЖАРА**

В данной главе диссертации производится решение задачи исследования, состоящей в разработке совокупности моделей многокритериального анализа управленческих решений и метода поддержки принятия решений на основе результатов мониторинга пожара с учетом математического моделирования оперативно-тактических действий, связанных с тушением пожаров и реализуемых силами и средствами пожарных подразделений.

Для решения поставленной задачи необходимо произвести исследование моделей многокритериальной оптимизации, охватывающих широкий класс задач многокритериального выбора управленческих решений на основе количественных показателей важности критериев выбора. В рассматриваемых задачах в качестве критериев и их показателей важности применяются результаты математического моделирования оперативно-тактических действий, представленные в аддитивной и мультипликативной формах, с учетом разработанных моделей и методов многокритериального мониторинга динамики пожара в здании.

Результаты исследования моделей многокритериальной оптимизации являются теоретической основой при разработке метода поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров с применением информации от систем мониторинга динамики пожара в здании. Использование объективной информации о динамике пожара в количественном виде позволяет исключить человеческий фактор на этапах сбора информации, необходимой для принятия рациональных управленческих решений и снизить долю субъективизма при реализации процедур поддержки принятия решений, что в совокупности позволит повысить эффективность действий пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях.

### 3.1. Общая модель многокритериальной поддержки принятия решений

Для формального описания метода многокритериальной оптимизации вариантов управленческих решений рассмотрим их общую модель.

В качестве понятийного аппарата рассматривается модель поддержки принятия решений как феноменологическое объяснение факта выбора варианта управленческого решения, состоящего в том, то из  $n$  вариантов, оцениваемых по  $m$  критериям, в результате реализации процедур поддержки принятия решений оказалось, что  $d$  вариантов ( $d < n$ ) исключены из анализа, а  $k = n - d$  вариантов рекомендованы для выбора лица, принимающего решение (ЛПР).

#### 3.1.1. Формальная задача многокритериального выбора

Исходя из понятийного описания модели поддержки принятия решений для анализа и разработки многокритериального метода поддержки принятия решений необходимо рассмотреть задачу многокритериального выбора, которая включает в себя:

*множество вариантов*

$$x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n, n \geq 2;$$

*множество компонентов векторного критерия, используемых для оценки вариантов*

$$f_s \in F, s = 1, 2, \dots, m, m \geq 2;$$

*множество векторных оценок вариантов управленческих решений*

$$F(X) = f_1(X) \times f_2(X) \times \dots \times f_m(X), \quad (3.1)$$

где  $f_i(X)$  – множество значений компоненты векторного критерия с номером  $i$  на множестве вариантов  $x_i \in X$ ;  $F(x_i) = (f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_m(x_i))$  – векторная оценка варианта  $x_i$ , где  $f_i(x_i)$  – оценка варианта  $x_i$  по компоненте векторного критерия  $f_i$ , при этом в классической экстремальной задаче необходимо максимизировать значение каждой компоненты векторного критерия, то есть

$$f(x) \rightarrow \max. \quad (3.2)$$

В задаче необходимо найти подмножество вариантов  $C(X) \subset X$  – совокупность вариантов, рекомендованных моделью для окончательного выбора наилучшего варианта.

Компоненты векторного критерия  $F$  представляют собой числовые функции, которые по своей природе являются количественными интервальными шкалами, отвечающими требованиям, предъявляемым к количественным шкалам отношений. Тогда допустимым преобразованием для компонент векторного критерия является

$$\varphi(F(x_i)) = d_i F(x_i) + c_i, \quad (3.3)$$

где  $d_i > 0$  и  $c_i$  – фиксированные числа.

В главе 1 диссертации показано, что большинство моделей действий в общем случае являются аддитивными и мультипликативными:

*аддитивная модель действий (A)*

$$s = s_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i; \quad (3.4)$$

*мультипликативная модель действий (M)*

$$s = s_0 \prod_{i=1}^n s_i^{\alpha_i}, \quad (3.5)$$

где  $s$  – моделируемый параметр;  $s_i$  – частный параметр, влияющий на моделируемый параметр  $s$ ;  $\alpha_i$  – коэффициент влияния  $i$ -го параметра на результат моделирования.

При этом с помощью простейших математических преобразований, например логарифмирования, можно осуществить переход от аддитивной модели к мультипликативной, поэтому в дальнейших исследованиях используем только аддитивную модель, подразумевая, что полученные результаты применимы и для мультипликативного случая.

Воспользуемся допустимым преобразованием над количественными критериями модели многокритериального выбора (3.3). Тогда выбор на основе адди-

тивной модели действий всегда можно заменить эквивалентным выбором с использованием функции

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x), \quad (3.6)$$

где  $f_i(x)$  – количественные критерии, определяемые на основе параметров  $s_i$ ;  $w_i$  – показатели важности параметров модели, которые рассчитаны на основе  $\alpha_i$

и отвечают требованию  $1 = \sum_{i=1}^m w_i$ .

Стоит отметить, что теоретические результаты, полученные в главе 2 диссертации позволяют в функции (3.6) использовать параметры мониторинга динамики пожара в здании с учетом их количественной обработки на основе модели с нечеткими границами.

### 3.1.2. Свойства многокритериальной задачи выбора

Однако решение задачи многокритериального выбора с использованием функции (3.6) сводится исключительно к ранжированию вариантов управленческих решений. При этом для научного обоснования результата решения задачи необходимо выполнение требований теоремы Карлина [126]. Стоит отметить, что критерии в задаче являются вогнутыми функциями, но множество вариантов решений не является выпуклым, и поэтому результаты ранжирования носят эвристический характер. Поэтому важно в методе поддержки принятия решений использовать не только результаты ранжирования, но и результаты теоретико-множественного анализа, полученные на основе применения теоремы Ногина – Подиновского [126], детально рассмотренной в главе 1. Для этого необходимо произвести теоретическое обобщение двух моделей многокритериального выбора.

Введем понятия следующих теоретических моделей:

– модель ранжирования вариантов управленческих решений  $A$ , объединяющая в себе результаты мониторинга динамики пожара в здании и оперативно-тактических действий пожарных подразделений;

– модель теоретико-множественного анализа управленческих решений  $B$ , позволяющая применять результаты многокритериальной оптимизации при поддержке принятия решений.

Представим модель  $A$  следующим кортежем:

$$A = \langle X_n, F_m, \Phi_m(X), \omega_m \rangle, \quad (3.7)$$

где  $X$  – множество, состоящее из  $n$  вариантов управленческих решений;  $F_m$  – векторный критерий, состоящий из  $m$  частных компонент – параметров мониторинга пожара и параметров оперативно-тактических действий;  $\Phi$  – аддитивная (мультипликативная) функция параметров  $F$ ;  $\omega$  – показатели важности компонент векторного критерия  $F$ ;  $n \times m$  – размерность модели.

Многокритериальная модель теоретико-множественного анализа управленческих решений (модель  $B$ ) представим следующим кортежем:

$$B = \langle X, F_m, N, G, \Theta \rangle, \quad (3.8)$$

где  $X$  – множество, состоящее из  $n$  вариантов управленческих решений;  $F$  – векторный критерий размерности  $m$ ;  $G$  – новый векторный критерий;  $\Theta$  – показатели важности компонент векторного критерия  $F_m$ ;  $N$  – преобразование векторного критерия  $F$  в векторный критерий  $G$ ;  $n \times m$  – размерность модели.

Таким образом, для возможности обоснованного использования в процессе многокритериальной оптимизации результатов мониторинга динамики пожара и моделирования оперативно-тактических действий необходимо осуществить переход от параметров  $\omega$  важности критериев в модели  $A$  к параметрам  $\Theta$  важности критериев в модели  $B$ .

Специфика применения теоретико-множественного подхода к поддержке принятия решений заключается в построении структуры множества вариантов решений, топология которого заключается в следующем [107]:

$$C(X) \subset P_G(X) \subset P_F(X) \subset X \quad (3.9)$$

где  $X$  – исходное множество вариантов в многокритериальной задаче;  $C(X)$  – множество выбранных вариантов;  $P_F(X)$  – множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве  $X$  с использованием исходного векторного

критерия  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ ;  $P_G(X)$  – множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве  $X$  с использованием нового векторного критерия  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ .

В многокритериальной оптимизации для обеспечения применения теоретико-множественной модели используется преобразование  $N$ , позволяющего получить новые компоненты векторного критерия  $G$ .

В процессе формирования нового векторного критерия  $G$  рассмотрим произвольные оценки двух парето-оптимальных вариантов  $f_1(x'), \dots, f_m(x')$  и  $f_1(x''), \dots, f_m(x'')$  и условий предпочтения  $x' \succ x''$ . По определению множества Парето [109] должны найтись два непустых множества номеров компонент векторного критерия  $I_A, I_B \in I = \{1, 2, \dots, m\}$  таких, что

$$w_i = f_i(x') - f_i(x'') > 0 (\forall i \in I_A); \quad (3.10)$$

$$w_j = f_j(x'') - f_j(x') > 0 (\forall j \in I_B); \quad (3.11)$$

$$f_s(x') - f_s(x'') = 0, \forall s \in I \setminus (I_A \cup I_B). \quad (3.12)$$

Тогда компоненты векторного критерия  $G$  рассчитываются по формулам:

$$f_i \quad \forall i \in I \setminus I_B, \quad (3.13)$$

$$g_{ij} = w_j f_i + w_i f_j \quad \forall i \in I_A, j \in I_B. \quad (3.14)$$

Для удобства дальнейших исследований введем параметр относительной важности критериев  $\Theta_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$  и обратный показатель относительной важности

$\Theta_{ji} = \frac{w_j}{w_i}$ . Тогда формула (3.2) будет записана следующим образом:

$$g_{ij} = f_i + \Theta_{ij} f_j \quad \forall i \in I_A, j \in I_B; \quad (3.15)$$

$$g_{ij} = \Theta_{ji} f_i + f_j \quad \forall i \in I_A, j \in I_B. \quad (3.16)$$

Преобразование В.Д. Ногина [106–109] имеет особенность в сравнении с преобразованием В.В. Подиновского, заключающееся в увеличении размерности нового векторного критерия  $G$ . Так, в преобразовании В.Д. Ногина размерность нового векторного критерия  $G$  будет определена по формуле

$$p = m - b + ab, \quad (3.17)$$

где  $m$  – размерность исходного векторного критерия  $F$ ;  $a$  – количество компонент  $F$ , находящихся в группе  $I_A$ ;  $b$  – количество компонент  $F$ , находящихся в группе  $I_B$ .

В работе [109] при рассмотрении  $r$ -оптимального выбора как парно-доминантной процедуры оптимизации показано, что чем больше размерность векторных оценок, тем шире в известном смысле слова множество выбранных вариантов  $S(X)$ . Поэтому в дальнейших исследованиях предполагаем рассмотрение двух случаев:

*Первый случай* предполагает рассмотрение ситуации при многокритериальном выборе, когда в группу  $I_A$  входит одна компонента векторного критерия, то есть  $a = 1$ , а все остальные компоненты объединяются в группу  $I_B$ , то есть  $b = m - 1$ . Данный случай определяет ситуацию, когда один из частных критериев важнее всех остальных.

*Второй случай* заключается в формальном описании ситуации многокритериального выбора, когда все частные критерии важнее одного. То есть в группу  $I_B$  входит одна компонента векторного критерия и  $b = 1$ . Тогда все остальные компоненты входят в группу  $I_A$  и  $a = m - 1$ .

Стоит отметить, что для первого случая применение преобразования  $N$  не приводит к увеличению размерности векторного критерия  $G$ , так при,  $a = 1$  и  $b = m - 1$  и  $p = m - (m - 1) + 1(m - 1) = m$ .

Поэтому обобщение моделей  $A$  и  $B$  произведем по следующей схеме:

*на первом этапе* будут доказаны утверждения, позволяющие осуществить расчет показателей важности  $\omega$  модели  $A$  на основе показателей важности  $\Theta$  модели  $B$ , в качестве замечаний рассмотрим частные случаи ( $a = 1$ ;  $b = m - 1$ ) и ( $b = 1$ ;  $a = m - 1$ ).



на втором этапе с учетом замечаний для частных случаев ( $a = 1; b = m - 1$ ) и ( $b = 1; a = m - 1$ ) сформируем и докажем утверждения, позволяющие определить показатели важности  $\Theta$  модели  $B$  на основе показателей важности  $\omega$  модели  $A$ , которые в дальнейшем будут использованы при разработке метода поддержки принятия решений.

### 3.2. Исследование модели ранжирования управленческих решений

При исследовании модели ранжирования вариантов управленческих решений особое значение имеет анализ показателей важности критериев  $\omega$ , которые в соответствии с общей задачей теоретического обобщения моделей многокритериального выбора должны быть определены на основе относительных показателей важности критериев  $\Theta$ .

#### 3.2.1. Многокритериальная постановка задачи ранжирования

Известно, что в модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  показатели важности характеризуют степень влияния компоненты векторного критерия  $f_i$  на результирующую функцию  $\Phi$  следующим образом:

$$\Phi = \sum_{k=1}^m \omega_k f_k, \quad \sum_{k=1}^m \omega_k = 1. \quad (3.18)$$

Разделим компоненты векторного критерия  $F$  по группам важности  $I_A, I_B, I_S$ . Для удобства дальнейших рассуждений введем новую нумерацию компонент векторного критерия, вошедших в группу  $I_A$  и  $I_B$  соответственно. Для группа  $I_A$  номера будут обозначены индексом  $I_{Ai}$ , где  $i = 1, \dots, a$ , а в группе  $I_B$  соответственно  $I_{Bj}$ , где  $j = 1, \dots, b$ .

В модели  $B = \langle X, F_m, N, G, \Theta \rangle$  информация об относительной важности критериев используется для изменения компонент векторного критерия  $F$  в целях формирования компонент нового векторного критерия  $G$ , так что для компонент

векторного критерия  $F$  из группы  $I_A$  выполняется  $g_{Ai} = f_{Ai}$ , а для новых компонент векторного критерия  $G$  – соответственно  $g_{AiBj}$ . Введем новую группу компонент  $I_C$  векторного критерия  $G$ . В данную группу входят новые компоненты векторного критерия  $G$ , составленные как линейные комбинации компонент векторного критерия  $F$  из групп  $I_A$  и  $I_B$  с учетом информации об относительной важности критериев. Номера в данной группе обозначим  $l$ , а количество компонент векторного критерия  $G$ , вошедших в группу  $C$  -  $c=a \cdot b$ .

Тогда номер новой компоненты  $g_1$  ( $l = 1$ ) будет соответствовать номер  $g_{A1B1}$ , для компоненты  $g_2$  ( $l = 2$ ) – номер  $g_{A1B2}$  и так далее. Пусть  $G_A = \sum_{i=1}^a g_{Ai}$  – сумма новых компонент векторного критерия с номерами из множества  $I_A$ , тогда  $G_C = \sum_{l=1}^c g_l$ . В соответствии с преобразованием  $N$  положим, что сумма всех компонент векторного критерия определяется следующим образом:

$$\Phi = G_A + G_C + G_S = \sum_{i=1}^a \omega_i f_i + \sum_{j=1}^b \omega_j f_j + \sum_{s=1}^s \omega_s f_s \quad (3.19)$$

В задаче необходимо отыскать значения  $\omega_i$ ,  $\omega_j$ ,  $\omega_s$ - показатели важности компонент векторного критерия  $F$  из групп  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_S$  соответственно.

Ниже рассматриваются утверждения для определения весовых показателей важности критериев  $\omega$  многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  на основе коэффициентов относительной важности критериев в многокритериальной модели  $B = \langle X, F_m, G, N, \Theta \rangle$ .

### 3.2.2. Результаты исследования модели

Для формализованного описания результатов исследования модели многокритериального выбора, позволяющей осуществить ранжирование вариантов управленческих решений, сформулируем и докажем следующие утверждения.

**Утверждение 3.1.** Пусть в многокритериальной модели  $B = \langle X, F_m, N, G, \Theta \rangle$  задано множество  $I$  номеров компонент векторного критерия, и компоненты векторного критерия с номерами  $i \in I_A$ , с номерами  $j \in I_B$  и компоненты с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$ . Пусть набор коэффициентов  $\Theta_{ij}$  определен для всех  $i \in I_A$  и  $j \in I_B$ . Тогда показатели важности  $\omega$  для многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  будут определяться по формулам:

для всех компонент  $F$  с номерами  $i \in I_A$  по выражению

$$\omega_i = \frac{1+b}{a(1+b) + \Theta + s}; \quad (3.20)$$

для всех компонент  $F$  с номерами  $j \in I_B$  по выражению

$$\omega_j = \frac{\Theta_i}{a(1+b) + \Theta + s}; \quad (3.21)$$

для всех компонент  $F$  с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$  по выражению

$$\omega_s = \frac{1}{a(1+b) + \Theta + s}, \quad (3.22)$$

где  $\Theta_j = \sum_{i=1}^a \Theta_{ij}$ ,  $\forall i \in I_A$ ,  $\Theta = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a \Theta_{ij}$ ,  $\forall j \in I_B$ ,  $\forall i \in I_A$ ;  $a$  – количество компонент  $F$  с номерами  $i \in I_A$ ;  $b$  – количество компонент  $F$  с номерами  $j \in I_B$  и  $s$  – количество компонент  $F$  с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$ .

**Доказательство.** Пусть информация об относительной важности критериев задана набором коэффициентов относительной важности компонент векторного критерия  $\Theta_{AiBi}$  для всех  $Ai \in I_A$  и  $Bj \in I_B$ .

Тогда в соответствии с преобразованием  $N$  новые компоненты векторного критерия будут являться элементами матрицы  $G_C$ :

$$G_C = \begin{pmatrix} \Theta_{A1B1} \cdot f_{B1} + f_{A1} & \dots & \Theta_{A1Bj} \cdot f_{Bj} + f_{A1} & \dots & \Theta_{A1Bb} \cdot f_{Bb} + f_{A1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AiB1} \cdot f_{B1} + f_{Ai} & \dots & \Theta_{AiBj} \cdot f_{Bj} + f_{Ai} & \dots & \Theta_{AiBb} \cdot f_{Bb} + f_{Ai} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AaB1} \cdot f_{B1} + f_{Aa} & \dots & \Theta_{AaBj} \cdot f_{Bj} + f_{Aa} & \dots & \Theta_{AaBb} \cdot f_{Bb} + f_{Aa} \end{pmatrix}.$$

Произведем над матрицей  $G_C$  преобразования:

$$G_C = \begin{pmatrix} \Theta_{A1B1} \cdot f_{B1} & \dots & \Theta_{A1Bj} \cdot f_{Bj} & \dots & \Theta_{A1Bb} \cdot f_{Bb} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AiB1} \cdot f_{B1} & \dots & \Theta_{AiBj} \cdot f_{Bj} & \dots & \Theta_{AiBb} \cdot f_{Bb} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AaB1} \cdot f_{B1} & \dots & \Theta_{AaBj} \cdot f_{Bj} & \dots & \Theta_{AaBb} \cdot f_{Bb} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_{A1} & \dots & f_{A1} & \dots & f_{A1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{Ai} & \dots & f_{Ai} & \dots & f_{Ai} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{Aa} & \dots & f_{Aa} & \dots & f_{Aa} \end{pmatrix}$$

Получим следующее матричное уравнение для расчета новых компонент векторного критерия  $G$  с номерами  $AiBj$ .

$$G_C = \begin{pmatrix} \Theta_{A1B1} & \dots & \Theta_{A1Bj} & \dots & \Theta_{A1Bb} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AiB1} & \dots & \Theta_{AiBj} & \dots & \Theta_{AiBb} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AaB1} & \dots & \Theta_{AaBj} & \dots & \Theta_{AaBb} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_{B1} \\ \dots \\ f_{Bj} \\ \dots \\ f_{Bb} \end{pmatrix}^T + \begin{pmatrix} d_{B1} \\ \dots \\ d_{Bj} \\ \dots \\ d_{Bb} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_{A1} \\ \dots \\ f_{Ai} \\ \dots \\ f_{Aa} \end{pmatrix}^T. \quad (3.23)$$

В матричной записи новые компоненты векторного критерия  $G$  с номерами  $AiBj$  для всех  $I_A, i \in I_A$  и всех  $I_B, j \in I_B$  являются элементами матрицы  $G_{AB}$ , получаемой путем решения матричного уравнения:

$$G_{AB} = \bar{\Theta}_{AB} \times F_B + D \times F_A, \quad (3.24)$$

$$\text{где } \bar{\Theta}_{AB} = \begin{pmatrix} \Theta_{A1B1} & \dots & \Theta_{A1Bj} & \dots & \Theta_{A1Bb} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AiB1} & \dots & \Theta_{AiBj} & \dots & \Theta_{AiBb} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{AaB1} & \dots & \Theta_{AaBj} & \dots & \Theta_{AaBb} \end{pmatrix}, F_B = \begin{pmatrix} f_{B1} \\ \dots \\ f_{Bj} \\ \dots \\ f_{Bb} \end{pmatrix}^T, D = \begin{pmatrix} d_{B1} \\ \dots \\ d_{Bj} \\ \dots \\ d_{Bb} \end{pmatrix}, F_A = \begin{pmatrix} f_{A1} \\ \dots \\ f_{Ai} \\ \dots \\ f_{Aa} \end{pmatrix}^T,$$

где  $\bar{\Theta}_{AB}$  – матрица предпочтений, выраженная набором коэффициентов относительной важности компонент векторного критерия  $F$  из группы  $I_A$  над компонентами из группы  $I_B$ ;  $D$  – матрица-столбец с единичными элементами;  $F_A$  и  $F_B$  – матрицы строк, элементами которых являются компоненты векторного критерия  $F$  из групп  $I_A$  и  $I_B$  соответственно.

Обозначим сумму по компонентам векторного критерия  $F$  из группы  $I_A$

$$\Theta_{AB_j} = \sum_{i=1}^a \Theta_{AiB_j} \quad (\text{сумма элементов } j\text{-го столбца матрицы предпочтений } \bar{\Theta}_{AB}).$$

Тогда  $\Theta_{AB} = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a \Theta_{AiB_j}$  (сумма всех элементов матрицы предпочтений  $\bar{\Theta}_{AB}$ ).

Показатели важности  $\omega_i, \omega_j, \omega_s$  рассчитываются по формулам:

для всех компонент  $F$  из группы  $I_A$

$$\omega_i = \frac{D_{Ai}}{D}, \quad \text{для всех } i \in I_A; \quad (3.25)$$

для всех компонент  $F$  из группы  $I_B$

$$\omega_j = \frac{D_{Bj}}{D}, \quad \text{для всех } j \in I_B; \quad (3.26)$$

для всех компонент  $F$  из группы  $I_S$

$$\omega_s = \frac{D_s}{D}. \quad \text{для всех } s \in I_S. \quad (3.27)$$

Тогда на основании анализа уравнения с учетом (3.24) получаем, что перед каждой компонентой векторного критерия  $F$  из группы  $I_A$  коэффициент определяем по формуле  $D_{Ai}=(1+b)$ , а для каждой компоненты векторного критерия  $F$  из группы  $I_B$  соответственно –  $D_{Bj}=\bar{\Theta}_{ABj}$ . У компонент из группы  $I_S$  коэффициент  $D_s$  равен 1. Знаменатель дроби определяется по формуле  $D = a(1+b) + \bar{\Theta}_{AB} + s$ .

Вернувшись к изначальной нумерации компонент векторного критерия  $F$ , получим следующие формулы для расчета весовых показателей важности компонент векторного критерия из группы  $I_A, I_B$  и  $I_S$  ( $\omega_i, \omega_j, \omega_s$ ):

для всех компонент векторного критерия с номерами  $i \in I_A$

$$\omega_i = \frac{1+b}{a(1+b) + \Theta + s}; \quad (3.28)$$

для всех компонент векторного критерия с номерами  $j \in I_B$

$$\omega_j = \frac{\Theta_j}{a(1+b) + \Theta + s}; \quad (3.29)$$

для всех компонент векторного критерия с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$ .

$$\omega_s = \frac{1}{a(1+b) + \Theta + s}, \quad (3.30)$$

где  $\Theta_j = \sum_{i=1}^a \Theta_{ij}, \forall i \in I_A$  и  $\Theta = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a \Theta_{ij}, \forall j \in I_B, \forall i \in I_A$ ;  $a$  – количество компонент  $F$  с номерами  $i \in I_A$ ;  $b$  – количество компонент  $F$  с номерами  $j \in I_B$ ;  $s$  – количество компонент  $F$  с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$ .

Утверждение 3.1. доказано.

**Утверждение 3.2.** Пусть в модели  $B = \langle X, F_m, G, N, \Theta \rangle$  в группу с номерами  $I_A$  компонент векторного критерия  $F$  входит одна компонента ( $a = 1$ ), а все остальные компоненты входят в группу с номерами  $I_B$  ( $b = m - 1$ ). Пусть для всех  $j \in I_B$  определен набор коэффициентов  $\Theta_j$ . Тогда показатели важности  $\omega$  для многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega \rangle$  будут определяться по формулам:

для компоненты  $F$  с номером  $i \in I_A$

$$\omega_i = \frac{m}{m + \Theta}; \quad (3.31)$$

для всех компонент  $F$  с номерами  $j \in I_B$

$$\omega_j = \frac{\Theta_j}{m + \Theta}, \quad (3.32)$$

где  $\Theta = \sum_{j=1}^b \Theta_j, \forall j \in I_B$ ;  $b$  – количество компонент  $F_m$  с номерами  $j \in I_B$ .

Доказательство утверждения 3.2 аналогично доказательству утверждения 3.1. для случая:  $a=1, b=m-1$ .

**Утверждение 3.3.** Пусть в многокритериальной модели  $B = \langle X, F_m, G, N, \Theta \rangle$  задано множество  $I$  номеров компонент векторного критерия, компоненты векторного критерия с номерами  $i \in I_A$ , с номерами  $j \in I_B$ , компоненты векторного критерия с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$  и набор коэффициентов  $\Theta_{ji}$  определен для всех

$i \in I_A$  и  $j \in I_B$ . Тогда показатели важности  $\omega$  для многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  будут определяться по формулам:

для всех компонент векторного критерия с номерами  $i \in I_A$

$$\omega_i = \frac{1 + \Theta_i}{a(1+b) + \Theta + s}; \quad (3.33)$$

для всех компонент векторного критерия с номерами  $j \in I_B$

$$\omega_j = \frac{a}{a(1+b) + \Theta + s}; \quad (3.34)$$

для всех компонент векторного критерия с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$

$$\omega_s = \frac{1}{a(1+b) + \Theta + s}, \quad (3.35)$$

где  $\Theta_i = \sum_{j=1}^b \Theta_{ji}, \forall j \in I_B$  и  $\Theta = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \Theta_{ji}, \forall i \in I_A, \forall j \in I_B$ ;  $a$  – количество компонент  $F$  с номерами  $i \in I_A$ ;  $b$  – количество компонент  $F$  с номерами  $j \in I_B$ ;  $s$  – количество компонент  $F$  с номерами  $s \in I \setminus (I_A \cup I_B)$ .

Утверждение 3.3. доказывается аналогично утверждению 3.1.

**Утверждение 3.4.** Пусть в модели  $B = \langle X, F_m, G, N, \Theta \rangle$  в группу с номерами  $I_B$  компонент векторного критерия  $F$  входит одна компонента ( $b=1$ ), в группу с номерами  $I_A$  входят все остальные компоненты ( $a = m - 1$ ). Пусть для всех  $i \in I_A$ , определен набор коэффициентов  $\Theta_i$ . Тогда показатели важности  $\omega$  для многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  будут определяться по формулам:

для компонент  $F$  с номерами  $i \in I_A$

$$\omega_i = \frac{1 + \Theta_i}{2a + \Theta}; \quad (3.36)$$

для компоненты векторного критерия с номером  $j$

$$\omega_j = \frac{a}{2a + \Theta}, \quad (3.37)$$

где  $\Theta = \sum_{i=1}^a \Theta_i, \forall i \in I_A$ ;  $a$  – количество компонент  $F$  с номерами  $i \in I_A$ ;  $m$  – количество компонент векторного критерия  $F$ .

Утверждение 3.4 следует из утверждения 3.3 при  $a = m-1, b = 1$ .

*Анализ результатов теоретического обобщения*

Используя показатели  $\Theta_{ji}$  при расчете весовых показателей важности  $\omega$ , компоненты векторного критерия  $F$ , входящих в группу  $I_A$ , дифференцированы по важности, исходя из следующих соображений: если один и тот же параметр  $w_j$  по менее важному  $j$ -му критерию компенсируется параметром  $w_k$ , по  $k$ -му критерию параметр важности  $w_l$  – по  $l$ -му критерию (при условии, что  $w_k \neq w_l$ ). Тогда в группе  $I_A$  для показателей важности  $\omega_k$  для  $k$ -го и  $\omega_l$  для  $l$ -го критерия выполняются соотношения  $w_k < w_l$ , то  $\omega_k > \omega_l$ . В группах  $I_B$  и  $I_S$  величины  $\omega$  равны, то есть  $\omega_j = \omega_{j+1} = \omega_{j+\dots}$ ,  $\omega_s = \omega_{s+1} = \omega_{s+\dots}$ .

Если для расчета показателей важности  $\omega$  используется показатель  $\Theta_{ij}$ , то дифференцированными по важности являются компоненты векторного критерия  $F$ , входящие в группу  $I_B$ , исходя из следующих соображений: если один и тот же параметр  $w_i$  по более важному критерию  $i$ -му компенсирует параметр  $w_k$  по  $k$ -му критерию и  $w_l$  – по  $l$ -му критерию, при условии, что  $w_k \neq w_l$ . Тогда в группе  $I_B$  для показателей важности  $\omega_k$  для  $k$ -ого и  $\omega_l$  для  $l$ -го критерия выполняется условие  $w_k < w_l$ , то  $\omega_k < \omega_l$ , и наоборот. Компоненты  $F$ , входящие в группы  $I_A$  и  $I_S$  равны по важности, то есть  $\omega_i = \omega_{i+1} = \omega_{i+\dots}$ ,  $\omega_s = \omega_{s+1} = \omega_{s+\dots}$ .

Это позволяет использовать полученные результаты утверждений (3.1) и (3.2) только при теоретико-множественном анализе в частных случаях, когда

$$\{a = 1; b = m - 1; \Theta_j\}, \quad (3.38)$$

$$\{a = m - 1; b = 1; \Theta_i\}. \quad (3.39)$$

Таким образом, на основе сформулированных и доказанных утверждений 3.1 и 3.3 с использованием утверждений 3.2 и 3.4 представляется возможным определить значения показателей важности  $\Theta$  модели  $B$  на основе показателей



важности  $\omega$  модели  $A$  и тем самым произвести учет результатов мониторинга динамики пожара с применением математического моделирования действий пожарных подразделений.

### 3.3. Исследование модели теоретико-множественного анализа решений

Исследование модели теоретико-множественного анализа производится с использованием результатов анализа утверждений 3.1 и 3.3, формализованных утверждениями 3.2 и 3.4. При исследовании модели производится решение основной задачи теоретического обобщения многокритериальных моделей  $A$  и  $B$ , состоящее в определении относительных показателей важности критериев  $\Theta$  в модели  $B$ , на основе количественных значений показателей важности  $\omega$  модели  $A$ . Результаты исследования показателей относительной важности критериев в модели теоретико-множественного анализа являются теоретической основой для разработки метода поддержки принятия управленческих решений на основе результатов моделирования оперативно-тактических действий с применением мониторинга динамики пожара в здании.

#### 3.3.1. Многокритериальная постановка задачи

Рассматриваются общие и частные случаи определения коэффициентов относительной важности критериев  $\Theta$  многокритериальных моделей  $B = \langle X, F_m, N, G, \Theta \rangle$  на основе показателей важности критериев  $\omega$  многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$ .

В математической модели для реализации процедур выбора вариантов предполагается декомпозиция компонент векторного критерия по группам важности в соответствии с преобразованием  $N$ , для чего на основе утверждения (3.2) и (3.4) из доказанных в диссертации утверждений предлагается два способа декомпозиции компонент векторного критерия.

*Первый способ.* В группу  $I_A$  более важных компонент векторного критерия входит одна компонента  $f_k$  с номером  $k$ , для которой весовой коэффициент  $\omega_k$  имеет максимальное значение среди всех  $\omega_i, i = 1, 2, \dots, m$ . Все остальные компоненты векторного критерия  $f_j$  с номерами  $j \in I \setminus k$  относятся к группе  $I_B$ .

*Второй способ.* В группу  $I_B$  менее важных компонент векторного критерия  $F$  входит одна компонента  $f_k$  с номером  $k$ , для которой показатель важности  $\omega_k$  имеет минимальное значение среди всех  $\omega_i, i = 1, 2, \dots, m$ . Все остальные компоненты векторного критерия  $f_i$  с номерами  $i \in I \setminus k$  относятся к группе  $I_A$ .

Стоит отметить, что первый и второй способ декомпозиции компонент векторного критерия  $F$  предусматривает, что множество критериев с отсутствием информации о важности пусто, то есть  $I_s \in \emptyset$ . Поясним данное допущение. В результате анализа моделей оперативно-тактических действий и разработанных в диссертации моделей мониторинга для каждого параметра модели предусмотрено значение коэффициента важности, отличное от нуля. Параметры с отсутствием информации о важности в моделях рассматриваются как малозначащие и из дальнейшего анализа исключаются. Очевидно, что в модели многокритериального выбора их также можно опустить.

### 3.3.2. Результаты исследования теоретико-множественной модели

Результаты исследования показателей относительной важности критериев в модели теоретико-множественного анализа вариантов управленческих решений представляют собой совокупность двух сформулированных и доказанных утверждений, позволяющих в практике многокритериальной оптимизации реализовать предложенные способы декомпозиции компонент векторного критерия  $F$ .

**Утверждение 3.5.** Пусть в многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  задано множество номеров компонент векторного критерия  $I$ , и в группе  $A$  находится одна компонента векторного критерия с номером  $i$  в группе  $B$  – все остальные компоненты с номерами  $j, j \in I \setminus i$ , известно, что весовые показатели для

ранжирования равны  $\omega_k$ , тогда информация об относительной важности критериев выраженная набором, состоящим из  $j$  коэффициентов относительной важности, определяемых по формуле

$$\Theta_j = m \frac{\omega_j}{\omega_i}, \forall i, j \in I \rightarrow \omega_i > \omega_j, \quad (3.40)$$

где  $m$  – размерность векторного критерия в многокритериальной задаче выбора управленческих решений.

**Доказательство.** В группе  $I_A$  находится одна компонента векторного критерия с номером  $i$ , в группе  $I_B$  – все остальные компоненты с номерами  $j$ ,  $j \in I \setminus i$ . В соответствии с преобразованием  $N$  для мультипликативного вида сформируем новый векторный критерий  $G$ .

Определим размерность нового векторного критерия:

$$p = a \cdot b + a + s = 1 \cdot b + 1 + 0 = m, \quad (3.41)$$

тогда набор параметров относительной важности критериев:

$$\Theta_j, \text{ для всех } j \in I \setminus i.$$

По преобразованию  $N$  сформируем новый векторный критерий:

$$g_i = f_i \text{ и } g_j = f_i \cdot f_j^{\Theta_j} \text{ для всех } j \in I \setminus i. \quad (3.42)$$

Тогда критерий  $G$  будет записан следующим образом:

$$\Phi = f_i \cdot \prod_{\forall j \in I \setminus i} f_j \cdot f_j^{\Theta_j}. \quad (3.43)$$

Для расчета параметров важности критериев  $\omega_k$  на основе относительных параметров важности критериев  $\Theta_j$  составим уравнение

$$\prod_{k=1}^m f_k^{\omega_k} = f_i \cdot \prod_{\forall j \in I \setminus i} f_j \cdot f_j^{\Theta_j}. \quad (3.44)$$

В соответствии с утверждением 3.1 и 3.2 расчет показателей важности компонент векторного критерия из группы  $I_A$ ,  $I_B$  будет осуществляться по формулам:

*для компоненты векторного критерия с номером  $i$*

$$\omega_i = \frac{m}{m + \Theta}; \quad (3.45)$$



$$\text{где } \Theta = \begin{pmatrix} \Theta_1 \\ \dots \\ \Theta_d \\ \dots \\ \Theta_b \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} (\omega_1 - 1) & \dots & \omega_1 & \dots & \omega_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_d & \dots & (\omega_d - 1) & \dots & \omega_d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_b & \dots & \omega_b & \dots & (\omega_b - 1) \end{pmatrix}, \bar{B} = \begin{pmatrix} -m\omega_1 \\ \dots \\ -m\omega_d \\ \dots \\ -m\omega_b \end{pmatrix}.$$

Систему линейных уравнений решим методом Крамера. Тогда значения коэффициентов  $\Theta_d$  рассчитываются по формулам:

$$\Theta_l = \frac{\Delta_l}{\Delta}, \quad (3.50)$$

где  $\Delta = \det A$  – определитель матрицы  $A$ ;  $\Delta_l = \det A_l$  – определитель матрицы  $A_l$ .

Матрица  $A_l$  получается путем замены в матрице  $A$   $l$ -го столбца вектор-столбцом  $B$  свободных членов.

Определитель матрицы  $A$  равен:

$$\Delta = \det A = (-1)^b \left( 1 - \sum_{d=1}^b \omega_d \right).$$

В свою очередь определитель матрицы  $A_l$  рассчитывается по формуле

$$\Delta_d = \det A_d = (-1)^b m\omega_d.$$

Тогда, используя формулу (3.50), получаем формулу для расчета относительного показателя важности критериев:

$$\Theta_d = \frac{\Delta_d}{\Delta} = \frac{(-1)^b m\omega_d}{(-1)^b \left( 1 - \sum_{d=1}^b \omega_d \right)} = \frac{m\omega_d}{1 - \sum_{d=1}^b \omega_d}.$$

Учитывая изначальную нумерацию компонент векторного критерия  $F$  с учетом условия нормировки весовых коэффициентов  $\sum_{k=1}^m \omega_k = 1$  получаем следующую формулу для расчета логарифмических коэффициентов относительной важности

$$\Theta_j = m \frac{\omega_j}{\omega_i}.$$

Утверждение 3.5. доказано.

**Утверждение 3.6.** Пусть в многокритериальной модели  $A = \langle X, F_m, \Phi, \omega_m \rangle$  задано множество номеров компонент векторного критерия  $I$ , в группе  $I_B$  находится одна компонента векторного критерия с номером  $j$ , а в группе  $I_A$  – все остальные компоненты с номерами  $j$ ,  $j \in I \setminus i$ , известно, что весовые показатели для ранжирования равны  $\omega_k$ . Тогда информация об относительной важности критериев, выраженная набором, состоящим из  $i$  обратных коэффициентов относительной важности, определяемых по формуле

$$\Theta_i = (m-1) \frac{\omega_i}{\omega_j} - 1, \forall i, j \in I \rightarrow \omega_i > \omega_j, \quad (3.51)$$

где  $m$  – размерность векторного критерия в многокритериальной задаче выбора управленческих решений.

**Доказательство.** Пусть в группе  $B$  находится одна компонента векторного критерия с номером  $j$ . Тогда в группе  $A$  находятся все остальные компоненты с номерами  $i$ ,  $i \in I \setminus j$ .

Определим размерность нового векторного критерия

$$p = a \cdot b + a + s = (m-1) \cdot 1 + (m-1) + 0 = 2m - 2. \quad (3.52)$$

Определим набор показателей относительной важности критериев

$$\Theta_i, \text{ для всех } i \in I \setminus j.$$

С использованием преобразования  $N$  в мультипликативной форме сформируем новый векторный критерий для мультипликативного вида

$$g_i = f_i \text{ и } g_{ij} = f_j \cdot f_i^{\Theta_i} \text{ для всех } i \in I \setminus j.$$

Тогда критерий  $G$  в мультипликативной форме будет записан следующим образом

$$\Phi = (m-1) \cdot f_i \cdot \prod_{\forall i \in I \setminus j} f_j \cdot f_i^{\Theta_i}. \quad (3.53)$$

Для расчета весовых коэффициентов  $\omega_k$  на основе коэффициентов  $\Theta_j$  составим уравнение

$$\prod_{k=1}^m f_k^{\omega_k} = (m-1) \cdot f_i \cdot \prod_{\forall i \in I \setminus j} f_j \cdot f_i^{\Theta_i}. \quad (3.54)$$

Исходя из утверждения (3.3) и (3.4). расчет показателей важности компонент векторного критерия из группы  $I_A, I_B$  будет осуществляться по формулам:

для всех компонент векторного критерия с номерами  $i \in I \setminus j$

$$\omega_i = \frac{1 + \Theta_i}{2(m-1) + \Theta}; \quad (3.55)$$

для компоненты векторного критерия с номером  $j$

$$\omega_j = \frac{m-1}{2(m-1) + \Theta}, \quad (3.56)$$

где  $\Theta = \sum_{\forall i \in I \setminus j} \Theta_i$ .

Задача определения конкретных значений коэффициентов  $\Theta_i$  решается аналогично случаю 1, с использованием матричного уравнения:

$$\Theta A = B, \quad (3.57)$$

$$\text{где } \Theta = \begin{pmatrix} \Theta_1 \\ \dots \\ \Theta_l \\ \dots \\ \Theta_a \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} (\omega_1 - 1) & \dots & \omega_1 & \dots & \omega_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_l & \dots & (\omega_l - 1) & \dots & \omega_l \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_a & \dots & \omega_a & \dots & (\omega_a - 1) \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 - 2a\omega_1 \\ \dots \\ 1 - 2a\omega_l \\ \dots \\ 1 - 2a\omega_a \end{pmatrix}.$$

Решение уравнения (3.57) методом Крамера представляется в виде:

$$\Theta_l = \frac{\Delta_l}{\Delta} = \frac{(-1)^a \left( a\omega_l - \left( 1 - \sum_{l=1}^a \omega_l \right) \right)}{(-1)^a \left( 1 - \sum_{l=1}^a \omega_l \right)} = \frac{a\omega_l}{1 - \sum_{l=1}^a \omega_l} - 1.$$

Вернувшись к изначальной нумерации компонент векторного критерия и с учетом условия нормировки, используемых в модели  $A \sum_{k=1}^m \omega_k = 1$ , получаем следующую формулу для расчета показателей относительной важности:

$$\Theta_i = (m-1) \frac{\omega_i}{\omega_j} - 1, \quad (3.58)$$

Утверждение 3.6. доказано.

Результаты исследования моделей впервые позволили произвести теоретическое обобщение понятий важности критериев для моделей ранжирования и теоретико-множественного анализа управленческих решений. Исследование моделей произведено с применением преобразования  $N$  над векторным критерием, представленным в аддитивной и мультипликативной форме, а также анализом общеизвестного понятия оптимальности по Парето.

Полученные теоретические результаты позволяют реализовать многокритериальную оптимизацию и произвести обоснованный выбор наилучшего варианта в процессе поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров. Важным аспектом теоретических моделей является возможность использования результатов математического моделирования оперативно-тактических действий пожарных подразделений в совокупности с информацией от систем мониторинга динамики пожара в здании, представленной в количественном виде.

Результаты исследования, сформированные и доказанные с применением методов матричного анализа, включая процедуру решения систем линейных уравнений методом Крамера, являются теоретической основой для разработки метода поддержки принятия управленческих решений.

### **3.4. Разработка метода поддержки принятия управленческих решений**

В результате исследования моделей ранжирования и теоретико-множественного анализа управленческих решений определено наличие количественной связи между методами многокритериальной оптимизации. Это позволяет конструировать многоуровневые процедуры многокритериального выбора, реализующие одновременно распределение управленческих решений по множествам в соответствии с понятием оптимальности по Парето, и ранжирование управленческих решений в порядке предпочтительности для окончательного выбора. Общая структура совокупного взаимодействия методов в многокритериальной процедуре принятия решений показана на рисунке 3.1.



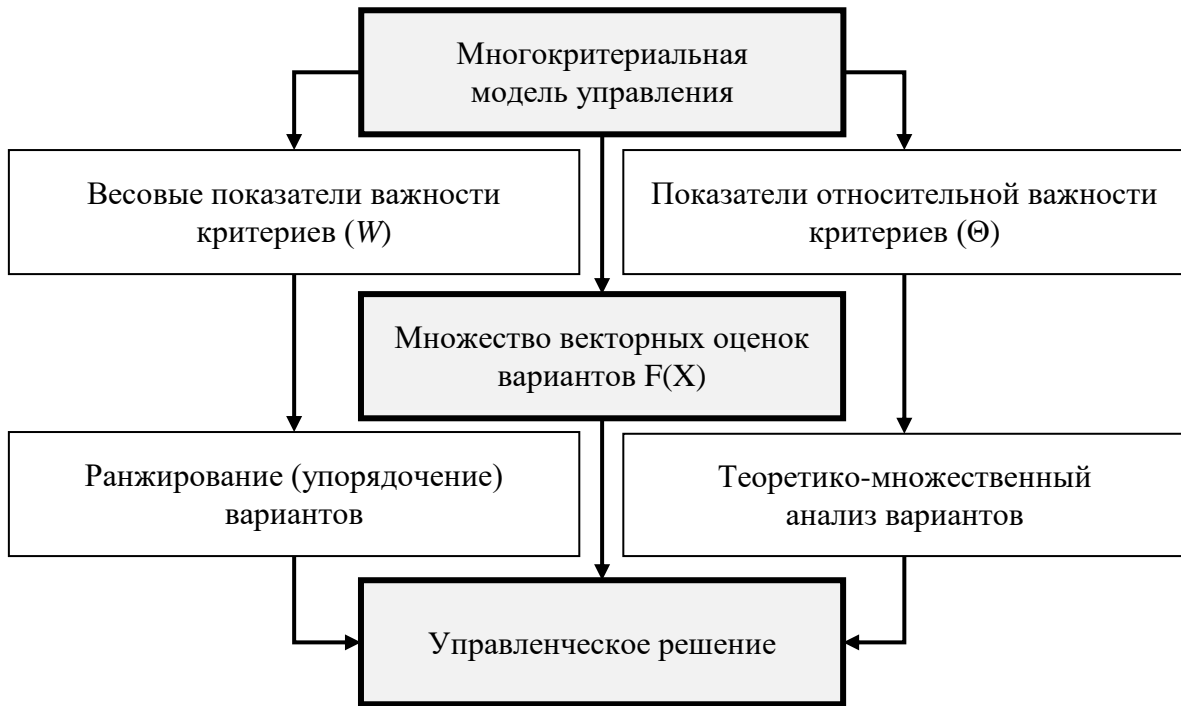


Рисунок 3.1 – Структурная схема многокритериального выбора

Предложенная структура является теоретической основой для систем поддержки принятия решений, используемых в практике борьбы с пожарами. Процедура анализа реализуется в виде метода и предназначена для программной реализации отдельной аналитической подсистемы поддержки принятия решений.

### 3.4.1. Структура метода поддержки принятия управленческих решений

Метод поддержки принятия управленческих решений представляет собой многоуровневую процедуру многокритериального анализа векторных оценок вариантов управленческих решений и включает в себя пять основных этапов, детально рассматриваемых ниже.

В качестве исходных данных для реализации многокритериальной оптимизации выступает задача многокритериального выбора, состоящая из совокупности критериев, показателей их важности и векторных оценок решений.

На *первом этапе* метода производится нормализация критериев выбора, показателей их важности. В качестве результата реализации данного этапа предложенного метода многокритериальной оптимизации формируется нормализованная задача многокритериального выбора решений.

На *втором этапе* производится ранжирование вариантов управленческих решений с использованием аддитивной либо мультипликативной функции в зависимости от структуры исходных данных.

*Третий этап* метода предусматривает расчет относительных показателей важности. Для этого используются результаты теоретического обобщения моделей многокритериального выбора – утверждения (3.5) и (3.6). На основе относительных показателей важности применяется мультипликативное либо аддитивное преобразование  $N$ , позволяющее получить новый векторный критерий и соответствующие новые векторные оценки вариантов управленческих решений.

На *четвёртом этапе* с использованием алгоритма поиска множества Парето производится исключение из дальнейшего рассмотрения непарето-оптимальных вариантов.

На *пятом этапе* оставшиеся неисключенные варианты объединяются во множество выбранных вариантов и упорядочиваются в соответствии с результатами ранжирования для удобства проведения процедуры окончательного выбора наилучшего варианта.

Разработанная структура метода поддержки принятия управленческих решений представлена на рисунке 3.2.

### 3.4.2. Содержание метода поддержки принятия управленческих решений

В соответствии с разработанной структурой метода поддержки принятия решений предлагается следующая методика.

Исходными данными для реализации методики многокритериального анализа вариантов управленческих решений являются:

*множество вариантов управленческих решений*

$$X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}, i = 1, 2, \dots, n;$$

*множество компонент векторного критерия*

$$F = \{f_1, \dots, f_i, \dots, f_m\}, i = 1, 2, \dots, m;$$

*множество значений показателей важности критериев*

$$W = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_m\}.$$

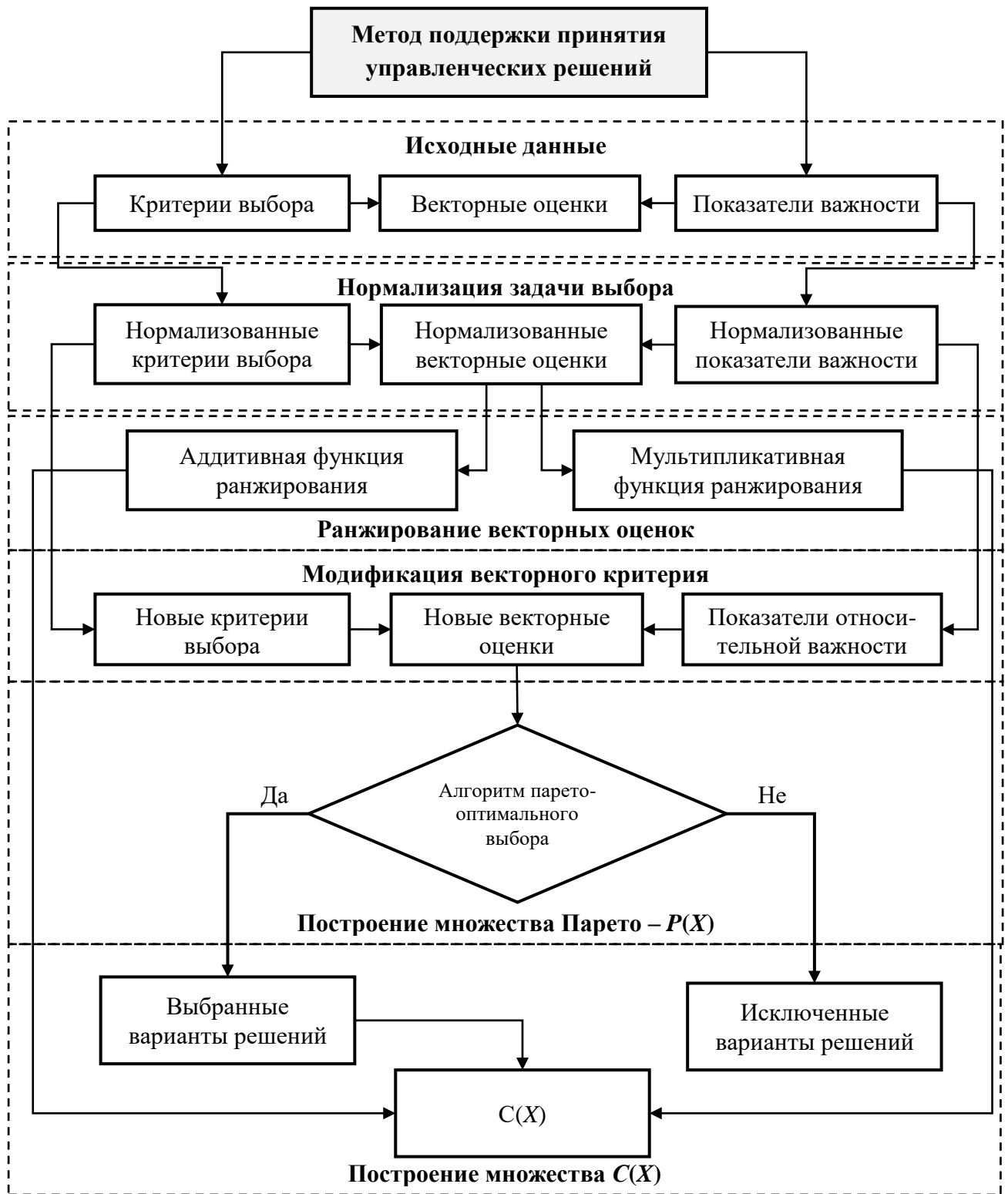


Рисунок 3.2 – Структура метода поддержки принятия управленческих решений

Объединение вариантов управленческих решений и компонент векторного критерия индуцирует множество векторных оценок.

Множество векторных оценок  $F(X)$  удобно представить в виде таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Множество векторных оценок вариантов

$X \backslash F$	$f_1$	...	$f_j$	...	$f_m$
$x_1$	$f_1(x_1)$	...	$f_j(x_1)$	...	$f_m(x_1)$
...	...	...		...	...
$x_i$	$f_1(x_i)$	...	$f_j(x_i)$	...	$f_m(x_i)$
...	...	...	...	...	...
$x_n$	$f_1(x_n)$	...	$f_j(x_n)$	...	$f_m(x_n)$

В таблице 3.1.  $i$ -я строка – векторная оценка варианта  $i$ -го варианта  $x_i$ , то есть  $F(x_i) = \{f_1(x_i), \dots, f_j(x_i), \dots, f_m(x_i)\}$ . В свою очередь  $i$ -й столбец – множество значений  $i$ -го критерия, то есть  $f_i(X) = \{f_i(x_1), \dots, f_i(x_i), \dots, f_i(x_n)\}$ .

В задаче нужно найти множество вариантов  $C(X)$ , из которых необходимо производить окончательный выбор с учетом результатов ранжирования вариантов в порядке предпочтительности.

Методика многокритериального анализа вариантов включает в себя последовательное выполнение нескольких этапов.

*Этап 1. Нормализация многокритериальной задачи.* На данном этапе производится приведение множества значений компонент векторного критерия к интервалу  $[0, 1]$  и нормировка весовых коэффициентов важности для выполнения

$$\text{условия } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1.$$

Для нормализации компонент векторного критерия в соответствии с допустимым преобразованием над компонентами критерия предлагается использование формулы

$$q_i = \frac{f_i}{\text{Max}f_i(X)}, \quad (3.59)$$

где  $q_i$  – нормированный критерий  $f_i$ ;  $\text{Max}f_i(X)$  – максимальное значение критерия  $f_i$  на множестве вариантов  $X$ .

Для нормирования показателей важности компонент векторного критерия с целью приведения их в аддитивное соответствие единице применяется формула

$$\omega_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^m w_i}. \quad (3.60)$$

По окончании реализации данного этапа формируется нормализованная задача многокритериального выбора, которая включающая в себя:

*множество вариантов*

$$X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}, i = 1, 2, \dots, n;$$

*множество компонент нормализованного векторного критерия*

$$Q = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_m\}, i = 1, 2, \dots, m;$$

*множество нормированных весовых коэффициентов важности*

$$\bar{E} = \{\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_m\}, \sum_{i=1}^m \omega_i = 1.$$

Векторные оценки вариантов  $Q(X)$  задаются с помощью таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Множество нормированных векторных оценок вариантов

$X \backslash Q$	$q_1$	...	$q_j$	...	$q_m$
$x_1$	$q_1(x_1)$	...	$q_j(x_1)$	...	$q_m(x_1)$
...	...	...		...	...
$x_i$	$q_1(x_i)$	...	$q_j(x_i)$	...	$q_m(x_i)$
...	...	...	...	...	...
$x_n$	$q_1(x_n)$	...	$q_j(x_n)$	...	$q_m(x_n)$

В таблице 3.2.  $i$ -я строка – нормализованная векторная оценка варианта  $i$ -го варианта  $x_i$ , то есть  $Q(x_i) = \{q_1(x_i), \dots, q_j(x_i), \dots, q_m(x_i)\}$ , в свою очередь  $i$ -й столбец – множество значений  $i$ -го критерия, то есть  $q_i(X) = \{q_i(x_1), \dots, q_i(x_i), \dots, q_i(x_n)\}$ .

*Этап 2. Ранжирование вариантов управленческих решений.* При реализации методик многокритериального анализа в части ранжирования векторных оценок для каждого варианта  $x_i \in X$  необходимо вычислить натуральное число - значение рейтинга  $R = \{1, \dots, i, \dots, n\}$ ,  $R \in \mathbb{N}$ . Для каждого варианта решения определяется значение  $\Phi(x)$  с помощью аддитивной либо мультипликативной функции, после чего применяется следующий алгоритм ранжирования.

Пусть имеется два множества  $X$  и  $R$ . Количество элементов в данных множествах одинаково и равно  $n$ . В начале работы алгоритма среди всех значений функции  $\Phi$  на множестве  $X$  выбирается максимальное значение  $\Phi(x_k) = \text{Max} \Phi(X)$ . Ему присваивается значение  $R_1 = 1$ . Вариант  $x_k$  и значение  $R_1$  удаляются соответственно из множества  $X$  и из множества  $R$ . Далее проверяется условие

$$X \setminus x_k = \emptyset. \quad (3.61)$$

Если условие (3.61) выполняется, то работа алгоритма заканчивается, если же нет, то выбирается максимальное значение функции  $\Phi$  на множестве  $X \setminus x_k$ . Ему присваивается значение  $R_2 = 2$  и так далее до тех пор, пока условие (3.61) не будет выполнено. Таким образом, каждому варианту из множества  $X$  назначается рейтинг из  $R$  упорядочения вариантов в порядке возрастания значений  $R$ , реализует функцию ранжирования вариантов управленческих решений.

*Этап 3. Модификация векторного критерия.* На данном этапе определяются значения относительных показателей важности критериев выбора, то есть на этом этапе методики многокритериального анализа используются результаты теоретического исследования моделей многокритериального выбора, формализованные в утверждении (3.5) и утверждении (3.6), предусматривающие два основных способа модификации векторного критерия.

*Способ 1.* На основе утверждения (3.3) необходимо одну компоненту с максимальным значением показателя важности  $\omega$  отнести к группе  $I_A$ , а все остальные компоненты объединить в группу  $I_B$ . Для каждой компоненты векторного критерия из группы  $I_B$  необходимо определить совокупность относительных показателей важности критериев по формуле

$$\Theta_j = m \frac{\omega_j}{\omega_i}, \forall j \in I_B. \quad (3.62)$$

Применение преобразования  $N$  для модификации векторного критерия производится исходя из комплекса следующих условий.

Компонента векторного критерия с номером  $i$  из группы  $I_A$  остаётся без изменения, то есть

$$g_i = q_i. \quad (3.63)$$

Компоненты векторного критерия  $Q$  из группы  $I_B$  с номерами  $j$  заменяются следующими величинами:

*для аддитивного случая*

$$g_j = q_i + \Theta_j q_j; \quad (3.64)$$

*для мультипликативного случая*

$$g_j = q_i \cdot q_j^{\Theta_j}. \quad (3.65)$$

При практическом применении первого способа модификации векторного критерия размерность нового векторного критерия  $G$  равна размерности исходного векторного критерия  $F$  и составляет  $m$  – компонент, одной известной компоненты и  $(m - 1)$  новой компоненты, рассчитанной по предложенным формулам.

*Способ 2.* С использованием результатов утверждения (3.4) необходимо одну компоненту с минимальным значением показателя важности  $\omega$  отнести к группе  $I_B$  и присвоить ей номер  $j$ , а все остальные компоненты объединить в группу  $I_A$ . Для каждой компоненты векторного критерия из группы  $I_A$  необходимо определить совокупность обратных относительных показателей важности критериев по формуле

$$\Theta_i = (m - 1) \frac{\omega_i}{\omega_j} - 1, \forall i \in I_A. \quad (3.66)$$

Для случая 2 преобразование  $N$  при модификации векторного критерия производится, исходя из комплексного применения следующих формул.

Каждая компонента векторного критерия с номером  $i$  из группы  $I_A$  аналогично способу 1 остаётся без изменения, то есть

$$g_i = q_i. \quad (3.67)$$

Компонента векторного критерия  $Q$  из группы  $I_B$ , (то есть единственная компонента с номером  $j$ ) заменяется  $(m - 1)$  комбинациями, рассчитанными по формулами:

*для аддитивного случая*

$$g_j = \Theta_i q_i + q_j; \quad (3.68)$$

*для мультипликативного случая*

$$g_j = q_i^{\Theta_i} \cdot q_j. \quad (3.69)$$

Стоит отметить, что в данном случае размерность нового векторного критерия  $G$  увеличивается до  $p = 2m - 2$  компонент.

В результате реализации данного этапа методики многокритериального анализа вариантов управленческих решений формируется новая многокритериальная задача, состоящая из

*множества вариантов*

$$X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}, i=1, 2, \dots, n;$$

*множества компонент нового векторного критерия*

$$G = \{g_1, \dots, g_i, \dots, g_p\}, i=1, 2, \dots, p. \quad (3.70)$$

Векторные оценки вариантов  $G(X)$  задаются с помощью таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Множество новых векторных оценок вариантов

$X \backslash G$	$g_1$	...	$g_j$	...	$g_p$
$x_1$	$g_1(x_1)$	...	$g_j(x_1)$	...	$g_p(x_1)$
...	...	...	...	...	...
$x_i$	$g_1(x_i)$	...	$g_j(x_i)$	...	$g_p(x_i)$
...	...	...	...	...	...
$x_n$	$g_1(x_n)$	...	$g_j(x_n)$	...	$g_p(x_n)$

В таблице 3.3.  $i$ -я строка – нормализованная векторная оценка  $i$ -го варианта  $x_i$ , то есть  $G(x_i) = \{g_1(x_i), \dots, g_i(x_i), \dots, g_p(x_i)\}$ . В свою очередь  $i$ -й столбец – множество значений  $i$ -го критерия, то есть  $g_j(X) = \{g_j(x_1), \dots, g_j(x_i), \dots, g_j(x_n)\}$ .



В новой задаче многокритериального выбора необходимо проверить векторные оценки вариантов на парето-оптимальность и исключить доминируемые векторные оценки из дальнейшего анализа.

*Этап 4. Построение множества Парето.* На данном этапе реализации методики многокритериального анализа вариантов управленческих решений среди векторных оценок  $G(X)$  определяется подмножество парето-оптимальных векторных оценок  $P_G(X)$  с использованием разработанного алгоритма. Суть алгоритма построения множества Парето заключается в последовательном взаимном вычитании каждой векторной оценки вариантов из множества  $X$ .

Из векторной оценки варианта с номером  $k$  вычитается векторная оценка варианта с номером  $k + 1$ , то есть

$$\Delta_{k,k+1} = \{\Delta_1 = g_1(x_k) - g_1(x_{k+1}), \dots, \Delta_p = g_p(x_k) - g_p(x_{k+1})\}. \quad (3.71)$$

Если хотя бы один элемент из множества  $\Delta_{k,k+1}$  имеет положительное значение, то вариант с номером  $k$  оставляют в исходном множестве Парето. В противном случае вариант с номером  $k$  из множества Парето удаляется

$$P_G(X) \subset X, \quad (3.72)$$

где  $P_G(X)$  – множество парето-оптимальных вариантов управленческих решений в новой задаче многокритериального выбора с множеством вариантов  $X$  и векторным критерием  $G$ .

*Этап 5. Построение множества выбранных вариантов.* Выбранными вариантами управленческих решений в разработанной методике многокритериального анализа является их совокупность векторных оценок – множество, построенное по следующему правилу: из множества парето-оптимальных вариантов  $P_G(X)$  выбирается вариант, имеющий максимальное значение рейтинга  $R_i$ , в свою очередь выбранными вариантами являются варианты, имеющие меньшее значение рейтинга. Для множества выбранных вариантов выполняется условие:

$$C(X) \subset P_G(X) \subset X \quad (3.73)$$

где  $C(X)$  – множество вариантов рекомендованных лицу, принимающему решение для окончательного выбора.

Таким образом, выбранные решения с использованием предлагаемого метода будут отвечать условиям ранжирования и оптимальности по Парето.

### **Выводы по главе 3**

В результате исследования, проведенного в данной главе диссертации и состоящего в разработке совокупности моделей многокритериального анализа управленческих решений и разработке метода поддержки принятия решений на основе результатов мониторинга пожара с учетом математического моделирования оперативно-тактических действий, связанных с тушением пожаров и реализуемых силами и средствами пожарных подразделений получены следующие основные результаты.

1. Сформирована формальная постановка задачи поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров. В результате исследования задача поддержки решений определена как инструмент математического анализа имеющихся вариантов, оцениваемых по количественным критериям. Поэтому ЛПП предлагается подмножество вариантов решений, из которого необходимо производить выбор.

2. Определены свойства элементов, составляющих формальную задачу поддержки принятия решений, что позволило произвести учет результатов математического моделирования действий по тушению пожаров в совокупности с результатами мониторинга динамики пожара, представленными в количественном виде. С помощью применения теории эквивалентности многокритериальных задач количественного типа сформирована модель ранжирования и теоретико-множественного анализа управленческих решений.

3. Произведено теоретическое обобщение показателей важности количественных критериев в многокритериальных моделях анализа управленческих решений. Для исследования показателей важности сформулированы и доказаны утверждения, позволяющие произвести оценку показателей важности модели теоретико-множественного анализа решений на основе показателей важности критериев выбора в модели ранжирования вариантов управленческих решений. При

доказательстве утверждений были сформированы в матричном виде системы линейных уравнений, решение которых произведено методом Крамера.

4. Разработан метод поддержки принятия управленческих решений на основе моделирования действий по тушению пожаров с применением результатов мониторинга динамики пожара в здании. Метод представляет собой многоуровневую процедуру анализа и ранжирования вариантов управленческих решений в порядке предпочтительности для реализации окончательного выбора. В качестве теоретической основы при разработке метода были использованы результаты обобщения понятий важности критериев в моделях многокритериальной оптимизации с использованием модификации векторного критерия и формализованного понятия оптимальности по Парето.

Таким образом, полученные результаты исследования моделей многокритериальной оптимизации позволяют использовать в качестве информации для принятия решений количественные функции параметров мониторинга динамики пожара, что исключает субъективизм и человеческий фактор при реализации действий пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях.

## **ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ**

В четвертой главе рассматривается постановка, формализация и решение частных задач управления пожарными подразделениями с помощью созданного специального математического обеспечения. Решение этих частных задач произведено на основе теоретических моделей и методов мониторинга и прогнозирования динамики пожара в совокупности с математическим моделированием параметров, влияющих на процесс принятия решений при управлении пожарными подразделениями. При формализации частных задач управления проводится системный анализ специфики реализации действий по тушению пожаров в зданиях с применением пожарных подразделений.

Результаты формализации позволяют сформировать перечень основных критериев, определяющих предпочтительность управленческих решений и предложить общую многокритериальную модель управления пожарными подразделениями.

Разработанные процедуры многокритериальной оптимизации определяют важность основных критериев принятия решений, формирование которых возможно с применением детерминированных моделей оперативно-тактических действий и результатов мониторинга динамики пожара в здании. Аппроксимация эмпирических данных детерминированными моделями действий по тушению пожаров в совокупности с разработанным методом поддержки принятия решений является основой для определения нормализованных значений параметров важности, необходимых для реализации процедур многокритериальной оптимизации.

Важным аспектом моделирования поддержки принятия решений является выбор теоретической модели моделирования, позволяющей учесть результаты мониторинга динамики пожара и процедуры оптимизации управленческих решений. Для этого использованы методы многоагентного моделирования.

#### 4.1. Формализация задачи управления пожарными подразделениями

При ликвидации пожаров в зданиях нормативными документами [86–88, 112, 127, 231] регламентируется, что основные боевые действия пожарных подразделений направлены на спасание людей, находящихся внутри здания под воздействием опасных факторов пожара; эвакуацию культурно-материальных ценностей и подачу огнетушащих веществ с целью ликвидации горения.

Комплекс боевых действий, выполняемых силами и средствами пожарных подразделений, определяет решение двух задач пожаротушения:

- спасание людей при пожаре в здании;
- тушение пожара путем подачи огнетушащих веществ.

Обеспечение успешного выполнения спасательных работ достигается:

- применением способов спасания людей, обеспечивающих необходимый уровень безопасности и требуемое время на реализацию;
- исключением или снижением степени воздействия опасных факторов пожара на спасаемых и участников тушения пожара;
- реализацией защитных мероприятий в случае применения опасных для жизни людей огнетушащих веществ и составов.

Обеспечение успешного проведения действий по тушению пожара в зданиях достигается:

- созданием нормативной интенсивности подачи огнетушащих веществ во всех помещениях этажа с наличием признаков горения, а в условиях недостатка сил и средств – в крайних помещениях этажа;
- созданием условий подачи огнетушащих веществ в течение времени, необходимого для полного прекращения горения;
- введением средств подачи огнетушащих веществ одновременно в помещения очага пожара, смежные помещения и помещения возможного распространения огня по пустотам конструкций и коммуникационным каналам;
- созданием условий, исключающих возможность повторного возобновления горения в здании.

Для успешного выполнения условий при решении основной задачи на пожаре проводится разведка места пожара, целью которой является:

- выяснение мест нахождения людей для выбора кратчайших безопасных путей и способов их эвакуации или других способов спасания;
- выяснение места расположения очага пожара в здании, его размеров и вероятных направлений развития горения для определения путей продвижения к очагу пожара и выбора эффективных средств тушения, включая возможность использования в процессе тушения пожара стационарных систем пожаротушения;
- выяснение у администрации места расположения уникального и наиболее ценного оборудования, степень угрозы ему от огня и дыма, необходимость, порядок, очередность выполнения мероприятий по его эвакуации.

Практика тушения пожаров в зданиях показывает, что на начальных этапах развития пожара эффективные действия первого прибывшего пожарно-спасательного подразделения обеспечивают максимальный предотвращенный ущерб, который может быть причинен пожаром.

Возможность тушения пожара в зданиях на начальных этапах развития обеспечивается [112]:

- своевременным обнаружением пожара, что достигается путем оборудования зданий системами противопожарной защиты, автоматическими установками пожаротушения и пожарной сигнализации;
- своевременным прибытием сил и средств пожарных подразделений для ликвидации пожара прежде, чем его площадь превысит площадь, которую может ликвидировать одно пожарное подразделение, что достигается путем создания необходимого числа подразделений пожарной охраны с учетом мест их постоянной дислокации на территории населенного пункта или производственного объекта;
- своевременным проведением спасательных работ и подачей огнетушащих веществ в том числе и в очаг пожара, что достигается комплексом конструктивных, объемно-планировочных и инженерно-технических решений зданий и сооружений;

– готовностью сил и средств пожарно-спасательных подразделений к действиям по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ, связанных с тушением пожаров, что достигается комплексом мероприятий пожарно-тактической подготовки личного состава пожарно-спасательных подразделений, включая разработку и применение документов предварительного планирования действий по тушению пожаров в зданиях.

Специфика реализации действий по тушению пожаров в зданиях на начальных этапах развития обуславливает необходимость использования участниками тушения пожара средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения с необходимостью формирования звеньев газодымозащитной службы [113].

Применение сил и средств газодымозащитной службы пожарных подразделений при реализации работ по тушению пожара в ходе выполнения боевых действий определяет ряд мероприятий организационного и технического характера, выполнение которых позволяет повысить эффективность борьбы с пожарами в зданиях, а именно [113]:

- эффективного проведения разведки места пожара;
- обеспечения возможности проникновения в места воздействия опасных факторов пожара;
- эвакуации с мест воздействия опасных факторов пожара людей и имущества, оказания первой помощи пострадавшим;
- создания условий, снижающих вероятность воздействия опасных факторов пожара на людей и участников тушения пожара.

В таких условиях особую важность принимают первые решения руководителя тушения пожара, основанные на информации о месте расположения очага пожара в здании. К первым решениям руководителя тушения пожара при проведении разведки места пожара относят [113]:

- выбор маршрутов продвижения звеньев газодымозащитной службы к месту выполнения поставленных задач (на позиции);
- выбор оснащения звеньев газодымозащитной службы с учетом характера планируемых действий;

– определение количественного состава звеньев газодымозащитной службы при работе в непригодной для дыхания среде.

Для повышения эффективности принимаемых руководителем тушения пожара решений важно на правах дополнительной информации к результатам проведения разведки места пожара использовать информацию о мониторинге состояния пожара в здании.

Основными источниками результатов мониторинга динамики пожара в зданиях являются [59]:

– информация, поступающая от автоматических систем пожарной сигнализации и автоматических установок пожаротушения [154];

– информация от структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений, на которую возлагаются функции обнаружения и мониторинга развития деструктивных событий, в том числе пожаров [47, 60].

Современные тенденции увеличения общей строительной площади зданий определяет избыточность информации, получаемой от систем мониторинга, которая, в свою очередь, может привести к снижению оперативности принимаемых руководителем тушения пожара решений. Для повышения эффективности использования результатов мониторинга пожара информация, получаемая от систем мониторинга, должна быть структурирована по уровням и задачам управления и представлена в виде системы поддержки управления.

#### **4.1.1. Системный анализ действий пожарных подразделений**

В ходе исследования рассмотрен процесс управления пожарными подразделениями с позиций системного анализа. Структура системного анализа предусматривает изучение системы взаимодействующих элементов «Пожарный – Дыхательный аппарат – Опасная среда пожара – Архитектура здания» [113]. На качественном уровне элементы системы взаимодействуют следующим образом: физическое состояние пожарного определяет потребление им дыхательной



смеси при реализации работ внутри здания; в свою очередь дыхательный аппарат, обеспечивает защиту органов дыхания и зрения пожарного от опасной среды здания на время, зависящее от потребления дыхательной смеси; архитектурные и конструктивные решения исполнения элементов здания, по которым осуществляется движение к месту проведения работ, влияют на степень физической нагрузки, приходящейся на пожарного и определяют потребление дыхательной смеси, а, следовательно, и время защитного действия дыхательного аппарата.

Определено, что время прибытия к месту работы зависит от множества факторов, причем формализованному количественному описанию которых поддаются следующие:

– вид маршрута движения – часть общего пути к месту проведения работ, характеризующая особенности конструктивного исполнения (лестничная клетка, коридор, холл, узкий лаз и т.п.) элементов здания;

– степень воздействия опасных факторов пожара, которые существенно влияют на работу пожарных внутри здания: к ним можно отнести оптическую плотность дыма, являющуюся определяющим параметром для видимости на маршрутах движения, тепловой поток и температуру среды внутри здания. Условия видимости в объемах зон здания, через которые проходит маршрут движения, определяются наличием продуктов горения, вследствие которых снижается оптическая проницаемость среды внутри здания. В свою очередь температура среды и ее относительная влажность влияют на допустимое время пребывания газодымозащитников в здании;

– протяженность маршрута – расстояние от входа в здание до места проведения работ, определяется по траектории, построенной с учетом условий безопасного движения. Данный параметр прямо пропорционален времени движения к месту работы.

В результате системного анализа определена общая совокупность взаимодействия факторов, влияющих на работу пожарных в здании. Предложена иерархическая модель, включающая параметры и связи, характеризующие взаимодействие факторов. (рисунок 4.1)

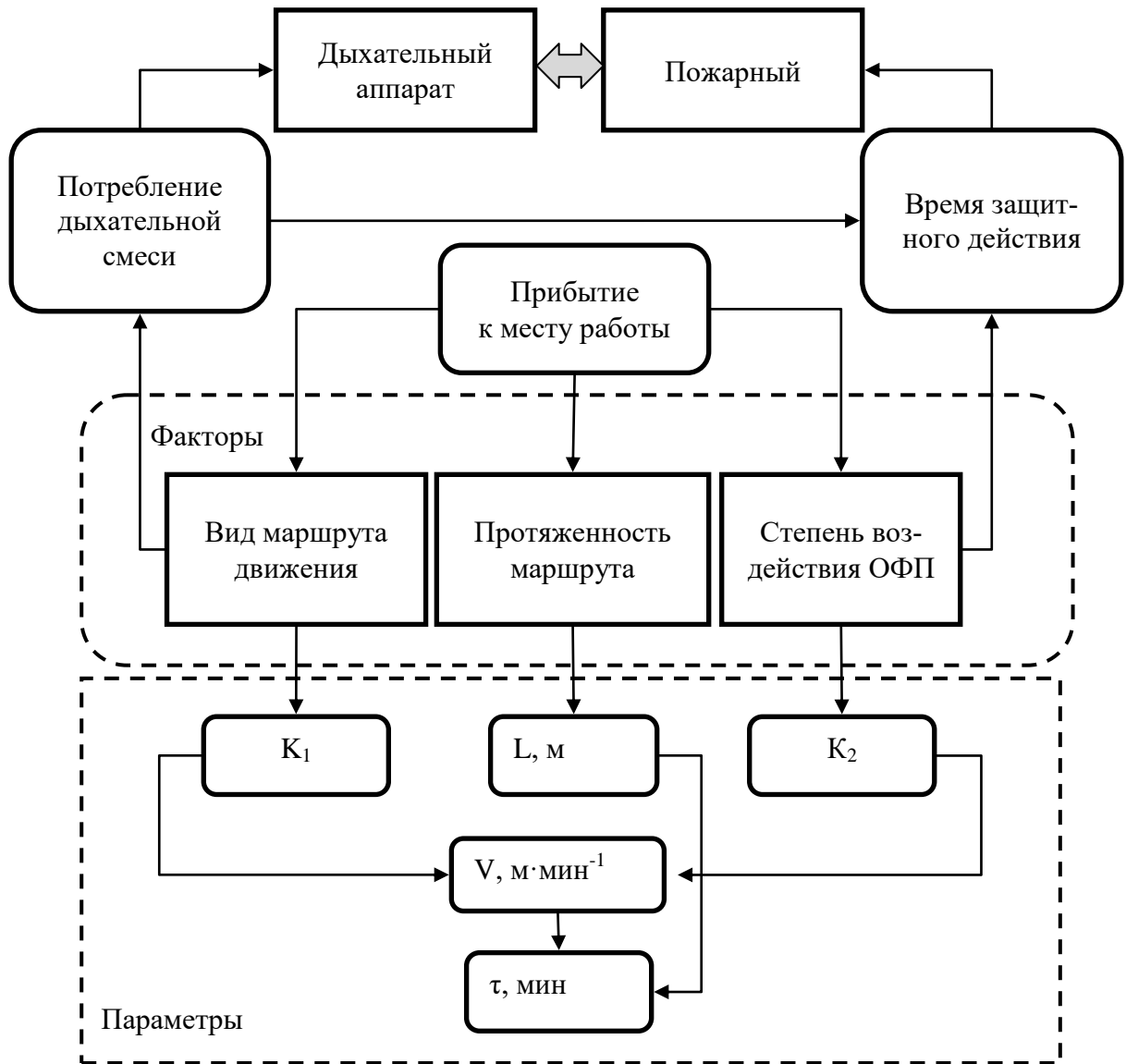


Рисунок 4.1 – Диаграмма «факторы-параметры» и системные связи

#### 4.1.2. Критерии выбора управленческих решений

В процессе системного анализа процесса движения параметры и критерии выбора управленческих решений классифицированы по степени влияния на основные и косвенные. При разработке модели принятия управленческих решений используются основные критерии, что определяет безусловную степень изменения косвенных параметров выбора решений при динамике основных критериев в процессе принятия управленческих решений.

На этапе формализации задачи управления к основным критериям принятия управленческих решений были отнесены следующие критерии и характеризующие их основные и косвенные показатели выбора:

*Критерий 1* – протяженность маршрута движения. Определяющим параметром данного критерия является траекторное расстояние, которое необходимо преодолеть звену газодымозащитной службы при движении к месту проведения работ по тушению пожара в здании. Косвенным параметром является время, необходимое на прибытие к очагу пожара в здании, с использованием которого определяют время работы у очага пожара и время, необходимое на успешный выход из опасной среды воздействия опасных факторов пожара.

*Критерий 2* – вид маршрута движения, определяющий скорость движения на маршруте, косвенный параметр – потребление дыхательной смеси газодымозащитниками при движении по данному участку маршрута.

Результаты анализа оценки влияния вида участка движения на скорость движения и потребление воздуха позволили выявить устойчивую тенденцию увеличения потенциальной скорости движения при снижении потребления дыхательной смеси. При подъеме по лестничной клетке потенциальная скорость минимальна, нагрузка на пожарного максимальна, соответственно и потребление дыхательной смеси максимально.

*Критерий 3* – степень воздействия опасных факторов пожара. Для данного критерия основным параметром является видимость на участке маршрута, косвенным параметром – температуры среды, которая определяет допустимое время пребывания пожарных внутри здания и является фактором ограничением в модели принятия управленческих решений.

В результате регрессионного анализа эмпирических данных по оценке степени влияния указанных параметров на процесс движения звена газодымозащитной службы в зданиях при реализации действий по тушению пожара и проведению аварийно-спасательных работ (приложении Б к диссертации), разработаны модели критериев выбора управленческих решений. При разработке моделей критериев выбора используется регрессионная зависимость на основе математиче-

ских ожиданий исследуемых параметров. Оценка достоверности результатов регрессионного анализа эмпирических данных произведена на основе коэффициента детерминации Пирсона. В качестве удовлетворительного значения критерия Пирсона в исследовании принято значение  $R^2 > 0,9$ , что свидетельствует о сходимости эмпирических данных и теоретических данных регрессионных моделей.

Время движения звена по маршруту протяженностью  $L$  (м) рассчитывается по формуле:

$$\tau = V \frac{L}{K_2 K_3}, \text{ мин} \quad (4.1)$$

где  $V$  – потенциальная скорость движения звена ГДЗС, м·мин<sup>-1</sup>;  $L$  – протяженность маршрута движения;  $K_2$  – вид маршрута движения;  $K_3$  – степень воздействия опасных факторов пожара.

Критерий вид маршрута движения, определяющий скорость движения звена газодымозащитной службы по различным по структуре участкам маршрута движения определяется по формуле

$$K_2 = B \cdot V^\beta, \quad (4.2)$$

где  $B = 0,15$  и  $\beta = 0,5$  теоретические коэффициенты, полученные методом корреляционного анализа с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,91$ .

Критерий степени воздействия опасных факторов пожара при движении к месту проведения работ в здании, характеризуется показателем учета видимости на маршруте движения ( $K_3$ )

$$K_3 = A \cdot \Omega^\alpha \quad (4.3)$$

где  $\Omega$  – средняя видимость на участке движения звена, м;  $A = 0,5$  и  $\alpha = 0,2$  эмпирические коэффициенты.

При анализе управленческих решений в частной задаче управления формула (4.1) представлена в виде классической производственной функции Кобба-Дугласа, применяемой при решении многокритериальных оптимизационных задач анализа и управления

$$\Phi(X) = \Phi_0 \cdot K^{\gamma_1} \cdot V^{\gamma_2} \cdot \Omega^{\gamma_3}, \quad (4.4)$$

где  $\Phi_0$  – свободный множитель;  $V$  – скорость движения на участках движения, различных по структуре;  $\Omega$  – видимость на участках маршрутов движения;  $K = L^{-1}$  – параметр, обратный протяженности маршрута движения в здании.

В функции, аналогичной производственной функции Кобба-Дугласа, введены следующие комплексы:

*свободный комплекс функции*

$$\Phi_0 = A \cdot B \cdot V_0, \quad (4.5)$$

где  $A = 0,5$  и  $B = 0,15$  – константы регрессионных моделей критериев выбора;  $V_0$  – средняя скорость движения звена ГДЗС;  $L$  – протяженность маршрута движения в здании;

*комплексы показателей важности*

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \beta + \alpha}; \gamma_2 = \frac{\beta}{1 + \beta + \alpha}; \gamma_3 = \frac{\alpha}{1 + \beta + \alpha}, \quad (4.6)$$

где  $\alpha = 0,2$  и  $\beta = 0,5$  – коэффициенты регрессионных моделей показателей выбора управленческих решений.

В результате системного анализа частных задач управления действиями пожарных подразделений по тушению пожаров в зданиях с применением теории регрессионного анализа, коэффициента детерминации Пирсона разработана функция для ранжирования вариантов управленческих решений.

Анализ структуры разработанной функции ранжирования показал аналогию с известной в теории принятия решений производственной функцией Кобба-Дугласа. При оптимизации составляющих комплексов функции ранжирования вариантов управленческих решений выявленная аналогия позволила использовать свойства замещения факторов и линейной однородности функции Кобба-Дугласа.

### 4.1.3. Варианты управленческих решений

При формализованном описании процесса принятия управленческих решений по выбору наилучших маршрутов движения теоретической основой для построения множества вариантов используется сетевая модель здания.

Выбор данной модели в качестве теоретического обеспечения для моделирования действий по ликвидации пожара обуславливается тем, что модель широко и успешно используется для решения смежных задач управления при пожаротушении на различных уровнях управления.

Сетевая модель действий была использована для формализованного описания действий по ликвидации пожаров. В такой постановке задача моделирования сведена к повышению тактических возможностей пожарных подразделений на основных пожарных автомобилях. Сетевая модель действий по ликвидации пожаров широко используется при определении продолжительности тушения пожаров и планировании привлечения ресурсов противопожарной службы.

Сетевая модель движения пожарных к месту проведения работ в здании включает в себя ориентированный граф (сеть), состоящий из совокупности вершин (событий) и ребер (работ). Каждая работа оценивается временем на ее реализацию. Цели описания и применения сетевой модели: оптимизация действий по ликвидации пожара, минимизация времени ликвидации пожара и, как следствие, минимизация ущерба наносимого пожаром. Для достижения поставленной цели производился выбор критического пути – совокупности событий и работ, имеющей меньшую суммарную продолжительность. В свою очередь при планировании привлечения ресурсов противопожарной службы под критическим путем понимается совокупность событий и работ, имеющая максимальную продолжительность. Это обуславливается тем, что при планировании исходят из самого наихудшего варианта развития событий на пожаре.

Новизна предлагаемого способа применения сетевой модели заключается в многокритериальной постановке задачи выбора критического пути. В рассматриваемом случае существует практическая необходимость в выборе маршрута движения – критического пути в соответствии с тремя задачами:

- минимизация времени прибытия пожарных к месту работы;
- минимизация воздействие опасных факторов пожара на пожарных;
- минимизация нагрузки на пожарных при движении к месту работы.

Совокупность трех условий, как показано выше, обеспечивает минимальное потребление дыхательной смеси и тем самым повышает тактические возможности звена при решении задач пожаротушения в зданиях.

Вербальное описание процесса моделирования маршрутов движения пожарных внутри здания с использованием сетевой модели сводится к следующему: под путем  $x_i$  будем понимать маршрут движения от входа в здание до помещения цели (помещение, где находится очаг пожара). Работы – это участки пути ( $C_{i-1} \rightarrow C_i$ ). Детализация пути на отдельные работы осуществляется исходя из принципа различия условий для видов участка, например, движение по лестничной клетке и движение по прямому участку будут представляться двумя работами. Для условий воздействия опасных факторов пожара детализация осуществляется исходя из условия: если маршрут движения проходит через две зоны контроля системы мониторинга с номерами  $i$  и  $j$  и разными значениями по степени воздействия опасных факторов пожара, то данный путь  $x_i$  будет представлять собой две разные работы  $C_i$  и  $C_j$ .

Если степень воздействия опасных факторов пожара однородна, то можно представить данный две работы как одну. Например, маршрут проходит через три зоны контроля многопороговых извещателей с номерами 1, 2 и 3, протяженностью  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ . Пусть в зоне 1 и зоне 2 соответствующие им средства мониторинга фиксируют первый критический порог, а в зоне 3 – третий критический порог. Тогда данный маршрут можно представить как две работы:

*первая работа* – преодоление зон контроля с номерами 1 и 2, характеристика работы  $L = L_1 + L_2$  и степень воздействия опасных факторов пожара по первому порогу средства мониторинга;

*вторая работа* – преодоление зоны с номером 3, протяженностью  $L_3$ .

Общий вид сетевых структур элементов здания представлен на рисунке 4.2. Пример сетевой структуры здания представлен на рисунке 4.3.

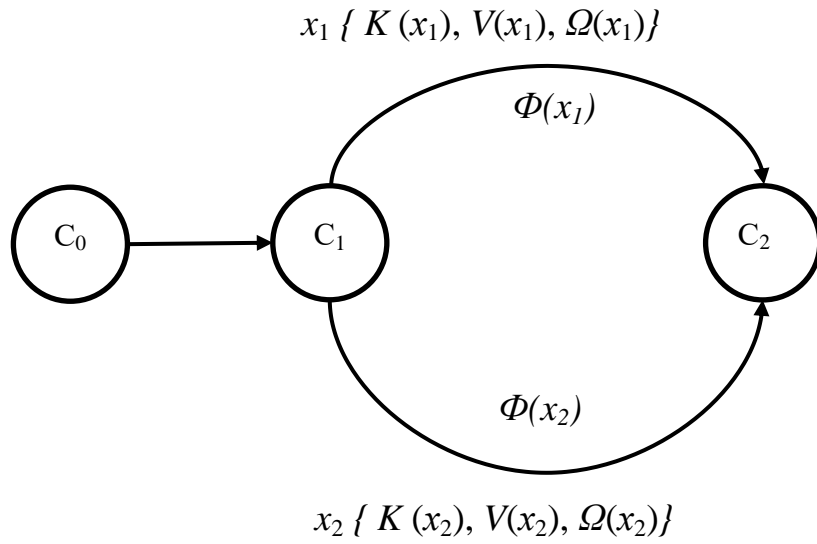
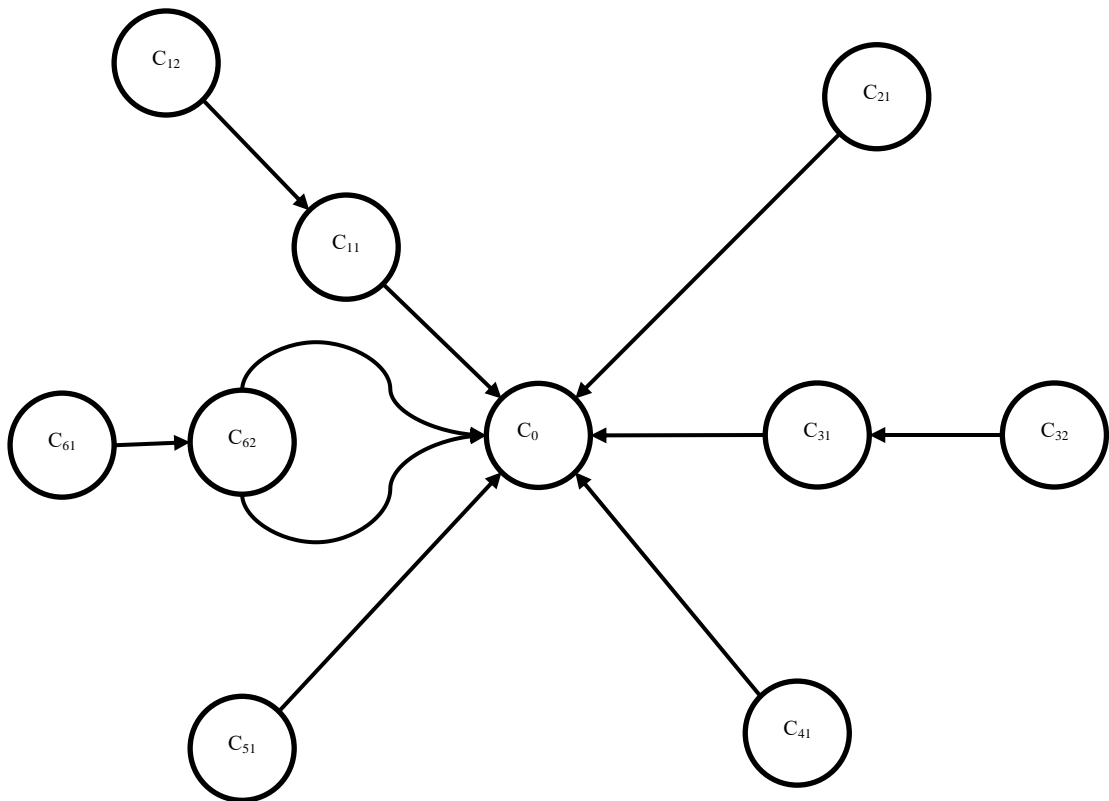
*a**б*

Рисунок 4.2 – Элементы сетевого моделирования здания:

*a* – маршрут движения; *б* – сетевая структура здания



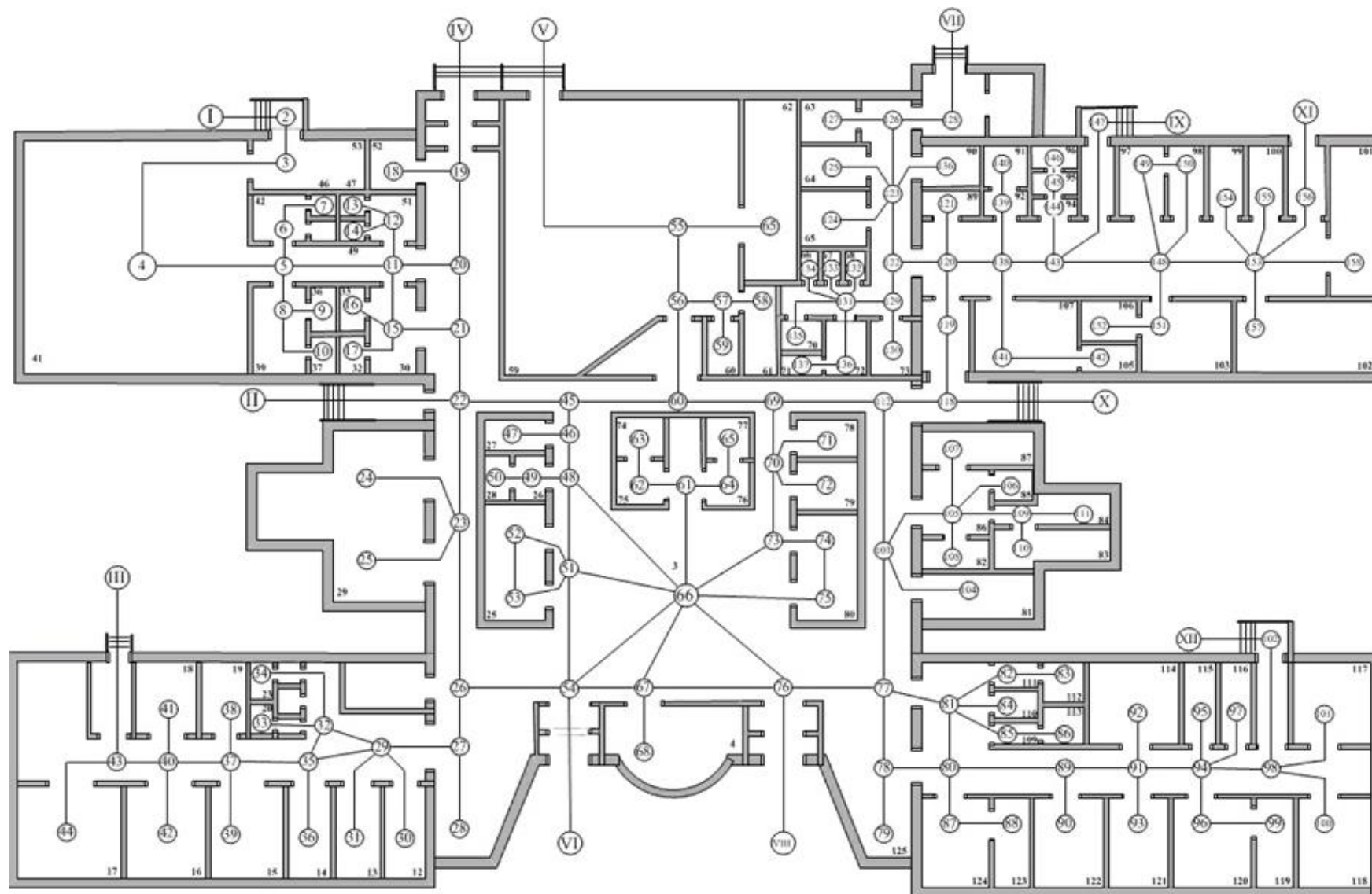


Рисунок 4.3 – Сетевая структура здания

В сетевой модели здания путь представляет собой совокупность из  $i$  работ  $i = 1, 2, \dots, k$ . Тогда для расчета векторных оценок маршрута в целом предлагается следующие формулы:

*для третьего параметра принятия решений*

$$L_o = \sum_{i=1,2,\dots,k} L_i, \quad (4.7)$$

$$K_o = \left[ \sum_{i=1,2,\dots,k} L_i \right]^{-1};$$

*для второго параметра принятия решений*

$$V_o = \left[ \frac{\sum_{i=1,\dots,k} L_i}{\sum_{i=1,\dots,k} \frac{L_i}{V_i^\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta}}; \quad (4.8)$$

*для третьего параметра принятия решений*

$$\Omega_{jo} = \left[ \frac{\sum_{i=1,\dots,k} L_i}{\sum_{i=1,\dots,k} \frac{L_i}{\Omega_{ji}^{\alpha_j}}} \right]^{\frac{1}{\alpha_j}}. \quad (4.9)$$

В общей многокритериальной модели принятия решений допустимое множество маршрутов определяет множество вариантов управленческих решений  $X = \bigcup_{i=1}^n x_i$ . Специфика применения результатов сетевого моделирования предусматривает рассмотрение сетевой структуры здания на этапе планирования действий по тушению пожара. В это связи необходимо для каждого потенциального помещения очага пожара от каждого допустимого входа в здание построить маршрут движения участников тушения пожара с учетом условий безопасности при ведении действий по тушению пожара. Множество маршрутов движения объединяется в базу данных для принятия управленческих решений и классифицируется по помещениям.

## 4.2. Разработка количественных шкал критериев

Формирование шкал критериев осуществляется с использованием модели обработки данных, разработанной в диссертации для формирования количественной шкалы оценки результатов мониторинга состояний пожара в здании для параметра температура газовой среды. В качестве средства мониторинга применен тепловой кумулятивный пожарный извещатель с диапазоном температур от 20 до 150 °С. Данный вид пожарного извещателя используется как средство обнаружения, мониторинга и прогнозирования динамики пожара в кумулятивной системе пожарной сигнализации и пожаротушения. В соответствии с разработанной цифровой моделью обработки данных с целью формирования результатов мониторинга для различных состояний пожара могут быть введены количественные оценки:  $B_1 = 1$ ;  $B_2 = 2$ ;  $B_3 = 3$ ;  $B_4 = 4$ . В модели управления пожарными подразделениями температура газовой среды является косвенным параметром, определяющим динамику видимости на участках движения.

### 4.2.1. Количественная шкала условий видимости

С целью разработки критерия «условия видимости» рассчитаем значение параметра  $S$ , для косвенной оценки видимости в зонах контроля по значению температуры, наблюдаемым с использованием средств измерения кумулятивной системы при этом используем разработанный в диссертации метод мониторинга динамики пожара.

Воспользуемся значением параметра соотношения низшей теплоты сгорания горючего материала в здании и его дымообразующей способности

$$S = \frac{Q_P^H}{D} = \frac{13800}{72} = 192, \text{ кДж} \cdot \text{Нп}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (4.10)$$

С использованием значения  $S$  произведём оценку видимости в зонах контроля системы мониторинга и прогнозирования.

Расчет видимости для состояний мониторинга при текущем значении температуры газовой среды в зоне контроля составит значение, определяемое по формуле

$$\Omega_{cp} = 2,7 \frac{S}{T_{cp} - T_0} \text{ м.} \quad (4.11)$$

Расчет значений видимости на участках маршрутов движения, проходящих через зоны контроля системы мониторинга, представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные параметры количественной шкалы критерия  $f_2$

<b><i>B</i></b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<i>T</i> , °C	Max	200	100	60	45
	Min	85	55	44	37
	Среднее	142,5	77,5	52	41
$\Omega$ , м	Max	3	6	13	20
	Min	7	14	21	30
	$\Omega_{cp}$ , м	5	10	17	25
	$\Delta\Omega_{cp}$ , м	1	1,2	1,4	1,6

С учётом данных таблицы 4.1 сформируем набор функций принадлежности для параметра  $\Omega$

$$\mu_i = \frac{1}{\Delta\Omega_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Omega_k - \Omega_{icp})^2}{2(\Delta\Omega_i)^2}\right), \quad (4.12)$$

где  $\Omega$  – текущее значение контролируемого параметра, м;  $\Omega_{icp}$  – среднее значение для интервала  $[\Omega_{i1}; \Omega_{i2}]$ , м;  $\Delta\Omega_i$  – параметр разброса данных, м.

Разработанные функции принадлежности и соответствующие им состояния системы мониторинга и прогнозирования динамики пожара представлены на рисунке 4.4.

При анализе результатов мониторинга пожара по температуре газовой среды воспользуемся функцией для расчета количественной шкалы  $B$  по утверждению 2.1.

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta\Omega_i}{\Delta\Omega_{i+1}} \exp(\Omega_i - \Omega_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta\Omega_{i+1}}{\Delta\Omega_i} \exp(\Omega_{i+1} - \Omega_i)}, \quad (4.13)$$

$$\Omega_i = \frac{(\Omega_k - \Omega_{i;cp})^2}{2 \cdot \Delta\Omega^2}.$$

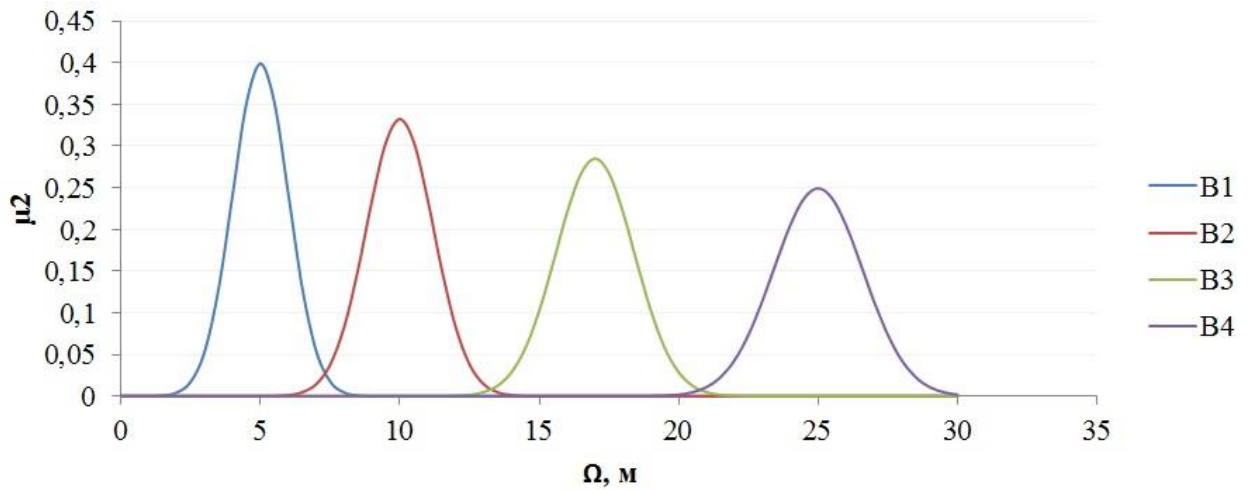


Рисунок 4.4 – Функции принадлежности для параметра  $\Omega$

Количественная шкала для оценки результатов мониторинга представлена на рисунке 4.5.

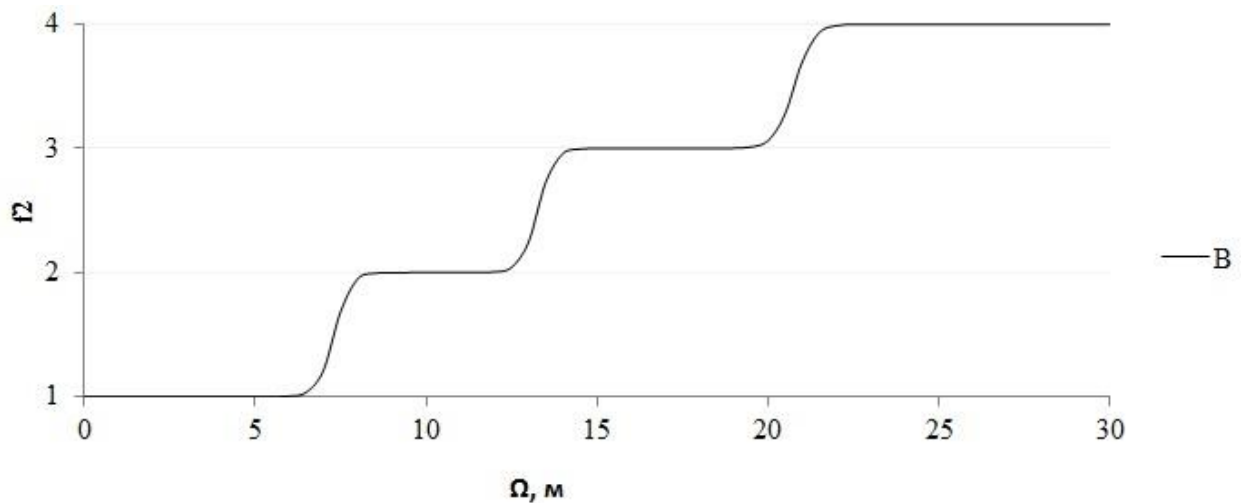


Рисунок 4.5 – Количественная шкала  $f_2$  для показателя  $\Omega$

### 4.2.2. Количественная шкала критериев движения

Для применения разработанных процедур поддержки принятия решений необходимо, чтобы все критерии, входящие в модель, были приведены к единой количественной шкале. Поэтому разработаны количественные шкалы для показателей  $K$  и  $V$  модели движения пожарных к месту проведения работ. Исходные данные для разработки количественной шкалы критерия  $f_1$  представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные параметры количественной шкалы критерия  $f_1$

<b>В</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$L, \text{ м}$	Max	50	20	12	6
	Min	12,5	8	6	4
$K, \text{ м}^{-1}$	Min	0,08	0,118	0,156	0,245
	Max	0,02	0,052	0,084	0,155
	$K_{\text{ср}}, 1/\text{м}$	0,05	0,085	0,12	0,2
	$\Delta K, 1/\text{м}$	0,01	0,011	0,012	0,015

Аналогично критерию  $f_2$  сформируем критерий  $f_1$ . Для этого используется функция принадлежности

$$\mu_{1i} = \frac{1}{\Delta K_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(K_k - K_{\text{ср}})^2}{2(\Delta K_i)^2}\right), \quad (4.14)$$

где  $K_k$  – значение параметра для  $k$ -го участка маршрута,  $\text{м}^{-1}$ ;  $K_{\text{ср}}$  – среднее значение параметра для интервала,  $\text{м}^{-1}$   $K_k \in [K_{i1}; K_{i2}]$ ;  $\Delta K_i$  – параметр разброса данных,  $\text{м}^{-1}$ .

Динамика значений функции принадлежности для критерия  $f_2$  представлена на рисунке 4.6.

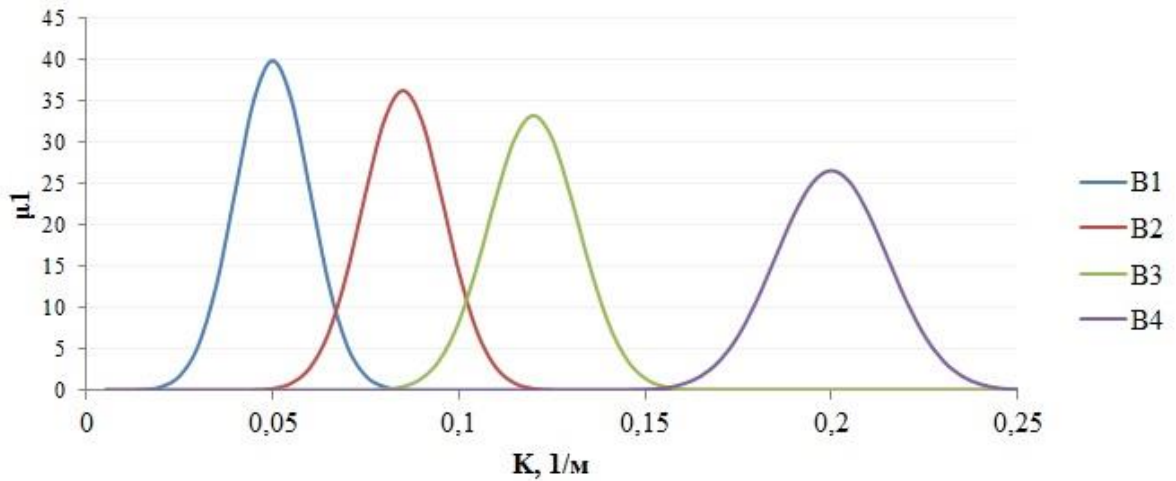


Рисунок 4.6 – Функции принадлежности для параметра  $K$

Используя утверждение 2.1, сформируем количественную шкалу для критерия  $f_2$ :

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\Delta K_i}{\Delta K_{i+1}} \exp(K_i - K_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\Delta K_{i+1}}{\Delta K_i} \exp(K_{i+1} - K_i)}, \quad (4.15)$$

$$K_i = \frac{(K_k - K_{i;cp})^2}{2 \cdot \Delta K^2}.$$

Количественная шкала для оценки результатов мониторинга представлена на рисунке 4.7.

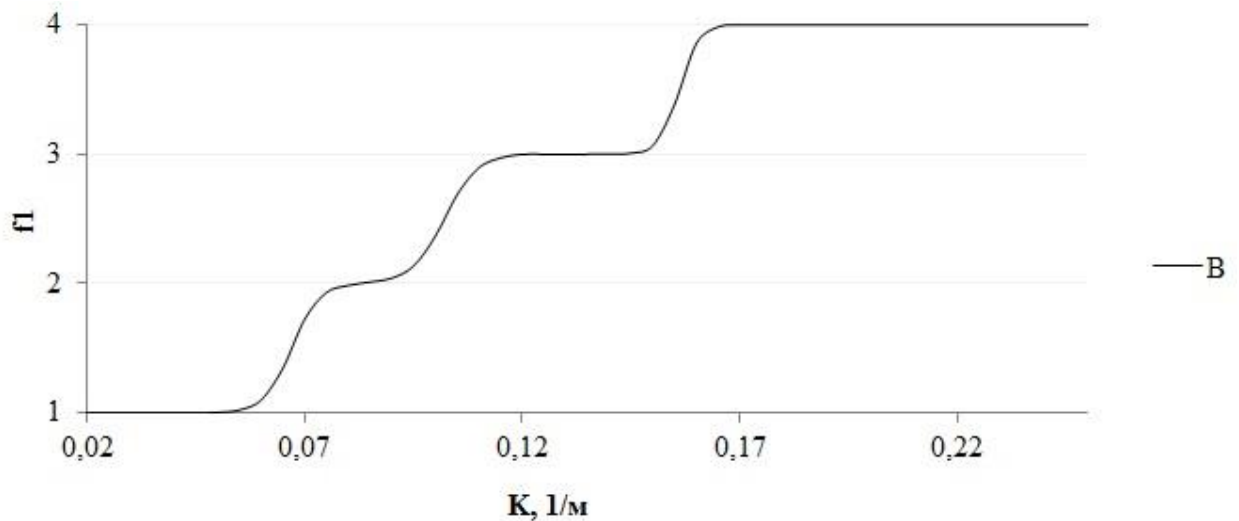


Рисунок 4.7 – Количественная шкала  $f_1$  для показателя  $K$

Аналогично критериям  $f_2$  и  $f_1$  сформирована количественная шкала для критерия  $f_3$  на основе показателя  $V$ , м·мин<sup>-1</sup>. В таблице 4.3 представлены исходные данные для данного этапа исследования.

Таблица 4.3. Исходные параметры количественной шкалы критерия  $f_3$

<b>B</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
V, м/мин	Min	2	6	12	20
	Max	8	14	24	35
	$K_{cp}$ , 1/м	5	10	18	27,5
	$\Delta K$ , 1/м	1	1,4	2	2,6

Функции принадлежности для критерия  $f_3$  и его количественная шкала иллюстрированы на рисунке 4.8 и 4.9.

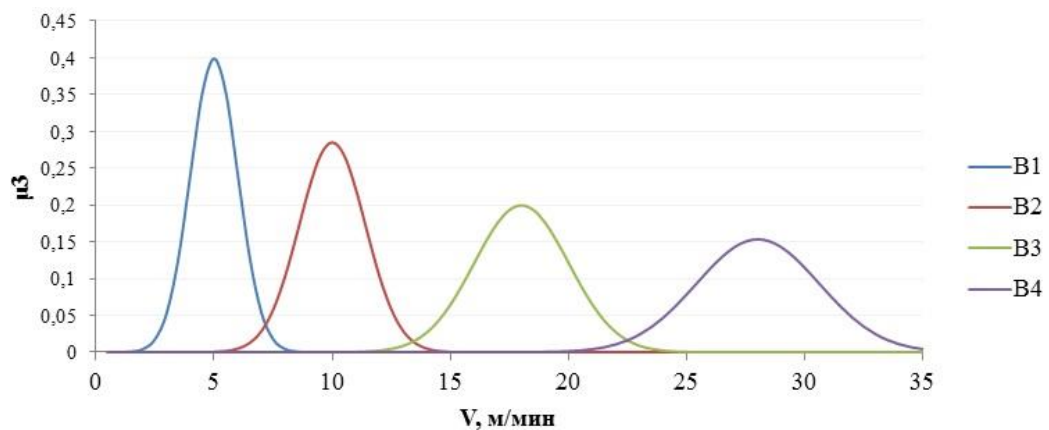


Рисунок 4.8 – Функции принадлежности для параметра  $V$

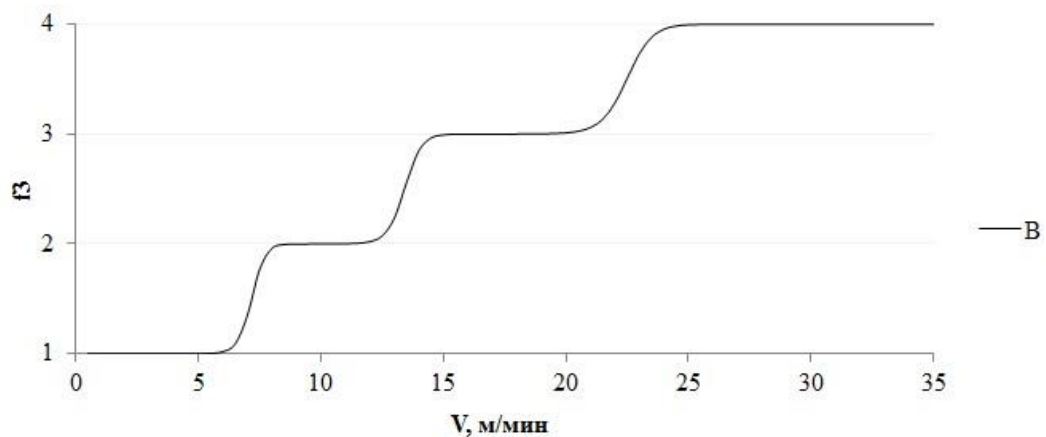


Рисунок 4.9 – Количественная шкала  $f_3$  для показателя  $V$



Используя свойства функции Кобба – Дугласа, связанные с эластичностью замещения факторов и линейной однородностью, принято, что оценка средней скорости движения звена газодымозащитной службы при движении  $V_0$  является величиной постоянной. Это значит, что функция ранжирования маршрутов движения внутри здания для принятия управленческих решений будет иметь вид

$$\Phi(x) = \prod_{i=1}^3 f_i^{\gamma_i}(x), \quad (4.16)$$

где  $f_1$  – критерий протяженности маршрута движения;  $f_2$  – критерий вида маршрута движения;  $f_3$  – критерий воздействия опасных факторов пожара на маршруте;  $\gamma_i$  – показатели важности критериев.

Критерии  $f_i$  представлены в количественной шкале отношений с множеством значений из отрезка [1, 4].

В общей теории мониторинга динамики пожара для управления пожарными подразделениями при тушении пожаров сформированы векторные оценки вариантов управленческих решений (рисунок 4.10).

В ходе исследования на основе комплексного применения математического моделирования и регрессионного анализа данных получены зависимости для оценки времени движения пожарных к очагу пожара в здании. С помощью констант регрессионных моделей определены параметры принятия решений и их показатели важности в функции, аналогичной производственной функции Кобба – Дугласа. Значения параметров протяженности участков маршрутов движения и скорости движения на участках являются результатом анализа сетевой структуры здания. Параметр видимости на участках маршрутов движения определяется на основе динамики параметра мониторинга пожара – температуры газовой среды.

При расчете значений видимости на участках маршрутов движения был использован разработанный в главе 2 диссертации метод прогнозирования параметров пожара по мониторингу температуры газовой среды. На основе параметров принятия решений с использованием нечеткой модели обработки информации, предложенной в главе 2 диссертации, сформированы критерии принятия решений и их количественные шкалы.

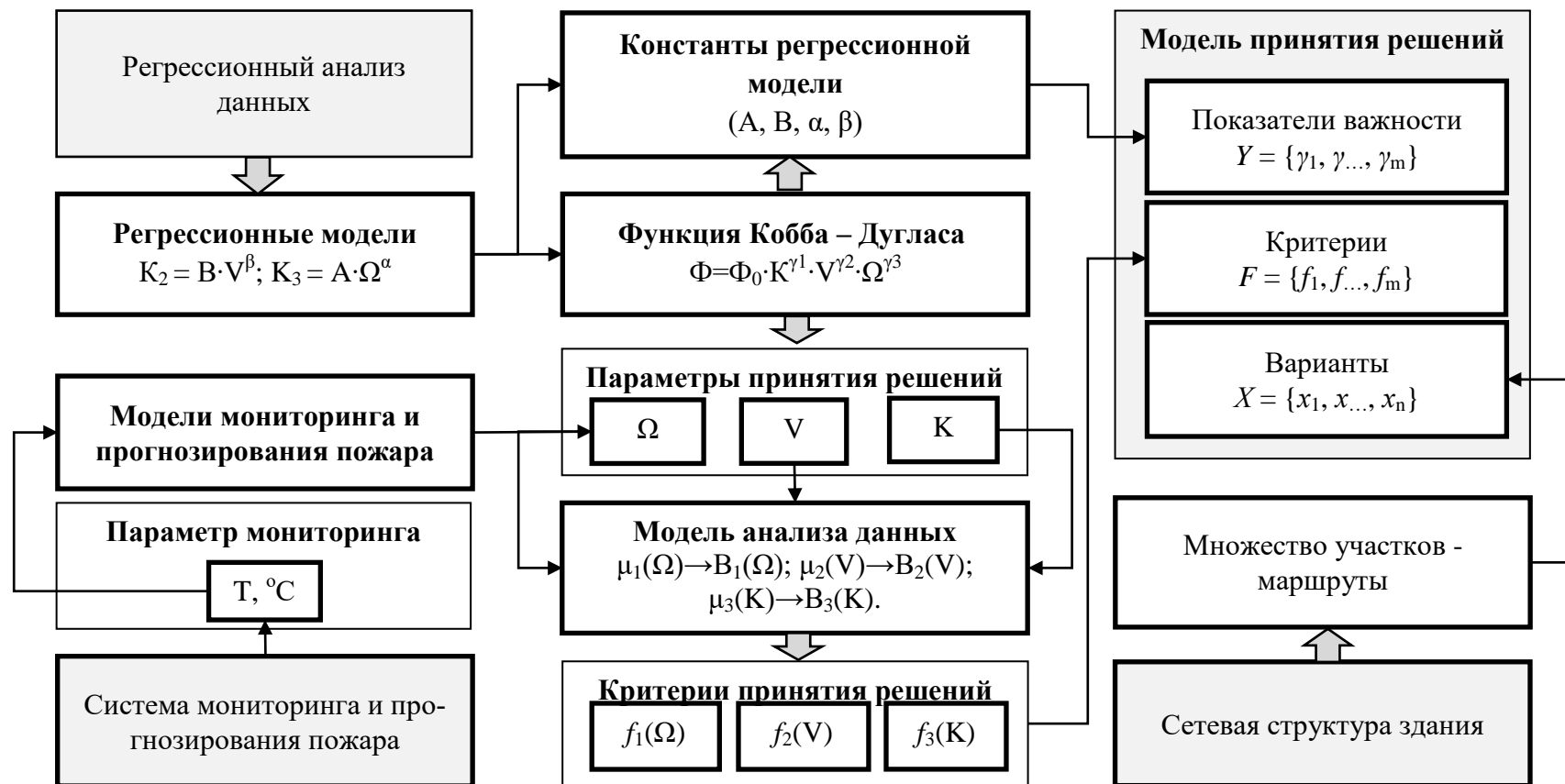


Рисунок 4.10 – Концептуальная модель исследования:

$\Phi_0$  – свободный множитель функции Кобба – Дугласа;  $f_1(\Omega)$  – критерий степени воздействия опасных факторов пожара при движении по маршруту движения;  $f_2(V)$  – критерий вида маршрута движения;  $f_3(K)$  – критерий протяженности маршрута движения;  $\Omega$  – видимость на участке движения, м;  $K$  – отношение протяженности движения;  $V$  – скорость движения на участке маршрута;  $T$  – абсолютное значение температуры газовой среды в зоне контроля средства мониторинга;  $(A, B, \alpha, \beta)$  – константы регрессионных моделей.

В работе сформирована многокритериальная модель принятия решений, состоящая из следующих элементов:

1. Показатели важности критериев выбора – результат регрессионного анализа данных о времени реализации действий по тушению пожара в здании с учетом основных и косвенных параметров, влияющих на данный процесс;

2. Критерии принятия решений – результат анализа структуры здания и моделирования динамики пожара в зонах контроля системы мониторинга с использованием нечеткой модели обработки результатов мониторинга;

3. Варианты управленческих решений – допустимые маршруты движения пожарных к месту проведения работ по тушению пожара в здании – результат анализа сетевой структуры здания.

Таким образом, в результате формализации частных задач управления при тушении пожаров в зданиях разработана многокритериальная модель принятия решений, позволяющая применить, разработанные в главе 3 диссертации процедуры поддержки принятия решений.

### **4.3. Многокритериальный анализ управленческих решений**

Разработка подсистемы многокритериального анализа управленческих решений в системе поддержки принятия решений основана на теоретических результатах, полученных в главе 3 диссертации. В частности при формировании алгоритма поддержки принятия решений используются доказанные теоретические утверждения 3.1 – 3.6.

#### **4.3.1. Постановка многокритериальной задачи**

Теоретическое обобщение функции Кобба-Дугласа и моделей нечеткой обработки результатов мониторинга и моделирования процессов, связанных с тушением пожаров в зданиях позволили сформировать следующую многокритериальную задачу выбора маршрутов движения пожарных внутри здания.

При этом используются варианты управленческих решений – допустимые маршруты движения пожарных к месту проведения работ по тушению пожара в здании – результат анализа сетевой структуры здания. Введем множество маршрутов движения пожарных подразделений в здании

$$X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}, i=1, 2, \dots, n. \quad (4.17)$$

Критерии принятия решений и их количественные шкалы – результат анализа структуры здания и моделирования динамики пожара в зонах контроля системы мониторинга и прогнозирования пожара с использованием нечеткой модели обработки результатов мониторинга

$$F = \{f_1, f_2, f_3\}, \quad (4.18)$$

где  $f_1$  – критерий протяженности маршрута движения;  $f_2$  – критерий вида маршрута движения;  $f_3$  – критерий воздействия опасных факторов пожара на маршруте.

Показатели важности критериев выбора – результат регрессионного анализа эмпирических данных о времени реализации действий по тушению пожара в здании с учетом основных и косвенных параметров влияющих на данный процесс. При этом используются показатели  $Y = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}$ .

По формуле (4.6) определим значения показателей важности критериев выбора при значениях коэффициентов регрессионной модели оперативно-тактических действий  $\alpha = 0,2$  и  $\beta = 0,5$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \beta + \alpha} = \frac{1}{1 + 0,5 + 0,2} = 0,59; \quad (4.19)$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta}{1 + \beta + \alpha} = \frac{0,5}{1 + 0,5 + 0,2} = 0,29; \quad (4.20)$$

$$\gamma_3 = \frac{\alpha}{1 + \beta + \alpha} = \frac{0,2}{1 + 0,5 + 0,2} = 0,12. \quad (4.21)$$

Результатом решения многокритериальной задачи является структура множества вариантов управленческих решений.

Используя свойства функции Кобба – Дугласа, связанные с ее постоянной эластичностью замещения факторов и линейной однородностью, принято, что оценка средней скорости движения звена газодымозащитной службы при движении  $V_0$  является величиной постоянной. Это значит, что функция ранжирования маршрутов движения внутри здания для принятия управленческих решений будет иметь вид

$$\Phi(x) = f_1^{0,59}(x) \cdot f_1^{0,29}(x) \cdot f_1^{0,12}(x). \quad (4.22)$$

#### 4.3.2. Методика многокритериального анализа управленческих решений

При совершенствовании процессов управления ликвидацией пожаров используется многокритериальная постановка задачи принятия решений. Из всей совокупности подходов к постановке и решению многокритериальных задач одним из наиболее часто применяемых методов является метод многокритериального ранжирования. Данный метод используется в том случае, если множество исходных вариантов достаточно широко и из данного множества необходимо произвести оперативный выбор. В данной работе предлагается алгоритм многокритериального ранжирования вариантов управления, основанный на теории относительной важности критериев, сформированной в работе и нашедший применение при решении практических задач распределения ресурсов оперативных подразделений по участкам выполнения работ на крупных пожарах в зданиях.

При этом выполняется формирование множества векторных оценок вариантов  $F(X)$ . Путем оценки каждого маршрута движения по трем критериям с использованием разработанных количественных шкал критериев строится матрица векторных оценок

$$F(X) = \begin{pmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & f_3(x_1) \\ f_1(x_{\dots}) & f_2(x_{\dots}) & f_3(x_{\dots}) \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & f_3(x_n) \end{pmatrix}. \quad (4.23)$$

На основе общего метода поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров в зданиях с использованием информации от систем мони-

торинга и прогнозирования динамики пожара в здании разработана оптимальная последовательность решения задачи многокритериального выбора.

Далее выполняется модификация векторного критерия. На данном этапе методики многокритериального анализа используются результаты теоретического исследования моделей многокритериального выбора, формализованные в утверждении (3.3) и утверждении (3.4).

При модификации векторного критерия воспользуемся разработанным в данной работе способом. Для это среди показателей важности критериев  $\{\gamma_1 = 0,59; \gamma_2 = 0,29; \gamma_3 = 0,12\}$  выбираем показатель важности с максимальным значением это показатель  $\gamma_1$ .

Тогда в группе  $I_A$  будет находиться одна компонента векторного критерия  $f_1$ , а остальные компоненты  $f_2$  и  $f_3$  отнесем к группе  $I_B$ . Далее в соответствии с разработанным методом поддержки принятия решений определим показатели относительной важности критериев  $\Theta_2$  и  $\Theta_3$  по формулам

$$\Theta_2 = m \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = 3 \frac{0,29}{0,59} = 1,48, \quad (4.24)$$

$$\Theta_3 = m \frac{\gamma_3}{\gamma_1} = 3 \frac{0,12}{0,59} = 0,61. \quad (4.25)$$

Произведем проверку расчета значений показателей важности критериев. Для этого воспользуемся утверждением (3.2). Определим значение общего показателя важности  $\Theta$  группы критериев  $I_B$  по формуле

$$\Theta = \sum_{j=1}^b \Theta_j = 1,48 + 0,61 = 2,09. \quad (4.26)$$

Далее определим исходные показатели важности по формулам для компоненты  $F$  с номером  $i \in I_A$ , в рассматриваемом случае это  $f_1$ . Тогда

$$\gamma_1 = \frac{m}{m + \Theta} = \frac{3}{3 + 2,09} = 0,59; \quad (4.27)$$

а для всех компонент  $F$  с номерами  $j \in I_B$  то есть компонент  $f_2$  и  $f_3$

$$\gamma_2 = \frac{\Theta_2}{m + \Theta} = \frac{1,48}{3 + 2,09} = 0,29; \quad (4.28)$$

$$\gamma_3 = \frac{\Theta_3}{m + \Theta} = \frac{0,61}{3 + 2,09} = 0,12. \quad (4.29)$$

Далее применим преобразование  $N$  для модификации векторного критерия. Это выполняется исходя из комплекса следующих условий.

Компонента векторного критерия с номером  $i$  из группы  $I_A$  остаётся без изменения, то есть

$$g_i = f_i. \quad (4.30)$$

Компоненты векторного критерия  $F$  из группы  $I_B$  с номерами  $j$  заменяются формулами для мультипликативного случая

$$g_2 = f_1 \cdot f_2^{\Theta_2} = f_1 \cdot f_2^{1,48}; \quad (4.31)$$

$$g_3 = f_1 \cdot f_3^{\Theta_3} = f_1 \cdot f_3^{0,61}. \quad (4.32)$$

При практическом применении первого способа модификации векторного критерия размерность нового векторного критерия  $G$  равна размерности исходного векторного критерия  $F$  и составляет  $m$  компонент, одной известной компоненты и  $(m - 1)$  новой компоненты, рассчитанной по предложенным формулам

$$G(X) = \begin{pmatrix} g_1(x_1) & g_2(x_1) & g_3(x_1) \\ g_1(x_{\dots}) & g_2(x_{\dots}) & g_3(x_{\dots}) \\ g_1(x_n) & g_2(x_n) & g_3(x_n) \end{pmatrix}, \quad (4.33)$$

где  $G(x_i) = (g_1(x_i), g_2(x_i), g_3(x_i))$  - векторная оценка варианта  $x_i$  по векторному критерию  $G$ .

Построение структуры множества вариантов управленческих решений. Для построения структуры выбранных вариантов используется свойство исходных вариантов, теоретически обоснованное в работе и определяемое последовательными включениями

$$C(X) \subset P_G(X) \subset P_F(X) \subset X, \quad (4.34)$$

где  $X$  - исходное множество вариантов в многокритериальной задаче;  $C(X)$  - множество выбранных вариантов;  $P_G(X)$  - множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве  $X$  с использованием нового векторного критерия  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ ;  $P_F(X)$  - множество парето-оптимальных вариантов, построен-

ное на множестве  $X$  с использованием исходного векторного критерия  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ .

С использованием понятия оптимальности по Парето, наилучшими будут считаться варианты, принадлежащие множеству  $D_0 = P_G(X)$  (зеленый цвет, рисунок 4.11), эффективными (приемлемыми) –  $D_1 = P_F(X)/P_G(X)$  (желтый цвет, рисунок 4.11) и неэффективными (неприемлемыми) оставшиеся варианты из множества  $D_2 = X/(P_F(X))$  (красный цвет, рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Ранжирование маршрутов движения пожарных

#### 4.4. Многоагентное моделирование поддержки управления

На основе опыта применения технологий агентного моделирования при решении частных задач управления при ликвидации чрезвычайных ситуаций и тушении пожара на критически важных объектах определено, что моделирование действий по тушению пожаров в зданиях с использованием многоагентного подхода предусматривает схему «успех – неудача» [205]. Анализ результатов агентного моделирования ставит акцент на ситуации «неудачи», поэтому в случае «не-



удачи» необходимо на этапе подготовки к моделированию указывать либо большее количество сил и средств для решения задачи пожаротушения, либо улучшать значения показателей реагирования на пожар виртуального пожарно-спасательного гарнизона.

#### 4.4.1. Элементы и структура многоагентной модели

Многоагентная система (МАС) включает в себя когнитивные и реактивные агенты и среду их взаимодействия между собой и пожаром в здании. *Реактивные агенты* – участники тушения пожара (газодымозащитники), *когнитивные агенты* – это руководитель тушения пожара и постовой на посту безопасности. *Внутренняя среда здания* – это нагретая пожаром газовая среда внутри здания, характеризующаяся следующими параметрами: температура и видимость [205].

Система взаимодействия агентов между собой: когнитивные агенты принимают решения о спасании людей и ликвидации очага пожара посредством подачи огнетушащих веществ с использованием пожарной техники и решения о подаче команды на выход из здания на основе данных о динамике параметров, характеризующих условия работы пожарных в специальных дыхательных аппаратах.

Система взаимодействия агентов с пожаром: параметры внутренней среды здания при пожаре оказывают влияние на возможность, скорость и условия тепловой нагрузки при движении агентов к очагу пожара в здании. В свою очередь посредством информации о состоянии внутренней среды пожара в здании когнитивные агенты «понимают» место расположения очага пожара и производят выбор маршрутов движения для ликвидации пожара [205].

В соответствии с общепринятыми для агентного моделирования правилами агенты в МАС наделены пятью способностями [254–256]:

*Реактивность* – влияние среды пожара в здании на условия и скорость решения задач агентами.

*Активность* – выбор маршрута реализации работ с учетом необходимости минимизации времени их выполнения на основе информации от системы мониторинга состояния пожара в здании.

*Коммуникативность* – обмен информацией о параметрах работы в дыхательных аппаратах от реактивных агентов когнитивным агентам для определения безопасного времени пребывания реактивных агентов в здании.

*Когнитивность* – контроль критического времени нахождения реактивных агентов внутри здания и принимать решение о подаче команды на выход из здания или координацию их действий.

*Автономность* – взаимодействие без участия пользователя. Все задачи принятия решений в МАС приведены к модели многокритериального выбора. При возникновении не тождественности маршрутов движения окончательный выбор производится случайным образом.

Для реализации МАС в виде программного средства выбрана модульная структура. Это позволяет отдельные модели, описывающие процессы в МАС, реализовать в виде модулей для адаптации системы под конкретные задачи моделирования посредством гибкой настройки.

Когнитивные агенты при управлении наделены двумя функциями принятия решений: выбор маршрута к месту проведения работ внутри здания; подача команды на выход из здания при достижении критического времени пребывания в здании реактивных агентов. Реактивные агенты в свою очередь решают задачу ликвидации горения.

Отношение количества когнитивных и реактивных агентов, совокупность правил их взаимодействия определяют, что по общей классификации созданная МАС является «интеллектуальной многоагентной системой», в которой процессы управления реализуются по принципу «искусственная жизнь».

Общая концептуальная схема МАС представлена на рисунке 4.12.

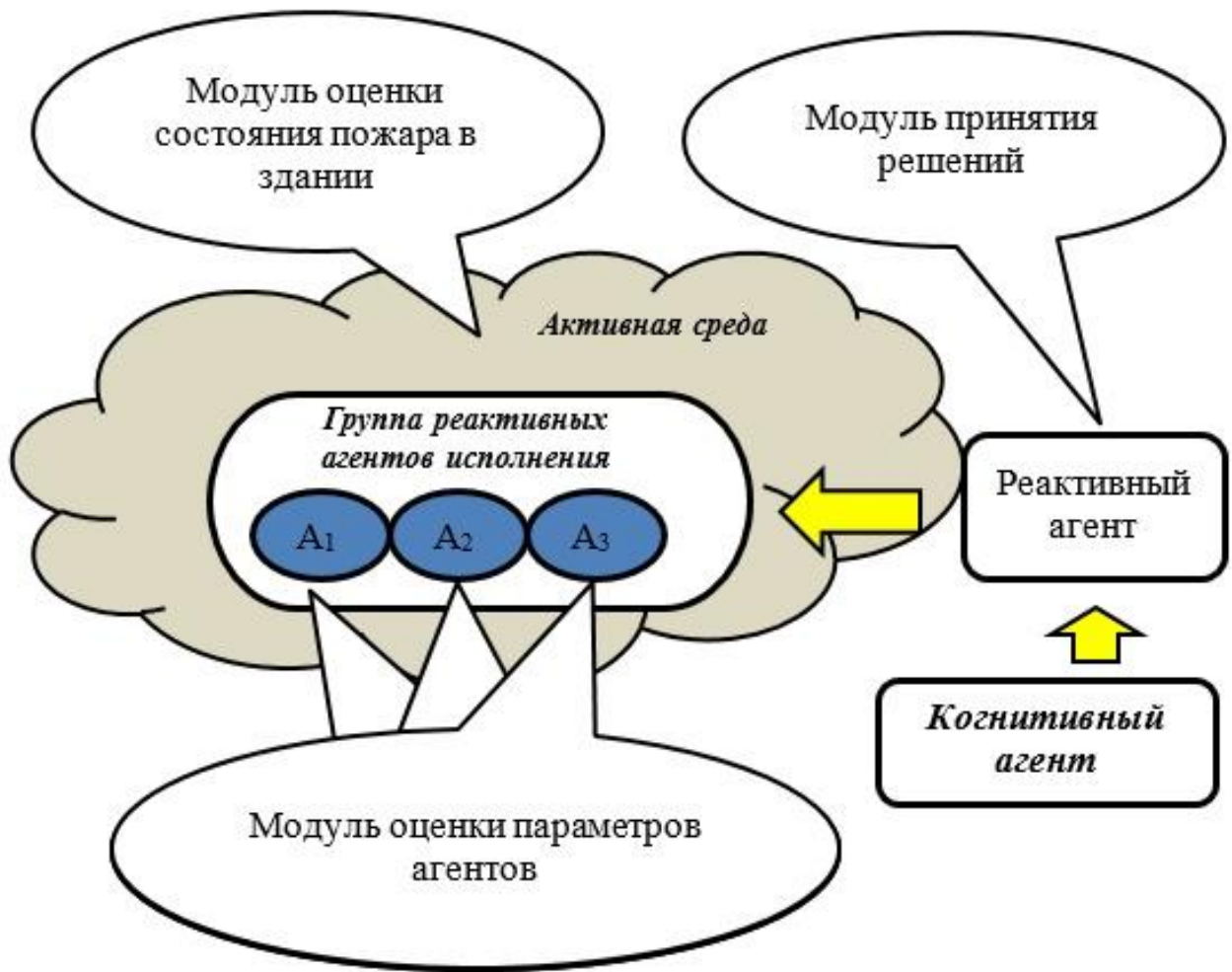


Рисунок 4.12 – Структурная схема агентной модели

#### 4.4.2. Моделирование поддержки принятия управленческих решений

При реализации своих функций агенты используют правила, которые в общей модели определяются математическими зависимостями, которые, в свою очередь, являются результатом совокупного взаимодействия следующих математических моделей: движения агентов; динамики пожара; системы мониторинга; прекращения горения; оценки параметров работы газодымозащитной службы. Структура взаимодействия моделей представлена на рисунке 4.13.

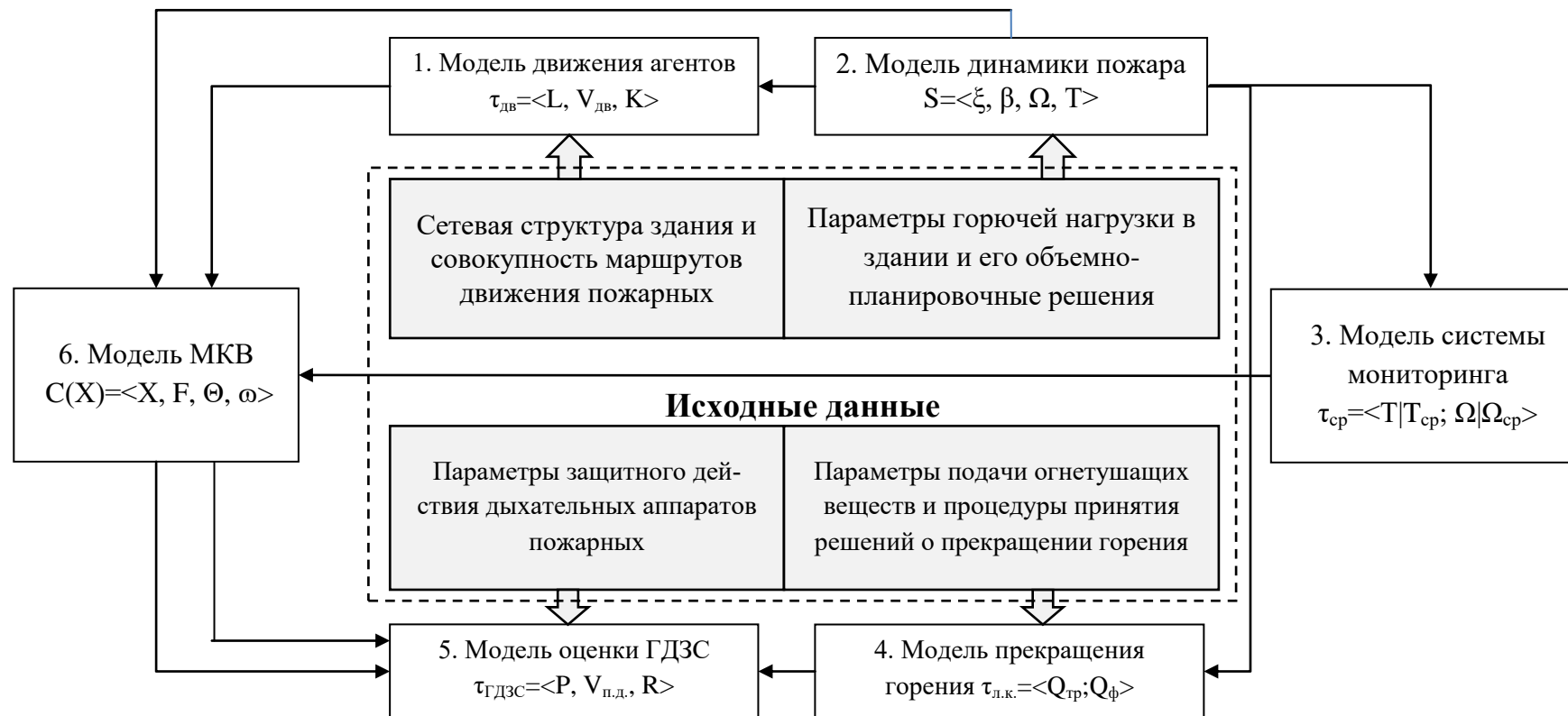


Рисунок 4.13 – Взаимодействие моделей многоагентной системы:

$\tau_{дв}$  – время реализации работ,  $L$  – протяженность маршрута при реализации работ,  $V_{дв}$  – скорость движения при реализации работ,  $K$  – коэффициент снижения скорости движения;  $S$  – совокупность состояний пожара,  $\xi$  – оптическая плотность дыма,  $\beta$  – безразмерный параметр пожара,  $\Omega$  – видимость в дыму,  $T$  – текущее значение температуры газовой среды;  $\tau_{ср}$  – время предельных состояний пожара,  $T_{ср}$  – предельно-допустимое значение температуры газовой среды для средств контроля системы мониторинга,  $\Omega_{ср}$  – предельно-допустимое значение видимости в дыму средств системы мониторинга пожара,  $\tau_{л.к.}$  – время ликвидации горения,  $Q_{тр}$  – требуемый расход подачи ОТВ;  $Q_{ф}$  – фактический расход подачи ОТВ,  $\tau_{ГДЗС}$  – ограничения по времени нахождения в непригодной для дыхания среде здания,  $P$  – давление в баллонах ДА,  $V_{п.д.}$  – скорость падения давления,  $R$  – показатель защиты дыхательных аппаратов,  $C(X)$  – множество маршрутов движения пожарных внутри зданий, рекомендованных для окончательного выбора,  $X$  – множество маршрутов движения,  $F$  – векторный критерий,  $\Theta$  – показатель относительной важности критериев выбора,  $\omega$  – коэффициент важности критериев выбора.

Разработана структура совокупного взаимодействия моделей многоагентной системы, которая позволяет представить использование результатов моделирования поддержки принятия решений при реализации действий по тушению пожаров в зданиях. Параметры многоагентной системы определяются взаимодействием параметров следующих моделей.

1. Модель движения агентов внутри здания представляет собой следующую совокупность параметров при расчете времени движения агентов по указанным маршрутам в здании

$$\tau_{\text{дв}} = \langle L, V_{\text{дв}}, K_i \rangle, \quad (4.35)$$

где  $L$  – протяженность маршрута движения, м;  $V_{\text{дв}}$  – скорость движения агентов на участках маршрута, м·мин<sup>-1</sup>;  $K_i$  – коэффициенты, учитывающие условия видимости агентов.

Данная модель используется на всех этапах реализации работ, при тушении пожаров в здании, коэффициент  $K$  рассчитывается по формуле

$$K_i = C_i \cdot B_i^{\gamma_i}, \quad i=1,2 \quad (4.36)$$

где  $B_i$  – количественная шкала зависимости скорости движения по участку маршрута  $C_i$  и  $\gamma_i$  значения констант модели.

2. Модель динамики пожара позволяет оценить видимость на маршрутах движения агентов и тем самым оценить динамику скорости движения и время реализации действия. Модель динамики пожара предусматривает оценку динамики пожара системой мониторинга. В этом случае она позволяет определить время передачи информации от системы мониторинга, которое лимитируется критической температурой воздействия пожара на средство измерения параметра пожара. Модель динамики пожара предусматривает моделирование следующих параметров многоагентной системы

$$S = \langle \xi, \beta, \Omega, T \rangle, \quad (4.37)$$

где  $\xi$  – количественная функция динамики видимости в здании при пожаре;  $\Omega$  – видимость на участках движения агентов внутри здания, м;  $\beta$  – функция динамики температуры внутри здания при пожаре;  $T$  – температуры на участках движения агентов внутри здания, град.

Результаты моделирования динамики пожара используются в качестве исходных данных для модели поддержки принятия решений и модели системы мониторинга динамики пожара.

3. Модель системы мониторинга предназначена для определения наступления критических состояний в зонах контроля многопараметрических средств мониторинга пожара и оповещения когнитивных агентов модели для управления реактивными агентами. Данная модель представляет собой совокупность следующих параметров, позволяющих оценить временные интервалы наступления критических состояний пожара в зонах контроля путем сравнения текущих значений с предельно-допустимыми значениями

$$\tau_{\text{cp}} = \langle T | T_{\text{cp}}; \Omega | \Omega_{\text{cp}} \rangle, \quad (4.38)$$

где  $T$  – текущее значение температуры в зонах системы мониторинга, град;  $T_{\text{cp}}$  – предельно-допустимое значение температуры, град;  $\Omega$  – текущее значение видимости в зонах системы мониторинга, м;  $\Omega_{\text{cp}}$  – предельно-допустимое значение видимости при пожаре в здании, м.

Результаты моделирования, полученные на основе модели системы мониторинга и визуализируемые с использованием клеточных автоматов, оповещают когнитивных агентов многоагентной системы о месте расположения очага пожара в здании и условиях температурного воздействия на реактивных агентов модели при их движении к очагу пожара по выбранному маршруту.

4. Модель прекращения горения представляет собой совокупность зависимостей, необходимых для определения требуемого количества приборов подачи огнетушащих веществ и времени на реализацию действий по ликвидации пожара. Интервалы времени необходимые для прекращения горения при пожаре в здании, определяются на основе требуемого и фактического расходов огнетушащих веществ

$$\tau_{\text{л.к.}} = \langle Q_{\text{тр}}; Q_{\text{ф}} \rangle, \quad (4.39)$$

где  $Q_{\text{тр}}$  – требуемый расход подачи огнетушащих веществ, л·с<sup>-1</sup>;  $Q_{\text{ф}}$  – фактический расход огнетушащих веществ, л·с<sup>-1</sup>.

5. Модель оценки параметров работы газодымозащитной службы – данная модель позволяет определить нормативное время пребывания реактивных агентов внутри здания. Нормативное время является параметром, ограничивающим продолжительность реализации работ внутри здания, связанных как со спасением людей, так и с прекращением горения. Время защитного действия дыхательных аппаратов, используемых реактивными агентами, определяется на основе следующих параметров

$$\tau_{ГДЗС} = \langle P, V_{п.д.}, R \rangle, \quad (4.40)$$

где  $P$  – текущее давление в средствах индивидуальной защиты пожарных, атм;  $V_{п.д.}$  – скорость потребления дыхательной смеси пожарными при движении на участках маршрутов внутри здания, атм·мин<sup>-1</sup>;  $R$  – показатель защиты дыхательных аппаратов.

6. Модель многокритериального выбора и поддержки принятия управленческих решений предназначена для ранжирования задач пожаротушения в порядке предпочтительности для выбора маршрута движения при реализации работ по спасению людей и ликвидации пожара. Исходными данным для данной модели являются набор задач пожаротушения (спасание людей и ликвидация горения) и маршруты движения агентов при реализации работ. Модель позволяет реализовать многокритериальную оптимизацию маршрутов движения для реактивных агентов модели

$$C(X) = \langle X, F, \Theta, \omega \rangle, \quad (4.41)$$

где  $C(X)$  – множество маршрутов для выбора реактивными агентами;  $X$  – исходное множество маршрутов движения;  $F$  – векторный критерий, позволяющий оценить маршрутов по показателем;  $\Theta$  – относительные показатели важности компонент векторного критерия;  $\omega$  – показатели важности для ранжирования задач пожаротушения.

Для построения структуры выбранных маршрутов движения в многокритериальной модели используется принцип оптимальности по Парето и разработанный в диссертации метод поддержки принятия управленческих решений.

Разработанная многоагентная система моделирования действий пожарных подразделений при тушении пожаров с использованием поддержки принятия решений позволяет реализовать процедуры численного моделирования использования теоретических результатов исследования в процессе практической деятельности по тушению пожаров в зданиях.

#### **Выводы по главе 4**

В результате исследования, проведенного в главе 4, целью которого являлось моделирование поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров в зданиях с применением моделей и методов мониторинга пожара, получены следующие основные результаты:

1. Проведена постановка, формализация и решение частных задач управления пожарными подразделениями на основе методов системного анализа действий по тушению пожаров в зданиях. В результате применения системного анализа разработаны критерии принятия решений по выбору маршрутов движения пожарных внутри зданий и предложен метод моделирования структуры здания для формирования множества допустимых вариантов управленческих решений.

2. Разработаны регрессионные модели действий по тушению пожаров. На их основе применена функция Кобба – Дугласа для нормализации показателей важности критериев принятия решений.

3. Разработаны количественные шкалы критериев для формирования векторных оценок вариантов управленческих решений. При разработке количественных шкал использована модель, разработанная во второй главе диссертации. Для соблюдения требований линейной однородности функции ранжирования модель применена ко всем критериям, включая критерий мониторинга динамики пожара.

4. Произведена постановка многокритериальной задачи выбора маршрутов движения пожарных внутри здания при пожаре, которая решена с использованием многокритериального метода поддержки принятия решений разработанного в диссертации. Определены показатели относительной важности критериев приня-



тия решений, которые ранжированы по степени влияния на окончательный выбор, что позволило модифицировать исходный векторный критерий и определить множество парето-оптимальных маршрутов движения, которые предлагаются для выбора наилучшего решения в поставленной задаче.

5. Разработана многоагентная система для моделирования процессов поддержки принятия решений при управлении пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях. Предложена структура модели, рассмотрены свойства агентов модели. Разработана совокупность моделей для описания динамики параметров среды моделирования в многоагентной модели, что позволило представить в виде единой системы совокупность моделей оперативно-тактических действий, модели мониторинга динамики пожара в здании и процедуры поддержки принятия решений.

## **ГЛАВА 5. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ**

В данной главе диссертации разрабатывается информационная система поддержки управления, целью которой является практическая реализация разработанных многокритериальных моделей, методов и алгоритмов поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании. Сложность частных задач управления пожарными подразделениями определяет возможность их практической реализации только в виде интеллектуальной системы поддержки управления.

Информационное взаимодействие процедур поддержки принятия решений с многопараметрическими средствами мониторинга динамики пожара определили возможность реализации системы поддержки управления в виде программно-аппаратного комплекса. Реализация теоретических моделей поддержки управления и мониторинга динамики пожара в программно-аппаратном комплексе определила необходимость разработки функциональной и алгоритмической структуры системы поддержки управления. При разработке структур программно-аппаратного комплекса поддержки управления необходимо произвести обоснованный выбор способа построения функциональной структуры системы, а также рассмотреть наполнение структуры отдельными алгоритмическими подсистемами

Для разработки практических рекомендаций по применению разработанных теоретических моделей, методов и алгоритмов, реализованных в виде программно-аппаратного комплекса, необходима разработка компьютерной модели системы поддержки управления на основе технологий многоагентного моделирования, что позволяет в едином комплексе представить модели действий пожарных подразделений, модели мониторинга динамики пожара и методы поддержки принятия решений.

## 5.1. Архитектура программно-аппаратного комплекса

В целях практической реализации теоретических моделей и методов разработана система поддержки управления, которая представляет собой программно-аппаратный комплекс (ПАК). Аппаратная компонента ПАК состоит из многопараметрических средств мониторинга динамики пожара в помещениях здания, включая протоколы обмена результатами мониторинга, объединенные в единую систему мониторинга динамики пожара в здании [153]. Программная компонента ПАК – совокупность алгоритмизированных многокритериальных моделей и методов обработки результатов многопараметрического мониторинга пожара с учетом алгоритмов моделирования динамики параметров мониторинга. Программная компонента ПАК обеспечивает взаимодействие с процедурами многокритериального анализа вариантов управленческих решений, как информационная компонента для поддержки принятия управленческих решений. Система поддержки управления включает в себя алгоритмическую и функциональную структуру, обеспечивающие взаимодействие функциональных подсистем.

### 5.1.1. Функциональная структура системы поддержки управления

Для реализации разработанных теоретических моделей разработана система поддержки управления. Структура системы поддержки управления построена по иерархическому принципу и включает высший, средний и низовой уровни иерархии, в рамках которых реализованы функциональные подсистемы. В иерархической структуре системы выделены следующие подсистемы:

*подсистема 1* – подсистема многопараметрического мониторинга:

– подсистема сбора и обработки результатов мониторинга в которой реализованы протоколы обмена данными между средствами мониторинга и программными решениями, обеспечивающими моделирование мониторинга пожара. Основной задачей данной функциональной подсистемы является обеспечение своевременного доведения сигналов об изменении значений контролируемых па-

раметров мониторинга. В рамках данной подсистемы реализована база данных и инструментарий просмотра истории работы системы мониторинга на объекте, а также для ведения статистики результатов мониторинга;

– подсистема моделирования динамики параметров мониторинга данная функциональная подсистема обеспечивает информационное сопровождение процесса принятия решений на основе прямых и косвенных параметров мониторинга, а также в случае частичной потери связи со средствами многопараметрического мониторинга. В качестве теоретической основы данной функциональной подсистемы выступает модель клеточных автоматов, обеспечивающая восполнение недостающих данных для оперативного принятия управленческих решений;

*подсистема 2* – подсистема многокритериального анализа данных:

– подсистема ранжирования управленческих решений. В рамках данной подсистемы производится анализ сетевой структуры данных, формирование векторного критерия вариантов управленческих решений и упорядочение в порядке предпочтительности для окончательного выбора решений, результаты ранжирования вариантов решений используется в качестве исходных данных для реализации многоуровневых процедур многокритериальной оптимизации;

– подсистема теоретико-множественного анализа управленческих решений. В рамках данной функциональной подсистемы реализованы разработанные процедуры поддержки принятия управленческих решений, в которых на основе ранжирования вариантов определяется комплекс относительных показателей важности критериев и выявляется парето-оптимальная структура множества исходных вариантов. Результатами многокритериального анализа данной функциональной подсистемы является множество вариантов управленческих решений, рекомендованных лицу принимающему решение, для окончательного выбора. Если множество вариантов решений достаточно велико, тогда к парето-оптимальной структуре вариантов решений добавляются результаты их ранжирования (рисунок 5.1).

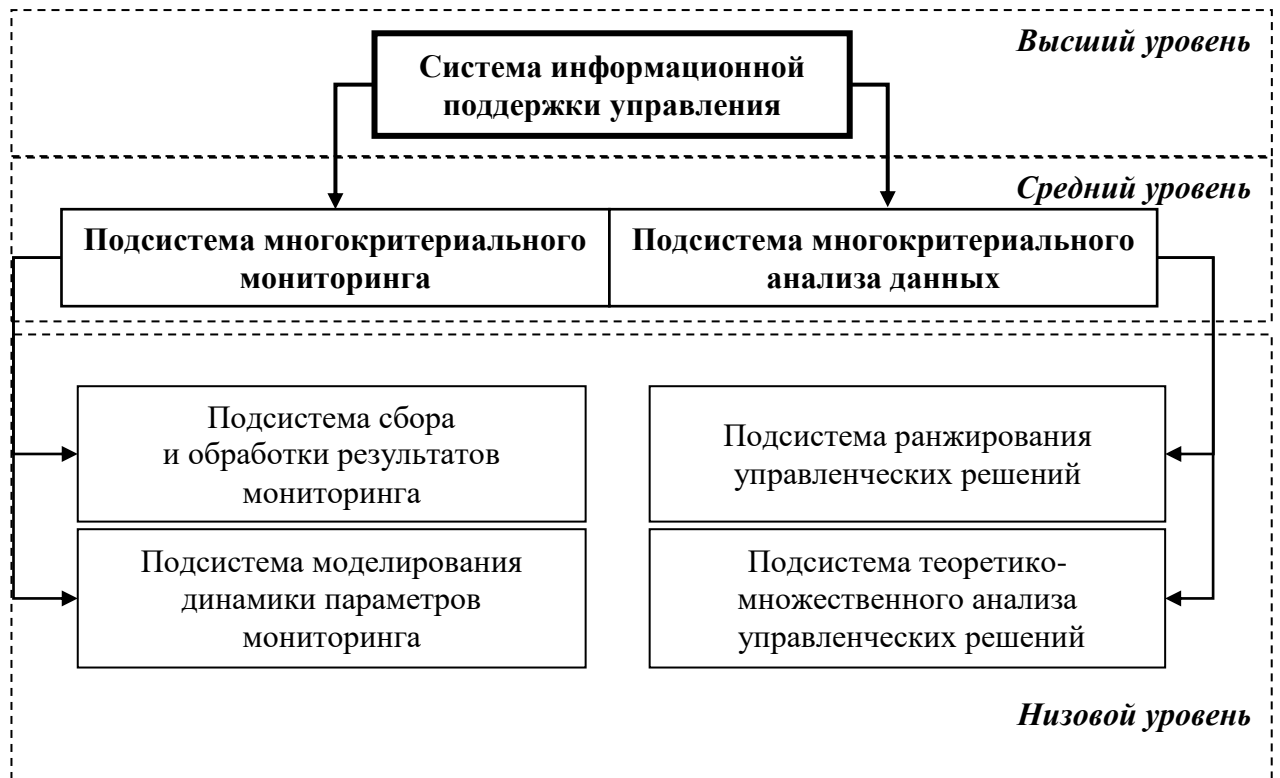


Рисунок 5.1 – Иерархическая структура системы поддержки управления

На основе взаимодействия функциональных подсистем системы поддержки управления произведена алгоритмизация методов обработки результатов мониторинга, моделирования и прогнозирования динамики пожара в здании и метода поддержки принятия решений, а также разработана алгоритмическая структура системы поддержки управления.

### 5.1.2. Алгоритмическая структура системы поддержки управления

На основе иерархической функциональной структуры системы поддержки управления произведена алгоритмизация и программная реализация моделей и методов мониторинга динамики пожара в здании и многокритериальных процедур поддержки принятия решений. В процессе алгоритмизации моделей и методов разработана алгоритмическая структура системы поддержки управления, которая представляет собой совокупность элементов системы, включающих 10 подсистем и 4 базы данных (рисунок 5.2).

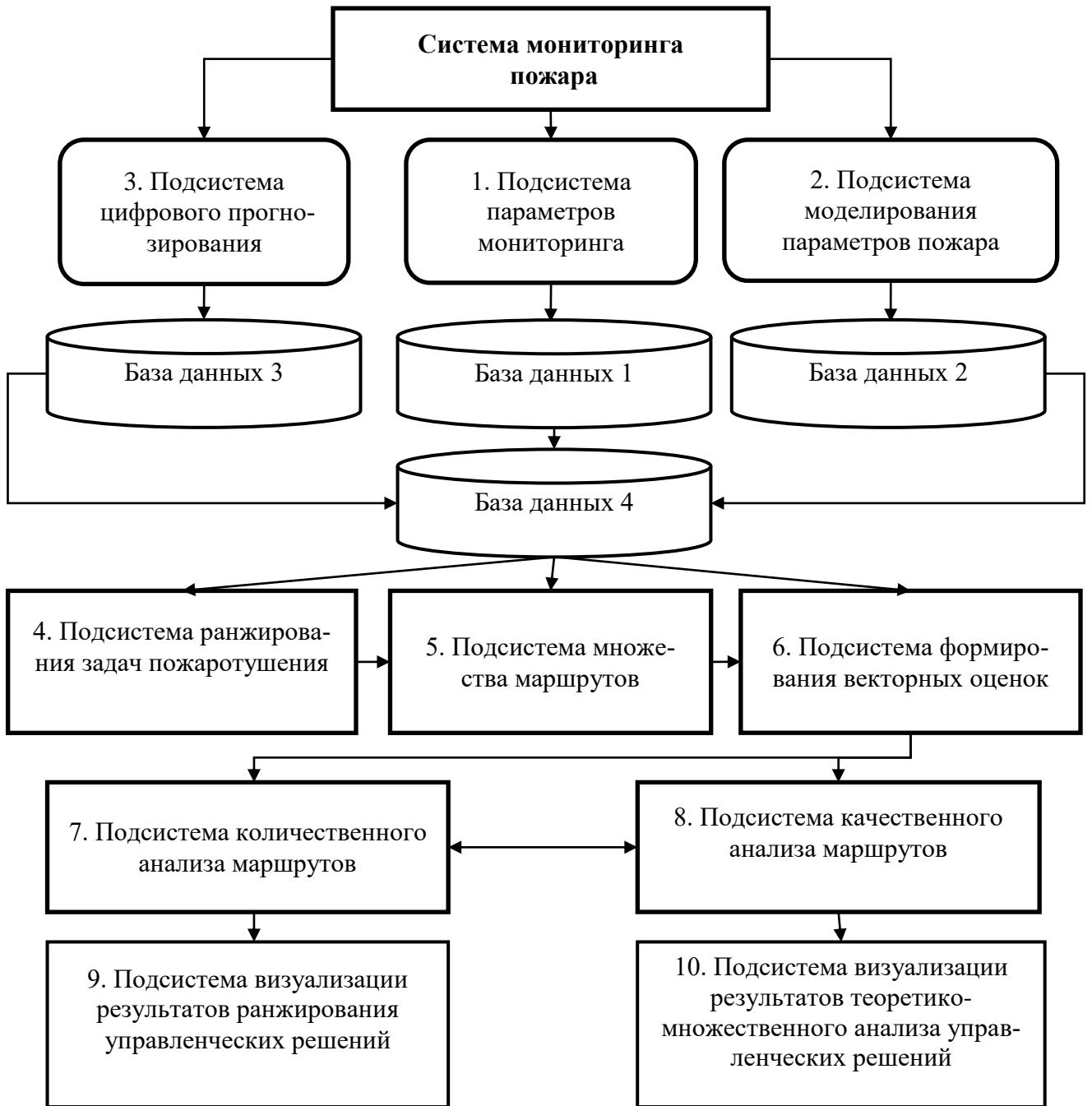


Рисунок 5.2 – Структура системы поддержки управления

Подсистема параметров мониторинга. В данном функциональном блоке осуществляется реализация взаимодействия моделей мониторинга и прогнозирования динамики пожара в здании со средствами мониторинга пожара. Поэтому основной функцией данного блока является идентификация параметров мониторинга пожара. Результаты идентификации параметров мониторинга сохраняются в базе данных 1.

Подсистема моделирования параметров мониторинга. При идентификации одного или нескольких параметров мониторинга в системе определение значений недостающих параметров, необходимых для принятия управленческих решений, осуществляется посредством математического моделирования. Результаты математического моделирования параметров мониторинга сохраняются в базе данных 2.

Подсистема цифрового прогнозирования. В данном блоке осуществляется цифровая обработка результатов мониторинга с использованием, разработанной модели нормализации и прогнозирования значений параметров мониторинга. Результаты цифровой обработки данных показателей мониторинга с учетом текущих и прогнозных значений сохраняются в базе данных 3. Обобщенные результаты сбора, обработки данных и математического моделирования объединяются по уровням решаемых задач в базе данных 4.

Подсистема ранжирования задач пожаротушения. Функциональное назначение алгоритмов, реализованных в данном блоке, состоит в упорядочении задач пожаротушения в системе поддержки управления в порядке предпочтительности для практической реализации.

Подсистема множества маршрутов содержит алгоритмический инструментарий для сетевого моделирования структуры здания с возможностью формирования участков и маршрутов движения пожарных.

Подсистема формирования векторных оценок предназначена для оценивания предпочтительности маршрутов движения по комплексу показателей, необходимых для принятия решений. В данном блоке формируется массив данных векторных оценок маршрутов движения.

Подсистема количественного анализа маршрутов реализует в себе алгоритмы ранжирования векторных оценок маршрутов движения с целью их упорядочения в порядке предпочтительности для окончательного выбора.

Подсистема качественного анализа маршрутов предусматривает разбиение маршрутов движения по множествам: наилучшие, эффективные и неэффективные. В рамках теоретико-множественного анализа управленческих решений

маршруты движения внутри множеств считаются несравнимыми. С позиции многокритериального анализа для маршрутов движения в соответствующих множествах известно, что каждый из наилучших маршрутов предпочтительнее любого из неэффективных, которые в дальнейшем исключаются из процедуры принятия решений.

Подсистема визуализации результатов ранжирования управленческих решений представляет в удобном для восприятия виде результаты упорядочения маршрутов движения пожарных в здании.

Подсистема визуализации результатов теоретико-множественного анализа управленческих решений с использованием лепестковой диаграммы визуализирует результаты парного сравнения маршрутов движения и с использованием цветовой палитры отображает декомпозицию множества управленческих решений по подмножествам парето-оптимальной структуры.

## **5.2. Система мониторинга и моделирования динамики пожара**

Система мониторинга и моделирования динамики пожара является функциональной подсистемой среднего уровня системы поддержки управления и реализует в себе модели и алгоритмы многокритериального мониторинга. Система мониторинга и моделирования состоит из двух подсистем низового уровня, в совокупности позволяющих решать стоящие перед системой поддержки управления задачи принятия решений. Система представляет собой информационный комплекс, взаимодействующий с аппаратной частью системы поддержки управления – средствами мониторинга пожара нескольких параметров мониторинга с несколькими контролируемыми критическими значениями – состояниями пожара в зонах контроля. Рассмотрим функциональные подсистемы низового уровня иерархии, позволяющие решать задачи мониторинга и моделирования динамики пожара.



### 5.2.1. Подсистема сбора и обработки результатов мониторинга

Подсистема сбора и обработки результатов мониторинга реализует информационный обмен данными между средствами мониторинга и программно-техническими решениями по моделированию динамики параметров мониторинга пожара. Целью данной функциональной подсистемы является обеспечение своевременного доведения сообщений об изменении состояний в зонах контроля значений контролируемых параметров мониторинга [82].

Передача информации между средствами мониторинга пожара осуществляется по иерархическому принципу в соответствии со структурой системы. Концептуально применение системы предусматривает разбиение внутреннего пространства здания на зоны контроля, каждая из которых контролируется одним многопараметрическим средством мониторинга с встроенным блоком обработки сигнала. Средства мониторинга и блоки обработки сигналов объединяются в систему, контролируемую одним ретранслятором маршрутизаторов, обеспечивающим передачу данных на ретранслятор-координатор, взаимодействующий с компьютерной станцией оператора системы. Отличительной особенностью многокритериальной системы мониторинга от аналогов является ее основное свойство, позволяющее программировать предельно допустимые значения параметров мониторинга и определять соответствие интервалов между критическими значениями состояния пожара в зонах контроля. Техническое решение, расширяющее функциональные возможности системы мониторинга, позволяющее использовать средства мониторинга и блоки обработки сигнала с программируемой функцией по новому назначению защищено патентом на полезную модель [94].

Для системы мониторинга разработано математическое обеспечение, позволяющее проектировать систему и использовать ее при решении практических задач мониторинга состояния пожара с возможностью дистанционной передачи результатов на мобильные устройства – адаптивная система проектирования мониторинга, прогнозирования и моделирования динамики пожара в здании [82].

В рамках разработанного математического обеспечения предложена адаптивная система проектирования. Для системы сформированы рекомендации по использованию в части решения задач проектирования систем мониторинга и прогнозирования динамики пожара. На электронной схеме здания (части здания) из стандартного набора создается сетка клеточного автомата с размещением средств мониторинга пожара. Для средств мониторинга задаются количество порогов-состояний и диапазоны значений контролируемого фактора пожара, сопоставляемые с состояниями пожара. Сетка оптимального размещения средств мониторинга пожара, объединенных в единую систему, представлена на рисунке 5.3.

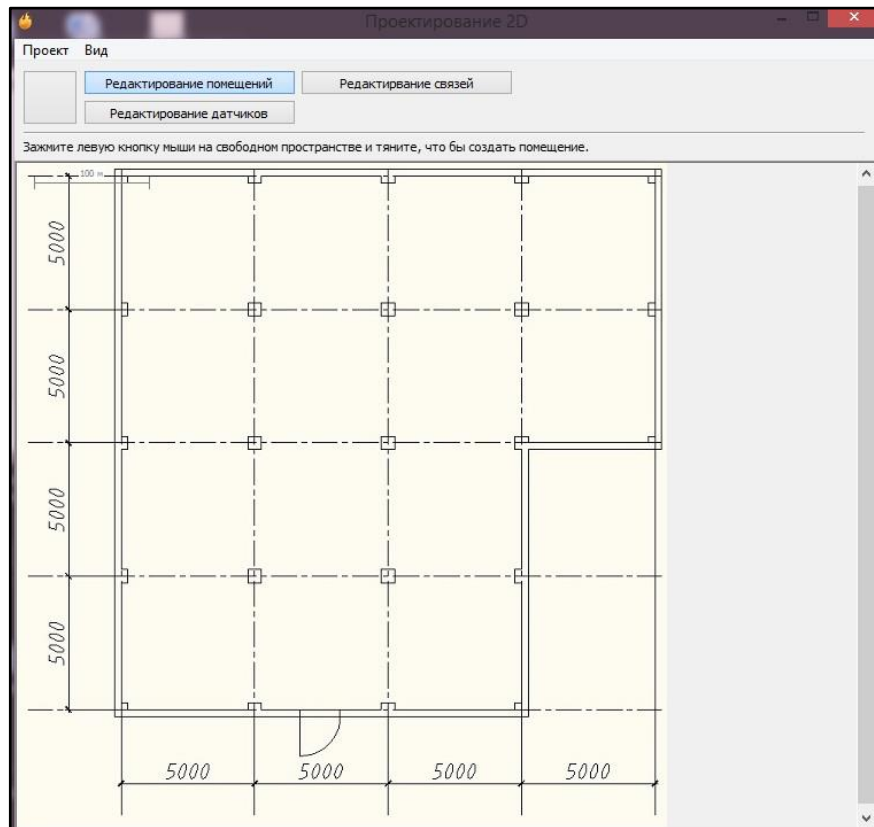


Рисунок 5.3 – Размещение электронной схемы элемента здания

Размещение электронной схемы элемента здания в адаптивной системе проектирования мониторинга и прогнозирования динамики пожара и размещение клеток клеточного автомата, для каждой из которых указываются геометрические размеры (рисунок 5.4).

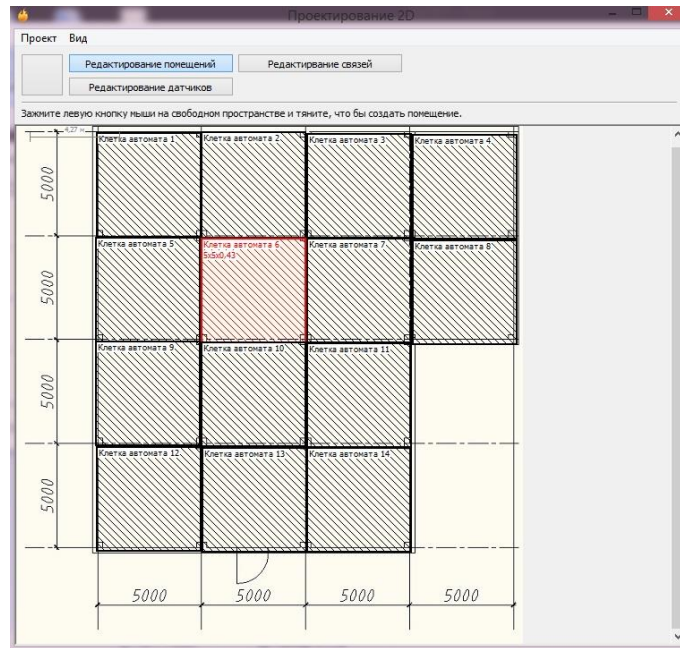


Рисунок 5.4 – Размещение клеточного автомата

Каждая клетка автомата является зоной контроля средств мониторинга с одним или несколькими контролируруемыми параметрами пожара. Расположение средств мониторинга в зонах контроля представлено на рисунке 5.5.

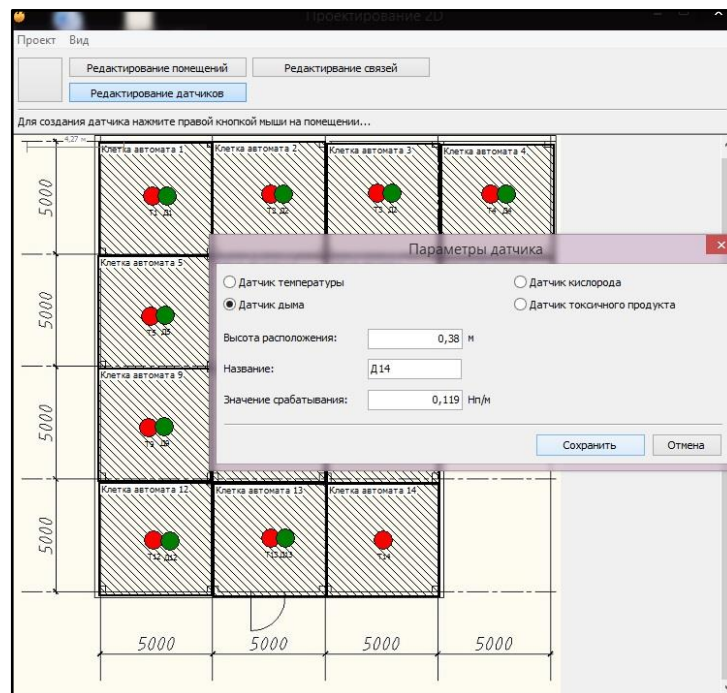


Рисунок 5.5 – Размещение средств мониторинга

Предложенное в процессе исследования комплексное решение размещения средств мониторинга в здании, проектирование системы мониторинга с функциями моделирования и прогнозирования динамики пожара обеспечивают разработку системы технических решений, позволяющих осуществить информационное обеспечение процессов поддержки принятия решений [101].

Информация о динамике параметров мониторинга позволяет реализовать процесс моделирования пожара в случае потери сигнала со средствами мониторинга пожара в процессе их практической эксплуатации.

### **5.2.2. Подсистема моделирования параметров мониторинга пожара**

Подсистема моделирования динамики параметров мониторинга пожара предназначена для решения комплекса задач цифровой обработки данных от средств мониторинга, обеспечивая информационное сопровождение процесса принятия решений на основе прямых и косвенных параметров мониторинга. В рамках данной функциональной подсистемы реализованы алгоритмы цифровой обработки данных основных параметров мониторинга и моделирования динамики косвенных параметров мониторинга на основе разработанного в диссертации метода моделирования мониторинга пожара в здании. Важной практической задачей данной подсистемы является восполнение отсутствующих результатов мониторинга в случае потери связи со средствами мониторинга в случае их технической неисправности, в том числе под воздействием температурного режима пожара.

В качестве теоретической основы данной функциональной подсистемы выступает модель клеточных автоматов в совокупности с аналитическими решениями системы уравнений А.Н. Колмогорова, адаптированными для прогнозирования динамики пожара в здании, что в совокупности обеспечивает полное сопровождение решения поставленных перед функциональной подсистемой задач управления.

На основе метода моделирования динамики параметров мониторинга пожара в здании, разработанного в параграфе 2.4 в диссертации произведена алгоритмизация и программная реализация модели клеточных автоматов, используемых

для цифровой обработки данных основных параметров мониторинга и моделирования косвенных параметров.

Подсистема моделирования состоит из базы данных мониторинга и расчетного модуля, реализованного на основе модели клеточных автоматов. В базе данных указываются теплотехнические характеристики горючей нагрузки в помещениях здания и геометрические характеристики помещения (рисунок 5.6).

Параметры модели

Выберите типовые горючие нагрузки:

- Здания I-II ст. огнест.; мебель+бытовые изделия
- Здания I-II ст. огнест.; мебель+бытовые изделия
- Здания I-II ст. огнест.; мебель+ткани
- Здания III-IV ст. огнест.; мебель+бытовые изделия
- Здания III-IV ст. огнест.; мебель+ткани
- Здание I ст. огнест.; мебель+ткани (0,75+0,25)
- Здание III ст. огнест.; мебель+ткани (0,75+0,25)

Кэффициент теплопотерь: 0,91

Теплоемкость газовой среды: 1 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>

Начальная среднеобъемная температура: 293 К

Начальная среднеобъемная плотность: 1,21 кг/м<sup>3</sup>

Объем помещения: 74,75 м<sup>3</sup>

Высота помещения: 2,99 м

Высота рабочей зоны: 1,7 м

Дальность видимости в дыму: 20 м

Начальная парциальная плотность кислорода: 0,27 кг/м<sup>3</sup>

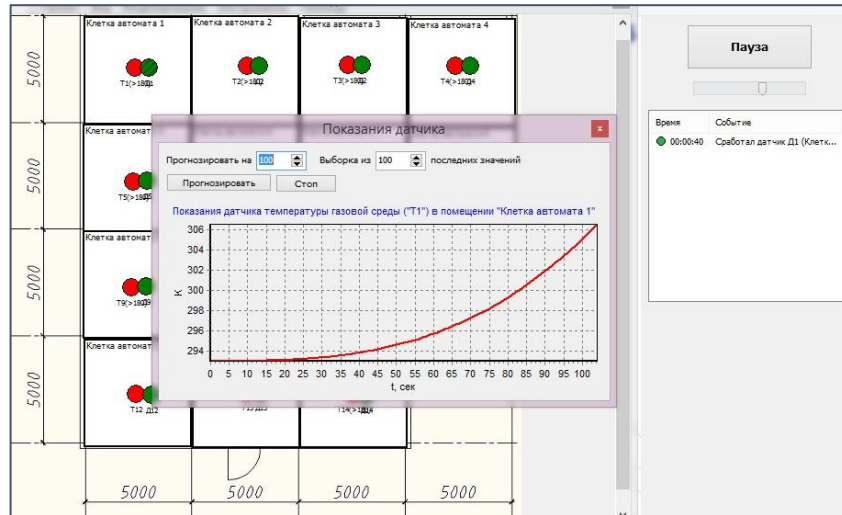
Вид материала ограждающих конструкций: Гипсокартон

Критическая масса горючей нагрузки: 2500 кг

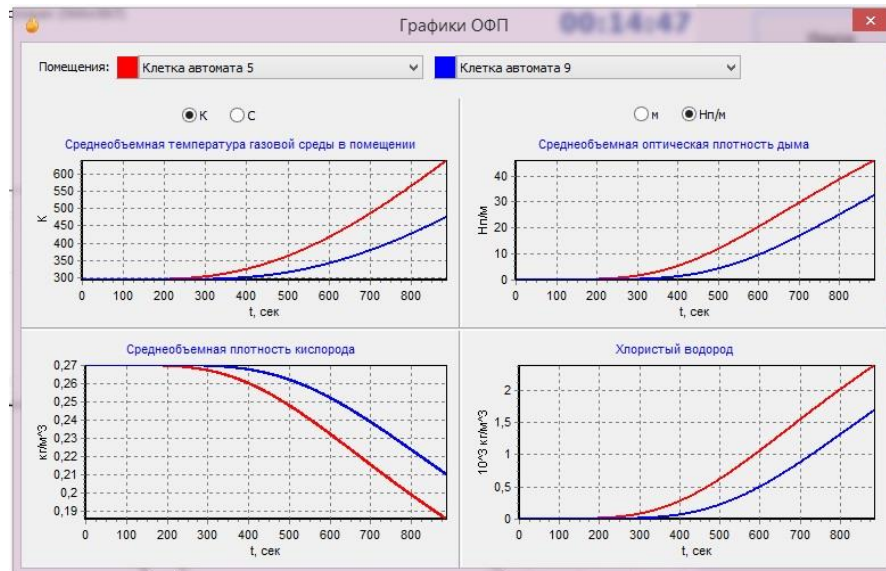
Назад    Далее    Закрыть

Рисунок 5.6 – База данных подсистемы моделирования

В качестве основного параметра мониторинга в методе моделирования предусматривается использование количественной функции температуры газовой среды в зонах контроля системы мониторинга. В этом случае результатами мониторинга являются абсолютные значения температуры в каждой из зон контроля. Реализация модели клеточных автоматов на основе динамики температуры предусматривает разработку структуры взаимодействия клеток автомата, определение абсолютных значений температуры в зонах контроля и моделирование динамики косвенных параметров – видимости в зонах контроля, концентрации кислорода и парциальных плотностей токсичных продуктов горения, а также расчет значения параметров мониторинга на основе разработанного метода моделирования, представляющего в нелинейном виде изменение значений комплекса параметров мониторинга (рисунок 5.7, а и б).



а



б

Рисунок 5.7 – Динамика основных и косвенных параметров мониторинга:

а – динамика основного параметра мониторинга; б – моделирование косвенных параметров мониторинга

Таким образом, произведена программная реализация комплекса многокритериальных моделей и методов мониторинга и моделирования динамики основных и косвенных параметров мониторинга, позволяющего обеспечить информационное сопровождение процедур многокритериального анализа вариантов управленческих решений.

### **5.3. Система многокритериального анализа управленческих решений**

В рамках разработанной системы поддержки управления процедуры многокритериального анализа управленческих решений реализованы в виде функциональной подсистемы среднего уровня иерархии. Процедуры многокритериального анализа включают в себя комплексное решение задач ранжирования и теоретико-множественного анализа управленческих решений. В рамках данной подсистемы производится программная реализация ранжирования вариантов решений, которая используется в качестве исходных данных для реализации многоуровневых процедур многокритериальной оптимизации для поддержки принятия управленческих решений, в которых выявляется парето-оптимальная структура множества исходных вариантов. Результатами многокритериального анализа является множество вариантов управленческих решений, рекомендованных лицу, принимающему решение, для окончательного выбора с учетом результатов ранжирования вариантов управленческих решений.

#### **5.3.1. Структура системы многокритериального анализа**

Система многокритериального анализа управленческих решений на этапе построения структуры множества парето-оптимальных вариантов использует алгоритм сравнения векторных оценок вариантов путем перебора. Количество сравнений в каждом конкретном случае зависит от количества вариантов и их векторных оценок. В случае, если множество вариантов невелико и включает в себя 3–5 вариантов, проблемы реализовать сравнения нет. Но если множество  $X$  велико (более 5-ти элементов), то процедуры сравнения становятся трудоемкими с вычислительной точки зрения. Поэтому целесообразно реализовать процедуру многокритериального анализа в виде формальной структуры, представленного на рисунке 5.8.

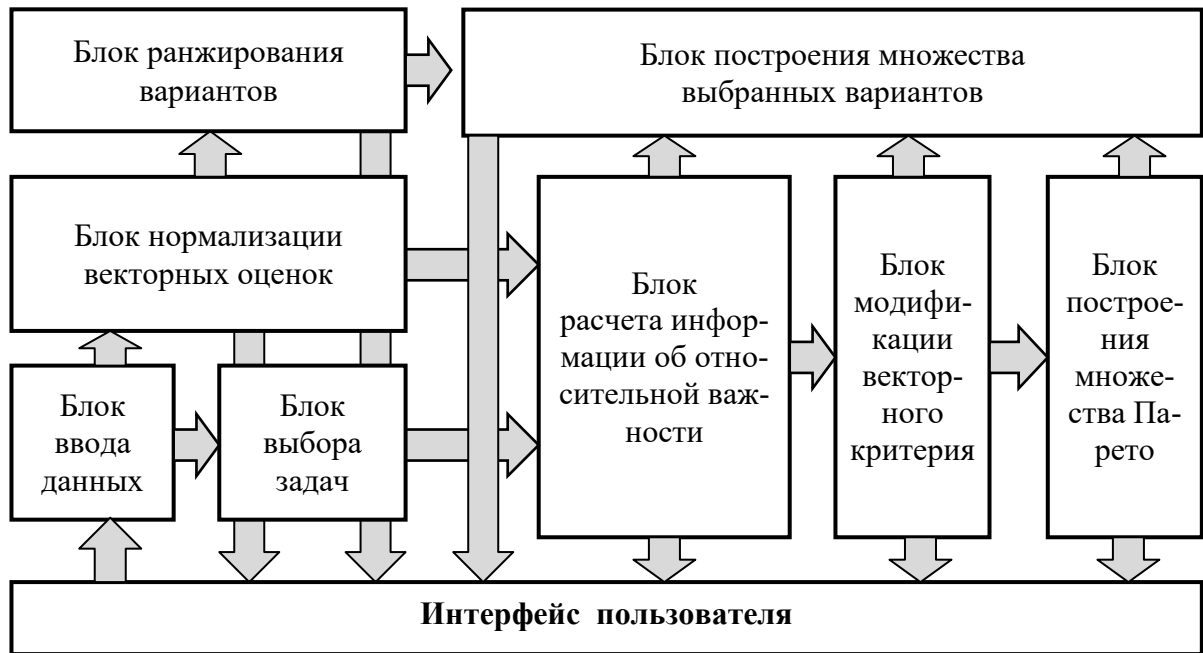


Рисунок. 5.8 – Структурная схема системы поддержки принятия решений

Структура системы многокритериального анализа управленческих решений реализована в виде совокупности отдельных блоков, в которых реализуются алгоритмы каждого из этапов метода поддержки принятия решений на основе мониторинга и моделирования динамики пожара в здании. Каждый блок системы реализует определенную задачу многокритериального анализа вариантов решений. Ввод данных в процедуру поддержки принятия решения предложено рассматривать как отдельную задачу для обеспечения взаимодействия с информационной компонентой системы поддержки управления – системой мониторинга и моделирования динамики пожара. Результаты многокритериального анализа представляются в удобном графическом виде с учетом разработанного способа визуализации парного сравнения векторных оценок вариантов управленческих решений и структуры множества решений, рекомендованных лицу, принимающему решение, для выбора наилучшего варианта.



### 5.3.2. Программная реализация процедур многокритериального анализа

Предложена программная реализация основных блоков процедуры многокритериального анализа вариантов управленческих решений.

1. Блок ввода данных и блок выбора задач реализуют совокупность операций, направленных на введение в программу множества векторных оценок и выбор способа деления компонент векторного критерия по группам важности. Интерфейс пользователя при работе с блоками представлен на рисунке 5.9.

The screenshot shows a software interface with several tabs: 'Исходные данные', 'Нормализация', 'Парето 1', 'Мод. вект. критерия', 'Парето 2', and 'Результат'. The 'Исходные данные' tab is active.

**Блок ввода данных** (Data Input Block) contains:

- Варианты и векторные оценки** (Variants and vector evaluations): A table with columns f1, f2, f3 and rows x1, x2, x3, x4. The value '2' in the first row, first column is highlighted.
 

	f1	f2	f3
x1	2	0,5	0,1
x2	5	0,2	0,5
x3	1	0,3	0,4
x4	3	0,7	0,2
- Весовые коэффициенты:** (Weights): A table with columns w1, w2, w3 and rows 0,5, 0,4, 0,1. The value '0,5' in the first row, first column is highlighted.
 

w1	w2	w3
0,5	0,4	0,1
- Buttons: 'Добавить вариант', 'Удалить', 'Добавить критерий', 'Удалить', and 'Очистить'.

**Блок выбора задач** (Task Selection Block) contains:

- Модель интегрального критерия** (Integral criterion model): Radio buttons for 'Аддитивная' (unselected) and 'Мультипликативная' (selected).
- Граница выбранного множества** (Boundary of the selected set): Radio buttons for 'Минимальная' (unselected) and 'Максимальная' (selected).
- Button: 'Расчитать' (Calculate).

Рисунок 5.9 – Элементы алгоритма ввода данных и выбора задач

На рисунке 5.9 изображен основной функционал блоков. В *блоке ввода данных* представлено множество векторных оценок вариантов, которое визуализиру-

ется методом «информационной доски» (таблицы), где строки – это векторные оценки вариантов, а столбцы – множества значений критериев. Увеличение / уменьшение размерности таблицы достигается путем увеличения / уменьшения количества критериев и вариантов, при этом каждому критерию соответствует свой «весовой» коэффициент важности. В блоке выбора задач пользователь может выбрать вид функции обобщенного критерия ранжирования (мультипликативная или аддитивная) и способ деления компонент векторного критерия по группам важности (по максимальной или минимальной компоненте векторного критерия).

2. Блок нормализации векторных оценок и блок ранжирования предусматривают реализацию процедур приведения множества значений критериев к интервалу  $[0, 1]$ , что необходимо для корректного применения процедуры ранжирования вариантов в порядке предпочтительности для выбора и визуализации векторных оценок при их парном сравнении. Данный этап алгоритма поддержки принятия решений представлен на рисунке 5.10.

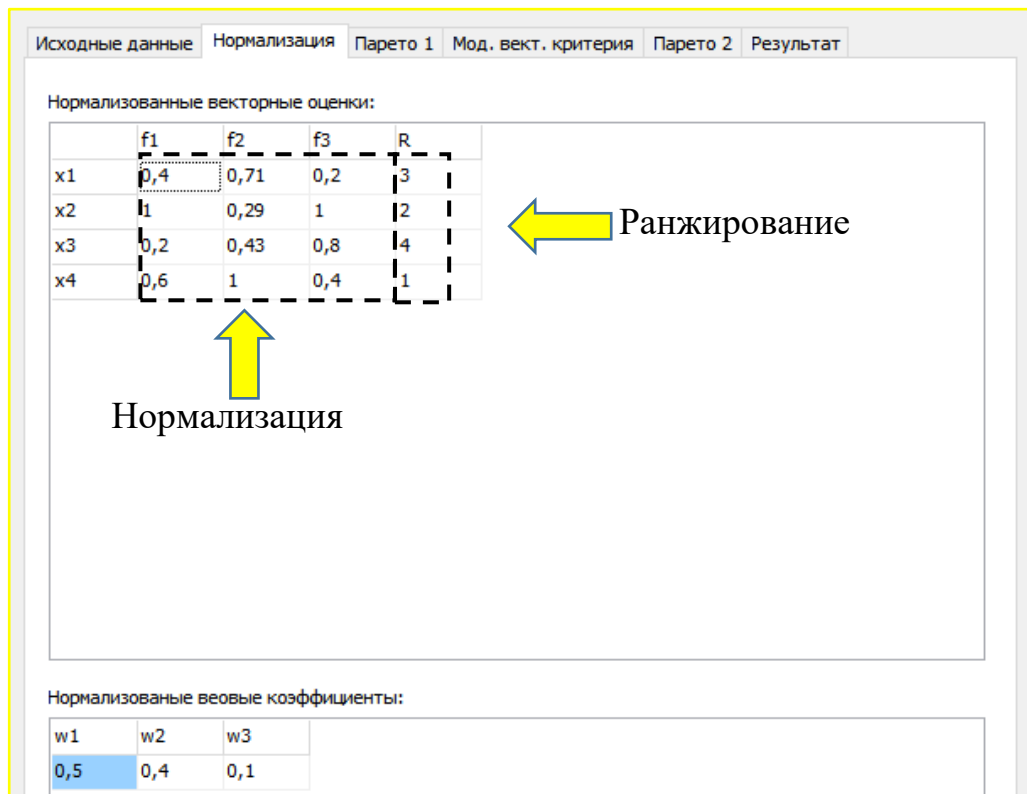


Рисунок 5.10 – Элемент алгоритма нормализации векторных оценок

3. Блок расчета информации об относительной важности и блок модификации векторного критерия предусматривают в соответствии с выбранным видом функции обобщенного критерия (аддитивная или мультипликативная) и способа деления компонент векторного критерия по группам расчет информации об относительной важности критериев заданной набором показателей относительной важности или нормированным показателем относительной важности. В блоке модификация векторного критерия реализуется учет коэффициентов важности в многокритериальном выборе путем изменения векторного критерия. Результатом реализации совместной работы блоков является множество векторных оценок, полученных путем объединения исходного множества вариантов и нового векторного критерия. Элемент алгоритма поддержки принятия решений, визуализирующий результаты работы блока, представлен на рисунке 5.11.

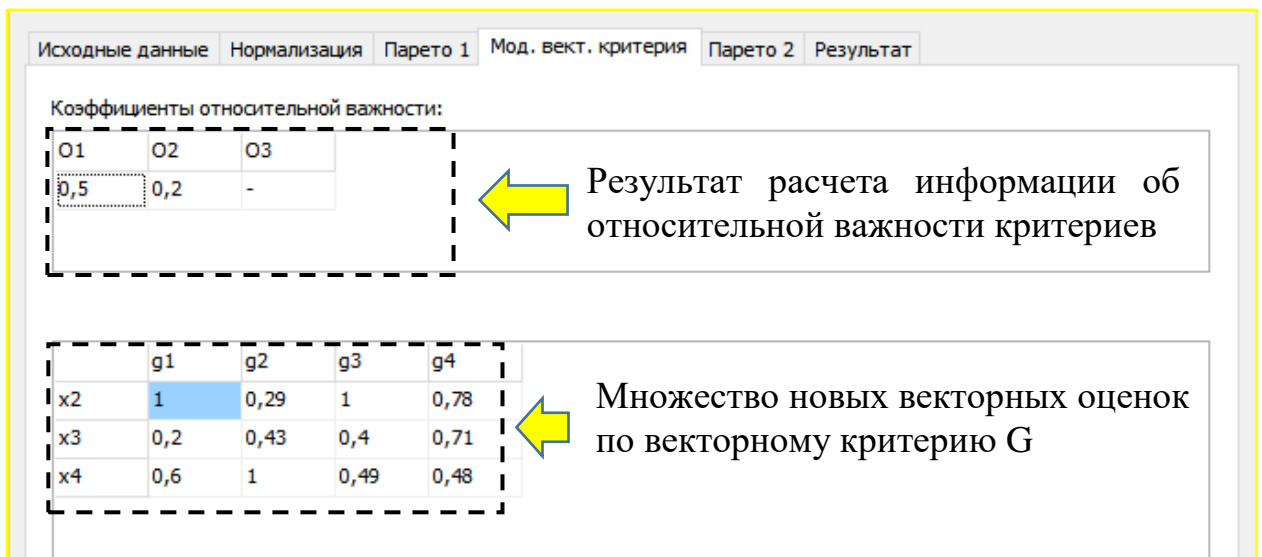


Рисунок 5.11 – Элемент блока модификации векторного критерия

4. Блок построения множества Парето реализует процедуры парных сравнений вариантов в целях построения точек максимума дискретной многокритериальной функции, характеризующей векторный критерий. Блок предусматривает попарное сравнение векторных оценок вариантов с целью определения парето-оптимальных и визуализацию парных сравнений.

Результатом работы блока являются парето-оптимальные векторные оценки вариантов (рисунок 5.12).

В случае наличия в задаче многокритериального выбора более двух критериев воспользоваться способом визуализации векторных оценок по «северо-западному углу» проблематично, поэтому целесообразно разработать способ парных сравнений вариантов.

Векторные оценки вариантов визуализируются в виде лепестковой диаграммы, в которой оси совпадают с критериями выбора, а векторная оценка представляется в виде выпуклого многогранника, в котором вершины есть локальные оценки по критериям.

Пример визуализации трехмерной векторной оценки представлен на рисунке 5.13.

Предлагаемый способ визуализации парных сравнений векторных оценок предусматривает наличие на лепестковой диаграмме двух многогранников, соответствующих векторным оценкам. Однако:

- если грани двух многогранников имеют пересечения, то соответствующие им векторные оценки являются парето-оптимальными;
- если пересечений в вершинах или пересечений фигур нет, то это значит, что векторная оценка, которой соответствует фигура с большей площадью, доминирует над векторной оценкой с соответствующей фигурой меньшей площади.

Примеры парных сравнений векторных оценок с различной размерностью представлены на рисунке 5.14.

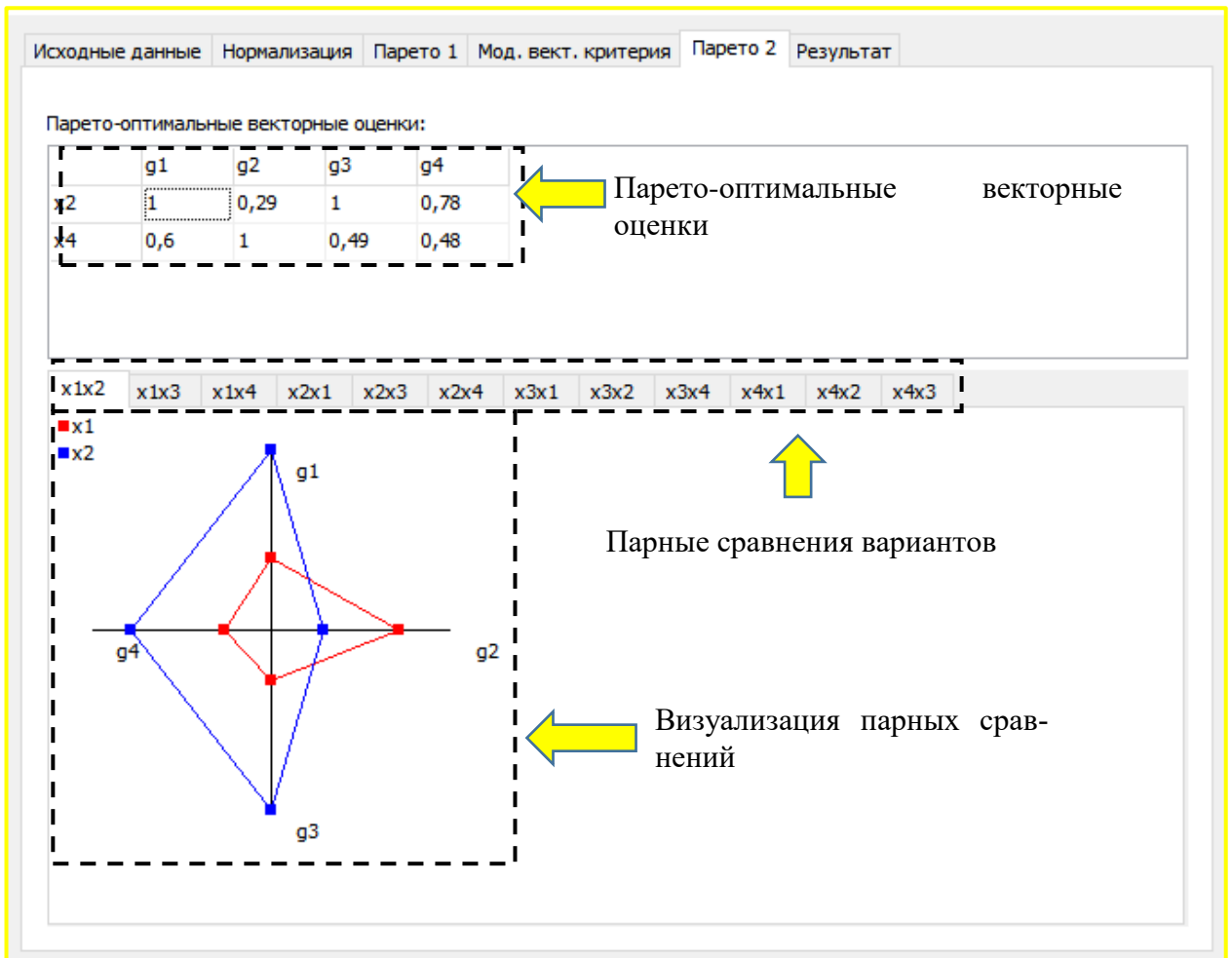


Рисунок 5.12 – Элемент алгоритма при построении множества Парето

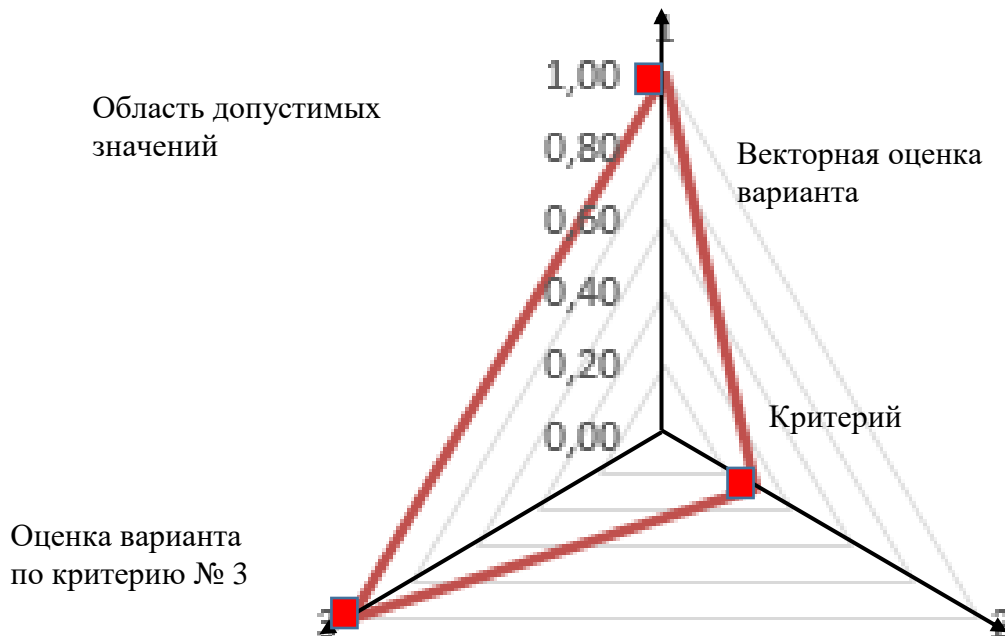
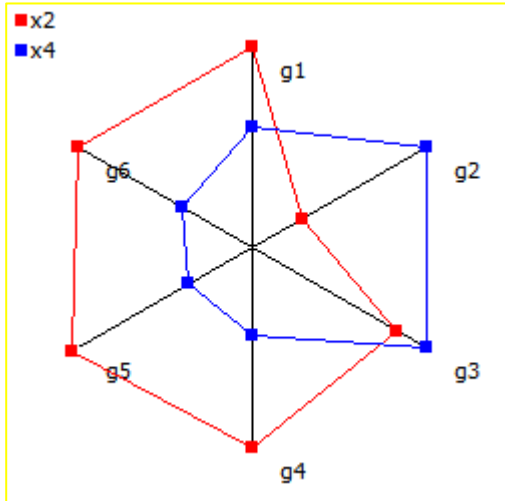
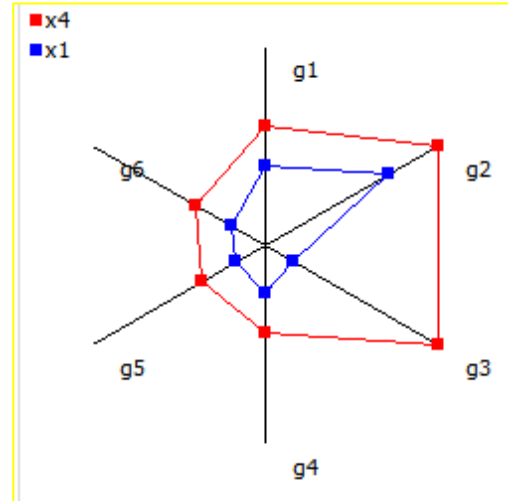


Рисунок 5.13 – Визуализация векторной оценки

*Визуализация векторных оценок при шести критериях*

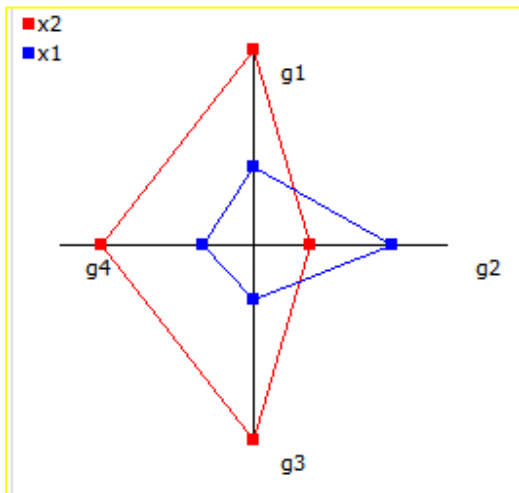


*a*

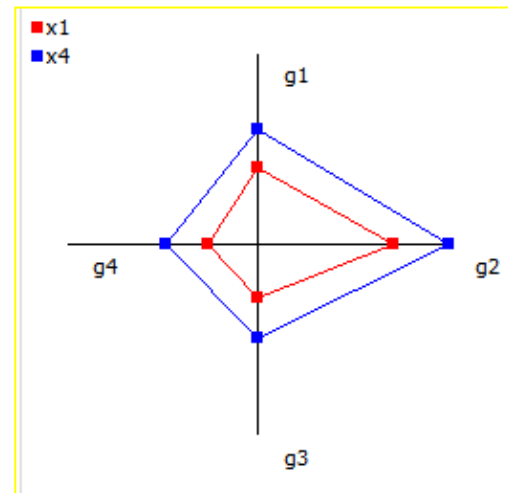


*б*

*Визуализация векторных оценок при четырех критериях*

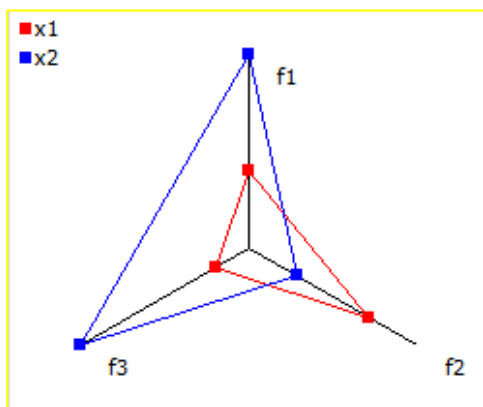


*a*

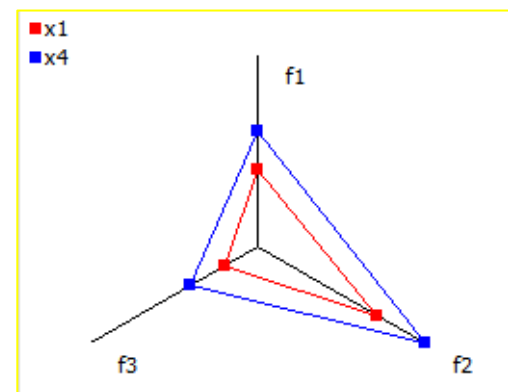


*б*

*Визуализация векторных оценок при трех критериях*



*a*



*б*

Рисунок 5.14 – Визуализация парных сравнений векторных оценок:  
*a* – ситуация соответствует парето-оптимальным векторным оценкам; *б* – ситуация соответствует доминированию одной векторной оценки над другой

5. Блок построения выбранных вариантов предназначен для построения и визуализации множества выбранных вариантов с учетом ранжирования. В блоке визуализируются разделение вариантов в задаче многокритериального выбора на парето-оптимальные и доминируемые (далее с учетом ранжирования визуализируются множества выбранных и удаленных вариантов). Результаты работы блока представлены на рисунке 5.15.

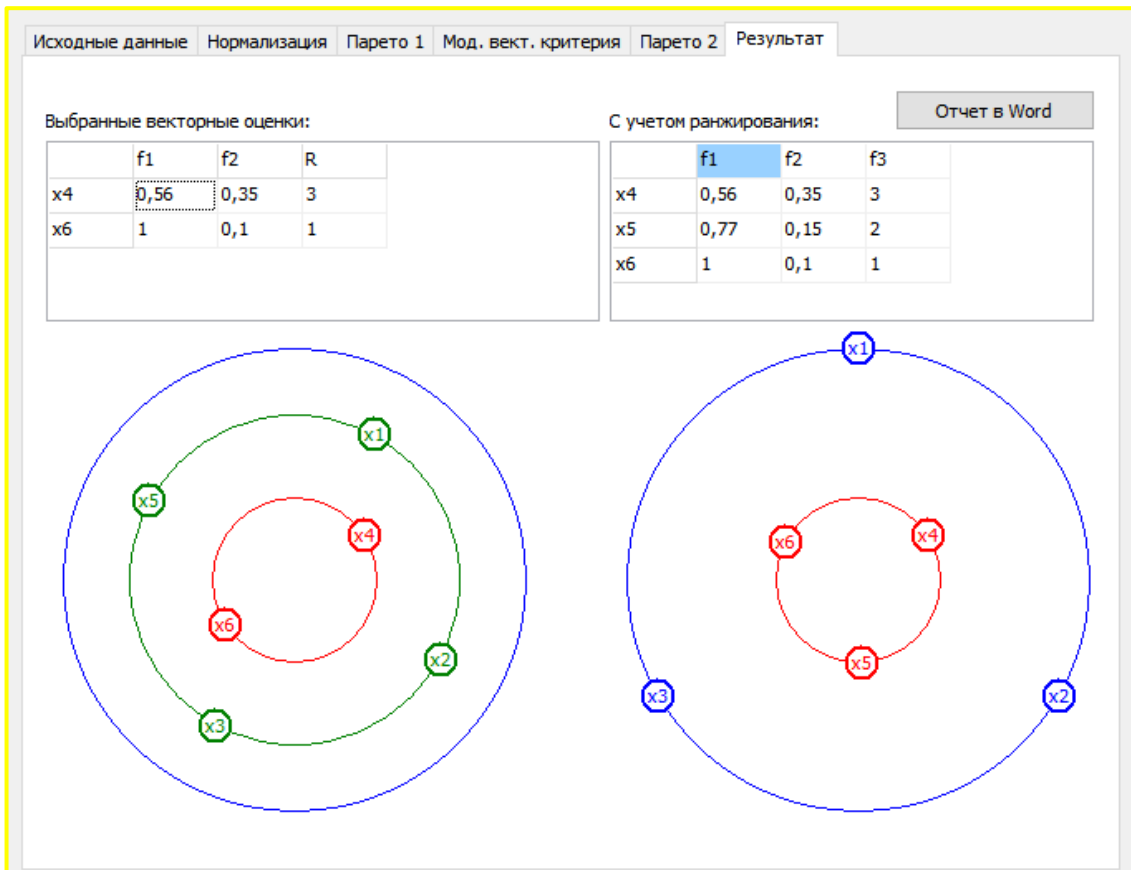


Рисунок 5.15 – Элемент алгоритма выбора вариантов

На рисунке 5.15. визуализируются результаты решения задачи многокритериального выбора по данным примера, представленного в параграфе 3.4. диссертации. По данным этого примера во множестве Парето оказались варианты с номерами  $x_4$ ,  $x_6$ , а варианты  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_5$  – являются доминируемыми. В свою очередь выбранными с учетом ранжирования являются варианты  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$ , а варианты  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  являются исключенными.

## 5.4. Система моделирования поддержки управления

Для апробации работы системы поддержки управления, исследование вопросов применения теоретических моделей и методов при решении практических задач разработана и реализована модель системы на основе теоретических результатов многоагентного моделирования. Технология многоагентного моделирования позволила увязать в единой концептуальной системе прогнозирование обстановки на пожаре как совокупность динамики параметров мониторинга, так и результаты боевых действий пожарных подразделений на основе детерминированных моделей.

Система моделирования состоит из двух основных компонент: компоненты моделирования динамики параметров мониторинга пожара с использованием модели клеточных автоматов; и компоненты управления силами и средствами пожарного подразделениями при тушении пожаров в зданиях [205].

### 5.4.1. Моделирование мониторинга динамики пожара в здании

Для реализации метода моделирования на основе модели клеточного автомата и системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы нарастания параметров пожара в клетках, в архитектуре компьютерной модели развития и тушения пожара в здании разработан отдельный программный модуль.

Программный модуль позволяет по заранее заданной планировке этажа распределить равномерную сетку различной размерности, задать характеристики горючих материалов пожара, выбрать модель выгорания массы горючего материала (полином  $n$ -й степени).

Особенностью программной реализации модуля является циклический алгоритм расчета динамики пожара и оценки состояний клеток модели клеточного автомата. Общая структура программного модуля моделирования пожара представлена на рисунке 5.16.



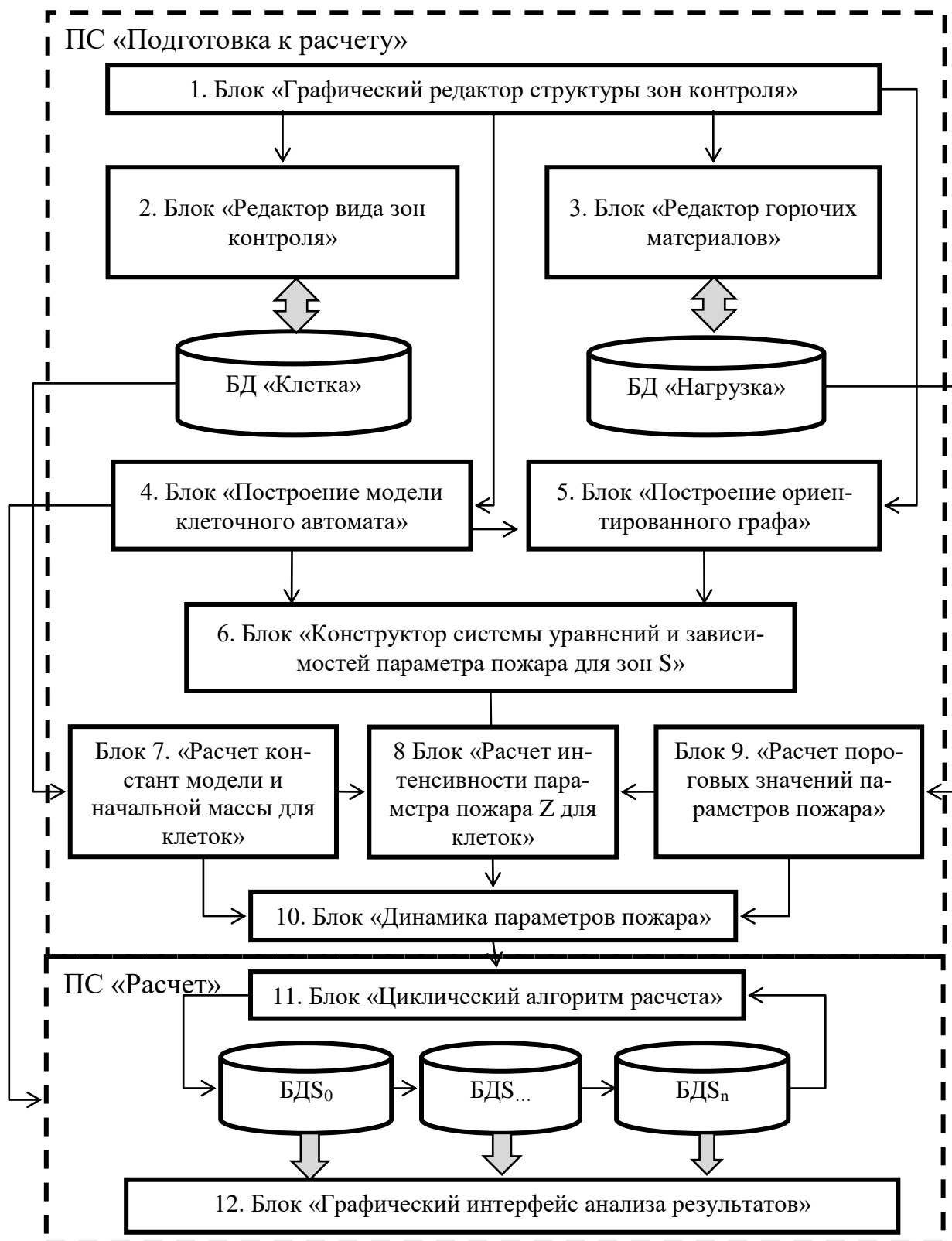


Рисунок 5.16 – Структура модуля оценки состояния пожара в здании:

БД – база данных; ПС – подсистема

Работу программного модуля оценки состояния пожара в здании можно разделить на два этапа: подготовка к расчету и расчет. Поэтому в структуре реа-

лизации модуля имеются две глобальные подсистемы: ПС «Подготовка к расчету» и ПС «Расчет».

В подсистеме «Подготовка к расчету» совокупно взаимодействуют блоки с номерами 1–10. Подсистема «Расчет» реализуется в блоках 11 и 12.

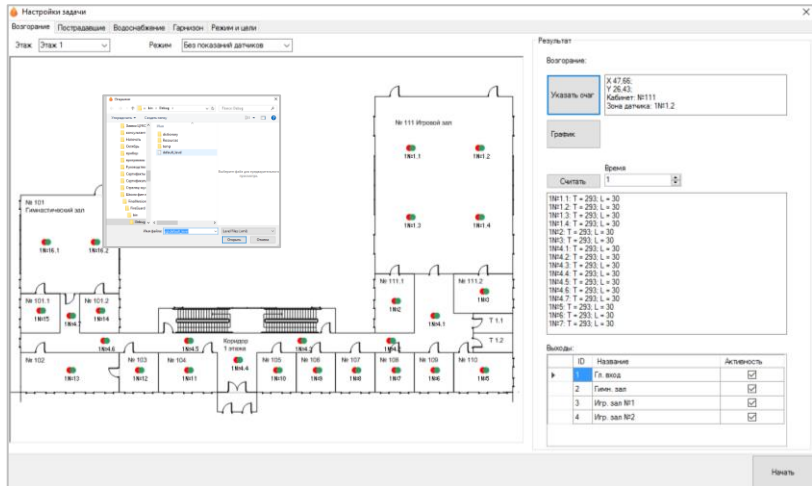
#### *Работа подсистемы «Подготовка к расчету»*

В блоке 1 «Графический редактор структуры зон контроля» производится загрузка слоев с файлами планировок и топологических схем этажей здания (рисунок 5.16, а). Далее с помощью блоке 2 «Редактор вида зон контроля» по планировкам разрабатывается сетка клеточного автомата (рисунок 5.16, в), при этом виды клеток с различной размерностью хранятся в базе данных БД «Клетка». Извлекая из базы данных заранее заготовленные клетки, структура клеточного автомата строится автоматически в блоке 4 «Построение модели клеточного автомата» с использованием топологии этажа здания. По построенной структуре клеточного автомата в блоке 5 «Построение ориентированного графа» автоматически формируется ориентированный граф связей и состояний пожара. После этого в блоке 6 «Конструктор системы уравнений и зависимостей параметра пожара для зон  $S$ » формируются зависимости, оценивающие динамику безразмерного параметра пожара  $p$ . На основании значений данного параметра с использованием зависимостей пересчета значений в размерные значения температуры и видимости в дыму необходим набор констант, определяемых на основании параметров горючего материала. Поэтому в блоке 3 «Редактор горючих материалов» предусмотрена возможность формирования новых горючих материалов путем указания их пожароопасных свойств или же извлечение из базы данных БД «Нагрузка» информацию о заранее заготовленных горючих материалах. На основе введенных данных о значениях пожароопасных свойств материалов в блоке 9 «Расчет пороговых значений параметров пожара» определяются пороговая температура, пороговая видимость, безразмерный параметр среды и др. На основе геометрии клеток клеточного автомата и начального значения плотности газовой среды в клетке в блоке 7 «Расчет констант модели и начальной массы для клеток» определяется

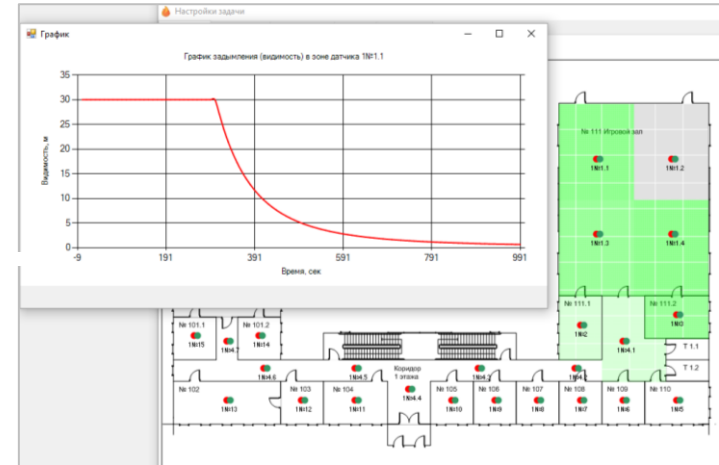
значение начальной массы газовой среды для каждой клетки и параметра  $n$  распространения продуктов горения. Далее в блоке 8 «Расчет интенсивности параметра пожара  $Z$  для клеток» для каждой клетки клеточного автомата определяется зависимость интенсивности нарастания безразмерного параметра пожара  $p$  с использованием констант модели из блока 9 и начальной массы из блока 7. Далее для каждого параметра пожара (видимости в дыму и температуры) формируются зависимости, описывающие их динамику от времени. Для этого используются константы  $n$  из блока 7, интенсивность нарастания безразмерного параметра пожара  $Z$  из блока 8 и пороговые значения параметров пожара из блока 9. После того, как для каждой клетки клеточного автомата построена зависимость динамики каждого параметра пожара от времени, работа подсистемы «Подготовка к расчету» считается законченной.

#### *Работа подсистемы «Расчет»*

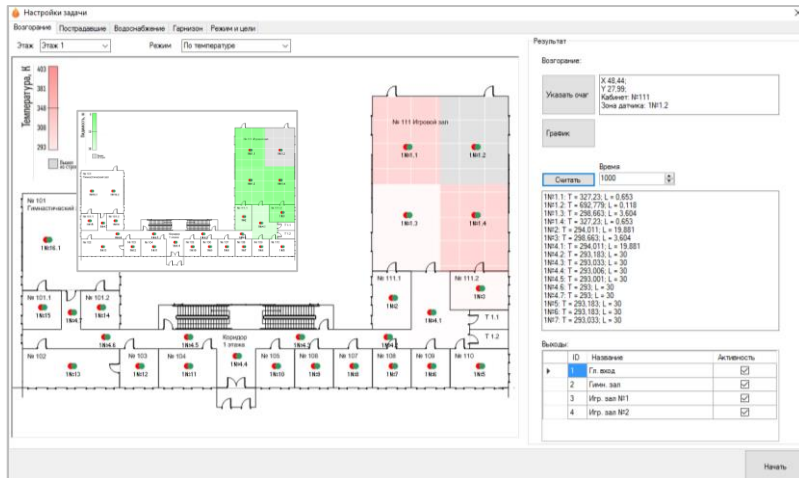
В блоке 11 «циклический алгоритм расчета» производится определение значения каждого параметра пожара по зависимостям из блока 10. При этом запускается следующий алгоритм расчета: определяется значение параметра пожара для клетки с номером 0, далее для клетки с номером 1 и далее до клетки с номером  $N$ . Затем по значению из клетки с номером  $N$  получаем следующее значение параметра пожара для клетки с номером 0 и так далее. Результаты расчетов значений параметров пожара в конкретные дискретные моменты времени сохраняются в базах данных для каждой клетки (фрагмент рисунка 5.17, *а*) и по запросу пользователя визуализируются в виде локальных значений (фрагмент рисунка 5.17, *в*) либо в виде графика зависимости параметра от времени (рисунок 5.17, *б* и *г*).



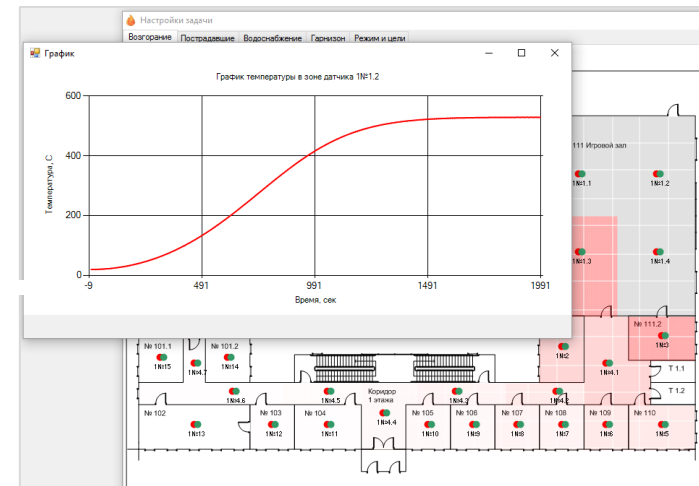
а



б



в



г

Рисунок 5.17 – Программный модуль оценки состояния пожара в здании:

а – база данных результатов мониторинга видимости; б – динамика видимости в дыму; в – база данных результатов мониторинга температуры;

г – динамика температуры пожара

Результатом работы модуля являются зависимости моделируемых параметров пожара от времени. Визуализация результатов расчетов зависит от вида моделируемой системы мониторинга состояния пожара. Если указана дифференциальная система мониторинга, тогда изменение цветовой палитры клеток осуществляется непрерывно, а при запросе результата измерения параметра пожара пользователю визуализируется график текущих значений параметра пожара. Если же указана система мониторинга с критическими значениями, тогда пользователю визуализируется цвет клетки соответствующий состоянию, а при запросе значения параметра пожара пользователь видит состояние и/или прогнозное время достижения данного состояния.

Результаты работы программного модуля сохраняются в базе данных компьютерной модели и извлекаются из базы данных при отработке сценария развития и тушения пожара. Модуль взаимодействует с другим модулем, оценивающим движение пожарных по выбранным маршрутам и модулем многокритериального анализа, с помощью которого реализуется процесс выбора маршрута движения и ранжирования задач пожаротушения.

#### **5.4.2. Моделирование действий пожарных подразделений**

Действия пожарных подразделений в компьютерной многоагентной модели разделены на действия снаружи здания и действия внутри здания. Первый вид действий предусматривает спасание людей из здания, а также боевые действия, связанные с развертыванием сил и средств пожарных подразделений. К действиям снаружи здания отнесены мероприятия, направленные на обеспечение безопасной реализации действий по тушению пожара внутри здания путем контроля запаса дыхательной смеси в средствах индивидуальной защиты пожарных. Действия пожарных подразделений внутри здания реализуются по выбранным маршрутам и направлены на своевременное прибытие к месту тушения пожара внутри здания и подачу огнетушащих веществ.

В компьютерной модели предусмотрены действия по поиску людей в здании с использованием звеньев газодымозащитной службы, спасание людей снаружи и внутри здания.

Манипуляция объектами компьютерной модели предусматривает использование заранее указанных мест для установки пожарной техники и размещения личного состава.

При этом реализация действий по спасанию предусматривает отображение в компьютерной модели личного состава пожарных подразделений и визуализацию трехколенной лестницы, установленной у здания. Элементы компьютерной модели, визуализирующие реализацию спасательных работ, представлены на рисунке 5.18.

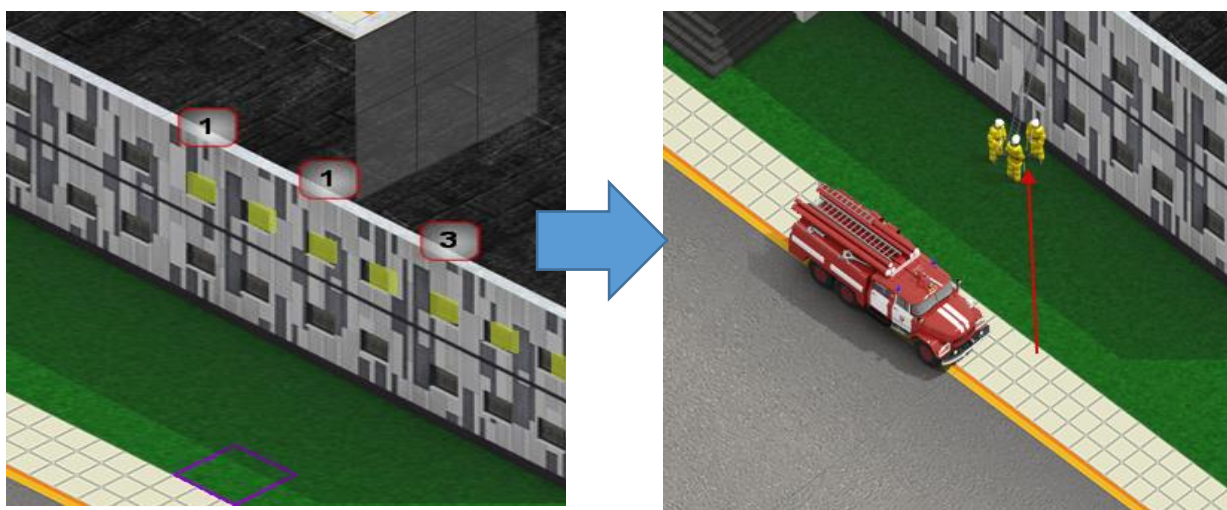
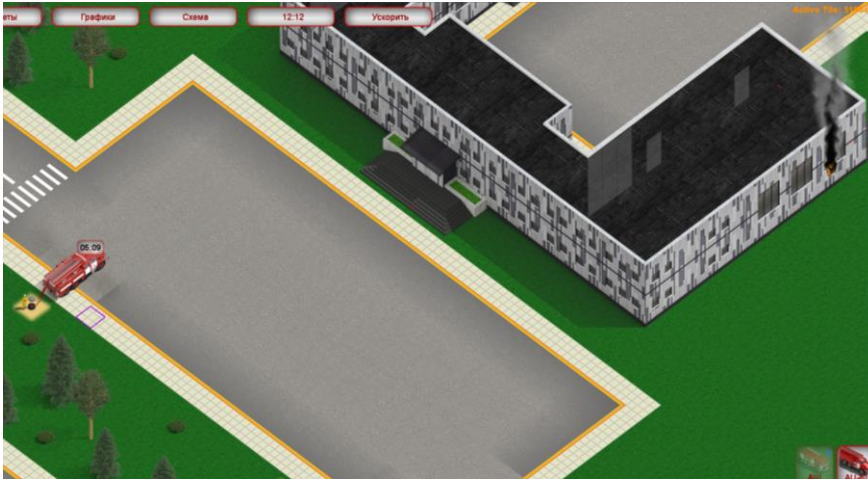


Рисунок 5.18 – Визуализация спасательных работ в компьютерной модели

В компьютерной модели за время реализации спасательных работ размеры пожара увеличиваются, что отображается как на 2D-схеме модели, так и в изометрии, как показано на рисунке 5.18.

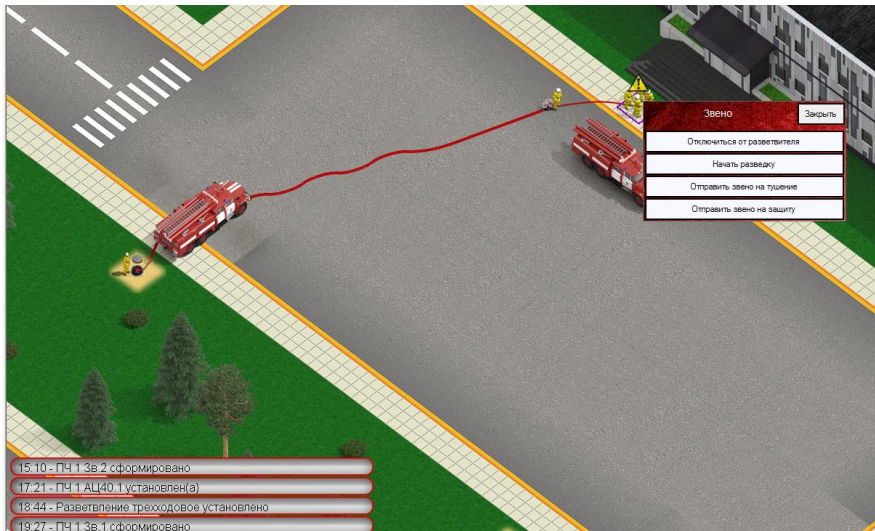
Визуализация установки пожарной автоцистерны на водосточник, прокладка магистральной рукавной линии к месту размещения разветвления, отдача команды звену ГДЗС, расчет параметров работы ГДЗС, рабочая проверка дыхательного аппарата, подачи огнетушащих веществ указаны на рисунке 5.19.



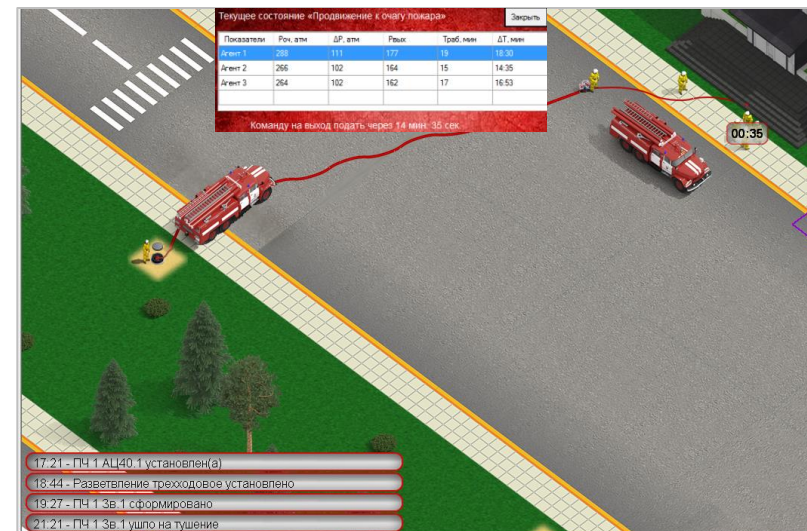
*a*



*б*



*в*



*г*

Рисунок 5.19 – Визуализация действий по тушению пожара снаружи здания:

*a* – установка АЦ на гидрант; *б* – организация звена ГДЗС; *в* – прокладка магистральной линии; *г* – рабочая проверка работоспособности ДА

В многоагентной системе моделирования манипуляция над агентами внутри здания возможна лишь на этапе разработки схемы моделирования. Так, для каждого помещения здания на планировке указываются маршруты движения агентов, как на рисунке 5.19 (а). Маршруты движения сохраняются в базе данных. При срабатывании средства обнаружения пожара системы мониторинга и/или передаче информации о нахождении людей в том или ином помещении здания из базы данных извлекаются все возможные маршруты к заданному помещению.

На этапе моделирования пользователь осуществляет выбор входа в здание, от которого будет начат процесс движения агентов. Выбор маршрута осуществляется с помощью метода многокритериального выбора с учетом видимости на маршруте из множества эффективных альтернатив. Визуализация движения агентов к помещению очага пожара продемонстрирована на рисунке 5.19 (б).

Сам процесс работы внутри здания делится на три основных этапа: движение к месту проведения работ, работа и обратный путь. При реализации действий по ликвидации пожара на основе модели динамики параметров ГДЗС осуществляется оценка нормативного времени на реализацию поиска очага (поиска спасаемого); на реализацию работы у очага пожара и работ, связанных с выходом наружу из здания.

Выбор маршрута осуществляется на этапе движения к месту работы. При этом в случае ликвидации горения выход наружу осуществляется по пройденному маршруту, а в случае спасания людей обратный путь может быть выбран при условии минимизации вероятности воздействия опасных факторов пожара на спасаемого. Если время на реализацию работы больше, чем нормативное время пребывания в непригодной для дыхания среде здания, то агенты при достижении критического времени приступают к выходу из здания независимо от результатов решения задачи пожаротушения.

Применение технологии многоагентного моделирования позволило в единой системе реализовать как процессы развития, мониторинга и прогнозирования пожара, так и действия пожарных подразделений. Система раскрывает особенность реализации разработанной системы поддержки управления на основе ком-



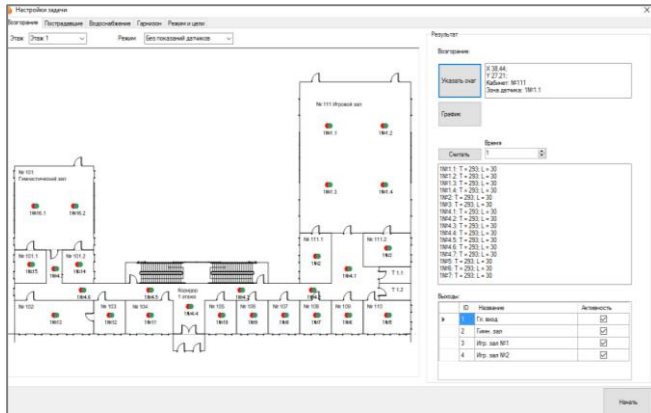
поненты системы активной противопожарной защиты здания – адресной пожарной сигнализации.

Сам процесс моделирования действий по тушению пожаров в совокупности с реализацией принятых руководителем управленческих решений в компьютерной модели делится на два этапа:

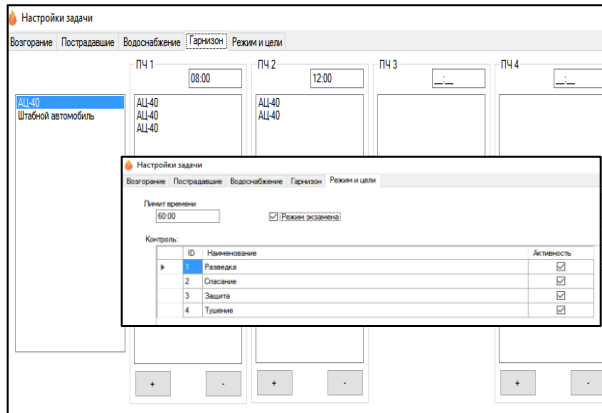
*подготовительный этап* – формирование задания для моделирования с учетом выбора схемы сосредоточения пожарных подразделений к песту пожара и указание места расположения очага пожара в здании с размещением пострадавших и спасаемых людей;

*основной этап* – непосредственное моделирование боевых действий пожарных подразделений по спасанию людей и тушению пожара.

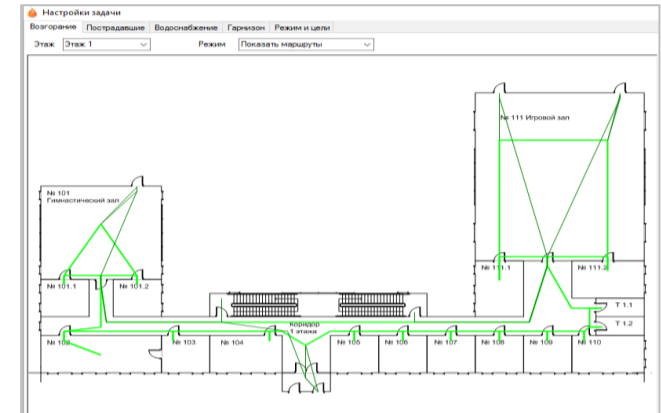
На подготовительном этапе производится выбор задач моделирования, решение которых предстоит выполнить на основном этапе (рисунок 5.20, *а* и *б*). Указывается набор источников противопожарного водоснабжения (визуализирована на рисунке 5.20 (*в*)), которые могут быть использованы для решения задач моделирования. Для начала моделирования указывается качественный и количественный состав ресурсов оперативных отделений и этапы их сосредоточения к месту пожара (рисунок 5.20, *б*). Разработанная модель мониторинга состояния пожара в зонах контроля реализована в системе, ее визуализация представлена на рисунке 5.20 (*д*). Набор правил манипуляции объектами компьютерной модели представлен на рисунке 5.20 (*е*). В компьютерной модели содержится информация для поддержки принятия решений, заключающаяся в наборе подсказок по использованию ресурсов. Работа модуля принятия решений продемонстрирована на рисунке 5.20 (*д*).



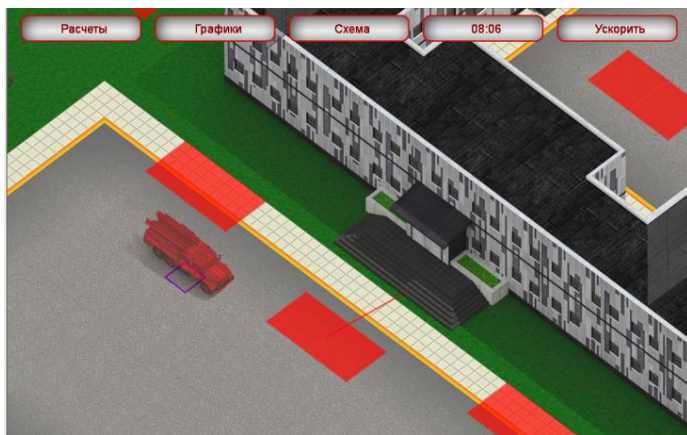
а



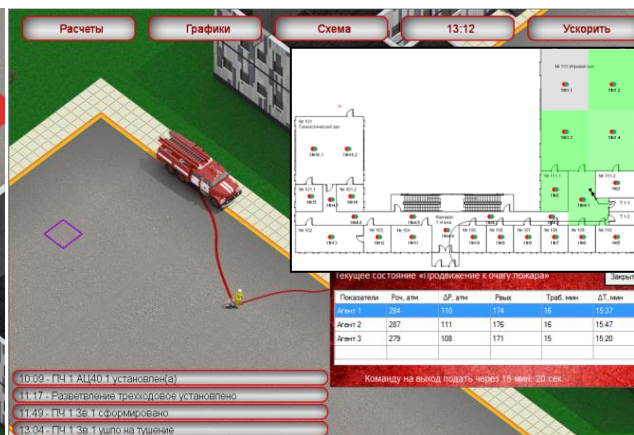
б



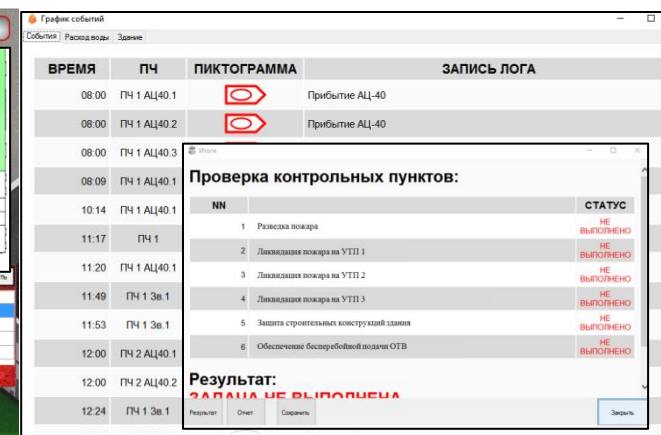
в



г



д



е

Рисунок 5.20 – Рабочие окна многоагентной модели системы поддержки управления:

- а – этап 1 – разработка системы мониторинга; б – этап 2 – разработка схемы сосредоточения пожарных подразделений;
- в – этап 3 – разработка сетевой структура здания; г – этап 4 – манипуляция над объектами модели;
- д – этап 5 – принятие управленческих решений; е – этап 6 – оценка результатов моделирования

Для применения компьютерной модели системы поддержки управления в процессе пожарно-тактической подготовки специалистов пожарно-спасательных гарнизонов на основе многоагентного подхода разработана последовательность реализации этапов моделирования, включающие в себя 6 этапов:

*1 этап* – разработка системы мониторинга, включающий моделирование и визуализацию создания системы мониторинга с использованием адаптивного проектирования;

*2 этап* – разработка схемы сосредоточения сил и средств пожарных подразделений, предусматривающий определение группировки пожарных подразделений и последовательности их прибытия к месту пожара в здании;

*3 этап* – разработка сетевой структуры здания, заключающийся в создании сетевой модели маршрутов движения пожарных при поиске очага пожара;

*4 этап* – манипуляция над объектами многоагентной модели, включающий в себя анализ допустимых позиций расположения пожарной техники в соответствии с рекомендациями системы поддержки управления на основе результатов мониторинга динамики пожара в здании;

*5 этап* – принятие управленческих решений, предусматривающий выбор пользователем позиций размещения пожарной техники и маршрутов движения пожарных в здании на основе рекомендаций системы поддержки управления;

*6 этап* – оценка результатов, заключающийся в анализе результатов моделирования в соответствии с выбором пользователя и рекомендациями системы поддержки управления.

Совокупное применение компьютерной модели системы поддержки управления и результаты обсуждения результатов исследования позволили разработать методические рекомендации по применению системы поддержки управления в процессе реализации боевых действий пожарных подразделений и при пожарно-тактических учениях.

## **5.5. Методические рекомендации по применению системы**

После прибытия первых пожарных подразделений одной из задач разведки пожара в зданиях является оценка обстановки. При этом руководитель тушения пожара для качественного управления пожарными подразделениями должен располагать информацией о месте пожара в здании и его масштабах [151].

В современных условиях развития теории тактики тушения пожаров разведка пожара проводится тремя способами – наблюдение, изучение документов оперативного планирования и опрос очевидцев. При использовании информации от системы информационной поддержки управления помимо органов чувств человека для сбора информации используются также технические средства системы мониторинга состояния пожара в здании. Поэтому при использовании системы информационной поддержки управления можно говорить о повышении качества ведения разведки за счет наблюдения при помощи информации о мониторинге пожара в здании.

На начальной стадии ликвидации пожара в здании материальный ущерб от пожара минимален. Однако стадия закрытого пожара характеризуется отсутствием внешних признаков горения и поэтому руководитель тушения пожара находится в условиях ограничения информации (видения) для принятия обоснованных управленческих решений.

Информация от системы поддержки управления поступает к руководителю тушения пожара с использованием беспроводных способов, поэтому ее можно использовать как на месте пожара, так и в пути следования.

### **5.5.1. Способы применения системы поддержки управления**

На основании задач мониторинга и прогнозирования динамики пожара с использованием средств мониторинга, входящих в систему пожарной сигнализации, автоматического пожаротушения, структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений и возможностью ви-

зуально интерпретировать данные при управлении действиями по тушению пожара, разработана система поддержки управления. Система включает в себя совокупность взаимодействия потребителей результатов мониторинга пожаров, технических средств мониторинга и информационных потоков между ними. Получаемая посредством мониторинга информация структурирована по уровням, задачам, функциям управления для повышения качества информационного обеспечения должностных лиц служб экстренного реагирования города. В общем случае применение системы поддержки управления нуждается в программно-технической реализации, однако существуют типовые структуры для построения последних.

Система поддержки управления представляет собой программно-аппаратный комплекс, включающий в себя три компонента:

*первая:* информационная компонента – средства мониторинга пожара в здании, пожарные извещатели проводных и/или беспроводных систем;

*вторая:* аналитическая компонента – алгоритмы многокритериальной обработки результатов мониторинга, построенные на основе динамической модели дистанционного мониторинга состояния пожара в здании;

*третья:* визуальная компонента – система отображения результатов мониторинга – электронные варианты документов предварительного планирования действий по тушению пожаров в зданиях [186, 190].

Результат работы системы заключается в извещении руководителя тушения пожара и других должностных лиц, входящих в систему управления действиями по тушению пожара, о месте расположения очага пожара в здании с точностью до зоны контроля одним адресным пожарным извещателем.

Информация, получаемая от системы, является дополнительной информацией к результатам разведки места пожара. Руководитель тушения пожара вправе подвергнуть сомнению результаты работы системы и проводить разведку места пожара, не опираясь на результаты мониторинга.

Разработаны способы извещения должностных лиц о месте расположения очага пожара в здании, которые включают в себя следующие действия диспетчера гарнизона, руководителя тушения пожара и обслуживающего персонала объекта:

– для систем мониторинга, оснащенных беспроводными дистанционными средствами мониторинга, информация централизованно поступает на пульт пожарно-спасательной части. Результаты мониторинга доступны диспетчеру пожарно-спасательного гарнизона и при наличии технической возможности доводятся диспетчером до начальника караула (в пути следования к месту вызова или на месте вызова);

– для систем мониторинга, отображающих информацию на пульт обслуживающего персонала объекта, доводится обслуживающим персоналом до диспетчера пожарно-спасательного гарнизона по телефонной, либо мобильной связи и далее от диспетчера поступает начальнику караула (в пути следования к месту вызова);

– для систем мониторинга с функцией дублирования результатов мониторинга на электронный вариант документа планирования информация доступна непосредственно начальнику караула (в пути следования к месту вызова) и далее от начальника караула доводится до диспетчера пожарно-спасательного гарнизона.

Аудиальное воспроизведение информации о месте расположения очага пожара в здании сводится к наименованию номера этажа и номера помещения, в котором зафиксирован факт возникновения пожара.

Визуальное отображение информации о месте расположения очага пожара производится посредством изменения цветовой (световой) палитры зоны контроля на электронном плане этажа здания.

### **5.5.2. Технология применения системы при тушении пожара в здании**

В настоящее время при пожарах в зданиях реализуется следующая ситуация: система пожарной сигнализации (система мониторинга) обнаруживает пожар, передает сигнал о пожаре системе оповещения и управления эвакуацией лю-

дей в здании и в пожарную часть. После этого осуществляется высылка сил и средств пожарных подразделений из места их постоянной дислокации – пожарно-спасательной части. По прибытии сил и средств руководитель тушения пожара, используя органы чувств, оценивает обстановку и принимает решение о введении в здание звеньев газодымозащитной службы пожарных подразделений. Во многих практических случаях руководитель тушения пожара самостоятельно возглавляет звено газодымозащитной службы, то есть является участником звена, что во многом определяется необходимостью сбора информации о динамике пожара. В этом случае координация и управление звеном газодымозащитной службы осуществляется постовым на посту безопасности. Обмен информацией между звеном газодымозащитной службы и руководителем тушения пожара осуществляется с помощью радиостанций.

Предлагаемая схема обмена информацией с использованием системы поддержки управления следующая: информация от системы мониторинга поступает в систему поддержки управления и визуализируется для руководителя тушения пожара, представляемая для удобства восприятия как электронный документ предварительного планирования действий по тушению пожаров. Для руководителя тушения пожара на электронном документе визуализируется помещение очага пожара и допустимые маршруты продвижения звена газодымозащитной службы. Руководитель тушения пожара ставит задачу звену и приступает к реализации действий по ликвидации пожара.

Для возможности разработки и использования системы поддержки управления должны выполняться следующие необходимые условия:

- здание в соответствии с существующей нормативно-правовой базой в области обеспечения пожарной безопасности должно быть оборудовано адресными системами обнаружения пожара;
- в соответствии с расписанием выезда пожарных подразделений для этого здания должны быть разработаны электронные документы планирования действий по тушению пожаров.

### 5.5.3. Технология применения системы на пожарно-тактических учениях

Для отработки вопросов проведения разведки места пожара на пожарно-тактических учениях и занятиях предлагаются два варианта использования результатов мониторинга.

Первый вариант сводится к извещению руководителя тушения пожара и его посредников о предполагаемом месте расположения очага пожара с помощью аудиальных сообщений от руководителя проведения занятий (учений).

Второй вариант сводится к визуализации работы мониторинговой системы на электронном плане этажа здания. С целью реализации визуального извещения руководителя тушения пожара на занятии необходимо использовать ЭВМ для информирования о месте расположения очага пожара.

Для имитации работы системы в программном средстве необходимо использовать динамическую модель мониторинга. Динамическая модель иллюстрирует изменение состояний в зонах контроля средств мониторинга – пожарных извещателей. Модель должна учитывать геометрию зон контроля пожарных извещателей, динамику параметра контролируемой среды (являющегося побудителем изменения состояния в зонах контроля) и вид горючей нагрузки в защищаемом системой помещении.

При использовании в системе мониторинга нескольких параметров в качестве инициализации изменения состояний в зонах контроля необходимо рассматривать каждый параметр в отдельности.

Специфика тушения пожара на начальных этапах развития пожара в зданиях определяет ситуацию, при которой утверждать о повышении качества информационного обеспечения руководителя тушения пожара возможно путем оценки времени на реализацию действий по тушению пожаров в зданиях. Поэтому необходимо рассматривать критерий эффективности использования информации от системы поддержки управления, выражающийся в снижении временных затрат на реализацию движения к очагу пожара в здании и потенциальным увеличением времени на реализацию действий по тушению пожара внутри здания.



## Выводы по главе 5

В результате исследования, проведенного в данной главе диссертации, для практической реализации разработанных многокритериальных моделей, методов поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании получены следующие основные выводы:

1. Предложена практическая реализация многокритериальных моделей и методов поддержки принятия решений на основе мониторинга динамики пожара в виде системы поддержки управления. Специфика взаимодействия процедур поддержки управления с системами мониторинга пожара определила реализацию системы поддержки управления в виде программно-аппаратного комплекса.

2. Разработаны структура системы поддержки управления на основе мониторинга динамики пожара в здании. Структура системы построена по иерархическому принципу и включает в себя подсистему многопараметрического мониторинга и подсистему многокритериального анализа и синтеза вариантов управленческих решений.

3. Разработана информационная подсистема мониторинга и моделирования динамики пожара в здании для формирования вариантов управленческих решений и их векторных оценок. Подсистема разработана на основе многокритериальных моделей и методов мониторинга и моделирования динамики пожара в здании.

4. Разработана подсистема многокритериального анализа вариантов управленческих решений в виде программного обеспечения, позволяющего решать задачи анализа вариантов решений и реализует в себе разработанный метод поддержки принятия решений на основе мониторинга динамики пожара в здании.

5. Разработана компьютерная модель системы поддержки принятия решений, где в едином комплексе увязаны модели действий пожарных подразделений, модели мониторинга динамики пожара и методы поддержки принятия решений.

6. Разработаны рекомендации по применению системы поддержки управления при тушении пожаров в зданиях и проведении пожарно-тактических учений.

## ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ

Основной целью создания автоматизированной системы поддержки управления пожарами подразделениями при тушении пожаров в зданиях является снижение социально-экономических потерь от пожаров и предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Однако, несмотря на безусловный потенциальный эффект от внедрения системы в практику пожаротушения, все же стоит отметить, что показатели, характеризующие социально-экономические потери от пожаров, носят прогнозный, вероятностный характер. Поэтому рассматривая систему поддержки управления как мероприятие, реализуемое в общей концепции активной противопожарной защиты зданий, необходимо произвести комплексную оценку эффективности ее внедрения в практику пожаротушения.

В настоящее время методы комплексной оценки автоматизированных систем поддержки управления не разработаны, так как отсутствуют критерии, позволяющие оценить эффективность внедрения подобных систем в практику борьбы с пожарами. В общем случае система поддержки управления представляет собой комплекс, состоящий из средств и систем мониторинга динамики пожара в здании, а также специального программного обеспечения, реализующего методы многокритериальной оптимизации принятия управленческих решений. В качестве средств мониторинга в системе поддержки управления возможно использование информационных компонент установок автоматической пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения. Поэтому экономическую целесообразность и эффективность внедрения информационной системы необходимо рассматривать в совокупности с автоматическими системами обнаружения и тушения пожаров, для которых методы экономической оценки разработаны и внедрены на законодательном уровне.

Таким образом, в главе раскрыты особенности и результаты экспериментального исследования эффективности системы поддержки управления, на основе

которых разработаны соответствующие количественные критерии, а также модифицированы общеизвестные методы оценки пожарной опасности и экономического обоснования внедрения мероприятий активной противопожарной защиты зданий.

### **6.1. Общие положения оценки эффективности**

Любая информационно-аналитическая система создается в целях повышения эффективности деятельности субъекта управления, и как следствие повышение результативности функционирования объекта управления. Однако, помимо управленческой эффективности, необходимо рассматривать и экономическую, так как зачастую дороговизна применения информационной системы сводит на нет экономический эффект от ее практического применения. Окупаемость системы наступает через десятилетия ее использования, что в век информационных технологий недопустимо, так как в последнее время информационные парадигмы интенсивно сменяют друг друга за интервалы времени, не превышающие десятилетия. Тогда под экономической эффективностью применения информационной системы будем понимать отношение экономического эффекта от ее практического использования к капитальным, эксплуатационным затратам, связанным с ее разработкой и практическим использованием.

Таким образом, при комплексной оценке информационной системы ее эффективность будет оцениваться с использованием количественных критериев. В первом приближении можно предположить, что критерии эффективности могут быть классифицированы на внутренние (прямые), непосредственно применимые лишь для данного вида систем и внешние (косвенные), рассматривающие системы в новом качестве, как мероприятие активной противопожарной защиты. Прямые критерии создаются по функциональным возможностям системы и эффекту от ее практического применения, носят уникальный характер. В свою очередь косвенные критерии являются составляющими общеизвестных методов и рассматривают эффективность системы в комплексе с другими известными мероприятиями.

Поэтому оценку эффективности необходимо проводить на микроуровне, раскрывая при этом эффект системы по назначению и макроуровне в комплексе общей противопожарной защиты зданий и социально-экономических систем – территорий на которых расположены здания.

Рассматривая эффективность информационной системы поддержки управления в общей методологической составляющей теории эффективности, необходимо рассматривать абсолютные критерии эффективности и их относительные аналоги. Оцениваемый эффект от внедрения информационной системы не всегда просматривается только по анализу абсолютных значений количественных критериев, но после приведения их к относительной или интервальной шкале становится очевидной вся совокупная польза от внедрения системы, что существенно влияет на процесс принятия решений при постановке системы на вооружение.

Относительная оценка эффективности информационной системы, как правило, оценивается величиной ее влияния на управляемую среду в процентах на эффективность макроуровня в совокупности с величинами влияния других систем.

Абсолютная оценка эффективности используется для обоснования применения информационной системы, а также для принятия решений о целесообразности ее проектирования, разработки и внедрения в практику борьбы с пожарами.

Следует учитывать, что абсолютная и относительная оценка эффективности информационной системы требуется для рационального выбора варианта системы противопожарной защиты зданий из возможных.

При оценке эффективности информационной системы будем исходить из основных положений и методологических основ теории эффективности. Тогда под «эффективностью по назначению» будем понимать эффект от внедрения системы поддержки управления в процесс реализации действий по тушению пожара в здании (микроуровень эффективности), для оценки которого предложены новые количественные критерии эффективности и методика их расчета. Тогда косвенная эффективность применения системы (макроуровень эффективности) реализуем путем учета прямых количественных критериев в косвенных критериях эффек-

тивности, реализованных в иерархических процедурах оценки эффективности противопожарных мероприятий общеизвестных и общепринятых методов.

При тушении пожаров в зданиях руководитель тушения пожара находится в условиях информационного кризиса, связанного, с одной стороны, с отсутствием объективной информации для принятия управленческих решений, что приводит к возможности утверждать об эффективности принятого решения только с определенной долей вероятности; с другой стороны, источники объективной информации определяют ее избыточность, снижающей оперативность принятия решений, что при тушении пожара является одним из основных условий, препятствующим успеху пожаротушения, поэтому использование объективной информации возможно лишь в виде системы информационной поддержки управления (СИПУ).

Внедрение СИПУ должно быть целесообразно и эффективно. Для оценки целесообразности использования СИПУ необходимо убедиться, что отсутствие данного инструментария определит низкую степень вероятности принятия верного решения за ограниченное время – вероятность обнаружения очага пожара группами разведки в составе одного или нескольких звеньев газодымозащитной службы пожарных подразделений. Оценка эффективности внедрения СИПУ должна обеспечить существенное повышение тактических возможностей звеньев газодымозащитной службы (ГДЗС) в группе разведки.

В современных условиях развития теории тактики тушения пожаров разведка пожара проводится тремя способами – наблюдение, изучение документов оперативного планирования и опрос очевидцев. При использовании информации от систем информационной поддержки управления помимо органов чувств человека для сбора информации применяются также технические средства системы мониторинга состояния пожара в здании. Поэтому при использовании информации от СИПУ можно говорить о повышении качества ведения разведки за счет наблюдения при помощи информации от систем мониторинга и прогнозирования динамики пожара в здании.

Информация от СИПУ поступает к руководителю тушения пожара на основе беспроводных каналов связи, поэтому ее можно использовать как на месте пожара, так и в пути следования.

Таким образом, оценить эффективность системы поддержки управления по назначению – это значит сравнить два варианта информационного наполнения процесса принятия решений: классический с использованием только органов чувств человека и новаторский с использованием информации от систем мониторинга и прогнозирования динамики пожара в здании.

## **6.2. Исследование эффективности системы поддержки управления**

Сравнение способов информационного наполнения процесса принятия управленческих решений возможно лишь при проведении экспериментальных пожарно-тактических учений. Стоит отметить, что при проведении учений использовалась реальная система поддержки управления на основе адресной беспроводной системы пожарной сигнализации и пожаротушения «Гарант-Р».

### **6.2.1. Условия экспериментального исследования**

Невозможно создать условия, приближенные к действиям на реальных пожарах, поэтому оценка эффективности применения СИПУ производилась способом решения пожарно-тактической задачи на местности. Рассматривалась пожарно-тактическая задача ликвидации условного пожара в секции 4-этажного здания на территории учебного центра ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия МЧС России» звену ГДЗС в составе 3 газодымозащитников из числа преподавателей кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ, оснащенных дыхательными аппаратами со временем защитного действия 40 минут. При проведении мероприятия была поставлена тактическая задача: обнаружить очаг пожара в 4-этажном здании общежития. Имитация очага пожара осуществлялась с помощью группового фонаря (световой поток,

ANSI не менее 600 лм), для имитации задымленности использовалась дымовая машина, дающая безопасный дым. При разработке сценария для пожарно-тактической задачи предполагалось, что размеры пожара не превышают максимальной площади помещения в 20 м<sup>2</sup>. Прокладка рукавной рабочей линии размером в 3 рукава  $d$  51 мм осуществлялась от напорного патрубка насоса, линия находилась под давлением 4,0–4,5 Мпа. Способ прокладки линии – ползучая, прокладываемая по лестничной клетке, и горизонтальная прокладка на прямых участках. Условные очаги пожара располагались на 2 и 4 этажах здания, имеющих однотипную планировку. На каждом этаже размещались по 12 позиций условного очага пожара, задачу решали поочередно [151, 199].

Способ решения пожарно-тактической задачи (ПТЗ) №1 – поиск очага пожара с использованием органа чувств – зрения.

Способ решения ПТЗ №2 – очаг пожара и наикратчайший маршрут были указаны на электронной планировке здания, отображаемой на планшетном компьютере, в системе, имитирующей работу СИПУ.

Общее количество подходов – 24, на 5 звеньев – 120 подходов.

В результате сравнивалось время решения задачи способом 1 и время решения задачи способом 2. Разность данных времен представляет собой выигрыш во времени от использования СИПУ при поиске очага пожара в здании.

Решение предложенной задачи носит вероятностный характер, так как очевидно, что при большом количестве наблюдений звену «наугад» удавалось осуществить выбор наикратчайшего пути и звено обнаруживало очаг пожара за минимальное время. Например, возникали случаи, когда время решения задачи способом 1 имело меньшее значение, чем по способу 2, но не более 1 случая на 10 подходов, такой исход считали ошибкой наблюдения. Возникновение ошибки определяется множеством факторов, одним из которых можно считать, различную физическую подготовку газодымозащитников звеньев ГДЗС. Поэтому для анализа результатов выбирались максимальные значения «выигрыша» во времени, которые были получены в результате решения пожарно-тактической задачи. Анализ динамики максимального значения при выигрыше во времени показал,

что он близок к линейному росту в зависимости от величины расстояния от входа на этаж до расположения очага пожара, а также номера этажа расположения условного пожара [155].

Таким образом, при решении ПТЗ, включающей применение СИПУ при поиске условного очага пожара в здании получены результаты выигрыша во времени при разворачивании сил и средств. Анализ полученных результатов наблюдений показал, что выигрыш во времени можно считать непрерывной случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения. Поэтому для дальнейшего анализа эффективности применения СИПУ представляется возможным использовать среднее арифметическое значение выигрыша во времени, полученное на основе результатов наблюдений.

Для оценки целесообразности и эффективности применения новых способов ликвидации пожаров в практике пожаротушения используются показательные пожарно-тактические учения. В рамках учений решается одна или несколько пожарно-тактических задач, условия которых ориентированы на новые возможности оцениваемых способов пожаротушения. Назначение СИПУ сводится к повышению степени информирования звена ГДЗС о расположении «места работы» в здании (люди и очаг пожара) в целях осуществления выбора эффективных маршрутов движения пожарных к «месту работы» и, как следствие, повышения времени, которое может потратить звено ГДЗС на реализацию работы (спасание людей или ликвидация очага пожара). Результаты статистической обработки результатов исследования представлены в приложении 3.

### **6.2.2. Количественные значения показателей эффективности**

#### *Локальный критерий для оценки эффективности системы*

Анализ результатов решения пожарно-тактической задачи показал, что выигрыш во времени от использования системы информационной поддержки управления, используя различные способы разворачивания рукавных систем при поиске



условного очага пожара в здании с необходимой точностью, может быть представлен зависимостью [180, 199]:

$$\Delta = \alpha_n \cdot S \cdot N^n \cdot \exp(\beta \cdot N), \quad (6.1)$$

где  $\Delta$  – локальный выигрыш во времени от применения системы информационной поддержки управления, с;  $N$  – номер этажа здания;  $\alpha_n$  и  $\beta$  – константы модели ( $\alpha_1 = 0,04$ ;  $\alpha_2 = 0,012$ ;  $\beta = -0,4$ );  $S$  – общая площадь здания, м<sup>2</sup>;  $n = 1$  – при прокладке рукавных линий по маршам лестничной клетки;  $n = 2$  – при подъеме рукавной линии с помощью спасательной веревки или опускании рукавной линии вниз снаружи здания.

При этом максимальное значение локального выигрыша в эффективности, то есть выигрыша во времени, получаемого внутри одного из этажей здания, с учетом корректировки результатов наблюдений и их экстраполяции по формуле (6.1) не превышает 180 секунд.

На рисунке 6.1 показана динамика локального выигрыша во времени при использовании СИПУ в ходе реализации действий пожарно-спасательных подразделений в зданиях строительной площадью  $S = 4\,000$  м<sup>2</sup>.

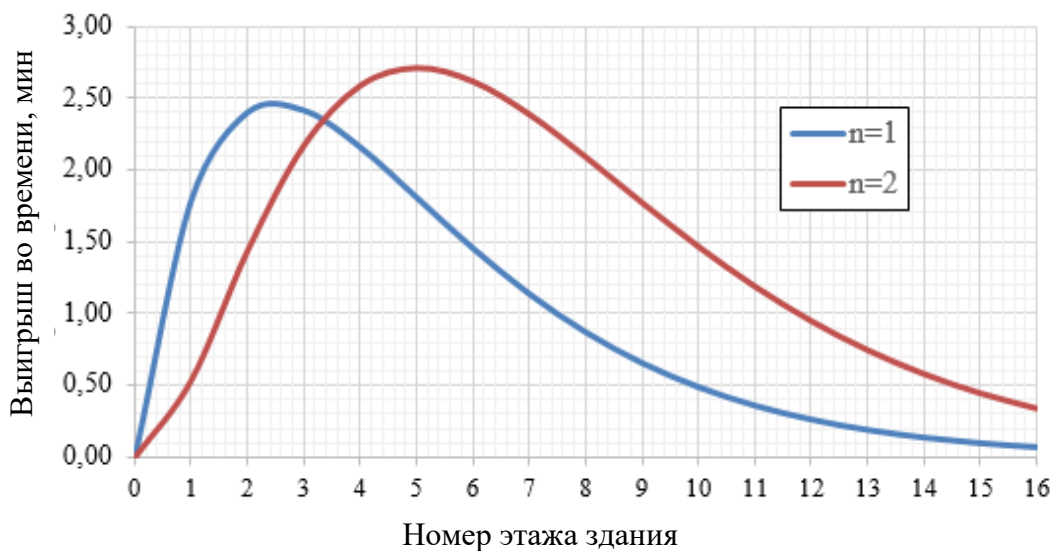


Рисунок 6.1 – Локальный выигрыш во времени от применения системы

Результаты расчета локального критерия эффективности системы информационной поддержки управления представлены в таблицах 6.1. и 6.2.

Таблица 6.1 – Локальный критерий эффективности СИПУ ( $n = 1$ )

N	Площадь поиска очага пожара, м <sup>2</sup>									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
1	0,45	0,89	1,34	1,79	2,23	2,68	3,00	3,00	3,00	3,00
2	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
3	0,60	1,20	1,81	2,41	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
4	0,54	1,08	1,62	2,15	2,69	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
5	0,45	0,90	1,35	1,80	2,26	2,71	3,00	3,00	3,00	3,00
6	0,36	0,73	1,09	1,45	1,81	2,18	2,54	2,90	3,00	3,00
7	0,28	0,57	0,85	1,14	1,42	1,70	1,99	2,27	2,55	2,84
8	0,22	0,43	0,65	0,87	1,09	1,30	1,52	1,74	1,96	2,17
9	0,16	0,33	0,49	0,66	0,82	0,98	1,15	1,31	1,48	1,64
10	0,12	0,24	0,37	0,49	0,61	0,73	0,85	0,98	1,10	1,22
11	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,90
12	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,40	0,46	0,53	0,59	0,66
13	0,05	0,10	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33	0,38	0,43	0,48
14	0,03	0,07	0,10	0,14	0,17	0,21	0,24	0,28	0,31	0,35
15	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20	0,22	0,25
16	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,11	0,12	0,14	0,16	0,18

Таблица 6.2 – Локальный критерий эффективности СИПУ ( $n = 2$ )

N	Площадь поиска очага пожара, м <sup>2</sup>									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
1	0,13	0,27	0,40	0,54	0,67	0,80	0,94	1,07	1,21	1,34
2	0,36	0,72	1,08	1,44	1,80	2,16	2,52	2,88	3,00	3,00
3	0,54	1,08	1,63	2,17	2,71	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
4	0,65	1,29	1,94	2,58	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
5	0,68	1,35	2,03	2,71	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
6	0,65	1,31	1,96	2,61	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
7	0,60	1,19	1,79	2,38	2,98	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
8	0,52	1,04	1,57	2,09	2,61	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
9	0,44	0,89	1,33	1,77	2,21	2,66	3,00	3,00	3,00	3,00
10	0,37	0,73	1,10	1,47	1,83	2,20	2,56	2,93	3,00	3,00
11	0,30	0,59	0,89	1,19	1,49	1,78	2,08	2,38	2,67	2,97
12	0,24	0,47	0,71	0,95	1,19	1,42	1,66	1,90	2,13	2,37
13	0,19	0,37	0,56	0,75	0,93	1,12	1,31	1,49	1,68	1,86
14	0,14	0,29	0,43	0,58	0,72	0,87	1,01	1,16	1,30	1,45
15	0,11	0,22	0,33	0,45	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00	1,12
16	0,09	0,17	0,26	0,34	0,43	0,51	0,60	0,68	0,77	0,85

*Интегральный критерий для оценки эффективности системы*

Анализируя данные, представленные на рисунке 6.1, можно сделать вывод о том, что максимальное значение выигрыша во времени наблюдается при развертывании рукавных линий по маршам лестничной клетки на 2–3 этаже здания при развертывании путем подъема или опускания рукавной линии на этажи здания – на 5–6 этаже. Объяснить полученный результат можно тем, что при выбранных способах прокладки рукавных линий выигрыш во времени при использовании системы информационной поддержки управления компенсируется вследствие увеличения времени, необходимого на реализацию способа прокладки рукавных линий [180, 199].

С другой стороны, при анализе эффективности применения МСПУ целесообразно учитывать, что пожар может произойти на любом этаже здания, если отсутствует информация, позволяющая утверждать противоположное. Поэтому необходимо иметь возможность определять средний интегральный выигрыш во времени от применения СИПУ, то есть выигрыш во времени для общей совокупности этажей здания, отнесенный к общей этажности здания.

Для этого необходимо проинтегрировать выражение (6.1):

$$\Delta_m = \frac{\alpha_n \cdot S}{k} \cdot \int_{N=0}^{N=k} N^n \cdot \exp(\beta \cdot N) dN, \quad (6.2)$$

где  $\Delta_m$  – средний интегральный выигрыш во времени при применении МСПУ;  $k$  – этажность здания.

Стоит отметить, что представленный интеграл является неопределенным интегралом вида:

$$\int x^n \exp(cx) dx = \frac{1}{c} x^n \exp(cx) - \frac{n}{c} \int x^{n-1} \exp(cx) dx. \quad (6.3)$$

Используя выражение (6.2) для случаев, когда  $n=1$  и  $n=2$  получаем общую формулу для определения интеграла (6.3):

$$\frac{\alpha_n \cdot S}{k} \int_{n=1;2} N^n \cdot \exp(\beta \cdot N) dN = \exp(\beta N) \cdot \left[ \frac{N^n}{\beta} - \frac{n(n-1)N^{n-1} + (2-n)}{\beta^2} + \frac{n(n-1)}{\beta^3} \right]. \quad (6.4)$$

Рассматривая пределы интегрирования для  $N_1 = 0$  до  $N_2 = k$ , получим общее решение для определения среднего интегрального выигрыша во времени:

$$\Delta_m = \frac{\alpha S}{k} \left[ \left( \frac{k^n}{\beta} - \frac{n(n-1)k^{n-1}}{\beta^2} \right) \exp(\beta k) - \left( \frac{n-2}{\beta^2} - \frac{n(n-1)}{\beta^3} \right) (1 - \exp(\beta k)) \right]. \quad (6.5)$$

Выполним для выражения (6.5) элементарные математические преобразования, за счет чего сформируем зависимости частных решений для расчета среднего интегрального выигрыша в эффективности:

для  $n = 1$ :

$$\Delta_m^{n=1} = \frac{\alpha_1 S}{\beta^2 k} [(\beta k - 1) \exp(\beta k) + 1], \quad (6.6)$$

для  $n = 2$ :

$$\Delta_m^{n=2} = \frac{\alpha_2 S}{\beta^3 k} [((\beta k - 1)^2 + 1) \exp(\beta k) - 2]. \quad (6.7)$$

На рисунке 6.2 показана динамика среднего интегрального выигрыша в эффективности применения МСПУ для зданий различной этажности при общей площади здания  $S = 6000 \text{ м}^2$ .

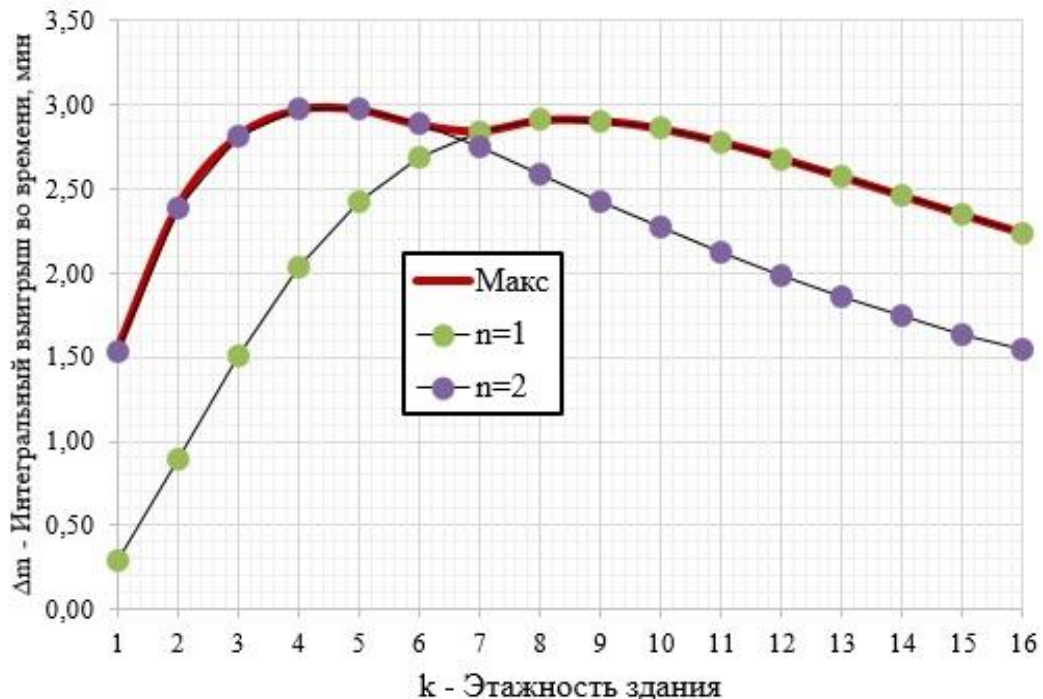


Рисунок 6.2 – Интегральный выигрыш в эффективности применения СИПУ

Результаты выигрыша во времени при использовании информации от системы информационной поддержки управления представлены на рисунках 6.3, 6.4 и в таблицах 6.3, 6.4.

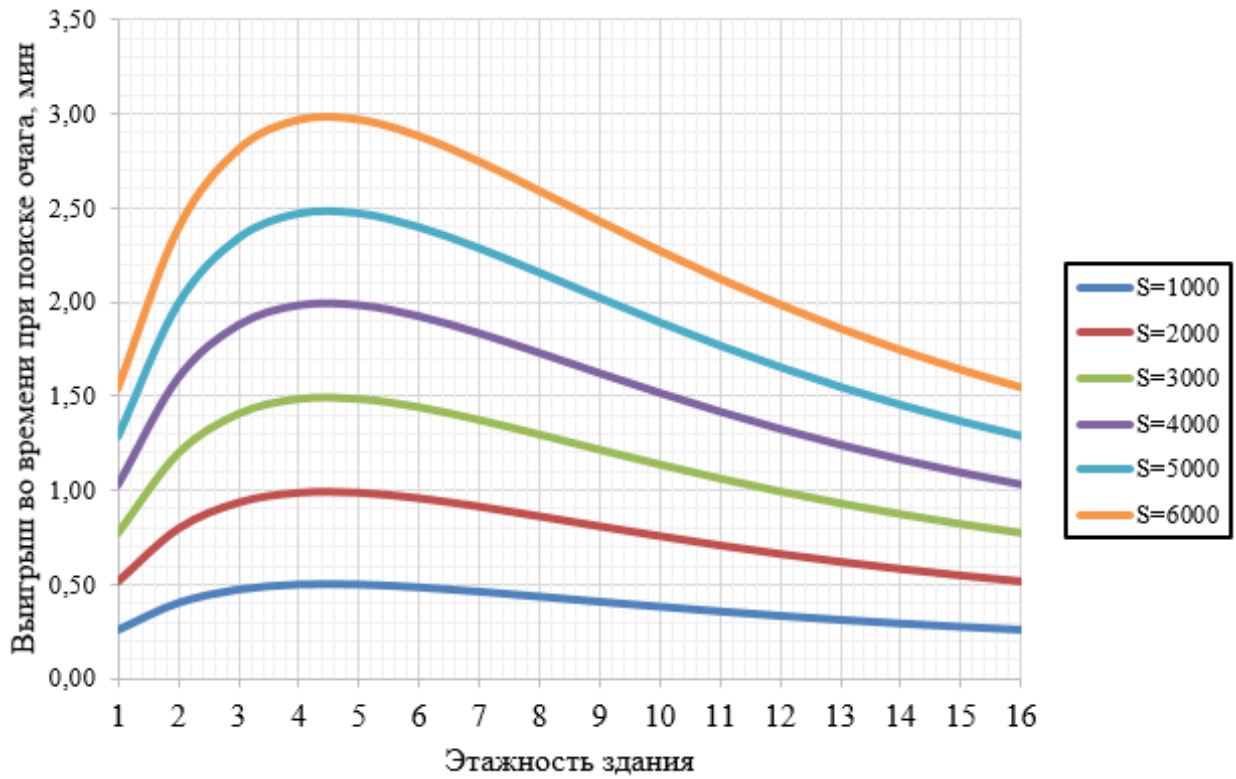


Рисунок 6.3 – Выигрыш во времени при поиске очага пожара ( $n = 1$ )

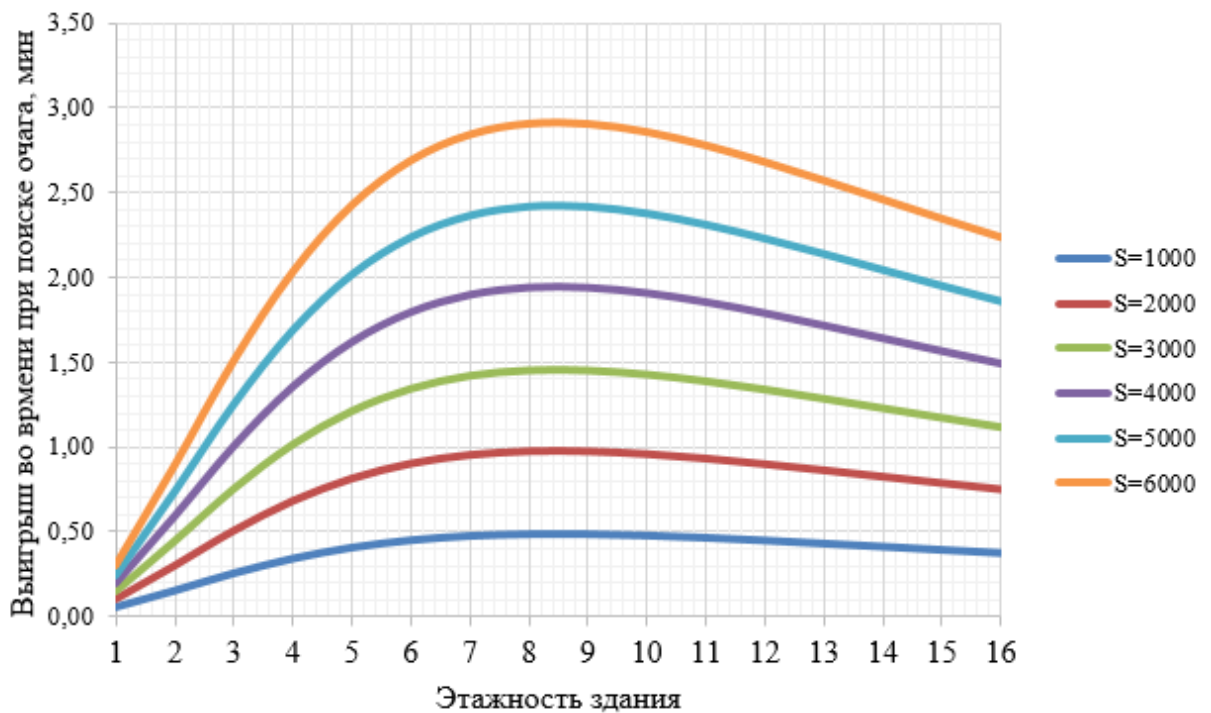


Рисунок 6.4 – Выигрыш во времени при поиске очага пожара ( $n = 2$ )

Таблица 6.3 – Интегральный критерий эффективности СИПУ ( $n = 1$ )

$k$	Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
1	0,26	0,51	0,77	1,03	1,28	1,54	1,80	2,05	2,31	2,56
2	0,40	0,80	1,20	1,59	1,99	2,39	2,79	3,19	3,59	3,98
3	0,47	0,94	1,41	1,87	2,34	2,81	3,28	3,75	4,22	4,69
4	0,49	0,99	1,48	1,98	2,47	2,97	3,46	3,96	4,45	4,95
5	0,49	0,99	1,48	1,98	2,47	2,97	3,46	3,96	4,45	4,95
6	0,48	0,96	1,44	1,92	2,40	2,88	3,36	3,84	4,32	4,80
7	0,46	0,92	1,37	1,83	2,29	2,75	3,20	3,66	4,12	4,58
8	0,43	0,86	1,29	1,73	2,16	2,59	3,02	3,45	3,88	4,32
9	0,40	0,81	1,21	1,62	2,02	2,43	2,83	3,24	3,64	4,05
10	0,38	0,76	1,14	1,51	1,89	2,27	2,65	3,03	3,41	3,79
11	0,35	0,71	1,06	1,41	1,77	2,12	2,48	2,83	3,18	3,54
12	0,33	0,66	0,99	1,32	1,65	1,98	2,31	2,65	2,98	3,31
13	0,31	0,62	0,93	1,24	1,55	1,86	2,17	2,48	2,79	3,10
14	0,29	0,58	0,87	1,16	1,45	1,74	2,03	2,32	2,61	2,90
15	0,27	0,55	0,82	1,09	1,36	1,64	1,91	2,18	2,46	2,73
16	0,26	0,51	0,77	1,03	1,29	1,54	1,80	2,06	2,31	2,57

Таблица 6.4 – Интегральный критерий эффективности СИПУ ( $n = 2$ )

$k$	Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
1	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
2	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,19	1,33	1,48
3	0,25	0,50	0,75	1,00	1,26	1,51	1,76	2,01	2,26	2,51
4	0,34	0,68	1,02	1,35	1,69	2,03	2,37	2,71	3,05	3,39
5	0,40	0,81	1,21	1,62	2,02	2,42	2,83	3,23	3,64	4,04
6	0,45	0,90	1,34	1,79	2,24	2,69	3,14	3,59	4,03	4,48
7	0,47	0,95	1,42	1,89	2,37	2,84	3,32	3,79	4,26	4,74
8	0,48	0,97	1,45	1,94	2,42	2,91	3,39	3,88	4,36	4,84
9	0,48	0,97	1,45	1,94	2,42	2,91	3,39	3,87	4,36	4,84
10	0,48	0,95	1,43	1,90	2,38	2,86	3,33	3,81	4,29	4,76
11	0,46	0,93	1,39	1,85	2,31	2,78	3,24	3,70	4,17	4,63
12	0,45	0,89	1,34	1,79	2,23	2,68	3,13	3,57	4,02	4,47
13	0,43	0,86	1,29	1,71	2,14	2,57	3,00	3,43	3,86	4,28
14	0,41	0,82	1,23	1,64	2,05	2,46	2,87	3,28	3,69	4,10
15	0,39	0,78	1,17	1,56	1,95	2,35	2,74	3,13	3,52	3,91
16	0,37	0,75	1,12	1,49	1,86	2,24	2,61	2,98	3,35	3,73

При реализации указанных способов прокладки рукавных линий необходимо рассматривать максимальные значения выигрыша из таблиц 6.3. и 6.4 – таблица 6.5.

Таблица 6.5 – Интегральный критерий эффективности СИПУ ( $n = 1, n = 2$ )

$k$	Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
1	0,26	0,51	0,77	1,03	1,28	1,54	1,8	2,05	2,31	2,56
2	0,40	0,8	1,20	1,59	1,99	2,39	2,79	3,19	3,59	3,98
3	0,47	0,94	1,41	1,87	2,34	2,81	3,28	3,75	4,22	4,69
4	0,49	0,99	1,48	1,98	2,47	2,97	3,46	3,96	4,45	4,95
5	0,49	0,99	1,48	1,98	2,47	2,97	3,46	3,96	4,45	4,95
6	0,48	0,96	1,44	1,92	2,4	2,88	3,36	3,84	4,32	4,80
7	0,47	0,95	1,42	1,89	2,37	2,84	3,32	3,79	4,26	4,74
8	0,48	0,97	1,45	1,94	2,42	2,91	3,39	3,88	4,36	4,84
9	0,48	0,97	1,45	1,94	2,42	2,91	3,39	3,87	4,36	4,84
10	0,48	0,95	1,43	1,9	2,38	2,86	3,33	3,81	4,29	4,76
11	0,46	0,93	1,39	1,85	2,31	2,78	3,24	3,7	4,17	4,63
12	0,45	0,89	1,34	1,79	2,23	2,68	3,13	3,57	4,02	4,47
13	0,43	0,86	1,29	1,71	2,14	2,57	3,00	3,43	3,86	4,28
14	0,41	0,82	1,23	1,64	2,05	2,46	2,87	3,28	3,69	4,10
15	0,39	0,78	1,17	1,56	1,95	2,35	2,74	3,13	3,52	3,91
16	0,37	0,75	1,12	1,49	1,86	2,24	2,61	2,98	3,35	3,73
Ср.зн	0,44	0,88	1,32	1,76	2,19	2,64	3,07	3,51	3,95	4,39

Распределение значений интегрального критерия эффективности ( $n = 1, n = 2$ ) имеют нелинейный характер и представлены на рисунке 6.5.

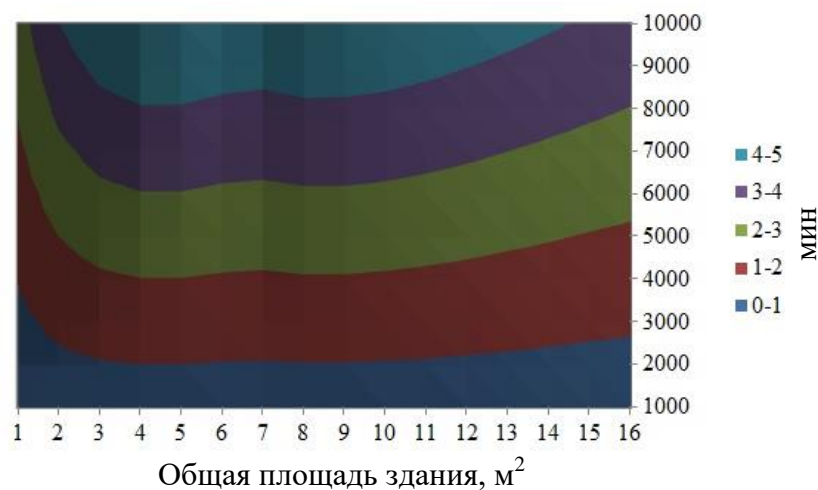


Рисунок 6.5 – Значения интегрального критерия

Однако средние по этажности зданий значения интегрального критерия полностью детерминируются линейной зависимостью, представленной на рисунке 6.6.

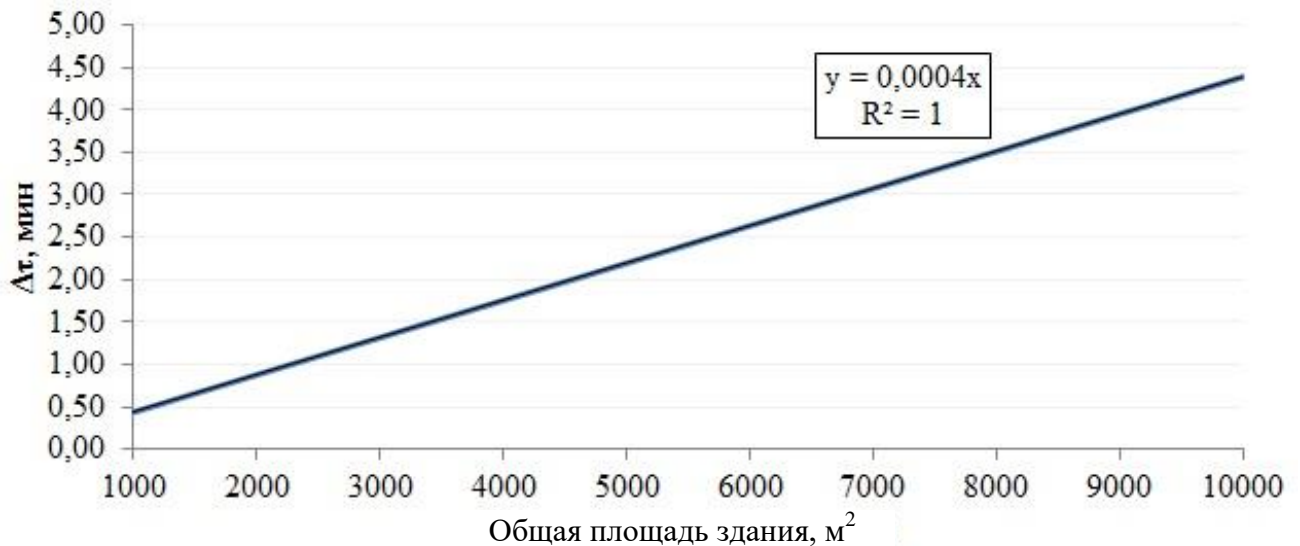


Рисунок 6.6 – Зависимость среднего значения интегрального критерия

При расчете интегрального выигрыша для зданий, предусматривающих возможность прокладки линий любым из анализируемых способов, предлагается в качестве расчетного значения среднего интегрального выигрыша во времени принимать максимальное значение из имеющихся.

### 6.3. Эффективность действий пожарных подразделений

Для количественной оценки эффективности действий пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях с использованием системы информационной поддержки управления необходимо от абсолютных значений критериев эффективности осуществить переход к относительному критерию эффективности, учитывающему специфику (сложность) работ по тушению пожара в здании.

#### 6.3.1. Показатель эффективности действий пожарных подразделений

Введем количественный относительный показатель, измеряемый в процентах – (критерий оценки повышения тактических возможностей звена в процентах), определяемый по формуле [151]:



$$\Delta\% = \frac{\tau_{оч}^* - \tau_{оч}}{\tau_{оч}^*} \cdot 100\% , \quad (6.8)$$

где  $\tau_{оч}^*$  – время работы у очага при использовании МСПУ, мин;  $\tau_{оч}$  – время работы у очага без использования МСПУ, мин.

Время работы у очага при его поиске с использованием органов чувств будет определяться по формуле:

$$\tau_{оч} = \tau_{зд} - (1+k)\tau_{но}, \text{ мин}, \quad (6.9)$$

где  $\tau_{зд}$  – время защитного действия дыхательного аппарата, мин;  $\tau_{но}$  – время на поиск очага, мин;  $k$  – коэффициент, учитывающий условия работы в здании  $k = 1,5$  в нормальных условиях и  $k=2$  при сложных условиях работы.

Время работы у очага пожара при его поиске с использованием СИПУ рассчитываем по формуле:

$$\tau_{оч}^* = \tau_{зд} - (1+k)(\tau_{но} - \Delta\tau), \text{ мин}, \quad (6.10)$$

где  $\tau_{зд}$  – время защитного действия дыхательного аппарата, мин;  $\tau_{но}$  – время на поиск очага, мин;  $\Delta$  – выигрыш во времени, мин.

Обоснование пределов анализа. Принимаем минимальное время на поиск очага  $180 \text{ с} = 3$  минуты. Максимальное время вычислим по формуле:

$$\tau_{но} = \frac{\tau_{зд} - \tau_{омв}}{1+k}, \text{ мин}, \quad (6.11)$$

где  $\tau_{омв}$  – время, необходимое для подачи требуемого количества огнетушащего вещества, мин.

### 6.3.2. Эффективность применения системы поддержки управления

Метод оценки эффективности применения СИПУ в процесс тушения пожара в зданиях на начальных этапах развития пожара предусматривает реализацию трех этапов [180, 199].

*На первом этапе* выдвигается гипотеза о целесообразности применения СИПУ при тушении пожара в здании. Подтверждение гипотезы производится по

критерию целесообразности – вероятности поиска очага пожара в здании без использования информации от СИПУ, определяемой по таблице 6.5.

*На втором этапе* методики определяется средний интегральный выигрыш во времени ( $\Delta_m$ , мин).

Производится анализ возможности пожарному подразделению реализовать рассматриваемые способы прокладки рукавных линий внутри и снаружи здания. Рассматривается три способа прокладки рукавных линий:

- 1 – прокладка рукавных линий по маршам лестничной клетки;
- 2 – подъем рукавной линии с помощью спасательной веревки;
- 3 – спуск рукавной линии с этажа пожара снаружи здания.

Осуществляется сбор необходимых параметров для расчета значений среднего выигрыша во времени, а именно: этажность здания и общая площадь здания.

Производится определение расчетного значения среднего выигрыша во времени с применением информации от СИПУ. Рассматриваются три случая.

*Первый случай* предусматривает возможность прокладки рукавных линий только по маршам лестничной клетки. Тогда расчетное значение среднего интегрального выигрыша во времени осуществляется по таблице 6.3.

*Второй случай* предусматривает возможность прокладки рукавных линий путем подъема рукавной линии с помощью спасательной веревки и/или при спуске рукавной линии с этажа пожара в здании. Тогда для оценки расчетного среднего интегрального выигрыша во времени используется таблица 6.4.

*Третий случай.* Если в здании имеется возможность осуществления прокладки рукавных линий всеми тремя способами, то определение расчетного значения среднего интегрального выигрыша во времени необходимо производить, исходя из следующего условия: если этажность здания не выше 7 этажей, то для оценки среднего интегрального выигрыша во времени необходимо использовать таблицу 6.3. В противном случае (этажность здания более 7 этажей) необходимо использовать таблицу 6.4.

Оценивается истинное значение среднего интегрального выигрыша в эффективности. По результатам наблюдений за эффективностью применения СИПУ

принято максимальное значение среднего интегрального выигрыша во времени (3 мин). Тогда при определении истинного значения необходимо исходить из условия: если расчетное значение не превышает максимального значения (3 мин), то рассчитанное значение принимаем за истинное, в противном случае истинным значением среднего интегрального выигрыша следует считать максимальное значение (3 мин).

На третьем этапе методики определяется количественный критерий повышения тактических возможностей звена ГДЗС в зависимости от условий работы ( $k = 1,5$  нормальные условия видимости;  $k = 2$  условия сильного задымления).

Здесь время на реализацию действий по тушению пожара без использования информации от системы составляет величину, определяемую по формуле (6.26).

Продолжительность тушения пожара с использованием информации от системы информационной поддержки управления определяется по формуле (6.10).

Предложенный критерий определяет фактическую возможность повышения эффективности действий по тушению пожара с применением МСПУ. Расчет значений относительного критерия эффективности тактических возможностей представлен в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Результаты оценки эффективности СИПУ

$\tau_{оч2},$ мин	Время защитного действия, мин	Допустимое время, мин	Общая площадь здания, м <sup>2</sup>							$\tau_{оч1},$ мин
			1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
$k = 1,5$	40	10	16,10	17,20	18,30	19,40	20,48	21,60	22,50	15
			7	15	22	29	37	44	50	
$k = 1,5$	60	15	23,60	24,70	25,80	26,90	27,98	29,10	30,00	22,5
			5	10	15	20	24	29	33	
$k = 1,5$	120	20	71,10	72,20	73,30	74,40	75,48	76,60	77,50	70
			2	3	5	6	8	9	11	
$k = 2,0$	40	10	11,32	12,64	13,96	15,28	16,57	17,92	19,00	10
			13	26	40	53	66	79	90	
	60	15	16,32	17,64	18,96	20,28	21,57	22,92	24,00	15
			9	18	26	35	44	53	60	
	120	20	61,32	62,64	63,96	65,28	66,57	67,92	69,00	60
			2	4	7	9	11	13	15	

На оперативном уровне управления для повышения эффективности действий пожарных подразделений при работах внутри здания наблюдаются значения относительного критерия эффективности от 10 до 50 %. Таким образом, основной задачей системы интеллектуальной поддержки управления является повышение эффективности действий пожарных подразделений при оперативном управлении на месте пожара. Применение системы позволяет существенно улучшить временные показатели реализации действий по тушению пожара, повысить вероятность ликвидации пожара в начальной стадии его развития [151].

#### **6.4. Оценка противопожарной защиты зданий с применением системы**

Для оценки уровня противопожарной защиты зданий с учетом реализованных в его активной системе противопожарной защиты мероприятий используется общеизвестный метод Гретенера [295, 118].

Метод широко используется для оценки эффективности инженерных и научно-практических решений в практику противопожарной защиты зданий. Существуют десятки модификаций данного метода [42, 51, 118, 223, 258, 267, 280, 298, 299]. Однако ни в одной модификации метода не учтены условия информационного обеспечения проведения действий по тушению пожаров. В основном это было связано с отсутствием количественных критериев эффективности применения систем информационного обеспечения. Но с учетом разработанных в диссертации критериев локального и интегрального эффекта от внедрения системы, появилась возможность разработать косвенный критерий эффективности системы информационной поддержки управления – качество информационного обеспечения действий по тушению пожара и внедрить данный критерий в структуру метода оценки уровня пожарной опасности зданий.

### 6.4.1. Структура метода оценки противопожарной защиты зданий

В данном методе основным показателем пожарной опасности здания является численные значения уровня пожароопасности здания ( $Y$ ), которые рассчитываются по формуле [118, 258]:

$$Y = \frac{P}{P_D}, \quad P_D = \frac{O_P}{3}, \quad O_P = P \cdot A, \quad (6.12)$$

где  $P$  – показатель пожароопасности здания;  $P_D$  – допустимый уровень пожароопасности здания;  $O_P$  – риск возникновения пожара в здании;  $3$  – показатель защищенности здания от пожара;  $P$  – потенциальная пожарная опасность здания;  $A$  – функциональная пожарная опасность здания.

Защищенность здания от пожара ( $3$ ) учитывает мероприятия по обеспечению пожарной безопасности, эффективности действий пожарных подразделений и рассчитывается как произведение следующих показателей:

- показатель, отражающий выполнение нормативных требований пожарной безопасности ( $N$ );
- показатель, характеризующий систему противопожарной защиты здания ( $S$ ). Значения данного показателя определяются качеством системы обнаружения пожара, системы пожарной сигнализации, технических и тактических возможностей пожарной охраны; оперативности реагирования пожарных подразделений на возникновение пожара; наличия и технического состояния автоматических установок пожаротушения [118, 258].
- фактор, конструктивного исполнения здания ( $V$ ), зависящий от огнестойкости несущих и ограждающих конструкций, перекрытий здания, а также проемности помещений.

Исходя из анализа структуры метода оценки уровня пожарной опасности здания можно заключить, что повышение качества информационного обеспечения действий по тушению пожара оказывают прямое влияние на технические и тактические возможности пожарных подразделений и, следовательно, на показатель ( $S$ ), характеризующий систему противопожарной защиты здания. Поэтому

для внедрения интегрального критерия эффективности применения системы поддержки управления в метод оценки уровня пожарной опасности здания необходимо осуществить разработку дополнительного показателя  $s$ , учитывающего влияние наличия системы поддержки управления на тактические возможности пожарных подразделений и, следовательно, на защищенность здания от пожара [118, 258].

#### 6.4.2. Результаты оценки эффективности применения системы

Количественный показатель качества информационного обеспечения действий по тушению пожара в здании имеет функциональную зависимость от параметров, характеризующих условия проведения боевых действий в зданиях

$$S = f(F_{зд}, T_{СИЗОД}, n_{ГДЗС}), \quad (6.13)$$

где  $F_{зд}$  – общая строительная площадь здания,  $m^2$ ;  $T_{СИЗОД}$  – тип используемых СИЗОД;  $n_{ГДЗС}$  – количество звеньев ГДЗС.

Задача информационного обеспечения действий пожарных подразделений в основном сводится к мероприятиям по оценке обстановки на пожаре и идентифицирует место проведения работ по тушению пожара в здании. Стоит отметить, что задача идентификации места работы в здании носит вероятностный характер и характеризуется количественным показателем – вероятностью обнаружения очага пожара в здании с использованием звеньев газодымозащитной службы за допустимое время. В свою очередь здесь под допустимым временем обнаружения очага пожара будем понимать допустимую долю времени защитного действия средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения пожарных от воздействия опасных факторов пожара, используемых при тушении пожара.

Вероятность обнаружения очага пожара в здании при использовании звеньев газодымозащитной службы [128], которая определяется по формуле

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{U \cdot \tau}{S_m}\right), \quad (6.14)$$

где  $P$  – вероятность обнаружения очага пожара в здании звеном ГДЗС;  $U$  – производительность звеньев ГДЗС,  $\text{м}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $S_m$  – расчетная площадь поиска,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – допустимый интервал времени для поиска очага пожара, мин.

Производительность звеньев ГДЗС при различных условиях поиска очага пожара в здании определяется по формуле [128]:

$$U = V_{зв}((m-1)d + 2D), \quad (6.15)$$

где  $V_{зв}$  – скорость движения звена ГДЗС в здании,  $\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $m$  – количество звеньев ГДЗС;  $d$  – эффективное расстояние между звеньями ГДЗС, м;  $D$  – ожидаемая дальность обнаружения очага пожара, м.

На основе анализа литературных источников приняты: скорость движения звена ГДЗС в нормальных условиях видимости (видимость более 5 метров) с ручным пожарным стволом и водозаполненной рукавной линией под давлением 40 м.вод.ст. составляет величину  $40 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$  [49]; эффективное расстояние между звеньями ГДЗС принимаем равным  $d = 4 \text{ м}$  [128], ожидаемая дальность обнаружения очага пожара участниками звеньев ГДЗС составляет величину  $D = 5 \text{ м}$  [128]. Тогда производительность групп разведки в составе  $n$  звеньев ГДЗС составит величину: 1 –  $400 \text{ м}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$ ; 2 –  $560 \text{ м}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$ ; 3 –  $720 \text{ м}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Интегральный критерий эффективности применения СИПУ определяется экономией временного ресурса при обнаружении очага пожара, поэтому проведем анализ математических зависимостей (6.14) и (6.15) и перейдем к временным количественным параметрам модели.

Исходя из анализа модели (6.14) можно предположить, что среднее время поиска очага пожара в здании представляет собой отношение расчетной площади поиска к производительности звена ГДЗС при поиске

$$\tau^* = \frac{S_m}{U}, \text{ мин.} \quad (6.16)$$

Тогда вероятность обнаружения очага пожара в здании будет представлять собой следующее соотношение:

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau^*}\right). \quad (6.17)$$

На основе модели (6.17) производится оценка необходимого количества звеньев ГДЗС для эффективной реализации поисковых работ в зданиях при пожаре, а также оценивается тактический потенциал групп разведки пожара в части, касающейся возможности обнаружения человека в задымленной зоне.

Тогда вероятность обнаружения очага пожара группами разведки в составе  $n$  звеньев ГДЗС с использованием информации от СИПУ будет рассчитываться по формуле

$$P^* = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau^* - \Delta\tau}\right), \quad (6.18)$$

где  $\Delta\tau$  – среднее значение интегрального критерия эффективности СИПУ для здания площадью  $F$ , мин.

Относительный показатель эффективности применения информации от СИПУ при проведении разведки пожара будет представлять следующее соотношение:

$$\Delta P = \frac{P^* - P}{P^*} \text{ или } \Delta P = 1 - \frac{P}{P^*}. \quad (6.19)$$

Тогда значение показателя информационного обеспечения действий по тушению пожара в здании ( $s$ ) будет определяться по формуле

$$s = 1 + \Delta P \text{ или } s = 2 - \frac{P}{P^*}. \quad (6.20)$$

В соответствии с методом оценим среднее значение времени, необходимого для обнаружения очага пожара в здании группами разведки, состоящими из  $n$  звеньев газодымозащитной службы пожарных подразделений. Для расчета количественных значений среднего времени поиска очага пожара в здании группами разведки в составе 1, 2 и 3-х звеньев газодымозащитной службы и общей площади зданий от 1000 до 10000 м<sup>2</sup> воспользуемся формулой (6.16). Результаты расчета представлены в таблице 6.7. В последней строке таблицы 6.7. представлены средние значения интегрального критерия в процессе поиска очага пожара в здании.



Таблица 6.7 – Среднее время поиска очага пожара в здании

$\tau^*$ , мин		Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
N ГДЗС	1	8,3	16,7	25,0	33,3	41,7	50,0	58,3	66,7	75,0	83,3
	2	3,6	7,1	10,7	14,3	17,9	21,4	25,0	28,6	32,1	35,7
	3	2,3	4,5	6,8	9,1	11,4	13,6	15,9	18,2	20,5	22,7
	$\Delta\tau$	0,44	0,88	1,32	1,76	2,19	2,64	3,07	3,51	3,95	4,39

Допустимое время для выполнения работ, связанных с тушением пожара в здании, определяется временем защитного действия средств индивидуальной защиты и принимается равным:

- 10 минут для дыхательных аппаратов с защитным действием 40 минут;
- 15 минут для дыхательных аппаратов с защитным действием 60 минут;
- 20 минут для дыхательных аппаратов и кислородизирующих противогазов с защитным действием 120 минут и более.

Таким образом, основываясь на среднем времени поиска очага пожара в здании группами разведки в составе звеньев газодымозащитной службы и допустимым временем для выполнения работ по поиску очага пожара определим вероятность обнаружения очага пожара в здании за допустимое время. Для расчета значений данного показателя воспользуемся формулой (6.17). Результаты расчета представлены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Вероятность обнаружения очага пожара в здании

P, факт		Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\tau_D = 10$	1	0,982	0,865	0,736	0,632	0,551	0,487	0,435	0,393	0,359	0,330
	2	0,996	0,939	0,845	0,753	0,674	0,607	0,551	0,503	0,463	0,429
	3	0,999	0,973	0,909	0,835	0,763	0,699	0,642	0,593	0,551	0,513
$\tau_D = 15$	1	0,998	0,950	0,865	0,777	0,699	0,632	0,576	0,528	0,487	0,451
	2	1,000	0,985	0,939	0,878	0,814	0,753	0,699	0,650	0,607	0,568
	3	1,000	0,995	0,973	0,933	0,885	0,835	0,786	0,741	0,699	0,660
$\tau_D = 20$	1	1,000	0,982	0,931	0,865	0,798	0,736	0,681	0,632	0,589	0,551
	2	1,000	0,996	0,976	0,939	0,894	0,845	0,798	0,753	0,712	0,674
	3	1,000	0,999	0,992	0,973	0,944	0,909	0,872	0,835	0,798	0,763

Используя средние значения интегрального критерия эффективности применения СИПУ в процессе обнаружения очага пожара в здании по формуле (6.18) определим значения вероятности обнаружения пожара в здании группами разведки с использованием информации от СИПУ. Результаты расчета представлены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Вероятность обнаружения очага пожара в здании

$P^*$		Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\tau_D = 10$	1	0,992	0,912	0,802	0,703	0,621	0,555	0,500	0,455	0,417	0,384
	2	0,999	0,976	0,916	0,844	0,773	0,710	0,654	0,605	0,562	0,524
	3	1,000	0,995	0,970	0,928	0,878	0,827	0,778	0,732	0,690	0,651
$\tau_D = 15$	1	0,999	0,974	0,912	0,838	0,767	0,703	0,646	0,597	0,555	0,517
	2	1,000	0,996	0,976	0,938	0,892	0,844	0,796	0,751	0,710	0,672
	3	1,000	1,000	0,995	0,981	0,957	0,928	0,895	0,861	0,827	0,794
$\tau_D = 20$	1	1,000	0,992	0,961	0,912	0,856	0,802	0,750	0,703	0,660	0,621
	2	1,000	0,999	0,993	0,976	0,949	0,916	0,880	0,844	0,808	0,774
	3	1,000	1,000	0,999	0,995	0,985	0,970	0,951	0,928	0,904	0,878

На основе фактической вероятности обнаружения очага пожара и вероятности обнаружения очага пожара в здании с использованием информации от СИПУ определим относительный показатель повышения эффективности СИПУ по формуле (6.19). Результаты представлены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Эффективность системы при поиске очага пожара в здании

$\Delta P, \%$		Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\tau_D = 10$	1	1	5	8	10	11	12	13	13	14	14
	2	0	4	8	11	13	15	16	17	18	18
	3	0	2	6	10	13	16	17	19	20	21
$\tau_D = 15$	1	0	2	5	7	9	10	11	12	12	13
	2	0	1	4	6	9	11	12	13	15	15
	3	0	0	2	5	8	10	12	14	16	17
$\tau_D = 20$	1	0	1	3	5	7	8	9	10	11	11
	2	0	0	2	4	6	8	9	11	12	13
	3	0	0	1	2	4	6	8	10	12	13

Таким образом, анализируя данные, представленные в таблице 6.10, можно сделать вывод: эффективность применения СИПУ возрастает при увеличении общей площади зданий и составляет величину 20 %, что можно считать существенным значением при проведении разведки пожара в здании группами разведки, состоящими из звеньев газодымозащитной службы пожарных подразделений.

Для модификации метода оценки пожарной опасности зданий введен количественный показатель «качество информационного обеспечения пожарных подразделений». Количественные оценки данного показателя рассчитаны по формуле (6.20) с использованием данных из таблиц 6.8 и 6.9. Результат представлены в таблице 6.11.

Таблица 6.11 – Значения показателя качества информационного обеспечения

S		Общая площадь здания, м <sup>2</sup>									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\tau_{д=10}$	1	1,01	1,05	1,08	1,10	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14
	2	1,00	1,04	1,08	1,11	1,13	1,15	1,16	1,17	1,18	1,18
	3	1,00	1,02	1,06	1,10	1,13	1,16	1,17	1,19	1,20	1,21
$\tau_{д=15}$	1	1,00	1,02	1,05	1,07	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13
	2	1,00	1,01	1,04	1,06	1,09	1,11	1,12	1,13	1,15	1,15
	3	1,00	1,00	1,02	1,05	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16	1,17
$\tau_{д=20}$	1	1,00	1,01	1,03	1,05	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,11
	2	1,00	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,09	1,11	1,12	1,13
	3	1,00	1,00	1,01	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12	1,13

Результаты оценки эффективности системы внедрены в программный продукт, реализующий метод оценки уровня пожарной опасности зданий [240]. Это позволило произвести учет условий информационного обеспечения пожарных подразделений при оценке пожарной опасности зданий. Показано, что качество информационного обеспечения определяет эффективность решения задач пожаротушения в зданиях, что позволяет предупредить возможность развития пожара до крупных размеров и избежать существенного ущерба. Экономическая оценка эффективности применения СИПУ в процессе тушения пожаров представлена в приложении 4.

## Выводы по главе 6

В результате исследований, выполненных в шестой главе диссертации, произведена оценка эффективности системы поддержки управления пожарными подразделениями, получены следующие основные результаты.

1. Произведено экспериментальное исследование применения системы поддержки управления при решении основной боевой задачи пожарных подразделений. Разработаны условия проведения эксперимента в рамках опытных пожарно-тактических учений. Произведена обработка экспериментальных данных.

2. Разработаны критерии для оценки эффективности применения системы поддержки управления: локальный критерий, применимый для оценки эффективности системы поддержки управления в рамках одного противопожарного отсека (этажа здания); интегральный критерий, с помощью которого проводится оценка эффективности системы для здания в целом.

3. Разработан метод оценки эффективности применения системы поддержки управления при решении оперативных задач управления в ходе тушения пожаров в зданиях. Предложен относительный показатель повышения тактических возможностей групп разведки пожара в составе нескольких звеньев газодымозащитной службы пожарных подразделений. Показано, что повышение эффективности применения системы обеспечивает увеличение относительного показателя тактических возможностей пожарных подразделений от 10 до 50 % в зависимости от общей площади здания и условий (тяжести) работ по тушению пожара.

4. Произведена модификация метода оценки уровня пожарной опасности зданий путем внедрения нового количественного показателя, характеризующего качество условий информационного обеспечения действий по тушению пожаров в зданиях. Показано, что повышение качества информационного обеспечения групп разведки позволяет на 20 % повысить вероятность обнаружения пожара в здании за допустимое время и существенно снизить пожарную опасность здания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты, полученные в процессе решения научной проблемы, состоящей в разрешении противоречия между характером информации, получаемой от систем мониторинга динамики пожара в здании и существующими формализованными процедурами поддержки принятия управленческих решений при ликвидации пожаров в зданиях, состоят в следующем:

1. Разработана многокритериальная модель мониторинга динамики параметров пожара в здании, представляющая собой совокупность аналитических решений системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Разработана модель клеточных автоматов, описывающих процесс развития и тушения пожара в здании. Результаты моделирования динамики параметров мониторинга пожара в здании определили возможность создания новых технических устройств контроля факторов пожара, объединенных в единую систему мониторинга пожара в здании, применяемую для управления пожаротушением, в том числе с использованием пожарных подразделений.

2. Разработан метод моделирования мониторинга динамики пожара в здании, позволяющий использовать количественные параметры мониторинга пожара в совокупности с параметрами динамики пожара, получаемыми посредством моделирования. На основе предложенного метода разработаны процедуры обработки информации от систем мониторинга пожара в здании, с использованием качественных состояний пожара при определении количественных значений параметров мониторинга пожара.

3. Разработан многокритериальный метод поддержки принятия управленческих решений на основе количественной информации, получаемой от систем мониторинга пожара в здании. В качестве теоретической основы метода выступает принцип оптимальности по Парето, что позволяет при реализации многоуровневой процедуры многокритериального выбора вариантов управленческих решений использовать количественные параметры мониторинга пожара в совокупности с параметрами моделирования действий пожарных подразделений.

4. Разработаны методы определения значений показателей важности в многокритериальных моделях выбора управленческих решений. При разработке методов сформулированы и доказаны утверждения о важности критериев принятия решений. Предложены системы линейных уравнений показателей важности в моделях ранжирования и теоретико-множественного анализа векторных оценок критериев, решение которых осуществлено методом Крамера.

5. Произведена многокритериальная постановка, формализация и решение частных задач управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях на основе информации, получаемой от системы мониторинга динамики пожара. Решение задач управления произведено с использованием разработанного многокритериального метода поддержки управления. В качестве дополнительного источника информации о важности критериев применены модели регрессионного анализа, объединенные в функцию аналогичную производственной функции Кобба – Дугласа, что позволило использовать свойства линейной однородности показателей важности и исключить из совокупности исходных данных субъективные показатели.

6. Разработана многоагентная технология моделирования поддержки управления при тушении пожаров в зданиях с использованием результатов мониторинга пожара. Технология предназначена для создания систем моделирования процедур поддержки управления для тактической подготовки пожарных.

7. Разработана система информационной поддержки управления пожарными подразделениями на основе динамики показателей мониторинга пожара в здании. Система является теоретической основой программно-аппаратного комплекса информационной поддержки принятия управленческих решений на основе результатов мониторинга параметров пожара в здании, созданного в рамках концепции формирования единого информационного пространства для управления службами экстренного реагирования на деструктивные события в городах и населенных пунктах.

8. Разработаны и экспериментально обоснованы показатели эффективности системы поддержки управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях. На основе предложенных показателей разработаны процедуры оценки эффективности применения системы на микроуровне – показатель тактических возможностей пожарных подразделений и макроуровне – показатель качества информационного обеспечения действий по тушению пожара, используемый для модификации метода оценки уровня противопожарной защиты зданий. В результате показано, что на микроуровне применение системы позволяет повысить эффективность реализации действий по тушению пожара на 50 %, на макроуровне – на 20 %.

9. Произведена экономическая оценка эффективности применения системы поддержки управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в зданиях в совокупности с функциональными подсистемами активной противопожарной защиты зданий – автоматической пожарной сигнализацией и автоматической установкой пожаротушения. Определено, что внедрение системы экономически целесообразно.

Разработанные в диссертации многокритериальные модели и методы, в совокупности составляющие теоретические основы многокритериального моделирования процесса принятия управленческих решений, позволяют исследовать широкий класс задач поддержки управления пожарными подразделениями на основе результатов мониторинга динамики пожара. Практическое применение теоретических результатов в виде системы информационной поддержки управления позволяет снизить субъективность и повысить оперативность процесса принятия управленческих решений при тушении пожаров в зданиях.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамов, А.П. Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений при тушении пожаров: структура и содержание информационного обеспечения [Текст] / А.П. Абрамов // Пожары и окружающая среда: материалы XVII Международной науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2002. – С. 363–365.
2. Абрамов, А.П. Методология проектирования автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений при тушении пожара [Текст] / А.П. Абрамов // Комплексная безопасность России – исследования, управление, опыт: сборник материалов. – М.: ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2002. – С. 312–313.
3. Абрамов, А.П. Функциональные возможности подсистемы оперативно-справочной информации по особо важным объектам гарнизона [Текст] / А.П. Абрамов // Пожары и окружающая среда: материалы XVII МНПК. – М.: ВНИИПО, 2002. – С. 363–365.
4. Абрамов, А.П. Автоматизация планирования боевых действий при чрезвычайных ситуациях на основе онтологии предметной области [Текст] / А.П. Абрамов, Е.А. Мешалкин, В.Т. Олейников // Комплексная безопасность России – исследования, управления, опыт: сборник материалов. – М.: НИЦ ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004. – С. 59–63.
5. Агеев, С.В. Методика оценки эффективности находящихся в длительной эксплуатации систем оповещения населения [Электронный ресурс] / А.П. Абрамов, М.С. Жуковский, А.Н. Леонова, М.В. Носов // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 3 (61). – С. 171–181. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-3/17-03-15.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).
6. Агеев, С.В. Современные тенденции создания комплексной системы безопасности жизнедеятельности как элемента автоматизированной информационно-управляющей системы РСЧС [Текст] / С.В. Агеев, В.А. Измалков, А.С. Ро-



манов // Комплексные решения проблем безопасности (40-летию института посвящается): сборник ВНИИ ГОЧС: в 4 т. – Москва, 2016. – С. 38–41.

7. Агнихотри, Л. Способ и устройство для поддержки принятия решений на базе случаев [Текст]: патент на изобретение RU 2 494 458, 11.12.2008 / Л. Агнихотри, Л. Бороцки, Л. Чжао, М.Ч. Ли.

8. Аксёнов, О.Ю. Модель оценки совокупного текущего и прогнозируемого ущерба, наносимого отдельным критически важным объектам и группировке критически важных объектов в техногенных и природных катастрофах и военных конфликтах для принятия управленческих решений [Текст]: свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2014611073, 23.01.2014 / О.Ю. Аксёнов, В.В. Пицык, Д.В. Тараканов и др.

9. Алехин, Е.М. Проверка адекватности математических моделей процесса функционирования аварийно-спасательных служб [Текст] / Е.М. Алехин, Н.Н. Брушлинский, Ю.И. Коломиец, С.В. Соколов, А.В. Белых, П. Вагнер // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 1997. – № 10. – С. 47.

10. Анкудинов, О.С. Программный комплекс информационной поддержки экипажей объектов морской техники типа ледостойких технологических платформ в аварийных ситуациях [Текст]: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2015611234, 26.01.2015 / О.С. Анкудинов, С.Г. Живица, С.В. Ковальчук, М.А. Кудрин, Д.Ю. Лузгин, С.В. Шедько, Ю.М. Фишкис.

11. Астапов, П.Е. Технологические и структурные решения по созданию системы мониторинга взрывопожароопасности объектов добычи и транспорта нефти [Текст] / П.Е. Астапов, А.В. Федоров, А.Н. Членов, Е.Н. Ломаев, А.Д. Ищенко // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 10. – С. 50–60.

12. Баканов, М.О. Дистанционный мониторинг техногенных пожаров и чрезвычайных ситуаций [Текст] / М.О. Баканов, Д.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 1 (373). – С. 173–177.

13. Баканов, М.О. Модель мониторинга для оперативного управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций [Текст] / М.О. Баканов, Д.В. Тара-

канов, М.В. Анкудинов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 3 (32). – С. 77–80.

14. Балаба, А.В. Программа для расчетного обоснования геометрических характеристик размещения тепловых кумулятивных пожарных извещателей [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015619987 от 18.09.2015 / А.В. Балаба, А.М. Мацук, М.А. Мацук и др.

15. Батырев, В.В. Технологии создания структурированных систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений [Текст]: монография / В.В. Батырев, О.С. Волков, С.А. Качанов. – М.: Альфа-Порте, 2011. – 270 с.

16. Башаричев, А.В. Принятие управленческих решений при организации тушения пожаров в зданиях повышенной этажности с использованием CASE-технологий [Текст] / А.В. Башаричев, Ю.И. Жуков // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2011. – Т. 17. № 1. – С. 51–57.

17. Безбородько, М.Д. Оценка эффективности средств эвакуации людей на пожарах [Текст] / М.Д. Безбородько, Г.П. Подкозьин // Пожарная техника. Расчеты проектирование: сб. научн. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1989. – С. 83–87.

18. Беллендир, Е.Н. Автоматизированная система мониторинга технического состояния и поддержки принятия управленческих решений по повышению безопасности и надежности комплексов гидротехнических сооружений гидроэлектростанций и иных объектов [Текст]: патент на изобретение RU 2 460 127, 29.08.2011 / Е.Н. Беллендир, Д.В. Мишин, Н.Я. Никитина, М.Н. Фрумкин.

19. Белозеров, В.В. Адаптивная система пожарной безопасности [Электронный ресурс] / В.В. Белозеров, Е.И. Богуславский, И.М. Тетерин // Технологии техносферной безопасности. – 2007. – № 1 (11). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2007-1/06-01-07.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

20. Берестов, Л.М. Система поддержки экипажа в опасных ситуациях [Текст]: патент на изобретение RU 2 128 854, 10.04.1999 / Л.М. Берестов, Е.Г. Харин, А.Ф. Якушев и др.

21. Бобков, С.П. Моделирование основных процессов переноса с использованием клеточных автоматов [Текст] / С.П. Бобков // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52, № 3. – С. 109–114.

22. Бобков, С.П. Использование систем клеточных автоматов для моделирования нелинейных задач теплопроводности [Текст] / С.П. Бобков, Ю.В. Войтко // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52, № 11. – С. 126–128.

23. Бобков, С.П. Моделирование процесса деформирования тел с использованием клеточных автоматов [Текст] / С.П. Бобков, И.В. Полищук // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 4. – С. 72–74.

24. Бобков, С.П. Применение клеточных автоматов для моделирования процесса деформирования твердых тел [Текст] / С.П. Бобков, И.В. Полищук // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов МНТК, посвященный 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. – 2016. – С. 148–150.

25. Бобков, С.П., Смирнов, С.С. Моделирование распространения упругих волн с использованием систем клеточных автоматов [Текст] / С.П. Бобков, С.С. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 8. – С. 100–102.

26. Бороцки, Л. Система и способ для поддержки клинических решений для планирования терапии с помощью логического рассуждения на основе прецедентов [Текст]: патент на изобретение RU 2 616 985, 07.12.2011 / Л. Бороцки, М.Р. Симпсон, Е. Сью м др.

27. Брушлинский, Н.Н. О некоторых проблемах, связанных с нормированием пожарных автомобилей и пожарных депо [Текст] / Н.Н. Брушлинский // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 13, № 4. – С. 76–81.

28. Брушлинский, Н.Н. Оценка рисков пожаров и катастроф [Текст] / Н.Н. Брушлинский, Ю.М. Глуховенко // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 1992. – № 1. – С. 13–18.
29. Брушлинский, Н.Н. Анализ обстановки с пожарами в городах и сельской местности субъектов Российской Федерации [Текст] / Н.Н. Брушлинский, Е.А. Клепко, С.Ю. Попков, С.В. Соколов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 1. – С. 92–99.
30. Брушлинский, Н.Н. О статистике пожаров и о пожарных рисках [Текст] / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 4. – С. 40–48.
31. Брушлинский, Н.Н. Проблемы обеспечения пожарной безопасности в мире на рубеже столетий [Текст] / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, П. Вагнер // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2000. – № 6. – С. 68–72.
32. Бубырь, Н.Ф. Математическая модель боеспособности пожарных подразделений [Текст]: сборник трудов ВНИИПО МВД СССР / Н.Ф. Бубырь, М.Д. Безбородько. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1977. – Вып. 2.
33. Букур, А. Й-Д. Система уточнения медицинских запросов [Текст]: патент на изобретение RU 2 598 328, 22.09.2011 / А. Й-Д. Букур, Р. Вдовяк, Я. Й-А. Ван Леувен.
34. Булгаков, В.В. Совершенствование системы управления аварийно-спасательными формированиями при ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах [Электронный ресурс] / В.В. Булгаков, А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 4. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-4/13-04-10.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).
35. Бурков, В.Н. Теория графов в управлении организационными системами [Текст] / В.Н. Бурков, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков. – М.: НПО Синтег, 2001. – 124 с.
36. Бурков, В.Н. Теория активных систем: состояние и перспективы [Текст]: монография / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: НПГ Синтег, 1999. – 128 с.

37. Бусленко, В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем [Текст] / В.Н. Бусленко. – М.: Наука, 1977. – 240 с.
38. Варламов, Е.С. Об оценке динамики температуры газовой среды пожара в здании по её мониторингу в смежной зоне [Электронный ресурс] / Е.С. Варламов, С.П. Бобков, Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3 (67). – С. 107–111. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/10-03-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).
39. Варламов, Е.С. Программные средства для создания электронных документов планирования действий по тушению пожаров в зданиях [Текст] / Е.С. Варламов, М.В. Илеменов, Д.В. Тараканов // Материалы IX МНПК «Пожарная и аварийная безопасность» – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России – 2013. – С. 127–130.
40. Варламов, Е.С. Модели для автоматизированного проектирования кумулятивной системы обнаружения пожара [Текст] / Е.С. Варламов, М.А. Мацук, Д.В. Тараканов // V ВНПК «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2018. – С. 54–59.
41. Вербек, А.А-М. Поддержка принятия решений об устранении ошибок в клинической документации [Текст]: патент на изобр. RU 2 606 050, 02.12. 2011 / А.А-М. Вербек.
42. Власов, А.А. Сравнительный анализ применения индексных методов анализа пожарного риска [Текст] / А.А. Власов // Научные проблемы гражданской защиты – 2014.– № 3. –С. 58–61.
43. Гапанович, В.А. Автоматизированная система для комплексного управления ресурсами, рисками, надежностью объектов железнодорожного транспорта [Текст]: патент на изобретение RU 2 579 981, 13.03.2015 / В.А. Гапанович, А.О. Ермаков, А.М. Замышляев и др.
44. Гарант-Р. Мониторинг. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: [http://этернис.рф/netcat\\_files/userfiles/Garant-R-Monitoring-2017.pdf](http://этернис.рф/netcat_files/userfiles/Garant-R-Monitoring-2017.pdf) (дата обращения 28.05.2018)

45. Гордеев, А.Б. Методика расчета параметров работы газодымозащитников для автоматизации поста безопасности на пожаре [Текст] / А.Б. Гордеев, Д.В. Тараканов // Материалы IX МНПК «Пожарная и аварийная безопасность» – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 174–175.
46. ГОСТ 8.207–76. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
47. ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования
48. ГОСТ Р 56935–2016. Производственные услуги. Услуги по построению системы мониторинга автоматических систем противопожарной защиты и вывода сигналов на пульт централизованного наблюдения «01» и «112».
49. Грачев, В.А. Газодымозащитная служба [Текст]: учебник / В.А. Грачев, Д.В. Поповский; под общ. ред. Е.А. Мешалкина. – М.: Пожкнига, 2004. – 384 с.
50. Демёхин, Ф.В. Повышение достоверности обнаружения пожара на промышленных объектах [Текст] / Ф.В. Демёхин, Т.А. Буцынская, С.Ю. Журавлёв // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 4. – С. 69–71.
51. Долговидов, А.В. Автономное пожаротушение: реальность и перспективы [Текст] / А.В. Долговидов, С.Ю. Сабинин, В.В. Терехнев. – Екатеринбург: Калан, 2014. – 204 с.
52. Егоров, В.Н. Бортовая интегрированная система информационной поддержки экипажа и когнитивный формат представления полетной информации на этапе «взлет» многодвигательного воздушного судна [Текст]: патент на изобретение RU 2 550 887, 20.05.2015 / В.Н. Егоров, В.А. Архипов, И.В. Буркина и др.
53. Егорова, Л.В. Автоматизированная система для управления работой объединенным парком локомотивов грузового движения на полигоне обращения

[Текст]: патент на изобретение RU 2 555 393, 13.09.2013 / Л.В. Егорова, М.Т. Иванов, Н.В. Иванова и др.

54. Зёрнушкин, С.А. Комплекс средств автоматизации системы управления боевыми средствами [Текст]: патент на изобретение RU 2 615 805, 27.05.2015 / С.А. Зёрнушкин, А.Е. Гвоздев, Н.Д. Пантюхина и др.

55. Иванов, М.Т. Автоматизированная система для управления работой локомотивных бригад на железнодорожном направлении [Текст]: патент на изобретение RU 2 574 049, 13.09.2013 / М.Т. Иванов, А.А. Логвинов, Т.Н. Сагдуллаев и др.

56. Илеменов, М.В. Комплекс программ для разработки электронных документов предварительного планирования тушения пожаров в зданиях [Текст] / М.В. Илеменов // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 1 (59). – С. 97–104.

57. Исайкин, Ф.А. Оптимизация маршрутов следования мобильных групп к местам происшествий [Текст] / Ф.А. Исайкин // Информационные технологии и компьютерные модели в деятельности ОВД. – М.: Академия МВД России, 1996. – С. 74–80.

58. Кабелев, Н.А. Пожарная разведка: тактика, стратегия и культура. [Текст] / Н.А. Кабелев. – Екатеринбург: Калан, 2016. – 348 с.

59. Качанов, С.А. Основные подходы по созданию системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру «112» в российской федерации [Текст] / С.А. Качанов, С.В. Агеев // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2013. – № 3. – С. 8–15.

60. Качанов, С.А. Основные направления развития информационного обеспечения автоматизированной информационно управляющей системы (АИУС) Единой Государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) [Текст] / С.А. Качанов, С.В. Агеев, О.Б. Ковтун и др. // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12, № 2 (44). – С. 8–12.

61. Качанов, С.А. Система комплексного управления безопасностью промышленного предприятия [Текст] / С.А. Качанов, М.Ю. Прошляков // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 32–39.
62. Кваша, В.С. Комплекс средств автоматизации системы управления боевыми средствами [Текст]: патент на изобретение RU 2 391 619, 10.06.2010 / В.С. Кваша, А.Ф. Усков.
63. Киселев, Я.С. Физические модели горения в системе пожарной безопасности [Текст]: монография / Я.С. Киселев, О.А. Хорошилов, Ф.В. Демехин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский ун-т гос. противопожарной службы, 2009. – С. 347.
64. Климовцов, В.М. Распределённые системы поддержки принятия решений в управлении Государственной противопожарной службой [Текст] / В.М. Климовцов // Материалы II международной конференции «Системы безопасности – 2002». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. – С. 145–146.
65. Козьмовский, Д.В. Методы мониторинга, контроля и тестирования уровня защищенности и анализа сетевой деятельности пользователей вычислительных сетей в интересах информационной безопасности системы [Текст] / Д.В. Козьмовский, И.Г. Малыгин, М.В. Сильников // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 3–4. – С. 26–31.
66. Колмогоров, А.Н. Избранные труды [Текст] / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 2005 – Т.1.: Математика и механика – 2005. – 519 с.
67. Колмогоров, А.Н. Введение в теорию вероятностей [Текст] / А.Н. Колмогоров. – 3-е изд., испр. – М.: МЦНМО, 2015. – 168 с.
68. Коморовский, В.С. Система поддержки принятия решений «Лесные пожары – объект» [Текст]: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2014661559, 30.10.2014 / В. С. Коморовский, П. А. Осавелюк, Г. А. Доррер.
69. Концепция общественной безопасности в Российской Федерации [Текст]: утв. приказом Президента РФ от 14.11.2013 № Пр-2685.



70. Концепция построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город» [Текст]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 3.12.2014 №2446-р.

71. Кошмаров, Ю.А. Динамика ОФП в помещении, смежном с очагом пожара [Текст] / Ю.А. Кошмаров, С.С. Лапшин, Д.В. Тараканов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 1. – С. 67–75.

72. Лабутин, А.Н. Агентно-ориентированное моделирование системы управления подразделениями при ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах химической промышленности [Текст] / А.Н. Лабутин, А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 3. – С. 94–99.

73. Лабутин, А.Н. Инструментальные подходы управления и их применение при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций [Текст] / А.Н. Лабутин, А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Материалы XXIV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–24». – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2011 – С. 156–157.

74. Лабутин, А.Н. В. Организация взаимодействия подразделений и служб при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объекте химической промышленности [Текст] / А.Н. Лабутин, А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2011. – № 4. – С. 105–110.

75. Лабутин, А.Н. Программный комплекс имитации развития и тушения пожаров в ограждениях [Текст] / А.Н. Лабутин, Д.В. Тараканов, В.В. Волков // Материалы IX МНПК «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2012. – С. 166–167.

76. Левин, М.З. Способ технического контроля и диагностирования бортовых систем беспилотного летательного аппарата с поддержкой принятия решений и комплекс контрольно-проверочной аппаратуры с интеллектуальной системой поддержки принятия решений для его осуществления [Текст]: патент на изобретение RU 2 557 771, 28.02.2014 / М.З. Левин, В.А. Смирнов, М.В. Ульянов и др.

77. Лорд, У.П. Основанные на принятии решений дисплеи для медицинских информационных систем [Текст]: патент на изобретение RU 2 459 258, 06.11.2006 / У.П. Лорд, С. Чжу.

78. Малыгин, И.Г. Маршрутизация движения пожарных автомобилей в условиях загруженной транспортной сети мегаполиса [Текст] / И.Г. Малыгин, А.Ю. Крылатов, А.П. Широколобова // Проблемы управления рисками в техно-сфере. – 2017. – № 3 (43). – С. 87–95.

79. Малыгин, И.Г. Создание информационной системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера субъекта российской федерации [Текст] / И.Г. Малыгин, А.П. Чуприян // Пожаро-взрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 1. – С. 10–13.

80. Малыгин, И.Г. Комплексная модель информационного обеспечения автоматизированного управления силами и средствами МЧС России [Текст] / И.Г. Малыгин, А.В. Щетка // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

81. Матюшин, А.В.. Метод повышения точности прогнозирования ОФП с помощью интегральной модели пожара [Текст] / А.В. Матюшин, Р.А. Иващук // Пожарная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 154–162.

82. Мащук, М.А. Программное обеспечение для мониторинга состояния беспроводной адресной системы пожарной сигнализации и пожаротушения «Гарант-Р» [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663753 от 11.12.2017 / М.А. Мащук, Е.С. Варламов, А.М. Мащук и др.

83. Мешалкин, Е.А. Экспертные системы и перспективы их использования в пожарной охране [Текст] / Е.А. Мешалкин, В.А. Кокушкин, Г.И. Дударев // Информационный выпуск. – М.: ГИЦ МВД СССР, 1988. – Вып. 6/88. – 43 с.

84. Свод правил СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения.

85. Методика и примеры технико-экономического обоснования противопожарных мероприятий к СНИП 21-01–97\* (МДС 21-3.2001).

86. Методические рекомендации по действиям подразделений федеральной противопожарной службы при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ [Текст]: письмо МЧС России от 26.05.2010 №43-2007-18.

87. Методические рекомендации по определению мест размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах в целях доведения времени прибытия первого подразделения пожарной охраны до нормативных значений [Текст]: утв. Главным Государственным инспектором Российской Федерации по пожарному надзору 30.12.2009. № 2-4-60-14-18. Москва – 2009. – 25 с.

88. Методические рекомендации по составлению планов тушения пожаров и карточек тушения пожаров [Текст]: утв. главным военным экспертом генерал-полковником П.В.Платом 27.02.2013 года №2-4-87-1-18.

89. Мешалкин, Е.А. Концепция создания информационной системы поддержки оперативных решений при тушении пожаров [Текст] / Е.А. Мешалкин, В.Т. Олейников, А.П. Абрамов // Пожары и окружающая среда: Материалы XVII Международной науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2002. – С. 358–361.

90. Мешалкин, Е.А. Концепция создания информационной системы поддержки оперативных решений при тушении пожаров [Текст] / Е.А. Мешалкин, В.Т. Олейников, А.П. Абрамов // Пожары и окружающая среда: Материалы XVII Международной науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2002. – С.358–361.

91. Мешалкин, Е.А. Принципы построения и архитектура автоматизированной системы поддержки принятия решений при тушении пожаров [Текст] / Е.А. Мешалкин, В.Т. Олейников, А.П. Абрамов // Пожарная безопасность. – М.: ВНИИПО, 2001. – № 4 – С. 118–123.

92. Мизгулин, В.В. Автоматизированная система распределенной когнитивной поддержки принятия диагностических решений в медицине [Текст]: патент на изобретение RU 2 609 737, 21.12.2015 / В.В. Мизгулин, Р.М. Кадушников, Е.Д. Федоров и др.

93. Михайлёв, В.Т. Беспилотный робототехнический комплекс дистанционного мониторинга и блокирования потенциально-опасных объектов воздушными роботами, оснащенный системой поддержки принятия решений по обеспечению

нию требуемой эффективности их применения [Текст]: патент на изобретение RU 2 353 891, 27.04.2009 / В.Т. Михайлёв, А.В. Савченко, М.А. Савченко и др.

94. Мацук, А.М. Модуль пожаротушения с устройством контроля факторов пожара и результатов его действия [Текст]: патент на полезную модель №2015147090. зарегистр. 02.11.2015. / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, А.В. Долговидов и др.

95. Матюшин, А.В. Определение скорости следования пожарных подразделений к месту пожара в городе [Электронный ресурс] / А.В. Матюшин, Куанг Тоан Нго // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – Вып. № 3 (61). – С. 28–33. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-3/04-03-15.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

96. Нехорошев С.Н., Подиновский В.В., Потапов М.А., Агеев С.В., Романов А.С. Использование теории многокритериального выбора в системе поддержки принятия решений НЦУКС МЧС России [Текст] / С.Н. Нехорошев, В.В. Подиновский, М.А. Потапов и др. // Технологии гражданской безопасности. – 2008. – Т. 5, № 1–2. – С. 128–130.

97. Николова-Симонс, М. Клиническая система поддержки принятия решений для прогнозирующего планирования выписки [Текст]: патент на изобретение RU 2 619 644, 01.02.2012 / М. Николова-Симонс, Й. Мюскенс, Д.Э. Рок, Х-А. Вишманн.

98. Новиков, А.М. Методология научного исследования [Текст] / А.М. Новиков, Д.В. Новиков. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 280.

99. Новиков, Д.А. Структура теории управления социально-экономическими системами [Текст] / Д.А. Новиков // Управление большими системами: сб. трудов. – 2009. – № 24. – С. 216–258.

100. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами [Текст]: монография / Д.А. Новиков. – М.: ИПУ РАН, 2005. – С. 584.

101. Новиков, Д.А., Рефлексивные игры [Текст]: монография / Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили – М.: ИПУ РАН, 2003. – С. 149.

102. Ногин, В.Д. Границы применимости распространенных методов скаляризации при решении задач многокритериального выбора [Текст] / В.Д. Ногин // Методы возмущений в гомологической алгебре и динамика систем: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Издательство Мордовского Университета, 2004. – С 59–68.

103. Ногин, В.Д. Комбинированный подход к сужению множества Парето с использованием линейной и мультипликативной сверток критериев [Текст] / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2016. – № 2. – С. 70–77.

104. Ногин, В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации [Текст] / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 4.– С. 73–82.

105. Ногин, В.Д. Новый способ сужения области компромиссов [Текст] / В.Д. Ногин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1976. – № 5.– С. 10–14.

106. Ногин, В.Д. Относительная важность критериев и ее применение в многокритериальной оптимизации [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра ф-м. наук: 01.01.11 / Ногин Владимир Дмитриевич. – СПб., 1995. – С. 24.

107. Ногин, В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В.Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 144 с.

108. Ногин, В.Д. Принятие решений при многих критериях [Текст]: учебно-метод. пособие / В.Д. Ногин. – СПб.: ЮТАС, 2007. – 104 с.

109. Ногин, В.Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению [Текст] / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений – 2008. – № 1. – С. 98–113.

110. Ногин, В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев [Текст] / В.Д. Ногин // ЖВМи МФ. – 2004. – Т. 44, №7. – С. 1259–1268.

111. Ноженкова, Л.Ф. Система поддержки принятия решений по повышению защищенности объекта образования от угрозы пожара[Текст]: свидетельство

о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617388, 18.07.2014 / Л.Ф. Ноженкова, Р.В. Морозов, В.В. Ничепорчук и др.

112. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «О пожарной безопасности».

113. Приказ МЧС России от 09.01.2013 № 3 «Об утверждении Правил проведения личным составом федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы аварийно-спасательных работ при тушении пожаров с использованием средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения в непригодной для дыхания среде».

114. Овсянников, М.Ю. Модель динамики опасных факторов пожара в системе смежных помещений [Текст] / М.Ю. Овсянников, Р.А. Соловьев, С.С. Лапшин и др. // Материалы IX МНПК «Пожарная и аварийная безопасность» – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России – 2013. – С. 62–65.

115. Окулов, В.М. Комплекс средств автоматизации системы управления силами и средствами [Текст]: патент на изобретение RU 2 560 196, 11.03.2014 / В.М. Окулов, М.И. Полубояринов, Е.В. Бачурин и др..

116. Окулов, В.М. Система поддержки принятия решений по повышению рентабельности авиаперевозок [Текст]: патент на изобретение RU (11) 2 294 013, 24.02.2005 / В.М. Окулов, М.И. Полубояринов, Е.В. Бачурин и др.

117. Опфер, Р. Система поддержки принятия клинических решений с внешним контекстом [Текст]: патент на изобретение RU 2 541 198, 09.04.2010 / Р. Опфер, И.К. Карлсен, А. Дугта и др.

118. Осипова, М.Н. Методическое пособие по оценке пожароопасности помещений различного назначения методом Гретенера [Текст] / М.Н. Осипова. – М.: НОУ ТАКИР, 1998. – 64 с.

119. Пицык, В.В. Обоснование метрологических характеристик информационных компонентов системы пожарной автоматики [Текст] / В.В. Пицык, Л.В. Суховерхова, Д.В. Тараканов и др. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 3. – С. 45–51.

120. Повзик, Я.С. Нормирование боевого развертывания пожарных подразделений [Текст] / Я.С. Повзик, В.А. Березин, В.В. Терехнев // Тактика и процессы пожаротушения: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1989. – С. 24–29.

121. Подгрушный, А.В. Реализация тактических возможностей отделений на автоцистернах при тушении пожаров. [Текст] / А.В. Подгрушный // Материалы XII науч.-техн. конф. «Системы безопасности – 2003». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – С. 306–313.

122. Подгрушный, А.В. Совершенствование управления боевыми действиями пожарных подразделений на основе их тактических возможностей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / Подгрушный Александр Васильевич. – М., 2004 – 24 с.

123. Подгрушный, А.В. Задачи экспериментальной оценки эффективности тушения различных видов пожаров [Текст] / А.В. Подгрушный, В.Е. Макаров // Современные проблемы тушения пожаров: материалы науч.-практ. конф. – М.: МИПБ МВД России, 1999. – С. 86–89.

124. Подиновский, В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. [Текст] / В.В. Подиновский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 64.

125. Подиновский, В.В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений [Текст] / В.В. Подиновский // Многокритериальные задачи принятия решений. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 48–83.

126. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.

127. Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444 «Об утверждении Боевого устава пожарной охраны (БУПО), определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ».

128. Промышленные здания и сооружения. Серия: Противопожарная защита и тушение пожаров [Текст] / В.В. Терещнев и др. – Книга 2. – М.: Пожнаука, 2006. – 412 с.

129. Прус, Ю.В. Интегральная диагностика как основа мониторинга состояния технических объектов [Текст] / Ю.В. Прус, В.В. Белозеров, С.И. Буйло и др. // Технологии техносферной безопасности. – 2009. – № 6. – С. 14.

130. Прус, Ю.В. Автоматизация инженерно-технической диагностики высотных зданий на основе комплексирования методов и средств неразрушающего контроля [Текст] / Ю.В. Прус, В.В. Белозеров, А.В. Ветров // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 5. – С. 8.

131. Пятаева, А.В. Обнаружение областей задымления на видеопоследовательности с применением локальных бинарных шаблонов [Текст] / А.В. Пятаева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2014. – №5 (57). – С. 108–114.

132. Пятаева, А.В. Сегментация областей задымления на видеопоследовательности [Текст] / А.В. Пятаева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 625–630.

133. Пятаева, А.В. Модель фона при детектировании дыма по видеопоследовательностям на открытых пространствах [Текст] / А.В. Пятаева, М.Н. Фаворская // Информационно-управляющие системы. – 2016. – №4 (83). – С. 44–50.

134. Радиоканальная система передачи извещений «Дельта» [Электронный ресурс]. URL: <http://megalux-brv.ru/catalog/pultovaya-radioohrana.html> (дата обращения 28.05.2018).

135. Радиосистема передачи извещений «Стрелец–Мониторинг». Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.argus-spectr.ru/index.php?path=ru/node/4/catalog/190> (дата обращения 28.05.2018).

136. Радиосистема пожарной сигнализации «Гарант-Р» (программное обеспечение: проектирование и мониторинг) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eternis.ru/catalog/programmnye-sredstva/>. (дата обращения 28.05.2018).



137. Радиосистема пожарной сигнализации «Гарант-Р» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eternis.ru/catalog/besprovodnaya-sistema-upravleniya-garant-r/> (дата обращения 28.05.2018).

138. Роечко, В.В. Критерии оценки вариантов переоснащения подразделений МЧС России [Электронный ресурс] / В.В. Роечко, Д.В. Тараканов, С.А. Шкунов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 5 (57). – URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-5/39-05-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018)

139. Роечко, В.В. Методика оценки уровня переоснащения подразделений МЧС России на примере субъектов Северокавказского регионального центра МЧС России [Текст] / В.В. Роечко, Д.В. Тараканов, С.А. Шкунов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 3. – С. 31–36.

140. Саттаров, И.Ф. Виртуальный тактический симулятор ликвидации пожаров в зданиях объектов социальной сферы [Текст]: свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661870 от 11.11.2015 / И.Ф. Саттаров., Д.В. Тараканов.

141. Сафронов, В.А. Способ эпидемиологического районирования по комплексу показателей с произвольной пространственной точностью для системы поддержки принятия управленческих решений [Текст]: патент на изобретение RU 2 557 757, 09.01.2014 / В.А. Сафронов, А.С. Раздорский, А.А. Лопатин и др.

142. Свидетельство № 2014613143. Программный комплекс по определению направлений безопасной эвакуации людей при пожаре: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [Текст] / Д.В. Шихалев, Р.Ш. Хабидулин; зарегистр. 19.03.2014.

143. Семенов, А.О. Модели мониторинга и управления при ликвидации крупных пожаров [Текст]: монография / А.О. Семенов, М.О. Баканов, Д.В. Тараканов. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – 128 с.

144. Семенов, А.О. Компьютерный модуль системы поддержки принятия решений при тушении крупных пожаров [Электронный ресурс] / А.О. Семенов, В.В. Булгаков, Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. –

2011. – № 1 (35). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-1/03-01-11.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

145. Семенов, А.О. Алгоритмы принятия решений при тушении пожаров на объектах химической промышленности [Текст] / А.О. Семенов, А.Н. Лабутин, Д.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, № 1. – С. 105–106.

146. Семенов, А.О. Методика многокритериальной оценки эффективности тушения пожаров на объектах химической промышленности [Текст] / А.О. Семенов, А.Н. Лабутин, Д.В. Тараканов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2012. – № 3. – С. 101–104.

147. Семенов, А.О. Методика определения показателей предпочтительности вариантов действий по ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах [Текст] / А.О. Семенов, А.Н. Лабутин, Д.В. Тараканов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 3. – С. 51–54.

148. Семенов, А.О. Математическая модель для выбора вариантов решений по расстановке пожарных подразделений при ликвидации лесных пожаров [Электронный ресурс] / А.О. Семенов, В.А. Смирнов, Д.В. Тараканов и др. // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – № 3 (37). – URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-3/06-03-11.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

149. Семенов, А.О. Алгоритм многокритериального выбора вариантов расстановки сил и средств при тушении пожаров с применением имитационного моделирования [Текст] / А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – № 4 (38). – URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-4/02-04-11.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018)

150. Семенов, А.О. Формирование структуры нештатной системы управления силами и средствами на месте пожара [Текст] / А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Материалы 17 МНТК Систем безопасности – 2008. – М.: Академия ГПС МЧС России – 2008 – С. 239–241.

151. Семенов, А.О. Руководство по повышению эффективности действий подразделений пожарной охраны при ликвидации пожаров на начальных этапах развития в зданиях с использованием информации от мониторинговых систем поддержки управления [Текст] / А.О. Семенов, Д.В. Тараканов, М.О. Баканов и др. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2017. – 35 с.

152. Семенов, А.О. Алгоритмы формализации информации об относительной важности показателей эффективности действий по тушению пожаров на объектах химической промышленности [Текст] / А.О. Семенов, Д.В. Тараканов, А.Н. Лабутин // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2012. – № 2. – С. 95–97.

153. Система информационной поддержки управления звеньями газодымозащитной службы при ликвидации пожаров в зданиях [Текст]: патент на изобретение № 2605682 от 18.08.2015/ Д.В. Тараканов.

154. Свод правил СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (утв. приказом МЧС РФ от 25.03.2009 № 175).

155. Смирнов, А.В. Применение многоагентного подхода для поддержки управления безопасностью в техносфере [Текст] / А.В. Смирнов, Р.Ш. Хабибулин, Д.В. Тараканов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. № 1 (132). – С. 118–133.

156. Смирнов, В.А. Программа для расчета показателей оперативного реагирования пожарно-спасательных гарнизонов [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661392 от 11.10.2017 / В.А. Смирнов, Д.В. Тараканов, А.В. Кузнецов и др.

157. Соколов, С.В. Оценка влияния сроков эксплуатации зданий жилого назначения на последствия от пожара [Текст] / С.В. Соколов, Д.В. Костюченко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014. – № 1. – С. 64–69.

158. Соколов, С.В. Эффективность средств пожарной автоматики на пожарах в жилых домах [Текст] / С.В. Соколов, Д.В. Костюченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 6. – С. 70–75.

159. Соколов, С.В. Определение преимущества движения пожарно-спасательных подразделений в транспортном потоке [Электронный ресурс] / С.В. Соколов, М.В. Сибиряков // Технологии техносферной безопасности. – 2017 – № 1. – С. 244–254. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения 09.03.2017).

160. Станкевич Т.С., Кипер А.В. Алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы поддержки принятия решений, предназначенной для руководителя тушения пожара [Текст] / Т.С., Станкевич, А.В., Кипер // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 9. – С. 45–56.

161. Станкевич, Т.С. Интеллектуальная система поддержки принятия решения на базе нечетких нейронных сетей для руководителя тушения пожара на территории ОАО «Калининградского морского торгового порта» [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661903 18.12.2013 / Т.С. Станкевич, А.В. Кипер.

162. Субачев, С.В. Разработка тренажера-имитатора по тушению пожаров в зданиях на основе компьютерной модели развития пожара по площади [Текст] / С.В. Субачев // Вестник Академии Государственной противопожарной службы. – 2006. – № 6. – С. 120–126.

163. Субачев, С.В. Имитационное моделирование развития и тушения пожаров в системе подготовки специалистов противопожарной службы [Текст] / С.В. Субачев, А.А. Субачева // Прикладная информатика. – 2008. – № 4. – С. 27–37.

164. Суворов, А.А. Комплекс поддержки принятия решений диспетчерским персоналом электроэнергетических систем [Текст]: патент на изобретение RU (11) 2 638 632, 07.12.2016 / А.А. Суворов, А.С. Гусев, Ю.С. Боровиков и др.

165. Тараканов, Д.В. Компьютерная система моделирования параметров работы газодымозащитной службы на пожаре [Текст]: Свидетельство о государ-

ственной регистрации программы для ЭВМ №2015612884, 26.02.2015 / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов.

166. Тараканов, Д.В. Система моделирования развития и тушения пожаров в зданиях [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013612151, 15.02.2013 / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов.

167. Тараканов, Д.В. Метод многокритериального выбора маршрутов движения пожарных в зданиях при тушении пожаров [Электронный ресурс] / Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4 (68). – С. 120–128. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/36-04-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

168. Тараканов, Д.В. Метод многокритериальной оптимизации в системе поддержки принятия решений при тушении крупных пожаров [Текст] / Д.В. Тараканов // Материалы 19 МНТК «Системы безопасности – 2010» .– М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – С. 145.

169. Тараканов, Д.В. Метод модификации векторного критерия в системе поддержки принятия решения при тушении крупного пожара [Электронный ресурс]/ Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 2. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-2/01-02-10.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018)

170. Тараканов, Д.В. Метод разработки систем поддержки принятия решений по тушению пожаров на объектах социальной сферы [Текст] / Д.В. Тараканов // Материалы 22 МНТК «Системы безопасности – 2013». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013.– С.182–184.

171. Тараканов, Д.В. Многокритериальная модель управления пожарно-спасательными подразделениями [Электронный ресурс] / Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 4 (74). – С. 148–154. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/39-05-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

172. Тараканов, Д.В. Программа для многокритериального анализа вариантов в системе поддержки принятия решений при ликвидации пожаров в зданиях

[Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615814 от 30.05.2016 / Д.В. Тараканов.

173. Тараканов, Д.В. Программа для моделирования работы системы поддержки управления ликвидацией пожаров в зданиях [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016614747 от 04.05.2016 / Д.В. Тараканов.

174. Тараканов, Д.В. Система информационного обеспечения действий по ликвидации пожаров в зданиях [Текст] / Д.В. Тараканов // Сборник материалов XI МНПК «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2016. – С. 321–324

175. Тараканов, Д.В. Система информационной поддержки управления звеньями газодымозащитной службы при ликвидации пожаров в зданиях [Текст] / Д.В. Тараканов // Материалы X МНПК «Пожарная и аварийная безопасность» – Иваново.: ИПСА ГПС МЧС России, 2015. – С. 185–186.

176. Тараканов, Д.В. Система мониторинга пожара в здании [Текст] / Д.В. Тараканов // Материалы 25 МНПК «Системы безопасности – 2016» .– Москва: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 281–282.

177. Тараканов, Д.В. Функция выбора наилучшего решения при двух критериях [Текст] / Д.В. Тараканов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. –2010. – № 1. – С. 24–27.

178. Тараканов, Д.В. Совершенствование модели качества мониторинга крупных пожаров и чрезвычайных ситуаций [Текст] / Д.В. Тараканов, М.О. Баканов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2018. – № 1 (26). – С. 91–95.

179. Тараканов, Д.В. Автоматизированная информационная система связи и управления пожарно-спасательными подразделениями [Текст]/ Д.В. Тараканов, М.О. Баканов, М.А. Колбашов и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 26, № 2–3. – С. 20–26.

180. Тараканов, Д.В. Методика оценки эффективности мониторинга состояния пожаров в зданиях [Электронный ресурс] / Д.В. Тараканов, М.О. Баканов,

А.О. Семенов // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 3 (73). – С. 97–102. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/32-03-17.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

181. Тараканов, Д.В. Программа для оперативного прогнозирования динамики пожара в здании по данным мониторинга температурных полей. [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015612865 от 26.02.2015 / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов.

182. Тараканов, Д.В. Компьютерное моделирование процессов развития и тушения пожаров в зданиях [Текст] / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 5 (57). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-5/38-05-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

183. Тараканов, Д.В. Метод прогнозирования динамики пожара в здании по данным мониторинга [Текст] / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов // Материалы 23 МНТК «Системы безопасности – 2014». – М.: АГПС МЧС России, 2014 – С. 209–210.

184. Тараканов, Д.В. Прогнозирование динамики пожара в здании по данным мониторинга [Текст] / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов // Материалы IX МНПК «Пожарная и аварийная безопасность – 2014». – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2014. – С. 174–175.

185. Тараканов, Д.В. Программное средство для разработки компьютерного плана тушения пожара в здании [Текст] / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов // Материалы III МНПК молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2014». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 109–111.

186. Тараканов, Д.В. Программное средство для разработки электронных документов предварительного планирования действий по тушению пожаров в зданиях [Текст] / Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов, М.В. Илеменов // Ежегодная международная научно–техническая конференция «Системы безопасности – 2013». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – С. 184–187.

187. Тараканов, Д.В. Алгоритм расчета параметров работы газодымозащитников для автоматизации поста безопасности на пожаре [Текст] / Д.В. Тараканов, А.В. Гордеев // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч.1. – М. Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 165–167.

188. Тараканов, Д.В. Мультипликативная функция для выбора маршрутов движения к очагу пожара внутри здания в условиях ограниченной видимости [Текст] / Д.В. Тараканов, Б.Б. Гринченко // Материалы МНПК «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 195–199.

189. Тараканов, Д.В. Концепция разработки систем поддержки принятия решений при тушении пожаров на социальных объектах города [Текст] / Д.В. Тараканов, М.В. Илеменов // Материалы IX МНПК «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2013. – С. 192–193.

190. Тараканов, Д.В. Программное средство для разработки электронной карточки тушения пожара [Текст] / Д.В. Тараканов, М.В. Илеменов // Материалы ВНПК «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2014. – С. 151–153.

191. Тараканов, Д.В. Программное средство для разработки электронных документов предварительного планирования действий по тушению пожаров в зданиях [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015612925 от 26.02.2015 / Д.В. Тараканов, М.В. Илеменов.

192. Тараканов, Д.В. Концепция разработки компьютерных тренажеров по организации пожаротушения в городах [Текст] / Д.В. Тараканов, А.В. Кузнецов, И.Ф. Саттаров и др. // Сборник материалов XI МНПК «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2016. – С. 326–327.

193. Тараканов, Д.В. Многокритериальная модель управления пожарно-спасательными подразделениями на основе мониторинга пожара в зданиях [Текст] / Д.В. Тараканов, А.В. Наумов, П.Н. Коноваленко и др. // V ВНПК «Акту-



альные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2018. 449–452 с.

194. Тараканов, Д.В. Компьютерная модель ликвидации пожаров в зданиях объектов социальной сферы [Текст] / Д.В. Тараканов, И.Ф. Саттаров // Материалы МНПК Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 92–95 с

195. Тараканов, Д.В. Компьютерная модель ликвидации пожаров для тактической подготовки пожарных [Электронный ресурс] / Д.В. Тараканов, И.Ф. Саттаров // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 6 (58). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-6/07-06-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

196. Тараканов, Д.В. Компьютерное моделирование тушения пожаров для тактической подготовки пожарных [Текст] / Д.В. Тараканов, И.Ф. Саттаров // Материалы IV МНПК «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации». – М. Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 165–167.

197. Тараканов, Д.В. Компьютерный симулятор ликвидации пожаров в зданиях объектов социальной сферы [Текст] / Д.В. Тараканов, И.Ф. Саттаров // Материалы V МНПК «Проблемы техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 304–308.

198. Тараканов, Д.В. Аддитивный метод модификации векторного критерия для поиска наилучшего решения (АММВК) [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2010613492, 13.04.2010 / Д.В. Тараканов, К.Г. Седых.

199. Тараканов, Д.В. Оценка эффективности применения информации от адресных систем обнаружения пожара при поиске очага пожара в здании [Текст] / Д.В. Тараканов, А.О. Семенов, Б.Б. Гринченко // Материалы IV МНПК «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 160–163

200. Тараканов, Д.В. Метод многокритериального ранжирования вариантов управления тушением пожаров в зданиях [Текст] / Д.В. Тараканов, В.А. Смирнов, А.О. Семенов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. –

№ 6 (70). – С. 72–75. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/30-06-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

201. Тараканов, Д.В. Технико-экономическое обоснование применения системы поддержки управления при тушении пожаров в зданиях лечебных учреждений [Текст] / Д.В. Тараканов, О.Г. Толкачев // Сборник материалов XII МНПК «Пожарная и аварийная безопасность». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2017. – С. 379–382.

202. Тараканов, Д.В. Ранжирование вариантов переоснащения парка основных пожарных автомобилей на основе критерия оперативной готовности [Текст] / Д.В. Тараканов, С.А. Шкунов, В.В. Роевко и др. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 49–54.

203. Тараканов, Д.В. Применение методов моделирования пожара при планировании действий пожарных подразделений по тушению пожара [Текст] / Д.В. Тараканов, М.В. Илеменов. // Материалы II ВНПК «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов». – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2015. – С. 132–133.

204. Тараканов, Д.В. Математическая модель мониторинга состояния пожара в здании [Текст] / Д.В. Тараканов // Сборник материалов VII ВНПК «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» в 2-х ч. Ч. 1. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2016. – С. 200–202.

205. Тараканов, Д.В. Многоагентная система моделирования тушения пожаров в социальных зданиях [Электронный ресурс] / Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 5 (69). – С. 118–125. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/39-05-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

206. Таранцев, А.А. Методика определения мест дислокации поэтапно создаваемых пожарных частей в сельской местности и корректировки границ районов выезда [Текст] / А.А. Таранцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 4. – С. 72.

207. Таранцев, А.А. Методы расчетной оценки динамики пожаров в помещениях [Текст] / А.А. Таранцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 3. – С. 82.
208. Таранцев, А.А. О связи интервального анализа с теорией вероятностей [Текст] / А.А. Таранцев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 3. – С. 60.
209. Таранцев, А.А. Оптимизация числа беспилотных летательных аппаратов для мониторинга пожаров крупных лесных массивов [Текст] / А.А. Таранцев, Ю.И. Чикитов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2015. – № 3 (35). – С. 1–9.
210. Терребнев, В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений [Текст] / В.В. Терребнев. – М.: Пожкнига, 2004 г. – 265 с.
211. Терребнев, В.В. Метод модификации векторного критерия для поиска наилучшего решения [Текст] / В.В. Терребнев, С.В. Баскаков, Д.В. Тараканов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 2. – С. 23–29.
212. Терребнев, В.В. Принятие решений при управлении силами и средствами на пожаре [Текст] / В.В. Терребнев, А.Е. Богданов, А.О. Семенов и др. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2012. – 100 с.
213. Терребнев, В.В. Программное средство для расчета параметров работы звеньев газодымозащитной службы на пожарах [Текст]: свидетельство об официальной регистрации программ ЭВМ №2014661680, 12.01.2015 / В.В. Терребнев, А.Б. Гордеев, Д.В. Тараканов.
214. Терребнев, В.В. Управление ресурсами пожарно-спасательных подразделений и технологическими операциями по тушению пожаров [Текст] / В.В. Терребнев, В.А. Грачёв, А.О. Семёнов // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 5. – С. 60–65.
215. Терребнев, В.В. Аналитические математические модели аварийно-спасательных и других неотложных работ, осуществляемых в ходе ликвидации чрезвычайных ситуаций [Текст] / В.В. Терребнев, В.А. Грачёв, Д.В. Тараканов //

Материалы VI МНПК Пожарная и аварийная безопасность. – Иваново: ИВИ ГПС МЧС России, 2008 – С. 134–138.

216. Теребнев, В.В. О терминах и определениях [Текст] / В.В. Теребнев, А.В. Подгрушный, А.О. Семенов и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18, № 3. – С. 21–28.

217. Теребнев, В.В. Принципы управления тушением пожара [Текст] / В.В. Теребнев, А.О. Семенов, И.В. Бурков // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 6. – С. 66–71.

218. Теребнев, В.В. Основы организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ [Текст] / В.В. Теребнев, А.О. Семенов, А.В. Подгрушный и др. – Екатеринбург: Калан, 2008. – 390 с.

219. Теребнев, В.В. Анализ и поддержка решений при тушении крупных пожаров [Текст] / В.В. Теребнев, А.О. Семенов, В.А. Смирнов и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 9. – С. 51–57.

220. Теребнев, В.В. Теоретические основы принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре [Текст] / В.В. Теребнев, А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 10. – С. 14–17.

221. Теребнев, В.В. Эволюция структуры управления силами и средствами на пожаре [Текст] / В.В. Теребнев, А.О. Семенов, Д.В. Тараканов // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 4. – С. 10–16.

222. Теребнев, В.В. Применение многокритериальных задач принятия решений при тушении крупных пожаров [Текст] / В.В. Теребнев, Д.В. Тараканов // Материалы XXI МНПК «Актуальные проблемы пожарной безопасности». Ч.2. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. – С. 299–301.

223. Теребнев, В.В. Оперативно-тактические задачи. Часть I. [Текст] / В.В. Теребнев, Д.В. Тараканов, В.А. Грачев. – Екатеринбург: Калан, 2010. – 406 с.

224. Теребнев, В.В. Программное средство для реализации алгоритма ранжирования вариантов распределения ресурсов пожарных подразделений по участкам тушения пожара [Текст]: свидетельство Роспатент о государственной

регистрации программы для ЭВМ №2014614899 от 12.05.2014 / В.В. Терещнев, Д.В. Тараканов, М.В. Илеменов.

225. Тетерин, И.М. Поддержка принятия решений по поиску пострадавших, эвакуации людей из зданий и организации тушения пожаров на основе теоретико-игровой модели [Текст]: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660875, 21.11.2013 / И.М. Тетерин, Н.Г. Топольский, Г.Н. Калашник и др.

226. Тетерин, И.М. Теоретико-игровые методы в системах поддержки принятия решений для руководителя тушения пожара [Электронный ресурс] / И.М. Тетерин // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 4. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-4/01-04-08.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018)

227. Тетерин, И.М. О мерах по оказанию методической помощи органам управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям [Текст] / И.М. Тетерин // Региональные и отраслевые проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в мирное и военное время доклады и выступления: сборник / под общей редакцией Ю.Л. Воробьева. – 1999. – С. 108–113

228. Тетерин, И.М. Методология разработки экспертных систем для оперативного управления пожарными подразделениями [Электронный ресурс] / И.М. Тетерин, В.М. Климовцов, Ю.В. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 5. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-5/07-05-08.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

229. Тетерин, И.М. Применение систем поддержки принятия решений руководителями оперативных подразделений при тушении пожаров в крупных городах [Электронный ресурс] / И.М. Тетерин, Н.Г. Топольский, В.М. Климовцов и др. // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 4. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-4/07-04-08.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

230. Тетерин, И.М. Об автоматизированной системе предотвращения пожаров при обнаружении токов утечки в электрооборудовании промышленных объектов [Электронный ресурс] / И.М. Тетерин, Н.Г. Топольский, Т.А. Нгуен //

Технологии техносферной безопасности. – 2011. – № 2 (36). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-2/01-02-11.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

231. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

232. Тивиг, Г. Система поддержки принятия клинических решений [Текст]: патент на изобретение RU 2 468 434, 08.10.2007 / Г. Тивиг, С. Хеблер, О. Рот и др.

233. Толмачев, В. И. Система поддержки принятия решений экипажа воздушного судна по предотвращению особых ситуаций [Текст]: патент на изобретение RU (11) 2 386 569, 20.04.2010 / В.И. Толмачев, В.И. Дмитриев, В.С. Мехоношин и др.

234. Толмачев, В.И. Устройство поддержки принятия решений по предотвращению особых ситуаций при выполнении полета на летательном аппарате [Текст]: патент на изобретение RU (11) 2 417 394, 18.05.2009 / В.И. Толмачев, В.С. Мехоношин, А.М. Лебедев.

235. Топольский, Н.Г. Поддержка принятия решений при проектировании и эксплуатации ледовой переправы [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014619630, 18.09.2014 / Н.Г. Топольский, Я.И. Городецкий, А.В. Мокшанцев.

236. Топольский, Н.Г. Поддержка принятия решения по спасению человека из здания с помощью спасательного комплекта в результате пожара и чрезвычайной ситуации [Текст]: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2013615259, 03.06.2013 / Н.Г. Топольский, Т.К. Нгуен, А.В. Мокшанцев.

237. Топольский, Н.Г. Автоматизированная система поддержки принятия управленческих решений при чрезвычайных ситуациях и пожарах с использованием платежной матрицы [Текст]: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2013617554, 20.08.2013 / Н.Г. Топольский, Т.К. Нгуен, Д.В. Псарев и др.

238. Топольский, Н.Г. Система поддержки принятия решений при спасении людей из высотных зданий [Текст]: Свидетельство о государственной реги-

страции программы для ЭВМ №2013615215, 30.05.2013 / Н.Г. Топольский, Т.К. Нгуен, Д.В. Псарев и др.

239. Топольский, Н.Г. Система поддержки принятия решения по определению несущей способности ледовой переправы при переброске техники [Текст]: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615766, 20.06.2013 / Н.Г. Топольский, В.В. Симаков, Я.И. Городецкий и др.

240. Топольский, Н.Г. Метод оценки уровня пожарной опасности промышленных предприятий [Текст]: свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014614314 от 22.04.2014 / Н.Г. Топольский, А.П. Баранов, Д.В. Тараканов.

241. Топольский, Н.Г. Поддержка принятия решений при проведении поисково-спасательных операций в условиях крайнего севера [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, Д.С. Береснев // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 5 (57). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-5/18-05-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

242. Топольский, Н.Г. Концепция информационно–аналитического обеспечения управления поисково-спасательными работами [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, Д.С. Береснев, А.А. Рыженко // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 4 (62). – С. 191–198. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-4/40-04-15.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

243. Топольский, Н.Г. Применение теории игр для решения задач обработки одновременных вызовов на происшествия [Текст] / Н.Г. Топольский, Ф.А. Исайкин // Материалы пятой международной конференции «Информатизация систем безопасности – 96» – М.: МИПБ МВД России, 1996. – С. 227–228.

244. Топольский, Н.Г. Анализ этапов развития концепции «Безопасный город» [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, С.А. Качанов, А.А. Рыженко // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 1 (65). – С. 178–186. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-1/42-01-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

245. Топольский, Н.Г. Принципы построения автоматизированных систем поддержки принятия решений в Государственной противопожарной службе

[Текст] / Н.Г. Топольский, В.М. Климовцов // Материалы 8 международного форума «Технологии безопасности». – М.: Защита ЭКСПО, 2003. – С. 285–286.

246. Топольский, Н.Г. Многокритериальная модель мониторинга пожара в здании для управления пожарно-спасательными подразделениями [Текст] / Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов, М.О. Баканов // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 5. – С. 26–33.

247. Топольский, Н.Г. Алгоритм ранжирования управленческих задач в системе поддержки принятия решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 2 (54). – URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-2/04-02-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

248. Топольский, Н.Г. Моделирование динамики параметров мониторинга пожара в здании на основе клеточных автоматов [Текст] / Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов // Матер. 25-й МНТК «Системы безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 585–588.

249. Топольский, Н.Г. Прогнозирование динамики пожара в здании по данным мониторинга температурных полей [Текст] / Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов // Труды XXII МНК Проблемы управления безопасностью сложных систем – 2014. – М.: ИПУ РА. – С. 252–254.

250. Топольский, Н.Г. Алгоритм прогнозирования температуры газовой среды в здании при пожаре по данным мониторинга [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов, Е.С. Варламов и др. // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 4 (56). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/25-04-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

251. Топольский, Н.Г. Адаптивная система поддержки деятельности центров управления в кризисных ситуациях [Текст]: монография / Н.Г. Топольский, Р.Ш. Хабибулин, А.А. Рыженко и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 151 с.



252. Торохов, С.В. «Риф Стринг–202» Расширяет границы возможного [Электронный ресурс] / С.В. Торохов // БДИ. – 2005 – Спецвыпуск № 6. URL: [http://mx1.algorithm.org/arch/63/63\\_5.pdf](http://mx1.algorithm.org/arch/63/63_5.pdf). (дата обращения 20.05.2018).

253. Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов [Текст] / Т. Тоффоли, Н. Марголус. – М.: Мир, 1991. – С. 283.

254. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений [Текст] / Э.А. Трахтенгерц // Проблемы управления. – 2003. – № 1. – С. 13–28.

255. Трахтенгерц, Э.А. Субъективность в стратегическом управлении [Текст] / Э.А. Трахтенгерц // Человеческий фактор в управлении: сборник трудов. – М.: КомКнига, 2006. – С. 408–438.

256. Трахтенгерц, Э.А. Эволюция компьютерных систем поддержки принятия управленческих решений [Текст] / Э.А. Трахтенгерц // Информационные технологии. – 2006. – № 51. – С. 1–32.

257. Трюйан, Р. Поддержка принятия клинических решений [Текст]: патент на изобретение RU 2 573 218, 27.08.2010 / Р Трюйан, А. А-М. Вербек.

258. Угорелов, В.А. Применение факторной оценки уровня пожарной опасности для обоснования проектных решений по противопожарной защите объектов строительства [Текст] / В.А. Угорелов, Д.Г. Пронин // Проектирование и обоснование противопожарной защиты уникальных объектов (НЭБ ПБС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко). Сборник научных статей – М.: Тисо Принт, 2010. – С. 28–34.

259. Фаворская, М.Н. Детектирование дыма на открытых пространствах в сложных погодных условиях с применением пространственно- временных локальных бинарных шаблонов [Текст] / М.Н. Фаворская, А.В. Пятаева // Информационно-управляющие системы. – 2016. – №1 (80). – С. 16–25.

260. Федоров, А.В. Автоматизация систем противопожарной защиты технологических процессов обеспечения функционирования спортивных сооружениях [Электронный ресурс] / А.В. Федоров, Е.Н. Ломаев, Ф.В. Демёхин // Техноло-

гии техносферной безопасности. – 2015. № 2 (60). – С. 49–55. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/03-02-15.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

261. Федосов, С.В. Математическая модель развития пожара в системе помещений [Текст] / С.В. Федосов., А.М. Ибрагимов, Р.А. Соловьев и др. // Вестник МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 121–128.

262. Хабибулин, Р.Ш. Компьютерная система поддержки принятия управленческих решений на основе методов ранжирования по предпочтительности и парных сравнений [Текст] / Р.Ш. Хабибулин, В.С. Шабалин, Д.В. Рубцов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий ЧС. – 2015. – Т. 2, № 1 (4). – С. 112–115.

263. Чистяков, И.М. Моделирование временных характеристик процесса функционирования газодымозащитной службы // Пожарная и аварийная безопасность [Текст] / И.М. Чистяков, Д.В. Тараканов, Е.Е. Соколов // Материалы ПХ МНПК / Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2012. – С. 204–207.

264. Членов, А.Н. Новые возможности управления противопожарной защитой объектов [Текст] / А.Н. Членов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 3. – С. 48–53.

265. Членов, А.Н. Особенности применения оптоволоконных каналов связи в автоматизированных системах охранно-пожарной сигнализации [Электронный ресурс] / А.Н. Членов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 3 (55). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/07-03-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

266. Членов, А.Н. Применение современных информационных технологий в автоматизированных системах противопожарной защиты [Электронный ресурс] / А.Н. Членов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 1 (53). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-1/07-01-14.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

267. Членов, А.Н. Оценка эффективности новых методов и технических средств обнаружения пожара [Электронный ресурс] / А.Н. Членов, Т.А. Буцынская, Ф.В. Демехин // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 3.

URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-3/01-03-08.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

268. Членов, А.Н. Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя [Текст] / А.Н. Членов, Т.А. Буцынская, С.Ю. Журавлев и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 12. – С. 55–60.

269. Членов, А.Н. Новые возможности применения видеодетекторов [Текст] / А.Н. Членов, И.Г. Дровникова, Ф.В. Демёхин // Вестник московского энергетического института. – 2010. – № 1. – С. 73–78.

270. Членов, А.Н. Методика оценки эффективности системы безопасности объектов дистанционного банковского обслуживания [Электронный ресурс] / А.Н. Членов, А.В. Климов // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 2 (60). – С. 205–211. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/28-02-15.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

271. Членов, А.Н. Совершенствование управления оперативными службами централизованной охраны объектов дистанционного банковского обслуживания [Электронный ресурс] / А.Н. Членов, А.В. Климов, Е.В. Самышкина // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 1 (65). – С. 306–311. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-1/24-01-16.ttb.pdf> (дата обращения 20.05.2018).

272. Чуприян, А.П. Анализ выездов пожарной охраны [Текст] / А.П. Чуприян, А.В. Матюшин, А.А. Порошин и др. // Актуальные проблемы пожарной безопасности: сборник материалов XXVII МНПК, посвященной 25-летию МЧС России в 3 частях. – 2015. – С. 174–183.

273. Шабалин, В.С. Программа для поддержки принятия решений при высылке сил и средств центра управления в кризисных ситуациях [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661559, 30.10.2014 / В. С. Шабалин, Р. Ш. Хабибулин, А. Л. Попов.

274. Шаров, В.А. Система контроля технологической дисциплины процесса управления движением поездов (СКТД) [Текст]: патент на изобретение RU (11) 2 307 041, 23.12.2005 / В. А. Шаров, Н. Г. Шабалин, И. К. Лакин и др.

275. Шаффер, Дж.Д. Обнаружение ошибок в машине логического вывода системы поддержки принятия клинического решения [Текст]: патент на изобретение RU 2 497 193, 10.12.2008 / Шаффер Дж.Д.

276. Шедько, С.В. Программа моделирования аварийных ситуаций, связанных с возникновением пожара на объектах морской техники, предназначенная для функционирования на суперкомпьютере. [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014610661, 15.01.2014 / С.В. Шедько, С.В. Ковальчук, Е.Н. Пушной.

277. Шихалев, Д.В. Компьютерное моделирование определения направлений безопасной эвакуации при пожаре [Текст] / Д.В. Шихалев, Р.Ш. Хабибулин // Материалы XIV Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – Томск: НПО ДиЛай, 2013. – С. 59.

278. Шихалев, Д.В. Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре [Текст] / Д.В. Шихалев, Р.Ш. Хабибулин // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 4. – С. 51–60.

279. Энелль, А. Способ компьютерный программный продукт и система обеспечения поддержки принятия клинического решения [Текст]: патент на изобретение RU 2 560 423, 20.08.2015 / А. Энелль, К. Валль, П. Форсгрэн и др.

280. Якуш, С.Е. Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы [Текст] / С.Е. Якуш, Р.К. Эсманский // Проблемы анализа риска. – 2009. – Т. 6, № 3. – С. 8–25.

281. Khorram-Manesh A. Two Validated Ways of Improving the Ability of Decision-Making in Emergencies; Results from a Literature Review [Текст] / A. Khorram-Manesh, J. Berlin, E. Carlström. Journal Bulletin of Emergency and Trauma. – 10 August 2016. – No. 4(4). – P. 186–196.

282. Chamberlain, D. Trials of teaching methods in basic life support (3): comparison of simulated CPR performance after first training and at 6 months, with a note on the value of re-training [Текст] / D. Chamberlain, A. Smith, M. Woollard, M.

Colquhoun, A.J. Handley, S. Leaves, K.B. Kern. Resuscitation. – 2002. – No. 53. – P. 179–187.

283. Mendonca, D. Designing Gaming Simulations for the Assessment of Group Decision Support Systems in Emergency Response [Текст] / D. Mendonca. Safety Science. – July 2006. – P. 120–126.

284. Dollar, P. Behavior recognition via sparse spatio-temporal features [Текст] / P. Dollar, V. Robaud, G. Cottrell, S. Belongie. 14 International Conference on Computer Communications and Networks, IEEE Computer Society. Washington, DC, USA. – 2005. – P. 65–72.

285. Zimmerman, D. Fire Fighter Safety and Survival [Текст] / D. Zimmerman. Jones & Bartlett Learning, 2013.

286. Doretto, G. Dynamic textures [Текст] / G. Doretto, A. Chiuso, Y. N. Wu, S. Soatto. International Journal of Computer Vision. – 2003. – No. 51 (2). – P. 91–109.

287. Dubois, S. A comparison of wavelet based spatio-temporal decomposition methods for dynamic texture recognition [Текст] / S. Dubois, R. Peteri, M. Menard. 4th Iberian Conference on Pattern Recognition 329 and Image Analysis, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. – 2009. – P. 314–321.

288. Eric Wai Ming Lee. Application of Artificial Neural Network to Building Compartment Design for Fire Safety [Текст] / Eric Wai Ming Lee, Po Chi Lau, Kitty Kit Yan Yuen. Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL. – 2006. – Vol. 4224. – P. 265–274.

289. Eric Wai Ming Lee. Application of Artificial Neural Network to Fire Safety Engineering [Текст] / Eric Wai Ming Lee. Handbook on Decision Making. – Vol. 4. – P. 369–395.

290. Fablet, R. Motion recognition using nonparametric image motion models estimated from temporal and multiscale cooccurrence statistics [Текст] / R. Fablet, P. Bouthemy. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2003. – No. 25 (12). – P. 1619–1624.

291. Fazekas, S. Analysis and performance evaluation of optical flow features for dynamic texture recognition [Текст] / S. Fazekas, D. Chetverikov. – Signal Processing: Image Communication, – 2007. – No. 22. – P. 680–691.

292. Fujii, M. Feature extraction of temporal texture based on spatiotemporal motion trajectory [Текст] / Fujii M., Horikoshi T., Otsuka K., Suzuki S. ICPR. Brisbane, Australia. – 1998. – Vol. II, No. 362.– P. 1047–1051.

293. Goncalves, W.N. A complex network approach for dynamic texture recognition [Текст] / Goncalves, W.N., Machado, B.B., Bruno, O.M. Neurocomputing. – 2015. – Vol. 153. – P. 211–220.

294. Goncalves, W.N. Dynamic texture analysis and segmentation using deterministic partially self-avoiding walks [Текст] / Goncalves, W.N., Bruno, O.M. Expert Systems with Applications. – 2013. – No.40 (11). – P. 4283–4300.

295. Gretener, M. Versuch zur rechnerischen Bestimmung der Brandgefährdung von Industrie- und Objekten. Internationales Brandschutzseminar; 3 [Kongress] (Attempt to calculate the fire risk of industrial and other objects [Текст] / M. Gretener. Third International Fire Protection Symposium.) Eindhoven, 1968. – P. 34–38.

296. Hao Cheng. The modeling of fire spread in buildings by Bayesian network [Текст] / Hao Cheng, George V. Hadjisophocleous. Fire Safety Journal. – 2009. – No. 4(6). – P. 901–908.

297. Hu, W. A. Survey on visual 316 content-based video indexing and retrieval [Текст] / Hu, W. A, Xie, N., Li, L., Zeng, X., Maybank, S.J. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 2011. – Part C (Applications and Reviews). – No. 41 (6). – P. 797–819

298. Hultquist, H. Evaluation of a Fire Risk Index Method for Multistorey Apartment Buildings [Текст] / Hultquist, H., Karlsson, B. – Lund University, Sweden, (2000). – Report No. 3088.

299. Karlsson, B. Fire Risk Index Method – Multi Storey Apartment Buildings. FRIM-MAB [Текст] / B. Karlsson. – 2002 – Version 2.0. Trätek, Rapport 212053.

300. Klaene B.J. Structural fire fighting [Текст] / Klaene B.J. and Sanders R.E. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2000. – P. 305.

301. Lean, Yu. A distance-based group decision-making methodology for multi-person multi-criteria emergency decision support [Текст] / Lean, Yu, Kin Keung Lai. Journal Elsevier. – 2010. – No. 2. – P. 287–295.

302. Markus Scholz. A Concept for Support of Firefighter Frontline Communication [Текст] / Markus Scholz, Dawud Gordon, Leonardo Ramirez, Stephan Sigg, Tobias Dyrks, Michael Beig. Future Internet. – 2013. – Vol.5, no. 2. – P. 113–127.

303. Matthieu Luras. Event-Cloud Platform to Support Decision Making in Emergency Management [Текст] / Matthieu Luras, Frederick Benaben, Sebastien Truptil, Aurelie Charles. Information Systems Frontiers, Springer Verlag (Germany). – 2015. – No. 17 (4). – P. 857–869

304. Mehdi Ben Lazreg. SmartRescue: Architecture for Fire Crisis Assessment and Prediction [Электронный ресурс] / Mehdi Ben Lazreg, Jaziar Radianti, Ole-Christoffer Granmo. Proceedings of the ISCRAM 2015 Conference – Kristiansand, May 24–27. URL: <http://iscram2015.uia.no/wp-content/uploads/2015/05/10-1.pdf>. (дата обращения 20.05.2018).

305. Michael Lee Successful. Rapid Primary Searches and Victim Location [Электронный ресурс] / Michael Lee Successful. – 2008. URL: <https://www.firerescue1.com/rescue/articles/332821-Successful-Rapid-Primary-Searches-and-VictimLocation/> (дата обращения 20.05.2018).

306. Naim Kapucu. Collaborative Decision-Making in Emergency and Disaster Management [Текст] / Naim Kapucu, Vener Garayev. International Journal of Public Administration. – 2011. – No. 34. – P. 366–375.

307. Norman, J. Fire Officer's Handbook of Tactics [Текст] / J. Norman. Fire Engineering. PennWell, 2012. – P. 58.

308. Polana, R. Temporal texture and activity recognition [Текст] / R. Polana, R. C. Nelson // Motion-Based Recognition. – 1997. – Chapter 5. – P. 87–115.

309. Pyataeva, A. Spatio-temporal smoke clustering in outdoor scenes based on boosted random forests [Текст] / М. Favorskaya, А. Pyataeva, А. Попов // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 96. – P. 762–771.

310. Qing Gu. Group information foraging in emergency re–response an illustration incorporating discrete-event simulation [Текст] / Qing Gu, David Mendonça. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Vol. 49, pp. 432-445, 2003.
311. Renshaw, Geoff. Maths for Economics [Текст] / Geoff. Renshaw. – New York : Oxford University Press, 2005. – P. 516–526.
312. Sanae Khali Issa. Vulnerability Analysis of Fire Spreading in a Building using Fuzzy Logic and its Integration in a Decision Support System [Текст] / Sanae Khali Issa, Abdellah Azmani, Benaissa Amami. International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 76 (6). – P. 48– 53.
313. Sung Ye Kim. Mobile analytics for emergency response and training [Текст] / Sung Ye Kim, Ross Maciejewski, Karl Ostmo, Edward J. Delp, Timothy F. Collins, David S. Ebert. Information Visualization. – 2008. – 1–12. – Vol. 7. – P. 77–88.
314. SungYe Kim. Visual Analytics on Mobile Devices for Emergency Response [Текст] / SungYe Kim, Yun Jang, Angela Mellema, David S. Ebert, Timothy Collins. Conference: Visual Analytics Science and Technology. – October 2007. – P. 35–42.
315. Tiejun Cheng. A Group Decision Making Methodology for Emergency Decision [Текст] / Tiejun Cheng, Fengping Wu, Yanping Chen. IJCSI International Journal of Computer Science Issues. – January 2013 – Vol. 10. – Issue 1. – No 3. – P. 151–157.
316. Toffoli T. Cellular Automata Machines [Текст] / T. Toffoli, N. Margolus. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1987. – P. 279.
317. Liana Manukyan. Montandon, Anamarija Fofonjka, Stanislav Smirnov & Michel C. Milinkovitch. A living mesoscopic cellular automaton made of skin scales [Текст] / Liana Manukyan, Sophie A. Nature. – 2017. – Vol. 544. – P. 173–179.
318. Wolfram S. Theory and applications of cellular automata: (including selected papers 1983–1986) [Текст] / S. Wolfram. Singapore : World Scientific, 1986. – P. 290.



319. Tanklevskiy L. Electrically controlled dynamic sprinkler activation: computational assessment of potential efficiency [Текст] / L. Tanklevskiy, A. Tsoy, A. Snegirev. Fire Safety Journal. 2017. T. 91. C. 614–623.

320. Xiaodong Chen. The fire vulnerability evaluation of the old building based on fuzzy comprehensive assessment method [Текст] / Xiaodong Chen, Yongjun Liu, Yangyang Liu. 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering, 2015. – P. 642–647.

321. Xing Zhi Xiang. Design and Implementation of City Fire Rescue Decision Support System [Текст] / Xing Zhi Xiang, Gao Wen Li, Zhao Xiao Fang, Zhu De Zhi . Procedia Engineering, 15 March 2013. – P. 483.

322. Zhao, G. Dynamic Texture Recognition Using Volume Local Binary Patterns [Текст] / Zhao G, Pietikäinen M. In: Vidal R, Heyden A, Ma Y (eds) Dynamical Vision. – 2007. – P. 165–177.

323. Zheng, H. Adaptive edge-based mean shift for drastic change gray target tracking[Текст] / H. Zheng, X. Mao, L. Chen, X. Liang. Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2015. – Vol. 126. – Issue 23. – P. 3859–3867.

324. Zho, H.A Novel Extended Local–Binary–Pattern Operator for Texture Analysis[Текст] / H. Zho, R. Wang, C. Wang. Information Sciences. – 2008. – Vol.178. – Issue 2. – P. 4314–4325.

325. Zhong H. Detecting unusual activity in video. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [Текст] / Zhong H., Shi J., Visontai M. Washington, USA, 2004. – P. 819–826.

## **Приложение 1**

**Статистические данные по пожарам в зданиях**

Таблица П1.1 – Динамика абсолютных показателей строительства в Российской Федерации за период 2001–2015 гг.

Параметры	Число зданий														
	Общая строительная площадь, млн. м <sup>2</sup>														
	год	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
введено в действие зданий - всего	124976	130789	132494	132014	141618	159033	209893	224635	233319	216541	227111	241343	258121	304194	306391
	47,6	49,6	53,7	60	66,3	75,6	98,1	102,5	95,1	91,5	98,9	110,1	117,8	138,6	139,4
<i>в том числе:</i>															
Жилого назначения	114358	119727	119759	121346	131043	148721	194612	208888	217253	201758	211182	223002	239086	282956	286129
	38,2	40,5	43,4	49,3	54,8	62,3	74,5	79,2	72,5	70,3	77,2	82	87,1	104,4	106,2
Нежилого назначения	10618	11062	12735	10668	10575	10312	15281	15747	16066	14783	15929	18341	19035	21238	20262
	9,4	9,1	10,3	10,7	11,5	13,3	23,6	23,3	22,6	21,2	21,6	28,1	30,7	34,2	33,2
<i>из них:</i>															
Промышленный	2857	2792	4494	2285	2211	1951	2600	3005	3081	2688	2722	3097	2970	3364	3145
	3	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	3,7	4,1	4,1	4,3	3,4	4,5	4,2	5,2	4,8
Сельскохозяйственные	1202	974	726	746	666	1094	1668	1939	2253	1811	1928	2828	2127	2337	2494
	1	1	0,8	0,8	0,8	1,5	2,7	3,3	3,7	3,3	3,4	5,1	4,4	4,6	5,1
Коммерческие	2369	2867	3260	3742	3801	3701	5528	5482	5405	5974	6128	7391	8332	9237	8419
	1,1	1,5	2,3	2,9	3,5	3,9	9,4	8	7,7	6,9	7,7	9,7	11,7	14,5	13,7
Административные	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800	968	1135	1234	1362	1257
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	1,7	2,1	2,2	2,5	2,1
Учебные	601	922	503	527	447	544	650	581	585	526	702	662	909	1132	1228
	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,4	2,1	2	1,8	1,8	2,2	2,9	3,3	3,9	4,5
Системы здравоохранения	652	618	527	621	540	573	706	625	655	698	730	521	667	662	765
	1	1,1	1	1,1	1	1,3	1,2	1,2	1	1,4	1,3	1,1	1,3	0,8	0,9
Другие	2937	2889	3225	2747	2910	2449	4129	4115	4087	3886	3719	3842	4030	4506	4211
	1,9	1,7	2,2	2,1	2,4	2,7	4,5	4,7	4,3	3,5	3,6	4,8	5,8	5,2	4,2

Таблица П1.2 – Показатели обстановки с пожарами в зданиях в Российской Федерации

<i>N</i>	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	12278	12413	10779	10390	9360	8619	8043	7232	5863	5752	3814	3459	3137	3099	2930
	313360	235491	672737	701832	1655287	1953577	1011868	2799248	2436297	4392062	2204592	2337422	924216	1244516	2868191
	578	584	556	507	428	421	386	365	222	215	159	142	95	113	95
2	7426	7964	7698	7258	7046	6720	6373	5687	4983	4966	4080	3831	3568	3212	3037
	340578	375559	467094	505621	774197	1213951	1089729	1191163	1162015	1105351	1312132	1523165	2206907	2371965	2718646
	114	82	93	80	90	77	43	56	37	30	29	17	18	16	32
3	1263	1372	1074	937	694	572	577	431	353	309	348	333	270	228	290
	18710	28313	28714	30431	25984	53173	26206	25005	16289	45134	25023	59617	39023	56337	125222
	32	12	61	17	11	6	12	5	4	1	3	1	4	1	2
4	575	652	472	344	311	230	209	155	89	72	348	333	270	228	290
	3955	6266	4239	4946	4195	3958	5828	3758	3656	10640	25023	59617	39023	56337	125222
	8	9	9	7	3	6	2	2	0	0	3	1	4	1	2
5	749	860	688	653	616	594	447	398	377	359	376	323	305	266	262
	24027	64414	23989	49053	31654	41576	43299	116051	57203	52640	40089	99333	54747	83035	95714
	6	16	13	9	7	8	13	4	102	3	5	1	1	1	1
6	901	883	738	674	606	475	446	362	355	313	251	217	223	192	171
	16244	13494	12979	11366	14625	16711	27121	28032	48186	27885	22574	29821	39202	34741	29401
	45	50	21	30	45	74	122	12	30	17	7	3	83	9	26
7	2810	2762	2576	2550	2484	2364	2260	2024	2329	2089	1101	969	938	880	910
	47201	70130	104939	184925	135503	206594	166729	222722	248610	463433	201333	47883	189756	408119	352962
	62	68	55	48	55	45	66	37	96	57	18	12	14	20	11
8	179253	189679	173250	168439	166362	159191	151758	143775	134904	128040	119336	113250	104592	103579	100498
	1390798	2015327	2136491	2408926	2877395	3565061	4312394	5135248	4801714	5845663	5450893	4933670	4450833	5214726	4939457
	16399	18039	17393	16896	16614	15365	14204	13731	12637	12081	11049	10740	9659	9339	8515

Продолжение таблицы П1.2

9	104799	107296	99887	96696	94777	90478	85412	81733	74739	72663	66930	64204	58867	57724	55132
	831924	1189934	1240346	1444530	1722536	2181721	2605756	3187255	2876633	3723476	3477132	3025181	2880661	3323648	3135179
	13973	15307	14950	14350	14182	13057	12077	11586	10745	10284	9406	9167	8234	7869	7065
10	2755	3076	2380	2141	2126	1952	1677	1487	933	884	776	680	694	617	552
	81371	117599	100265	88414	122989	125872	120392	163776	105376	151343	204378	316727	483056	593424	2129714
	90	74	96	65	60	57	68	41	35	28	24	22	22	14	8
11	1214	1190	1102	991	938	937	1084	995	1152	1058	1002	952	978	976	977
	16941	23896	26011	16230	91067	46722	155029	61036	92384	192251	239666	101873	283359	158916	153099
	50	58	59	63	35	53	63	47	56	41	52	38	38	29	40
12	1650	1593	1564	1515	1470	1424	1413	1366	1338	1274	1145	1095	1098	927	896
	8157	24192	15010	1030768	15863	32650	35917	370380	132735	114390	76007	201289	236681	1202446	314255
	42	62	60	62	71	64	68	56	63	63	64	62	63	57	38

*Примечание:* 1 – здание производственного назначения; 2 – здание торгового предприятия; 3 – здание образовательного учреждения; 4 – здание детского учреждения; 5 – здание культурно-зрелищного учреждения; 6 – здание лечебно-профилактического учреждения; 7 – здание административно-общественного учреждения; 8 – здание жилого сектора; 9 – жилой дом; 10 – здание сельско-хозяйственного назначения; 11 – строящееся здание; 12 – сооружение, установка. Показатели в таблице П1.2: количество пожаров, ед; прямой материальный ущерб, тыс. руб.; погибло человек, чел.

Таблица П1.3 – Показатели крупных пожаров в России в зданиях различного функционального назначения

<i>N</i>	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	34	46	27	23	20	24	20	20	19	28	20	17	6	12	15
	187845	75310	487444	481457	1374912	1597731	597153	2200599	1725577	3564196	1774111	1960456	426463	749252	2356614
2	33	73	33	31	25	31	28	13	6	7	15	13	12	11	13
	186128	173392	203976	168940	358191	704769	464089	484636	470354	254560	646792	787457	1471025	1706766	2129306
3	6	4	2	2	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
	5114	12464	9724	6942	10874	27576	0	0	0	15455	0	27050	0	0	98717
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27050	0	0	98717
5	8	5	1	3	1	1	1	2	1	0	0	2	1	0	1
	9511	44503	4430	23059	5500	3221	11498	80232	17960	0	0	70472	20000	0	65300
6	3	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	6674	2169	0	0	0	0	8619	0	17000	0	0	0	0	0	0
7	5	19	6	8	5	4	4	5	1	6	2	5	2	4	4
	4830	20658	42676	100584	49736	82996	37434	57918	20327	252313	40956	336922	60200	283088	204630
8	44	103	12	7	17	12	17	7	1	7	10	7	5	7	5
	40975	125381	84088	27850	83503	86138	129080	77848	18000	379061	267669	521721	176782	344320	138700
9	24	63	9	4	11	9	11	5	1	5	9	4	3	5	5
	22610	87413	25268	13195	49134	75376	54381	57861	18000	342117	247749	206124	104627	178369	138700
10	11	22	3	1	2	1	1	0	0	1	0	3	3	4	7
	10367	23621	17209	2937	8311	4236	4394	0	0	25361	0	183367	267633	484967	1951200
11	2	8	4	0	4	1	3	2	0	2	1	1	2	1	2
	5568	9905	9806	0	59423	12100	112353	17878	0	76365	140152	18610	140202	40520	66533
12	1	6	1	3	0	1	0	3	1	1	1	3	2	4	2
	1555	15612	2201	1015634	0	4700	0	322201	94025	74537	15870	123825	170862	1111763	252167

Таблица П1.4 – Показатели гибели пожарных при тушении пожаров в России

Объект пожара	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Здание производственного назначения	0	7	0	0	1	1	0	1	0	0	3	1	2	0	0	1	1	0	2	0	0	2
Складское здание	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Здание торгового предприятия и сервисного обслуживания населения	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	8
Здание образовательного учреждения	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Здание культурно-зрелищного учреждения	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Здание профилактического учреждения	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Здание административно-общественного учреждения	0	1	0	0	0	4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Здание жилого сектора	13	10	8	7	17	4	6	1	5	9	2	9	4	5	2	6	3	3	1	3	3	8
Здание сельскохозяйственного назначения	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Строящееся здание	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Сооружения, установки	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Места открытого хранения материалов, с/х угодья	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Транспортное средство	1	0	1	1	0	0	1	0	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Другие объекты пожара	0	1	0	0	1	2	0	2	1	1	1	0	0	5	0	0	0	0	1	1	1	1
Всего по России	17	24	10	13	20	13	7	6	13	15	8	11	6	12	5	7	6	3	5	8	5	19

Таблица П1.5 – Показатели травмирования пожарных при тушении пожаров в России

Объект пожара	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Здание производственного назначения	38	32	35	23	43	40	23	29	21	24	20	10	20	16	14	3	8	10	1	6	1	2
Складское здание	1	2	1	4	1	2	4	4	1	4	2	2	1	1	0	7	3	5	5	1	2	2
Здание торгового предприятия	7	11	4	7	12	4	5	14	6	13	3	4	4	2	3	2	6	3	1	3	5	1
Здание образовательного учреждения	10	8	5	2	5	3	6	7	3	1	0	0	0	2	0	1	0	2	0	0	0	0
Здание культурно-зрелищного учреждения	6	2	3	4	2	4	0	0	2	1	0	1	4	0	1	3	1	3	2	2	2	0
Здание лечебного учреждения	9	2	0	2	3	0	1	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Здание административно-общественного учреждения	24	16	15	26	6	15	6	9	19	2	3	5	7	10	4	0	0	6	0	6	2	2
Здание жилого сектора	150	161	145	153	140	127	148	128	97	97	83	90	85	46	41	50	41	44	36	38	33	24
Здание с/х назначения	1	1	3	5	1	2	7	4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Строящееся здание	3	4	3	5	4	3	1	6	2	3	0	2	1	6	0	3	1	1	1	0	0	1
Сооружения, установки	26	5	4	7	7	2	4	2	0	17	2	4	0	0	0	1	0	0	2	4	0	0
Места открытого хранения	2	5	8	6	6	25	3	8	1	3	3	5	0	1	8	0	6	3	10	2	1	4
Транспортное средство	5	2	4	3	6	4	6	5	2	3	2	7	2	4	2	0	0	0	3	2	0	0
Другие объекты пожара	6	23	3	11	0	10	9	12	8	8	12	8	7	6	1	10	4	4	6	7	5	6
Всего по России	288	274	233	258	236	241	223	230	162	177	131	138	132	94	75	80	70	82	67	71	51	42



Таблица П1.6 – Показатели работы пожарной сигнализации по всем видам зданий

Год	Всего	Задачу выполнила	Задачу не выполнила	Не сработала	Не включена
1993	818	300	47	311	157
1994	615	232	38	222	222
1995	786	280	34	270	202
1996	750	291	44	251	164
1997	749	293	43	251	162
1998	946	384	43	318	201
1999	1178	350	32	366	430
2000	1156	420	30	295	410
2001	1158	494	34	337	293
2002	870	432	65	315	67
2003	868	419	53	295	101
2004	835	451	40	278	66
2005	906	445	45	363	54
2006	825	464	31	286	44
2007	860	506	37	262	51
2008	855	534	42	159	106
2009	1021	687	3	207	124
2010	981	703	3	206	69
2011	820	608		146	62
2012	1005	743		215	47
2013	1223	858		308	57
2014	1179	948		190	38
2015	1146	951		155	40
2016	1044	882		125	37
2017	1028	854		128	47

Таблица П1.7 – Показатели работы пожарной сигнализации по промышленным зданиям

Год	Всего	Задачу выполнила	Задачу не выполнила	Не сработала	Не включена
1993	208	96	13	61	37
1994	150	70	9	40	31
1995	207	91	9	62	45
1996	177	101	9	39	28
1997	138	64	11	36	27
1998	192	92	11	46	43
1999	154	73	7	45	29
2000	168	104	4	32	28
2001	195	116	4	64	11
2002	134	71	12	45	9
2003	150	80	7	51	12
2004	116	72	7	29	8
2005	99	61	4	30	4
2006	86	55	3	23	5
2007	92	65	6	17	4
2008	112	70	5	31	6
2009	109	86	0	18	5
2010	141	108	1	24	8
2011	114	97		13	3
2012	131	100		24	6
2013	177	144		28	5
2014	178	158		16	4
2015	213	177		28	8
2016	207	184		15	8
2017	186	158		21	7

Таблица П.1.8 – Показатели работы пожарной сигнализации по жилым зданиям

Год	Всего	Задачу выполнила	Задачу не выполнила	Не сработала	Не включена
1993	106	13	1	74	18
1994	92	14	3	63	12
1995	81	9	3	40	29
1996	118	14	5	82	17
1997	120	20	2	67	31
1998	178	39	3	100	36
1999	456	31	2	163	260
2000	468	47	5	125	291
2001	341	36	2	106	195
2002	161	44	11	100	6
2003	157	44	6	82	25
2004	178	50	3	107	18
2005	270	50	3	209	9
2006	250	58	4	179	9
2007	254	65	8	161	17
2008	204	82	4	50	60
2009	247	101	0	62	84
2010	203	104	1	64	34
2011	176	94		50	30
2012	238	120		109	10
2013	367	156		180	31
2014	280	198		75	6
2015	217	175		38	4
2016	182	137		41	4
2017	193	147		36	10

Таблица П.1.9 – Показатели работы пожарной сигнализации по социальным зданиям

Год	Всего	Задачу выполнила	Задачу не выполнила	Не сработала	Не включена
1993	303	117	16	108	60
1994	234	100	16	70	48
1995	298	112	12	103	71
1996	268	105	14	79	70
1997	286	110	15	105	56
1998	295	109	13	105	68
1999	275	107	6	93	69
2000	229	121	9	61	38
2001	273	144	7	96	26
2002	245	142	13	83	11
2003	248	141	12	76	20
2004	249	150	11	70	18
2005	247	167	14	55	11
2006	210	155	12	33	10
2007	260	203	9	33	14
2008	267	198	17	31	20
2009	345	271	1	57	16
2010	317	266	1	43	7
2011	227	196		25	6
2012	258	217		35	6
2013	304	253		42	9
2014	313	269		38	6
2015	297	256		36	5
2016	248	225		17	6
2017	258	218		27	13

Таблица П1.10 – Показатели работы пожарной сигнализации по торговым зданиям

Год	Всего	Задачу выполнила	Задачу не выполнила	Не сработала	Не включена
1993	84	34	11	23	16
1994	62	24	6	19	13
1995	106	33	6	35	32
1996	106	43	12	26	25
1997	177	85	14	37	41
1998	261	130	16	64	51
1999	261	121	17	62	61
2000	261	135	10	68	48
2001	315	178	20	60	57
2002	301	158	28	78	39
2003	282	140	25	77	40
2004	254	155	19	61	19
2005	270	152	23	66	29
2006	257	185	11	42	19
2007	222	147	14	46	15
2008	249	170	15	43	17
2009	289	207	2	66	14
2010	286	202	0	67	17
2011	268	193		52	22
2012	326	276		38	12
2013	329	269		48	12
2014	363	286		55	20
2015	370	304		46	20
2016	343	287		44	12
2017	358	306		40	13

Источники информации: 1. Статистические сборники с 2001 по 2015 гг: Россия в цифрах / Росстат. М.: Федеральная служба государственной статистики; 2. Статистические сборники с 1993 по 2017 гг: Пожары и пожарная безопасность М.: ВНИИПО (г. Балашиха)

**Приложение 2**

**Регрессионные модели действий по тушению пожара**

Процедуры регрессионного анализа модели действий по тушению пожаров в зданиях с учетом степени влияния опасных факторов пожара и условий видимости в дыму на процесс движения по выбранному маршруту аппроксимируются степенной функцией. Для этого использован следующий алгоритм обработки экспериментальных данных:

**Этап 1. Переход от степенной функции к линейной модели первого порядка**

Степенная функция первого порядка имеет вид:

$$F = A\Omega^\alpha \quad (\text{П2.1})$$

где  $F$  значение коэффициента снижения скорости движения звена ГДЗС от видимости;  $\Omega$  – видимость на маршруте, м;  $\alpha$  и  $A$  – коэффициенты аппроксимации.

Применим над функцией (П2.1) следующее преобразование

$$\ln F = \ln A + \alpha \ln \Omega \quad (\text{П2.2})$$

Для удобства анализа введем следующие обозначения:

$$\ln F_i = y_i, \ln A = b_0, \ln \Omega_i = x, \alpha = b_1 \quad (\text{П2.3})$$

Получаем линейную модель первого порядка

$$y_i = b_0 + b_1 x_i \quad (\text{П2.4})$$

**Этап 2. Расчет коэффициентов аппроксимации**

Коэффициенты модели (П2.4)  $b_0$  и  $b_1$  рассчитываются по формулам:

Свободный член  $b_0$  определяется так

$$b_0 = y_{cp} + b_1 x_{cp} \quad (\text{П2.5})$$

в формуле (П2.5), входящие компоненты рассчитываются по формулам:

коэффициент  $b_1$

$$b_1 = \frac{D}{B} \quad (\text{П2.6})$$

$$D = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp}) \quad (\text{П2.7})$$

$$B = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2 \quad (\text{П2.8})$$

средние значения величин  $y_{cp}$  и  $x_{cp}$  рассчитываются так

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{П2.9})$$

$$y_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{П2.10})$$

Вычислив значения  $b_0$  и  $b_1$  линейной модели по формулам (П2.5) определяем значения констант степенной функции  $A$  и  $\alpha$ .

### **Этап 3. Оценка достоверности аппроксимации**

Для оценки достоверности аппроксимации рассчитывают коэффициент  $R^2$ , при значениях коэффициента  $R^2$  близких к единице считается, что модель удовлетворяет требованиям достоверности.

Коэффициент достоверности аппроксимации определяют по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{S_1}{S_2} \quad (\text{П2.11})$$

где  $S_1$  – сумма квадратов остатков;  $S_2$  – общая сумма квадратов.

Сумма квадратов остатков определяют по формуле

$$S_1 = \sum_{i=2}^n (F_i - \hat{F}_i)^2 \quad (\text{П2.12})$$

где  $\hat{F}_i$  – значение степенной функции в  $i$ -ой точке.

Значение степенной функции рассчитывают по формуле:

$$\hat{F}_i = A \cdot \Omega^\alpha . \quad (\text{П2.13})$$

Общую сумму квадратов определяют так,

$$S_2 = \sum_{i=2}^n (F_i - \hat{F}_{cp})^2 \quad (\text{П2.14})$$

Среднее значение  $\hat{F}_{cp}$  рассчитывают по формуле

$$\hat{F}_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{F}_i \quad (\text{П2.15})$$



При значениях  $R^2$  близких к единице для оценки возможности сделать вывод о наличии функциональной зависимости оценивают ошибку модели (%):

$$s = \sqrt{\frac{S_1}{n-1}} \cdot 100\% \quad (\text{П2.16})$$

при  $s < 5\%$  можно говорить о наличии функциональной зависимости.

Данные наблюдений и результаты их математического анализа представлены в таблице П2.1.

Таблица П2.1 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных

$\Omega$	$F$	$x$	$y$	$(x_i - x_{cp})^2$	$\frac{(x_i - x_{cp}) \cdot (y_i - y_{cp})}{(y_i - y_{cp})}$	$(F_i - \hat{F}_{cp})^2$	$\hat{F}$	$(F_i - \hat{F}_i)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0,570	0,693	-0,562	2,006	0,447	0,052	0,574	0,000
7	0,780	1,946	-0,248	0,027	0,000	0,000	0,738	0,002
11	0,840	2,398	-0,174	0,083	0,021	0,002	0,808	0,001
30	1,000	3,401	0,000	1,668	0,318	0,041	0,987	0,000
О	$F_{cp}=0,798$	$x_{cp}=2,11$	$y_{cp}=-0,246$	$B=3,784$	$D=0,787$	$S_2=0,095$	$\hat{F}_{cp}=3,107$	$S_1=0,003$

Параметр линейной модели  $b_1$  и параметр степенной модели  $\alpha$ , составляют величины:

$$b_1 = \frac{D}{B} = \frac{0,787}{3,784} = 0,208 \rightarrow \alpha = b_1 = 0,208$$

где  $D$  значение из столбца 6, а  $B$  значение столбца 5 таблицы П2.1.

Параметр линейной модели  $b_0$  равен:

$$b_0 = y_{cp} - b_1 x_{cp} = -0,246 - 0,208 \cdot 2,11 = -0,685.$$

Тогда параметр степенной модели  $A$ , равен

$$A = \exp(b_0) = \exp(-0,685) = 0,504$$

где значения  $y_{cp}$  и  $x_{cp}$  из столбцов 3 и 4 таблицы П2.1.

Тогда функциональная зависимость значений коэффициента от условий видимости записывается следующим образом:

$$\hat{F} = A \cdot \Omega^\alpha = 0,5 \cdot \Omega^{0,2}.$$

Рассчитаем значение коэффициента достоверности аппроксимации:

$$R = 1 - \frac{S_1}{S_2} = 1 - \frac{0,003}{0,095} = 0,968$$

где  $S_1$  и  $S_2$  значения из столбцов 7 и 9 таблицы П2.1.

Ошибка модели ( $s$ , %) составляет величину:

$$s = \sqrt{\frac{S_1}{n-1}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{0,003}{4-1}} \cdot 100\% = 3\%$$

Так как  $s < 5\%$ , то делаем вывод, что степенная зависимость является функциональной зависимостью для рассматриваемых эмпирических данных.

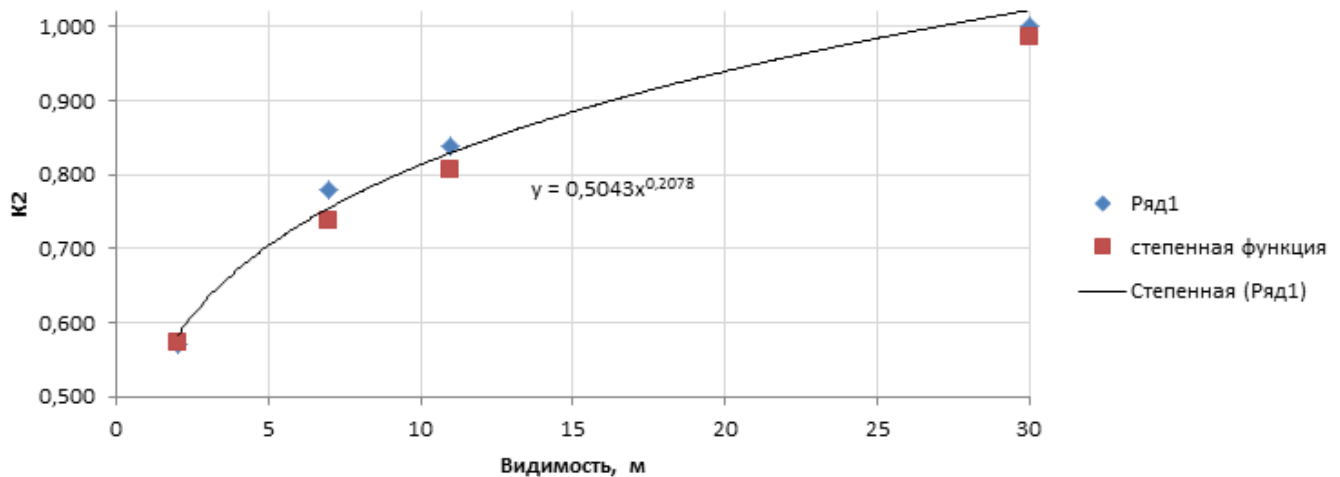


Рисунок П2.1 – Сравнение эмпирических и теоретических данных

Таким образом, влияние условий видимости на скорость движения звена газодымозащитной службы, выражается через коэффициент

$$K_2 = A \cdot \Omega^\alpha$$

где  $\Omega$  – средняя видимость на участке движения звена, м;  $A = 0,5$  и  $\alpha = 0,2$  эмпирические коэффициенты.

**Приложение 3**

**Статистический анализ результатов исследования**

Методика статистического анализа результатов исследования. Представим зависимость максимального выигрыша во времени от расстояния до входа на этаж в виде линейной модели первого порядка:

$$\Delta = \beta_0 + \beta_1 \cdot N + \varepsilon \quad (\text{ПЗ.1})$$

где  $\beta_0$  и  $\beta_1$  – параметры модели,  $\text{с} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $\varepsilon$  – нормально распределенная ошибка модели, с.

Так как при нулевом значении расстояния от входа в здание до условного очага принимается, что выигрыш во времени 0, тогда модель имеет вид:

$$\Delta = \beta_1 \cdot N + \varepsilon, \text{ с} \quad (\text{ПЗ.2})$$

Пусть значение параметра  $\beta_1$  в модели неизвестны в таком случае необходимо найти по данным наблюдения  $(\Delta_i, N_i), i = 1, \dots, n$ .

Пусть известна функция вида

$$\bar{\Delta}_i = b_1 \cdot N_i + e_i, \text{ с} \quad (\text{ПЗ.3})$$

где  $\bar{\Delta}_i$  – предсказанное моделью значение  $\Delta_i$  при заданном значении  $N_i$ ,  $b_1$  – выборочная оценка параметра модели  $\beta_1$ , а  $e_i = \Delta_i - \bar{\Delta}_i$  – ошибка аппроксимации.

Средние значения по формуле

$$N_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (\text{м}) \quad (\text{ПЗ.4})$$

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.5})$$

Расчет выборочной оценки  $b_1$  осуществляется по формуле

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2}, (\text{с} \cdot \text{м}^{-1}) \quad (\text{ПЗ.6})$$

Стандартная ошибка выборочной оценки  $b_1$  рассчитывается по формуле

$$S_b = S_e \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i^2}} \quad (\text{с} \cdot \text{м}^{-1}) \quad (\text{ПЗ.7})$$

Стандартная ошибка для предсказываемого моделью значения рассчитывается по формуле

$$S_{\bar{\Delta}_i} = S_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(N_i - N_{cp})^2}{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{cp})^2}} \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.8})$$

В формулах (ПЗ.7) и (ПЗ.8) параметр  $S_e$  – стандартная ошибка аппроксимации вычисляется по формуле:

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2}, \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.9})$$

где  $\bar{\Delta}_i$  рассчитывается по формуле (ПЗ.3) при условии, что  $e_i=0$ .

Существует два подхода к оценке истинного значения исследуемой величины:

1. По расчету истинного значения параметра модели для этого

$$\bar{\Delta}_{\min i} < \Delta_i < \bar{\Delta}_{\max i} \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.10})$$

Минимальное значение для  $i$ -го значения величины  $N$  рассчитывается по формуле

$$\bar{\Delta}_{\min i} = (b_1 - t_p \cdot S_b) N_i \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.11})$$

В свою очередь максимальное значение –

$$\bar{\Delta}_{\max i} = (b_1 + t_p \cdot S_b) N_i \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.12})$$

В этом случае истинное значение модели записывается так

$$\Delta_i = \bar{\Delta}_i \left( 1 \pm \frac{t_p S_b}{b_1} \right) \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.13})$$

2. По расчету истинного значения модели с учетом стандартной ошибки

$$\hat{\Delta}_{\min i} < \Delta_i < \hat{\Delta}_{\max i} \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.14})$$

Минимальная оценка истинного значения модели для  $i$ -го значения величины  $N$  рассчитывается по формуле

$$\hat{\Delta}_{\min i} = \bar{\Delta}_i - t_p \cdot S_{\bar{\Delta}_i} \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.15})$$

Максимальная оценка соответственно

$$\hat{\Delta}_{\min i} = \bar{\Delta}_i + t_p \cdot S_{\bar{\Delta}_i} \quad (\text{с}) \quad (\text{ПЗ.16})$$

В формулах (ПЗ.11), (ПЗ.12), (ПЗ.15), (ПЗ.16) используется критерий Стьюдента  $t_p=3,1$ . Значение коэффициента Стьюдента выбиралось исходя из условий: количество степеней свободы равно  $f=n-1-2=13-1-2=10$  и уровня значимости  $\alpha=0,01$ , доверительная вероятность  $p=0,99$ . Это значит, что из 100 наблюдений только одно может быть за расчетными пределами, полученными по модели.

Результаты наблюдения для 4-го этажа здания представлены в таблице ПЗ.1.

Таблица ПЗ.1 – Результаты наблюдений для 4-го этажа здания

$N, \text{ м}$	$\Delta, \text{ с}$	$N_i^2, \text{ с}^2$	$N_i \cdot \Delta_i, \text{ с} \cdot \text{ м}$	$\frac{(\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2}{\text{с}^2}$	$\frac{(N_i - N_{cp})^2}{\text{м}^2}$	$\bar{\Delta}_i, \text{ с}$	$S_{\bar{\Delta}_i}, \text{ с}$
0	0	0	0	0	36	0	10
1	30	1	30	2	25	31	9
2	70	4	140	49	16	63	7
3	100	9	300	31	9	94	7
4	130	16	520	16	4	126	6
5	160	25	800	6	1	157	5
6	190	36	1140	1	0	189	5
7	200	49	1400	418	1	220	5
8	240	64	1920	143	4	252	6
9	260	81	2340	549	9	283	7
10	360	100	3600	2032	16	315	7
11	360	121	3960	185	25	346	9
12	360	144	4320	321	36	378	10
$N_{cp} = 6$	Сумма	650	20470	3752	182	2454	93

Выборочной оценки  $b_1$  для данной выборки равна

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2} = \frac{20470}{650} = 31,5 \text{ с} \cdot \text{ м}^{-1}$$

Стандартная ошибка аппроксимации равна

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2} = \sqrt{\frac{3752}{13-2}} = 18,5 \text{ с}$$

Стандартная ошибка выборочной оценки  $b_1$  равна:

$$S_b = S_e \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i^2}} = 18,5 \sqrt{\frac{1}{650}} = 0,73 \text{ с} \cdot \text{м}^{-1}$$

Интервал истинного значения величины  $\Delta_i$  равен:

$$\Delta_i = \bar{\Delta}_i \left( 1 \pm \frac{t_p S_b}{b_1} \right) = \bar{\Delta}_i \left( 1 \pm \frac{3,1 \cdot 0,73}{31,5} \right) = \bar{\Delta}_i \pm 0,07 \cdot \bar{\Delta}_i \text{ (с)}$$

Результаты регрессионного анализа представлены на рисунке ПЗ.1. а). Результаты наблюдения для 2-го этажа здания представлены в таблице ПЗ.2.

Таблица ПЗ.2. – Результаты наблюдений для 2-го этажа здания

$N, \text{м}$	$\Delta, \text{с}$	$N_i^2, \text{с}^2$	$N_i \cdot \Delta_i, \text{с} \cdot \text{м}$	$(\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2, \text{с}^2$	$(N_i - N_{cp})^2, \text{м}^2$	$\bar{\Delta}_i, \text{с}$	$S_{\bar{\Delta}_i}, \text{с}$
0	0	0	0	0	36	0	7
1	10	1	10	50	25	17	6
2	30	4	60	18	16	34	6
3	50	9	150	2	9	51	5
4	60	16	240	70	4	68	4
5	80	25	400	30	1	85	4
6	100	36	600	7	0	103	4
7	110	49	770	93	1	120	4
8	120	64	960	280	4	137	4
9	140	81	1260	191	9	154	5
10	160	100	1600	119	16	171	6
11	220	121	2420	1023	25	188	6
12	220	144	2640	222	36	205	7
$N_{cp} = 6$	Сумма	650	11110	2104	182	1333	68

Выборочной оценки  $b_1$  для данной выборки равна

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2} = \frac{11110}{650} = 17,1 \text{ (с} \cdot \text{м}^{-1}\text{)}$$

Стандартная ошибка аппроксимации равна

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2} = \sqrt{\frac{2104}{13-2}} = 13,8 \text{ (с)}$$

Стандартная ошибка выборочной оценки  $b_1$  равна:

$$S_b = S_e \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i^2}} = 13,8 \sqrt{\frac{1}{650}} = 0,54 \text{ (с} \cdot \text{м}^{-1}\text{)}$$

Интервал истинного значения величины  $\Delta_i$  равен:

$$\Delta_i = \bar{\Delta}_i \left( 1 \pm \frac{t_p S_b}{b_1} \right) = \bar{\Delta}_i \left( 1 \pm \frac{3,1 \cdot 0,54}{17,1} \right) = \bar{\Delta}_i \pm 0,09 \cdot \bar{\Delta}_i \text{ (с)}$$

Результаты регрессионного анализа представлены на рисунке ПЗ.3. *b*).

Анализ данных представленных на рисунке ПЗ.3 показывает, что при  $N$  больших 6 метров доверительные области, рассчитанные по оценке истинного значения параметра модели  $b_1$ , и по оценке истинного значения модели  $\Delta_i$  совпадают. Это говорит о том, что в рассматриваемом случае истинное значение максимального выигрыша во времени может быть определено по формуле:

$$\Delta_i = \Delta_{срi} \pm 0,1 \cdot \Delta_{срi} \text{ (с)} \quad (\text{ПЗ.17})$$

где  $\Delta_{срi}$  – среднее значение максимального выигрыша во времени, мин.

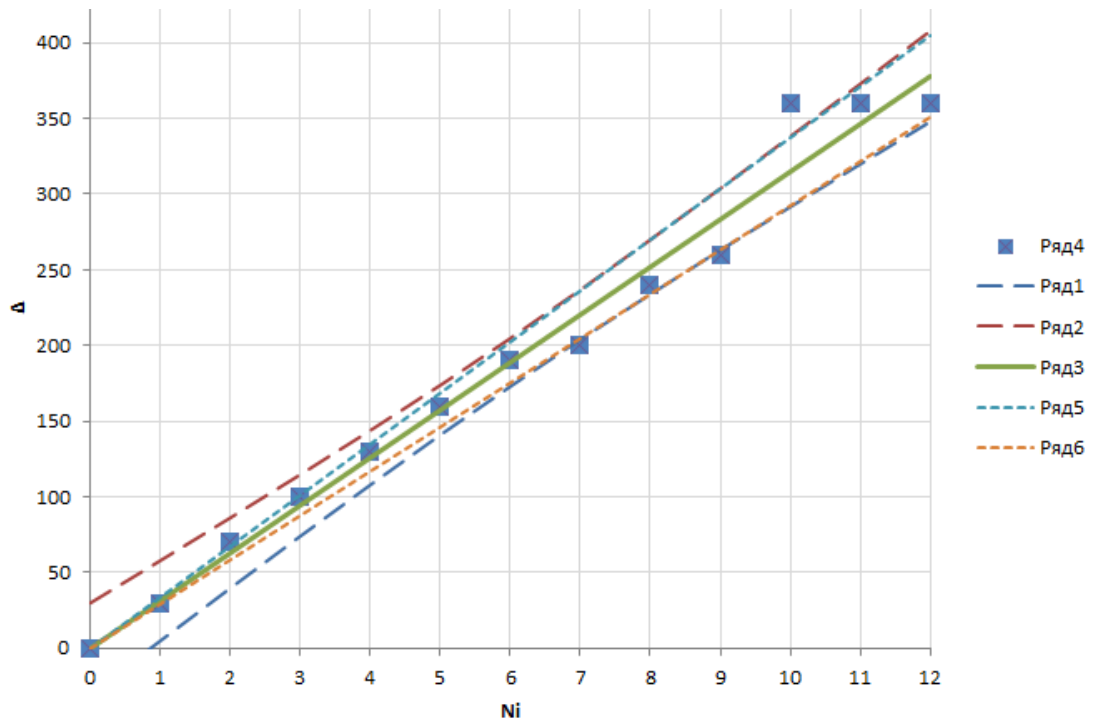
В этом случае для оценки повышения тактических возможностей звена ГДЗС с использованием СИПУ необходимо иметь общую формулу для расчета среднего максимального значения выигрыша во времени при движении к месту работы внутри здания.

Анализ данных, проиллюстрированных на рисунке П.3.1, показывает, что выигрыш во времени при использовании СИПУ возрастает с увеличением расстояния от входа на этаж и номера этажа пожара.

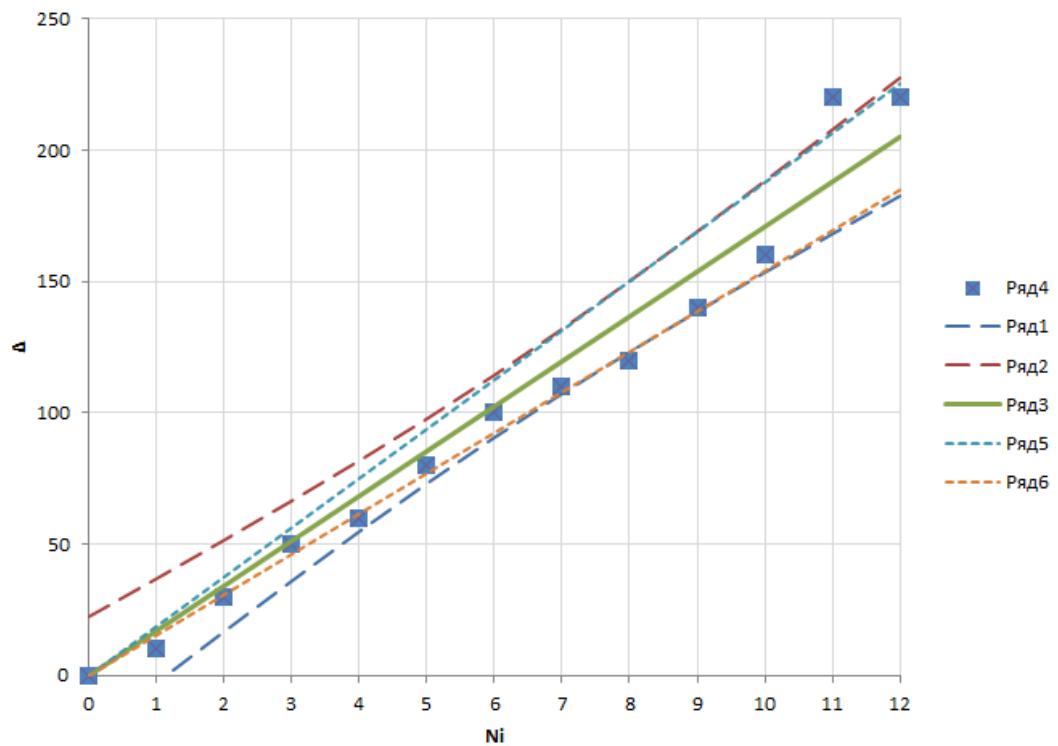
Максимальный выигрыш во времени для второго этажа составляет 2,5 минуты, а для четвертого этаже – 4,5 минуты.

На рисунке ПЗ.1 введены обозначения: ряд 4 – данные наблюдения; ряд 1 – минимальная оценка истинного значения модели, рассчитанная по формуле (ПЗ.15); ряд 2 – максимальная оценка истинного значения модели, рассчитанная по формуле (ПЗ.16); ряд 1 и ряд 2 – доверительная область для линии регрессии; ряд 3 – средняя оценка истинного значения модели; ряд 5 максимальная оценка истинного значения модели, рассчитанная по формуле (ПЗ.11); ряд 6 минимальная оценка истинного значения модели, рассчитанная по формуле (ПЗ.12).





*a*



*б*

Рисунок ПЗ.1. – Аппроксимация результатов наблюдения:

*a* – анализ данных для второго этажа здания;

*б* – анализ данных для четвертого этажа здания.

**Приложение 4**

**Экономическая оценка системы поддержки управления**

Для оценки экономической эффективности внедрения СИПУ в практику борьбы с пожарами в зданиях будем использовать метод общепринятый в практике решения задач технико-экономического обоснования противопожарных мероприятий для здания. Метод экономической оценки внедрения противопожарных мероприятий представлен в приложении к СНиП 21-01-97\* «Методика и примеры технико-экономического обоснования противопожарных мероприятий» [73].

#### *Структура метода экономической оценки*

Метод предусматривает расчет математических ожиданий (средних значений) годовых потерь от пожаров для здания при различном наборе противопожарных мероприятий и их парном сравнении с целью выбора.

Метод предусматривает реализацию двух основных вариантов оценки внедрения СИПУ в совокупности с автоматической пожарной сигнализацией АПС и совместно с автоматической установкой пожаротушения (АУПТ).

Для технико-экономического обоснования первого варианта (АПС и АУПТ) в соответствии с пунктом 7 и 8 МР годовые потери от пожара рассчитываются по формуле [73]:

$$M(\Pi) = M(\Pi_1) + M(\Pi_2) + M(\Pi_3) + M(\Pi_4), \text{ руб./год} \quad (\text{П4.1})$$

где  $M(\Pi_1), M(\Pi_2), M(\Pi_3), M(\Pi_4)$  – математические ожидания годовых потерь от пожаров, потушенных первичными средствами пожаротушения, автоматической установкой пожаротушения, привозными средствами пожаротушения и при отказе всех средств пожаротушения.

Математические ожидания годовых потерь от пожаров в зданиях, оборудованных автоматическими установками пожаротушения, рассчитываются по формулам:

*для потерь от пожаров, потушенных первичными средствами пожаротушения*

$$M(\Pi_1) = N_n C_t F_1 p_1; \text{ руб./год} \quad (\text{П4.2})$$

*для потерь от пожаров, потушенных автоматической установкой пожаротушения*

$$M(\Pi_2) = N_n C_t F_3 (1 - p_1) p_3; \text{ руб./год} \quad (\text{П4.3})$$

*для потерь от пожаров, потушенных привозными средствами тушения пожара*

$$M(\Pi_3) = N_n C_t F_2 0,52(1 - p_1)(1 - p_3)p_2; \text{руб./год} \quad (\text{П4.4})$$

для потерь от пожаров при отказе всех средств пожаротушения

$$M(\Pi_4) = N_n C_t F(1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3); \text{руб./год} \quad (\text{П4.5})$$

где  $N_n$  – частота возникновения пожара в год, год<sup>-1</sup>;  $F$  – площадь здания, м<sup>2</sup>;  $F_1$  – площадь пожара при использовании первичных средств пожаротушения<sup>1</sup>, м<sup>2</sup>;  $F_2$  – площадь пожара при использовании привозных средств пожаротушения, м<sup>2</sup>;  $F^*$  – площадь пожара потушенного автоматической установкой пожаротушения, м<sup>2</sup>;  $C_t$  – стоимость поврежденного пожаром имущества в расчете на м<sup>2</sup> здания, руб./м<sup>2</sup>;  $p_1$  – вероятности тушения пожара первичными средствами пожаротушения;  $p_2$  – вероятности тушения пожара привозными средствами пожаротушения;  $p_3$  – вероятности тушения пожара автоматической установкой пожаротушения; 0,52 – коэффициент, учитывающий степень уничтожения объекта тушения пожара привозными средствами.

Частота возникновения пожара,  $N_n$  год<sup>-1</sup> может быть определена по справочным данным, однако, принято значение 0,04 год<sup>-1</sup>.

Вероятность тушения пожара первичными средствами пожаротушения  $p_1$  в соответствии с пунктом 11 [73] принимается в зависимости от скорости распространения горения по поверхности  $v_{л}$  (м·мин<sup>-1</sup>).

Площадь тушения пожара первичными средствами пожаротушения 0,5–4 м<sup>2</sup>.

В соответствии с пунктом 12 МР [73] вероятность тушения пожара привозными средствами пожаротушения  $p_2$ , определяется в зависимости от нормативного расхода огнетушащих веществ на наружное пожаротушение на основании данных о водоснабжении пожарного водопровода или насосов пожарных машин  $q_v$  (л/с).

Пункт 15 МР [73] определяет, что площадь пожара на момент использования привозных средств пожаротушения рассчитывается в зависимости от линейной скорости распространения пламени в здании и времени введения приборов подачи огнетушащих веществ

<sup>1</sup> Эквивалентная площадь пожара, как часть пространства, на котором находится уничтоженное огнем имущество.

$$F_2 = \pi(v_L \tau_{св.р})^2, F_2 > F, F_2 = F, (м^2) \quad (П4.6)$$

где  $\tau_{св.р}$  – время введения приборов подачи огнетушащих веществ, мин.

Сокращение времени свободного развития пожара при введении сил и средств пожарных подразделений с использованием звеньев газодымозащитной службы, информированных о месте расположения очага пожара в здании от СИПУ, определяют снижение значения прогнозируемой площади пожара. Тогда формула (П4.6) будет иметь вид:

$$F_2 = \pi(v_L (\tau_{св.р} - \Delta\tau))^2, (м^2) \quad (П4.7)$$

при аналогичных ограничениях  $F_2 > F, F_2 = F$ .

Следовательно, использование информации от СИПУ позволяет снизить значение математического ожидания для потерь от пожаров, потушенных привозными средствами тушения пожара  $M(P_2)$ , то есть в любом случае экономический эффект от внедрения СИПУ будет положительным. Масштабы экономического эффекта зависят от вида здания и состава его активной противопожарной защиты.

На примере покажем, что применение системы в совокупности с АУПТ предпочтительнее применения системы только в совокупности с АПС. Тем самым подтвердим выбранный вариант разработки системы на основе автоматической беспроводной системы пожарной сигнализации и пожаротушения «Гарант-Р».

Исходные данные для расчета [156]:

здание общественное 7-ми этажное, площадью этажа 950 м<sup>2</sup>;

в здании размещена горючая нагрузка со средними характеристиками, позволяющими принять линейную скорость распространения пламени 0,8 м/мин;

условия наружного противопожарного водоснабжения удовлетворительные;

стоимость здания и имущества составляет 1 млрд. руб;

пожарное депо располагается на расстоянии, позволяющем ввести первые силы и средства пожарных подразделений на 15 минуте свободного развития.

Необходимо произвести экономическую оценку внедрения системы поддержки управления на базе системы мониторинга состояния пожара в здании общей стоимостью 5,6 млн руб. (средняя стоимость оборудования этажа здания со-

ставляет 800 тыс. руб. на один этаж). Годовое техническое обслуживание системы составляет 48 тыс. руб.. Замена элементов питания системы по истечении срока нормальной эксплуатации осуществляется через 5 лет, затраты на реализацию данной процедуры для здания 0,1 млн руб. (100 тыс. руб. этаж здания). Для рассмотрения варианта с использованием СИПУ и автоматической установки пожаротушения (АУПТ) или автоматической пожарной сигнализацией (АПС) стоимость здания увеличивается на стоимость системы поддержки управления.

Исходные данные для экономической оценки и сравнения вариантов реализации СИПУ в активной противопожарной защите здания сведем в таблицу П4.1 с указанием официального источника данных.

Таблица П4.1. Исходные данные для экономической оценки

Параметр	Значение	Источник данных
Общая стоимость материальных ценностей в зданиях, млн руб.	1000	Исходные данные
Частота возникновения пожара, год <sup>-1</sup>	0,04	Приказ МЧС РФ от 30 июня 2009 г. N 382
Площадь этажа здания, м <sup>2</sup>	950	Условие
Площадь пожара при использовании первичных средств пожаротушения, м <sup>2</sup>	4	МДС 21-3.2001.
Вероятность тушения пожара первичными средствами пожаротушения	0,27	Табл. 1 МДС 21-3.2001.
Вероятность тушения пожара привозными средствами пожаротушения	0,99	Табл. 2 МДС 21-3.2001.
Затраты на проектирование, закупку комплектующих и монтаж СИПУ (Кт), млн.руб	0,8	Условие
Затраты на замену отдельных элементов СИПУ (Кб), млн руб.	0,1	Условие
Затраты на годовое обслуживание СИПУ (Зт), тыс. руб.	48	Условие

Результаты расчета показателей, необходимых для экономической оценки практического использования СИПУ, представлены в таблице П4.2.

Таблица П4.2. – Результаты расчета годовых потерь от пожара

<b>Базовый вариант АПС</b>	<b>Вариант применения АПС+СИПУ</b>
Стоимость одного метра квадратного здания, руб·м <sup>-2</sup>	
$C_t=147000$	$C_t=147842$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, потушенных первичными средствами пожаротушения, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_1) = 0,04 \cdot 147000 \cdot 4 \cdot 0,27 = 6350$	$M(\Pi_1) = 0,04 \cdot 147842 \cdot 4 \cdot 0,27 = 6386$
Площадь пожара, м <sup>2</sup> ( $\Delta \tau = 3$ (мин))	
$F_2 = \pi(\nu_{л} \tau_{св.р})^2 = 3,14 \cdot (0,8 \cdot 15)^2 = 452$	$F_2 = \pi(\nu_{л}(\tau_{св.р} - \Delta \tau))^2 = 3,14 \cdot (0,8 \cdot 12)^2 = 362$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, потушенных привозными средствами тушения пожара, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_2) = 0,04 \cdot 147000 \cdot 452 \cdot 0,52 \cdot (1 - 0,27)0,99 = 999150$	$M(\Pi_2) = 0,04 \cdot 147842 \cdot 362 \cdot 0,52 \cdot (1 - 0,27)0,99 = 803899$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, при отказе всех средств пожаротушения, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_3) = 0,04 \cdot 147000 \cdot 950(1 - 0,27)(1 - 0,99) = 40777$	$M(\Pi_3) = 0,04 \cdot 147842 \cdot 950(1 - 0,27)(1 - 0,99) = 41011$
Годовые потери от пожара, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi) = 6350 + 999150 + 40777 = 1046279$	$M(\Pi) = 6386 + 803899 + 41011 = 851297$
Интегральный экономический эффект: $R=1046279-851297=194981$ , руб·год <sup>-1</sup>	
<b>Базовый вариант с АПС</b>	<b>Вариант применения АПС и СИПУ</b>
Стоимость одного метра квадратного здания, руб·м <sup>-2</sup>	
$C_t=150000$	$C_t=150842$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, потушенных первичными средствами пожаротушения, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_1) = 0,04 \cdot 150000 \cdot 4 \cdot 0,27 = 6480$	$M(\Pi_1) = 0,04 \cdot 150842 \cdot 4 \cdot 0,27 = 6516$
Площадь пожара, м <sup>2</sup> ( $\Delta \tau = 3$ (мин))	
$F_2 = \pi(\nu_{л} \tau_{св.р})^2 = 3,14 \cdot (0,8 \cdot 15)^2 = 452$	$F_2 = \pi(\nu_{л}(\tau_{св.р} - \Delta \tau))^2 = 3,14 \cdot (0,8 \cdot 12)^2 = 362$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, потушенных АУПТ, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_2) = 0,04 \cdot 150000 \cdot 30 \cdot (1 - 0,27)0,99 = 39175$	$M(\Pi_2) = 0,04 \cdot 150842 \cdot 30 \cdot (1 - 0,27)0,99 = 39395$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, потушенных привозными средствами пожаротушения руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_2) = 0,04 \cdot 150000 \cdot 30 \cdot (1 - 0,27)0,86 = 576714$	$M(\Pi_2) = 0,04 \cdot 150000 \cdot 30 \cdot (1 - 0,27)0,86 = 39175$
Математическое ожидание годовых потерь от пожаров, при отказе всех средств пожаротушения, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi_3) = 0,04 \cdot 150000 \cdot 950(1 - 0,27)(1 - 0,86)(1 - 0,99) = 2773$	$M(\Pi_3) = 0,04 \cdot 151052 \cdot 950(1 - 0,27)(1 - 0,86)(1 - 0,99) = 5858$
Годовые потери от пожара, руб·год <sup>-1</sup>	
$M(\Pi) = 6480 + 39175 + 576714 + 2773 = 625142$	$M(\Pi) = 6516 + 39394 + 220826 + 5858 = 272595$
Интегральный экономический эффект: $R=625142-272595=352546$ , руб·год <sup>-1</sup>	

В соответствии с методическими рекомендациями годовой экономической эффект от внедрения СИПУ рассчитывается по формуле

$$I_t = \frac{(R_t - Z_t)}{(1 + HD)^t} - K_t, \quad (\text{П4.8})$$

где  $R_t$  – затраты на проектирование, закупку комплектующих и монтаж СИПУ, руб.;  $Z_t$  – затраты на обслуживание СИПУ, руб.;  $HD$  – постоянная нормы дисконта в текущем году;  $t$  – номер текущего года.

Тогда интегральный экономический эффект от внедрения СИПУ составит

$$I = \sum_{i=1}^T I_t \quad (\text{П4.9})$$

где  $T$  – величину периода эксплуатации СИПУ.

Результаты технико-экономического обоснования внедрения СИПУ в практику пожаротушения в зданиях помимо показателей  $I_t$ ;  $R_t$ ;  $Z_t$  произведен отдельно расчет значений нормы дисконтирования  $D_t$ , которая определяется по формуле:

$$D_t = \frac{1}{(1 + HD)^t}, \quad (\text{П4.10})$$

где –  $HD$  норма дисконтирования в расчете принята 10 %.

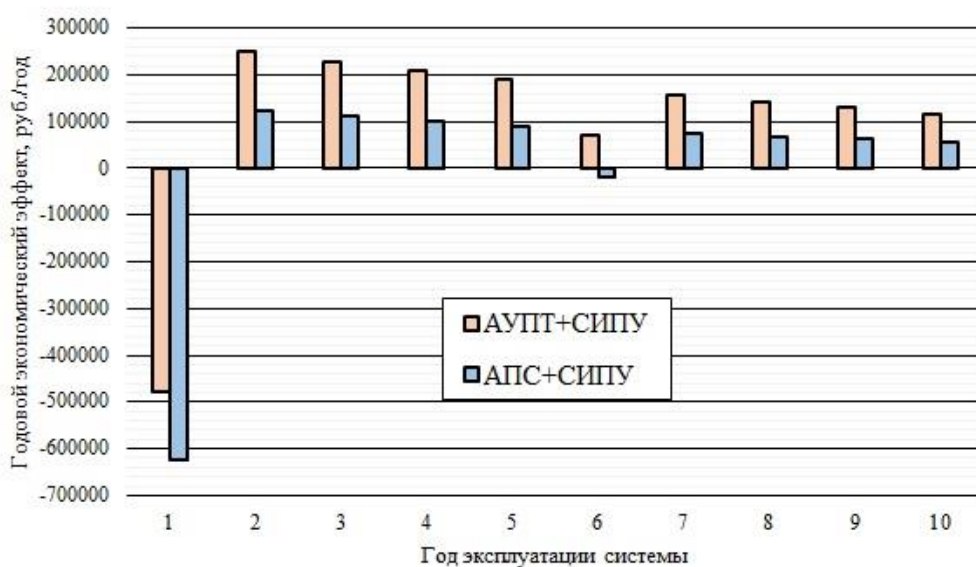
Результаты экономической оценки вариантов совместного использования СИПУ с АПС и СИПУ с АУПТ за период эксплуатации системы  $T = 10$  лет представлены в таблице П4.3.

Динамика годового экономического эффекта и интегрального экономического эффекта представлена на рисунке П4.1 (а и б).

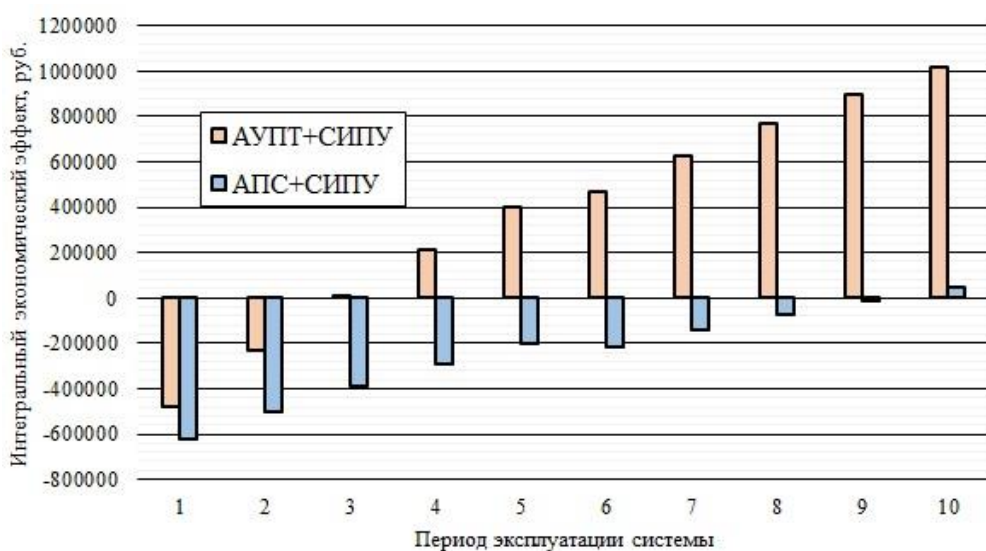


Таблица П4.3 – Результаты расчета интегрального экономического эффекта

СИПУ и АПС						
Год	$R$ , руб.	$K_t$ , руб.	$Z_t$ , руб.	$D$	$I_t$ , руб.	$I$ , руб.
1	194981	800000	0	0,91	177256	-622744
2	194981	0	48000	0,83	121472	121472
3	194981	0	48000	0,75	110429	110429
4	194981	0	48000	0,68	100390	100390
5	194981	0	48000	0,62	91264	91264
6	194981	100000	48000	0,56	82967	-17033
7	194981	0	48000	0,51	75425	75425
8	194981	0	48000	0,47	68568	68568
9	194981	0	48000	0,42	62334	62334
10	194981	0	48000	0,39	56668	56668
<b>Интегральный экономический эффект за 10 лет:</b>						46772
СИПУ и АУПТ						
Год	$R$ , руб.	$K_t$ , руб.	$Z_t$ , руб.	$D$	$I_t$ , руб.	$I$ , руб.
1	352547	800000	0	0,91	320497	-479503
2	352547	0	48000	0,83	251691	251691
3	352547	0	48000	0,75	228810	228810
4	352547	0	48000	0,68	208009	208009
5	352547	0	48000	0,62	189099	189099
6	352547	100000	48000	0,56	171909	71909
7	352547	0	48000	0,51	156281	156281
8	352547	0	48000	0,47	142073	142073
9	352547	0	48000	0,42	129157	129157
10	352547	0	48000	0,39	117416	117416
<b>Интегральный экономический эффект за 10 лет:</b>						1014943



а – годовой экономический эффект



б – интегральный экономический эффект

Рисунок П4.1 – Динамика показателей экономического эффекта

На основании произведенной экономической оценки использования системы информационной поддержки управления в совокупности с элементами системы противопожарной защиты зданий можно сделать следующие выводы:

- внедрение системы информационной поддержки управления в активную противопожарную защиту зданий экономически целесообразно и обосновано;
- наибольший экономический эффект приносит совокупное использование системы с АУПТ, система – окупаются на 3 году эксплуатации в свою очередь система и АПС окупаются лишь на 9 году эксплуатации.

**Приложение 5**

**Акты внедрения результатов исследования**

УТВЕРЖДАЮ

Директор Департамента  
готовности сил и специальной  
пожарной охраны МЧС России  
полковник внутренней службы



М.В. Максименко  
2018 г.

## А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы  
Тараканова Дениса Вячеславовича, представленной на соискание  
учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.10 –  
Управление в социальных и экономических системах (технические науки) в  
профессиональную подготовку начальствующего состава  
пожарно-спасательных гарнизонов МЧС России

Комиссия в составе председателя – начальника отдела применения пожарно-спасательных сил полковника внутренней службы Сивенкова Сергея Борисовича, и членов комиссии – старшего инспектора отдела применения пожарно-спасательных сил майора внутренней службы Жукова Олега Александровича, старшего инспектора отдела применения пожарно-спасательных сил майора внутренней службы Курпачёва Сергея Владимировича подтверждает, что результаты докторской диссертации Тараканова Дениса Вячеславовича используются при проведении занятий в школах оперативного мастерства начальствующего состава главных управлений МЧС России по субъектам Российской Федерации, специальных управлений ФПС МЧС России, личным составом пожарно-спасательных подразделений и формирований, входящих в состав пожарно-спасательных гарнизонов для повышения уровня профессиональной подготовки личного состава пожарно-спасательных гарнизонов, повышения эффективности действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ, а также организации мероприятий по обеспечению их планирования.

Председатель комиссии

С.Б. Сивенков

Члены комиссии:

О.А. Жуков

С.В. Курпачёв



МИНИСТЕРСТВО  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ,  
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ  
СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ  
(МЧС РОССИИ)

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА**

Театральный проезд, 3, Москва, 109012  
Тел. 8(499)216-79-01; факс: 8(495)624-19-46  
Телеграф: 114-933 «ФОТОН», 114-934 «ФОТОН»  
E-mail: info@mchs.gov.ru

23 МАЙ 2018

№ 91-2467-18  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Начальникам  
главных управлений МЧС России  
по субъектам Российской  
Федерации

Начальникам  
специальных управлений  
ФПС МЧС России

Начальникам  
образовательных организаций  
высшего образования МЧС России

МЧС России направляет для использования в практической деятельности «Руководство по повышению эффективности действий подразделений пожарной охраны при ликвидации пожаров на начальных этапах развития в зданиях с использованием информации от мониторинговых систем поддержки управления» (далее - руководство).

В целях повышения уровня профессиональной подготовки личного состава пожарно-спасательных гарнизонов, повышения эффективности действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ, а также организации мероприятий по обеспечению их планирования, предлагаю:

1. Изучить руководство с начальствующим составом главных управлений МЧС России по субъектам Российской Федерации, специальных управлений ФПС МЧС России, личным составом пожарно-спасательных подразделений и формирований, входящих в состав пожарно-спасательных гарнизонов, использовать руководство в практической деятельности в школах оперативного мастерства.

2. Поручить должностным лицам, ответственным за соответствующие направления, продолжить работу по совершенствованию деятельности территориальных и местных пожарно-спасательных гарнизонов.

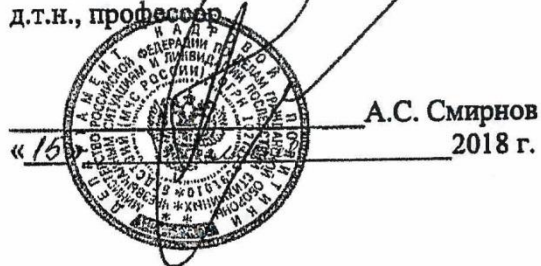
Приложение: на 31 л. в 1 экз.

генерал-лейтенант

П.Ф. Барышев  
217966

С.В. Куряча  
8-(495)-983-69-47

УТВЕРЖДАЮ  
 Начальник  
 Научно-технического управления МЧС России  
 генерал-майор внутренней службы  
 д.т.н., профессор



### А К Т

**о внедрении результатов диссертационной работы  
 Тараканова Дениса Вячеславовича, представленной на соискание  
 учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.10  
 «Управление в социальных и экономических системах»  
 (технические науки)**

Комиссия в составе:

председателя – заместителя начальника управления - начальника отдела планирования и организации НИОКР Научно-технического управления МЧС России, к.т.н. Гамаюнова Евгения Георгиевича;

и членов комиссии – заместителя начальника отдела планирования и организации НИОКР Научно-технического управления МЧС России Булгакова Александра Владимировича и инспектора отдела организации разработки и внедрения информационных технологий и робототехнических средств Научно-технического управления МЧС России Яцыновой Алены Олеговны подтверждают, что научные результаты докторской диссертации:

модель дистанционного мониторинга динамики пожара в здании;

многокритериальный метод моделирования параметров мониторинга пожара;

критерии и методика оценки эффективности практического применения результатов мониторинга при тушении пожаров в зданиях силами и средствами пожарных подразделений в виде системы поддержки управления;

использованы при разработке методических рекомендаций по повышению эффективности действий подразделений пожарной охраны при ликвидации пожаров на начальных этапах развития в зданиях с использованием информации от мониторинговых систем поддержки управления (п. 2 раздела IX «Описание выполняемых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках выполнения государственного задания ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России» Плана научно-исследовательских и опытно-

конструкторских работ МЧС России на 2017 год, утвержденного приказом МЧС России от 12.04.2017 г. № 161).

**Председатель комиссии:**  
заместитель начальника управления –  
начальника отдела НТУ  
к.т.н.



Е.Г. Гамаонов

**Члены комиссии:**

заместитель начальника отдела НТУ



А.В. Булгаков

инспектор отдела НТУ



А.О. Яцынова

**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор  
ООО «НПО ЭТЕРНИС»

  
С.И. Воробьев  
2018 г.

### А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы  
Тараканова Дениса Вячеславовича, представленной на соискание  
учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.10 –  
Управление в социальных и экономических системах (технические науки)  
в научно-конструкторскую и производственную деятельность НПО «ЭТЕРНИС»

Комиссия в составе председателя заместителя генерального директора ООО НПО «ЭТЕРНИС» по научной работе Мацука Александра Михайловича и членов комиссии начальника нормативно-технического отдела ООО НПО «ЭТЕРНИС», к.т.н., старшего научного сотрудника Долговидова Андрея Всеволодовича и начальника отдела информационных технологий ООО НПО «ЭТЕРНИС» Мацука Максима Александровича подтверждает, что на основе научных результатов диссертации Тараканова Д.В. разработаны:

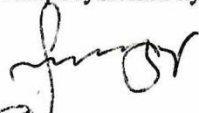
- программное обеспечение для мониторинга состояния беспроводной адресной системы пожарной сигнализации и пожаротушения «Гарант-Р» (Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663753 от 11.12.2017 г.);

- программное обеспечение для адаптивного проектирования системы мониторинга, пожарной сигнализации и пожаротушения «Гарант-Р» (Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015619987 от 18.09.2015 г);


- модуль пожаротушения с устройством контроля факторов пожара и результатов его действия (Патент на полезную модель №2015147090, зарегистр. 02.11.2015 г.).

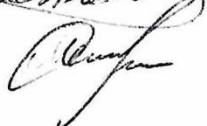
Разработанный Таракановым Д.В. многокритериальный метод моделирования динамики параметров мониторинга пожара в здании был использован при модернизации системы пожарной сигнализации и пожаротушения кумулятивного типа «Гарант-Р».

Председатель комиссии

 А.М. Мацук

Члены комиссии:

 А.В. Долговидов

 М.А. Мацук



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника  
Академии ГПС МЧС России  
по научной работе  
доктор технических наук, профессор



И.В. Алешков  
2018 г.

## АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Тараканова Дениса Вячеславовича на тему «Многокритериальные модели и методы  
поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики  
пожара в здании», представленной на соискание учёной степени доктора технических  
наук по специальности 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах  
(технические науки)

Комиссия в составе председателя – научного руководителя УНК АСИТ, доктора технических наук, профессора Топольского Николая Григорьевича и членов – старшего научного сотрудника НИО АСИТ, кандидата технических наук, доцента Буцынской Татьяны Анатольевны и научного сотрудника научно-исследовательского отдела УНК ОНД, кандидата технических наук Гудина Сергея Витальевича подтверждает, что результаты диссертации Тараканова Дениса Вячеславовича в части разработанной многокритериальной модели мониторинга динамики пожара и метода моделирования мониторинга динамики пожара в зданиях использованы при разработке критериев оперативной и технической готовности сил и средств пожарно-спасательных подразделений МЧС России, а также в научных работах учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий.

Председатель комиссии

Н.Г. Топольский

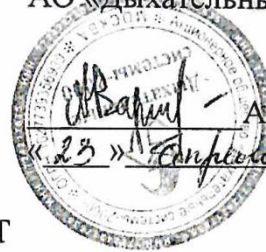
Члены комиссии:

Т.А. Буцынская

С.В. Гудин



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «Дыхательные системы - 2000»А.Г. Варшамов  
2018 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Тараканова Дениса Вячеславовича, представленной на соискание  
учёной степени доктора технических наук  
по специальности 05.13.10 – Управление в социальных и  
экономических системах (технические науки)  
в производственную деятельность АО «Дыхательные системы - 2000»

Комиссия в составе председателя комиссии – коммерческого директора АО «Дыхательные системы - 2000» Приказчиков Юрия Анатольевича и членов комиссии – руководителя департамента пожарной техники и вооружения Полякова Константина Михайловича и руководителя департамента комплексных решений по работе на высоте и в ограниченных пространствах Кирютова Алексей Александровича, подтверждает, что результаты диссертации Тараканова Д.В. в части разработанной сетевой структуры маршрутов движения для их ранжирования при многокритериальном выборе использованы при разработке интерактивных, обучающих программ по тренажерным комплексам «ГД-1» и «Огневой Дом» (TheInteractiveEducationalProgramoftheSimulatorSystem «OgnevoyDom», «TD-1») для отработки действий групп разведки в составе звеньев газодымозащитной службы пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях, сооружениях и работе по спасанию людей в ограниченных пространствах.

Председатель комиссии

A handwritten signature in black ink, corresponding to the name Y.M. Prizhchikov.

Ю.М. Приказчиков

Члены комиссии:

A handwritten signature in black ink, corresponding to the name K.M. Polyakov.

К.М. Поляков

A handwritten signature in black ink, corresponding to the name A.A. Kiryotov.

А.А. Кирютов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника ФГБОУ ВО  
Ивановская пожарно-спасательная  
академия ГПС МЧС России  
по научной работе,  
подполковник внутренней службы,  
кандидат медицинских наук, доцент

 И.Ю. Шарабанова  
«18»  2018 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы  
Тараканова Дениса Вячеславовича, представленной на соискание  
учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.10 –  
Управление в социальных и экономических системах (технические науки)  
в научную деятельность ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная  
академия ГПС МЧС России

Комиссия в составе председателя – начальника учебно-научного комплекса «Пожаротушение» полковника внутренней службы Маслова Алексея Владимировича, и членов комиссии – начальника кафедры эксплуатации пожарной техники, средств связи и малой механизации (в составе УНК «Пожаротушение») полковника внутренней службы Моисеева Юрия Николаевича и начальника экспертно-консалтингового отдела майора внутренней службы Орлова Олега Ивановича подтверждают, что научные результаты докторской диссертации использованы в следующих научно-исследовательских работах:

«Разработка функционального тренажера для пожарных и спасателей привлекаемых к действиям по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций радиационного характера при эксплуатации АЭС» в рамках мероприятия «Разработка учебно-методических пособий и тренинговых компьютерных систем для подготовки и повышения навыков специалистов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций радиационного характера» (п. 3.2.-31/А7-340 плана НТД МЧС России на 2011-2013 годы, утвержденного приказом МЧС России от 05.03.2011 г. №107);

«Разработка методических рекомендаций по повышению эффективности действий подразделений пожарной охраны при ликвидации пожаров на начальных этапах развития в зданиях с использованием информации от мониторинговых систем поддержки управления» (п. IX/2 Плана НИОКР МЧС России на 2017 год, утвержденного приказом МЧС России от 12.04.2017 г. № 161);

«Разработка программы для ЭВМ «Автоматизированная информационная система организации связи и оповещения при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ» (п. 55, раздела 4.6. Плана НИОКР МЧС России на 2018 год, утвержденного приказом МЧС России от 17.01.2018 г. №15).

Председатель комиссии

Члены комиссии:

А.В. Маслов

Ю.Н. Моисеев

О.И. Орлов