

На правах рукописи



Журавлев Николай Михайлович

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ
ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ**

Специальность: 2.3.4. Управление в организационных системах
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Денисов Алексей Николаевич

Официальные оппоненты:

Моторыгин Юрий Дмитриевич
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
кафедра криминалистики и инженерно-технических
экспертиз, профессор

Власов Константин Сергеевич
кандидат технических наук,
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, отдел разработки
мероприятий по поддержке принятия решений
(ситуационный центр), начальник

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России

Защита состоится «02» марта 2022 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.01 (Д 205.002.01) созданного на базе Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:
<https://academygps.ru/upload/iblock/617/617d0985fc795987afba279e3135a1e8.pdf>.

Автореферат разослан «22» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Хабибулин Р.Ш.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Ежегодный ущерб, наносимый пожарами обществу и экономике значителен, что рождает необходимость поиска научно обоснованных путей его снижения. Планирование действий пожарных подразделений и принятие управленческих решений являются основными этапами процесса управления при организации тушения пожаров. Статистический анализ пожаров подтверждает необходимость подробного исследования пожаров в многоквартирных жилых зданиях, как причины наибольшего материального ущерба, гибели людей и личного состава пожарных подразделений. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 1 января 2018 г. № 2 целью государственной политики в области пожарной безопасности является обеспечение необходимого уровня защищенности личности, имущества, общества и государства от пожаров.

Эффективность управления пожарными подразделениями при боевых действиях по тушению пожаров в жилых зданиях обеспечивается наличием научно обоснованных методов и алгоритмов поддержки принятия решений руководителя тушения пожара (РТП). Востребованность определяется основными приоритетами научно-технического и информационного обеспечения управления деятельностью единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС).

Концепция развития системы управления МЧС до 2030 года, Федеральная целевая программа «Пожарная безопасность в Российской Федерации», Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» определяют цели обеспечения пожарной безопасности, к которым относятся проведение научных исследований, внедрение новых технологий и совершенствование методов обеспечения пожарной безопасности, в том числе при управлении пожарными подразделениями. В перечисленных выше документах подчеркивается особая необходимость в научном и методическом обосновании направлений совершенствования системы управления деятельностью подразделений МЧС в кризисных ситуациях, включающих пожары. Таким образом, для повышения эффективности организации боевых действий, необходима разработка новых и совершенствование имеющихся моделей и алгоритмов поддержки принятия решений РТП. Эффективное управление силами и средствами пожарных подразделений при планировании организации тушения пожаров в жилых зданиях позволит сократить не только время его локализации и ликвидации, уменьшить материальный ущерб, но и сохранит человеческие жизни. Это определяет **актуальность** диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Исследования задач совершенствования управления силами и средствами Государственной противопожарной службы (ГПС) при организации тушения пожаров проводились под руководством следующих ученых: Н.Н. Брушлинского, С.Ю. Бутузова, А.Н. Денисова, В.В. Кафидова, В.Б. Коробко, О.А. Косорукова, А.В. Матюшина, Е.А. Мешалкина, Ю.Д. Моторыгина, А.И. Овсяника, Б.М. Пранова, Ю.В. Пруса, С.В. Соколова, В.А. Седнева, В.Л. Семикова, Н.Г. Топольского, Р.Ш. Хабибулина и других. В работах данных авторов предлагаются методы поддержки принятия решений при управлении пожарными подразделениями на основе теории вероятности и математической статистики, теории графов (сети Петри), теории игр и принятия решений. Однако в настоящее время с учетом изменений структуры управления МЧС России и нормативной базы исследование по совершенствованию поддержки принятия управленческих решений по тушению пожаров в жилых зданиях требует дальнейшего изучения.

Объект исследования – деятельность РТП при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях.

Предмет исследования – модели и алгоритмы поддержки принятия решения РТП при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях.

Цель исследования – повышение эффективности принятия решений РТП при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях, на основе методов теории полезности.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **задачи**:

- провести комплексный анализ принятия управленческих решений при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях;
- разработать модель и алгоритмы, повышающие эффективность принятия решения РТП при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях;
- провести оценку эффективности разработанной модели и алгоритмов поддержки принятия решения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы статистического, системного, корреляционного анализа, теории полезности, системно-динамического и натурального моделирования.

Научная новизна работы заключается в теоретическом обосновании и разработке новых моделей и алгоритмов поддержки управления руководителем тушения пожара при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях: модель поддержки принятия решений РТП на основе функции ценности, которая позволяет выбрать рациональный вариант ведения боевых действий по тушению пожара; алгоритмов поддержки принятия управленческих решений, повышающих эффективность планирования боевых действий (алгоритм поддержки

принятия решения РТП на основе оценки скорости роста площади пожара, алгоритм поддержки принятия решений РТП при фронтальном методе тушения пожара) с учетом моделей глубины тушения пожарным стволом, для обоснования сил и средств пожаротушения; обосновании частных критериев эффективности и объединяющей эти критерии многомерной функции ценности варианта тушения пожара.

Теоретическая значимость заключается в том, что результаты, полученные автором в диссертационном исследовании, дополняют имеющиеся теоретические представления о теории принятия решений применительно к управлению пожарными подразделениями при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях.

Практическая значимость диссертационного исследования подтверждается тем, что:

– разработаны и внедрены новые алгоритмы поддержки принятия решений РТП для планирования боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях (алгоритм поддержки принятия решения РТП на основе оценки скорости роста площади пожара, алгоритм поддержки принятия решений РТП при фронтальном методе тушения пожара);

– разработаны и зарегистрированы две программы ЭВМ для поддержки принятия решения РТП;

– разработана методика проведения эксперимента по определению параметра глубины тушения пожара на горизонтальную поверхность;

– результаты научного исследования рекомендованы для использования при разработке документов предварительного планирования действий, при отработке боевых действий на учениях, при решении пожарно-тактических задач, а также при экспертизе и анализе результатов тушения пожара.

Полученные результаты позволяют увеличить точность вычислений по расчету сил и средств при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях в среднем на 9 %, уменьшить объем затраченного огнетушащего вещества в среднем в 1,45 раза, сократить количество боевых позиций личного состава, участвующего в тушении пожара в среднем в 1,4 раза.

Полученные научные результаты внедрены в деятельность второй пожарно-спасательной части двенадцатого пожарно-спасательного отряда ФПС ГПС (г. Краснодар), Главного управления МЧС России по Самарской области, в компанию по проектированию, монтажу и обслуживанию пожарной автоматики ООО «Аларма» г. Москва, в научно-исследовательскую работу и учебный процесс Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

На защиту выносятся:

– модель поддержки принятия решения РТП на основе оценки функции ценности вариантов тушения пожара;

– алгоритм поддержки принятия решения РТП на основе оценки скорости роста площади пожара;

– алгоритм поддержки принятия решения РТП при фронтальном методе тушения пожара.

Степень достоверности результатов основана на корректности постановки задач, теоретической обоснованности сформулированных утверждений, использовании апробированного математического аппарата и данных статистики социально-экономических и технических параметров пожаров, соответствии результатов вычислительных и натурных экспериментов реальным данным.

Научные результаты, выносимые на защиту, апробированы на:

– XVII научно-технической конференции «Системы безопасности» СБ – 2008 Международного форума информатизации, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, 2008 г.;

– XVII международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем», ИПУ РАН, г. Москва, 2009 г.;

– XXI международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности», ФГУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха, 2009 г.;

– третьей межведомственной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации», г. Екатеринбург, 2009 г.;

– второй ежегодной всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий», ЦРНС, ПТ-2, г. Новосибирск, 2010 г.;

– XX научно-технической конференции «Системы безопасности» - СБ-2011. Академия ГПС МЧС России, г. Москва, 2011 г.;

– II межвузовском научно-практическом семинаре, посвященного 45-летию Ивановского института ГПС МЧС России «Надежность и долговечность машин и механизмов», г. Иваново, 2011 г.;

– XIII Международной научно-практической конференции «Инновационные исследования как локомотив развития современной науки: от теоретических парадигм к практике», НИЦ МИСИ, г. Москва, 2019 г.;

– IV всероссийской научно-практической конференции «Приоритетные направления развития Российской науки», г. Санкт-Петербург, 2020 г.;

– VII международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации», Академия ГПС МЧС России, г. Москва, 2020 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в восемнадцати работах, шесть из которых опубликованы в периодических изданиях из перечня ВАК России.

Личный вклад автора. Личное участие соискателя заключается в разработке и научном обосновании модели и алгоритмов поддержки принятия управленческих решений для

планирования боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях, а также оценки их эффективности. В личных и совместных публикациях результаты, связанные с анализом текущей ситуации в исследуемой области, разработкой модели и алгоритмов поддержки принятия управленческих решений при организации тушения пожаров в жилых зданиях на основе теории полезности, выполнены автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений, двух приложений. Основное содержание работы изложено на 197 страницах текста, включает в себя 29 таблиц, 89 рисунков и список литературы из 171 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе «Анализ процесса принятия управленческих решений при тушении пожаров в жилых зданиях»** Проведён статистический анализ динамики пожаров и материального ущерба от пожаров в жилых зданиях. Анализ показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны и ошибок, допускаемых при тушении пожаров в жилых зданиях. Анализ основных характеристик развития пожара и параметров его тушения, анализ процесса управления пожарным подразделением и методов принятия решений при планировании боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях, анализ систем поддержки принятия решений, применяемых для управления пожарными подразделениями в Российской Федерации.

Согласно официальной статистике количество пожаров с каждым годом сокращается, это связано с усилением противопожарных мер, привлечением внимания общественности, улучшением информированности в области безопасности и другими факторами. Однако урбанизация и экономическое развитие страны увеличивает концентрацию пожарной нагрузки и материальный ущерб от пожаров. Количество пожаров в зданиях жилого сектора с 2009 по 2020 год остается стабильно высоким – от 69 до 72 % от общего числа пожаров. Доля погибших при пожарах в жилых зданиях достигает 92%. При этом в зданиях I и II степени огнестойкости происходит до 20 тыс. пожаров, при которых погибает до 1 тыс. человек. Ежегодный прямой ущерб, наносимый пожарами в жилых зданиях, составляет 3,5 млрд. рублей, что обуславливает необходимость поиска путей его снижения и уменьшения социальных последствий. Сложность решения проблемы возрастает в связи с местами возникновения пожаров: более 30 тыс. – в

жилых помещениях, 2 тыс. – на балконах и лоджиях, около 1 тыс. – в подвальных этажах, более 8 тыс. – в чердаках, 3 тыс. – в лестничных клетках.

Анализ динамики возникновения пожаров, материального ущерба, наносимого пожарами, а также других показателей пожарной безопасности в РФ показал, что данные характеристики для разных субъектов страны различны. В некоторых регионах показатели пожарной безопасности значительно отличаются от средних по стране. В работах В. А. Малько, Д. В. Костюченко, рассматривается обстановка по пожарам и их последствиям в Московской области, республике Крым, на Юге России в целом и других субъектах страны. Но в тоже время в научных исследованиях авторами не рассматривается обстановка по пожарам в многоквартирных жилых зданиях в Краснодарском крае. В данном субъекте России за последние годы выявлена тенденция активного строительства жилых зданий быстрее и больше других. За последние шесть лет Краснодарский край занимает второе место после Москвы и Московской области по объёму ввода жилья в эксплуатацию. В связи с этим в диссертации произведён анализ обстановки по пожарам в Краснодарском крае, как одним из значимых социально-экономических регионов страны.

В работе приведены результаты анализа тушения пожаров в жилых зданиях за 11 лет в период с 2008 по 2019 годы. Из массива проработанных данных по принятию управленческих решений РТП при планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров, были выявлены наиболее часто встречающиеся ошибки, представленные на рисунке 1.

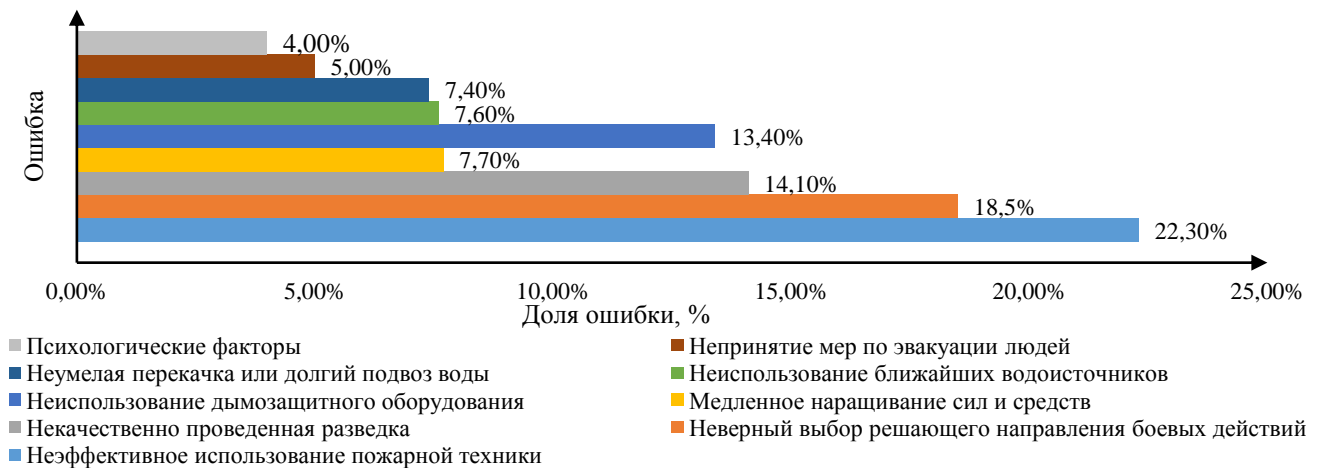


Рисунок 1 – Ошибки, допускаемые РТП при организации тушения пожаров

Ошибки при организации тушения пожаров в многоквартирных жилых зданиях, связанные с принятием неверного управленческого решения по использованию пожарной техники и оборудования, проведению разведки, выбору решающего направления, наращиванию сил и средств, занимают существенную долю от всех ошибок, допускаемых РТП, что доказывает необходимость повышения эффективности процесса принятия решений РТП.

В настоящее время составляется ряд документов предварительного планирования, однако документы предварительного планирования создаются не на все объекты, которые есть в районе выезда пожарных частей, только на определенные категории. А на те, которые создаются, отражены не все факторы, влияющие на локализацию и ликвидацию пожара (не рассматривается выбор варианта (метода) тушения пожара, глубина тушения, удельный расход огнетушащего вещества, количество боевых позиций личного состава). Каждый пожар уникален, поэтому документы предварительного планирования не всегда отражают действительную оперативную обстановку, что усложняет принятие обоснованных управленческих решений для РТП, связанные с недостатком или избытком информации. Поэтому круг некоторых вопросов этой проблематики требует дальнейшего изучения, а именно научное обоснование поддержки принятия управленческих решений РТП при планировании тушения пожаров в многоквартирных жилых зданиях. Данное исследование не противоречит с работами других авторов по данной тематике, а дополняет и расширяет границы исследования.

Принятие решений РТП происходит в условиях неопределенности, быстрого изменения факторов внешней среды и многокритериального выбора наилучшей альтернативы. С учетом требований, предъявляемых к моделям принятия управленческих решений при планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров, сделан выбор в пользу методов теории полезности, так как они наиболее полно подходят для решения многокритериальных задач в условиях определенности и неопределенности, в четкой и в нечеткой среде, с учетом структуры предпочтения РТП. Достоинством методов теории полезности является учёт различных критериев, а также случайностей, способных оказать негативное влияние на принятие решения, также позволяют наиболее полно использовать экспертные суждения и статистические данные успешно потушенных пожаров при анализе ситуации и выборе наилучшей альтернативы при недетерминированной постановке задачи принятия решения, связанной с выбором наиболее подходящего варианта тушения пожара, что в дальнейшем поможет сформировать типологизацию действий при организации тушения пожаров в многоквартирных жилых зданиях.

Во второй главе «Модели и алгоритмы поддержки принятия решений руководителя тушения пожара для планирования тушения пожаров» разработаны новые математические и алгоритмические модели поддержки принятия решений, повышающие эффективность принятия управленческих решений РТП.

На основе результатов, полученных в ходе исследования и применения методов теории полезности, разработана модель, устанавливающая связь между РТП и управляемыми силами, средствами и обстановкой, выраженная в частных критериях эффективности и объединяющей эти критерии многомерной функции ценности для каждого варианта тушения пожара.

Математическая модель поддержки принятия решения РТП представляется следующим выражением:

$$V(r)_j = k_1 \cdot V_1(r_1) + k_2 \cdot V_2(r_2) + \dots + k_n \cdot V_n(r_n) = \sum_{i=1}^n k_i V_i(r_i), \quad (1)$$

где r_i – частные критерии эффективности j -го варианта тушения пожара; $V_i(r_i)$ – функции ценности частных критериев эффективности j -го варианта тушения пожара; k_i – шкалирующие коэффициенты функций ценности частных критериев эффективности j -го варианта тушения пожара; $j = \overline{1, m}$; m – количество вариантов тушения пожара; n – количество критериев эффективности тушения пожара; при этом $V(r), V_i(r_i) \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n k_i = 1$.

Задачей управления является нахождение варианта тушения пожара с максимальной ценностью:

$$\max \{V(R)_j\} = \max \{V(r_1, r_2, \dots, r_n)_j\} = \max \left\{ \sum_{i=1}^n k_i V_i(r_i) \right\}, \quad (2)$$

где $j = \overline{1, m}$; m – число вариантов тушения пожара; $i = \overline{1, n}$; $n \geq 3$; n – число критериев, для вариантов тушения пожара.

Таким образом, у РТП появляется возможность оценивать альтернативные варианты тушения пожара при планировании и отработке боевых действий по частным критериями эффективности и объединяющей данные критерии многомерной функции ценности для каждого варианта тушения пожара. Каждый вариант тушения пожара может быть выражен численно и сравним с остальными альтернативными вариантами.

Для демонстрации вычисления функции ценностей возможных альтернатив (вариантов тушения пожара) в диссертационном исследовании использованы следующие критерии, в порядке их упорядоченности: расход огнетушащих веществ (ОТВ), л/с – r_1 ; время тушения пожара, мин. – r_2 ; глубина тушения, м. – r_3 ; количество личного состава, ед. – r_4 . В таблице 1 приведены лучшие (наиболее предпочтительные) и худшие (наименее предпочтительные значения) по каждому критерию r_i .

Таблица 1 – Диапазон изменения критериев эффективности вариантов тушения пожара

i	Критерий	Единицы измерения	Худшее значение критерия r_i^0	Лучшее значение критерия r_i^1
1	Расход ОТВ	л/с	30	20
2	Время тушения пожара	мин	20	10
3	Глубина тушения	м	6	3
4	Количество личного состава	ед.	18	5

В таблице 2 приведены значения данных критериев для 10 вариантов тушения пожара. Данные в таблице 2 взяты на основе анализа тушения реальных пожаров за период с 2008 по 2019 годы, являются обобщёнными и взяты в качестве примера. Таким образом, таблица 2

представляет для РТП информацию о диапазоне изменения значений критериев r_i в данной задаче принятия решения.

Таблица 2 – Значения критериев эффективности сравниваемых вариантов тушения пожара

Вариант тушения пожара	Критерии – $r_i, i = \overline{1,4}$			
	$r_1, \text{л/с}$	$r_2, \text{мин}$	$r_3, \text{м}$	$r_4, \text{ед.}$
1	20	13	5	8
2	27	17	3	15
3	30	10	6	15
4	28	20	4	16
5	29	15	5	15
6	23	14	6	12
7	28	12	3	14
8	24	15	4	5
9	28	18	5	10
10	30	18	6	5

На рисунке 2 изображено «пространство» двух критериев: r_1 – расход ОТВ, л/с; r_2 – время тушения пожара, мин. Точка C (30; 20) соответствует худшим значениям по обоим критериям, то есть $r_1^0 = 30 \text{ л/с}$ и $r_2^0 = 20 \text{ мин}$.

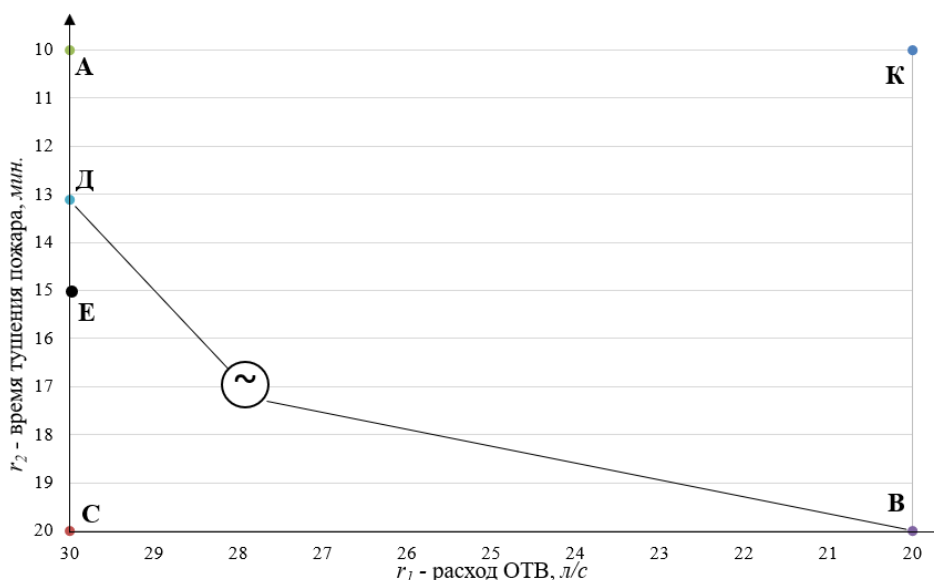


Рисунок 2 – Точки равноценности 1-го и 2-го критериев

Для нахождения лучшей альтернативы, необходимо решить задачу по улучшению параметров организации тушения, для чего необходимо переместиться: в точку A (30; 10), улучшив значение критерия r_2 от $r_2^0 = 20$ мин до $r_2^1 = 10$ мин или в точку B (20; 20), улучшив значение критерия r_1 от $r_1^0 = 30$ л/с до $r_1^1 = 20$ л/с. При этом существует ограничение – переместиться в точку K (20; 10), улучшив значения обоих критериев сразу, невозможно. Используя метод дихотомии и, разделив отрезок $[CA]$ пополам – получим точку E (30; 15). Вернувшись в точку C (20; 30) необходимо сделать выбор между другой парой точек: B (20; 20) и E (30; 15). В этой точке сокращение расхода ОТВ ведёт к увеличению времени тушения пожара. Зафиксируем данную точку в качестве опорной. Далее постепенно уменьшая отрезок

«неопределенности», сужаем «зону поиска точек равноценности» ищем точку на оси r_2 , которая была бы равноценна точке $B(20; 20)$. Таким образом, точка равноценности, которую ищет РТП, должна лежать между $r_2 = 15$ и $r_2 = 12,5$ на оси r_2 . Очередной итерацией применения метода дихотомии, найдена точка $D(30, 13.125)$ которая соответствует статистическим данным по тушению пожаров. Подобным образом найдены еще две точки равноценности для остальных пар критериев $\{r_1; r_3\}$, $\{r_1; r_4\}$. Выявленные точки равноценности приведены в работе.

Для нахождения частных шкалирующих коэффициентов k_i в модели (1) необходимо значение функций ценности частных критериев эффективности. На рисунке 3, *a*, построена одномерная функция ценности для первого частного критерия $V_1(r_1)$, которая построена следующим образом. Воспользуемся известными точками $V_1(20) = 1,0$; $V_1(30) = 0,0$ – по условиям нормирования функции ценности. Из статистических данных по пожарам в качестве новой точки воспользуемся точкой $V_1(24) = 0,50$.

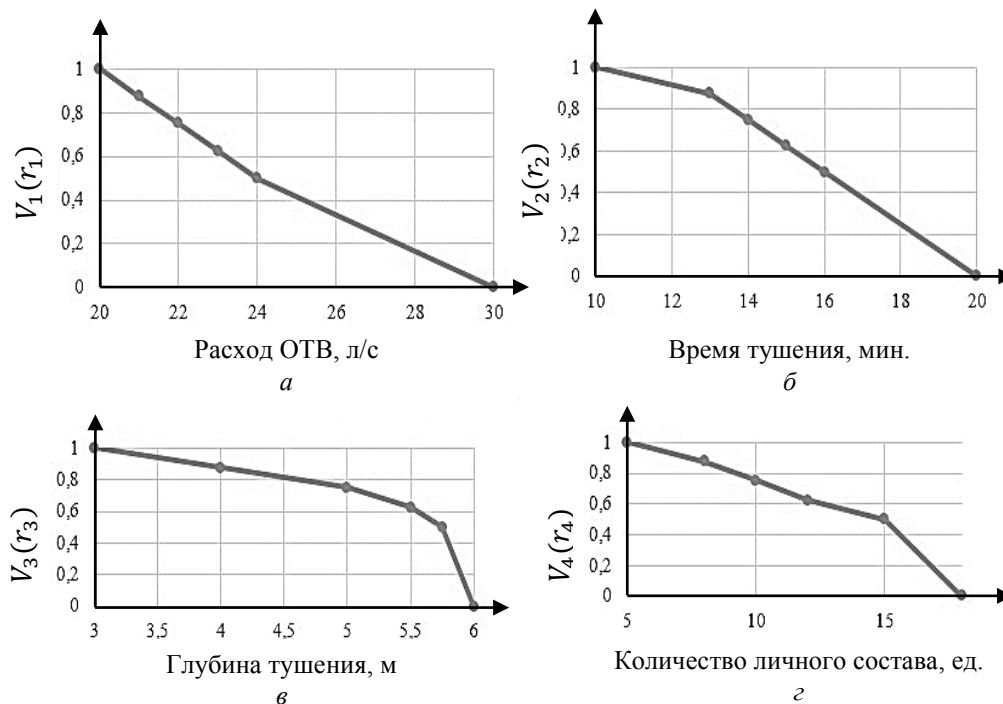


Рисунок 3 – Одномерные функции ценности для частных критериев эффективности: *a* – для расхода ОТВ; *b* – для времени тушения пожара; *в* – для глубины тушения; *г* – для количества личного состава

На рисунке 3, *a*, по оси абсцисс располагаются значения частного критерия r_1 – расход ОТВ, л/с, а по оси ординат – значения $V_1(r_1)$ функции ценности этого критерия (в условных единицах), нормированной от 0 до 1. Затем последовательно находятся еще две точки $r_1^{0,75} = 22$ л/с и $r_1^{0,625} = 23$ л/с, следовательно, $V_1(21) = 0,875$. По шести точкам r_1^0 , $r_1^{0,5}$, $r_1^{0,625}$, $r_1^{0,75}$, $r_1^{0,875}$, r_1^1 была проведена линия, которая графически отображает функцию ценности первого частного критерия $V_1(r_1)$, в данной задаче принятия решения. Аналогично, строятся остальные

три одномерные функции ценности для остальных частных критериев эффективности (см. рисунок 3, б, в, г).

Одномерные функции ценности необходимы для нахождения многомерной функции ценности в модели (1). Решением системы уравнений из значений координат известных точек равноценности, были получены следующие значения шкалирующих коэффициентов: $k_1 = 0,208$, $k_2 = 0,238$, $k_3 = 0,277$, $k_4 = 0,277$. При этом: $\sum_{j=1}^4 k_j = 1$.

При решении полученной системы уравнений, для предложенных критериев при рассмотрении 10 вариантов тушения пожара (см. таблицу 1) получена многомерная (четырёхмерная) функция ценности, представленная в следующем виде:

$$V(r) = 0,208 \cdot V_1(r_1) + 0,238 \cdot V_2(r_2) + 0,277 \cdot V_3(r_3) + 0,277 \cdot V_4(r_4). \quad (3)$$

Ценность каждого варианта тушения пожара (см. таблицу 1) может быть представлена в виде сравнительной диаграммы ценности, представленной на рисунке 4.

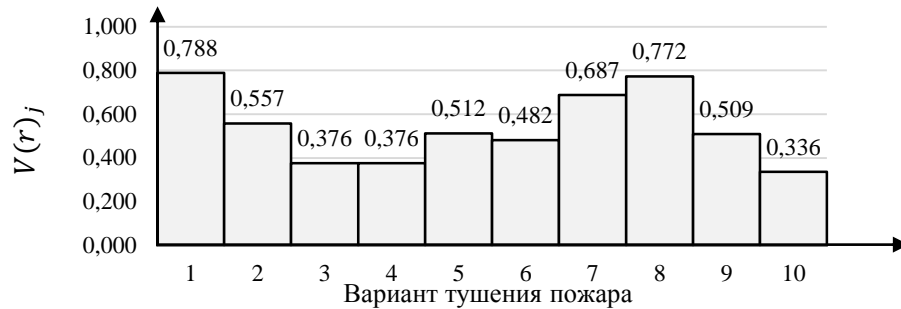


Рисунок 4 – Диаграмма ценностей вариантов тушения пожара

Выполним анализ чувствительности принимаемого решения, по выбору варианта тушения пожара. Для этого изменим шкалирующие коэффициенты так, чтобы они сохраняли неизменный ранговый порядок критериев. Таким образом, если в данной задаче принятия решения критерии расположены по убыванию ценности в следующей последовательности r_1 , r_3 , r_2 , r_4 , и шкалирующие коэффициенты базового варианта равны: $k_{1(баз)} = 0,208$; $k_{3(баз)} = 0,277$; $k_{2(баз)} = 0,238$; $k_{4(баз)} = 0,277$, то мы можем изменять их в границах интервалов точности, k_i , которые вычислены в таблице 3. Благодаря этому, у РТП имеется возможность избежать ошибки при отвержении альтернативного варианта тушения пожара, ценность которого меньше максимального значения.

Таблица 3 – Интервалы точности определения шкалирующих коэффициентов

i	k_i , базовый	$\frac{k_{i+1} + k_j}{2}$	$\frac{k_{i-1} + k_i}{2}$	$\sum_{j=2}^6 \frac{k_{i-1} + k_i}{2}$	$\sum_{j=2}^6 \frac{k_{i+1} + k_i}{2}$	\tilde{k}_i интервал точности
1	0,208	0,223	-	-	-	[0,223; 0,297]
2	0,238	0,257	0,223	0,257	0,223	[0,223; 0,257]
3	0,277	0,277	0,257	0,534	0,480	[0,257; 0,277]
4	0,277	-	0,277	-	-	[0,243; 0,277]

Предложенная модель поддержки принятия решений РТП на основе функции ценности вариантов тушения пожара позволяет количественно отобразить каждый вариант тушения пожара за счёт численного выражения выбранных критериев эффективности, которыми могут быть описаны альтернативные варианты использования сил и средств в борьбе с огнём. Таким образом, повышается эффективность принятия решений РТП для планирования боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях.

В соответствии с моделью (1) разработан алгоритм поддержки принятия решений РТП на основе оценки функции ценности для вариантов тушения пожара (рисунок 5).

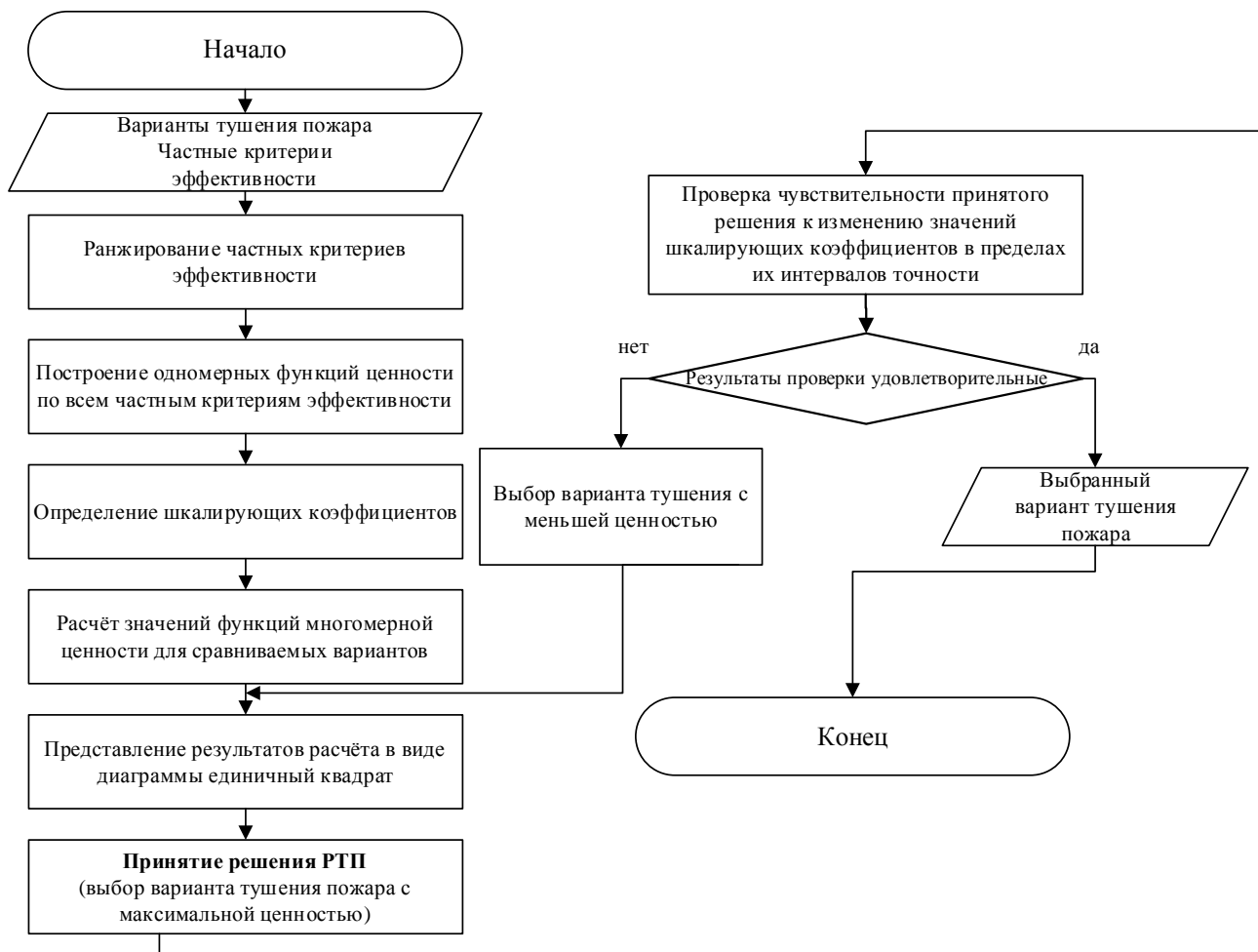


Рисунок 5 – Алгоритм поддержки принятия решений РТП на основе оценки функции ценности, решающий задачу выбора наиболее эффективного варианта тушения пожара

Особенностью алгоритма (см. рисунок 5) является наличие двух этапов принятия решения. На первом этапе по результатам расчётов функции ценности принимается предварительное решение. На втором этапе, после проверки чувствительности принятого решения к изменению шкалирующих коэффициентов в пределах их интервалов точности, принимается окончательное решение.

В исследовании показано, что значительное влияние при планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях, оказывает расчет сил и средств, зависящий от таких параметров как глубина тушения, площадь пожара, скорость роста площади пожара и других величин. На основе полученных данных определяют требуемое количество сил и средств. Задача управления силами и средствами при планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров представляет собой формирование сценария использования имеющихся на пожаре ресурсов, структура которой представлена на рисунке 6.

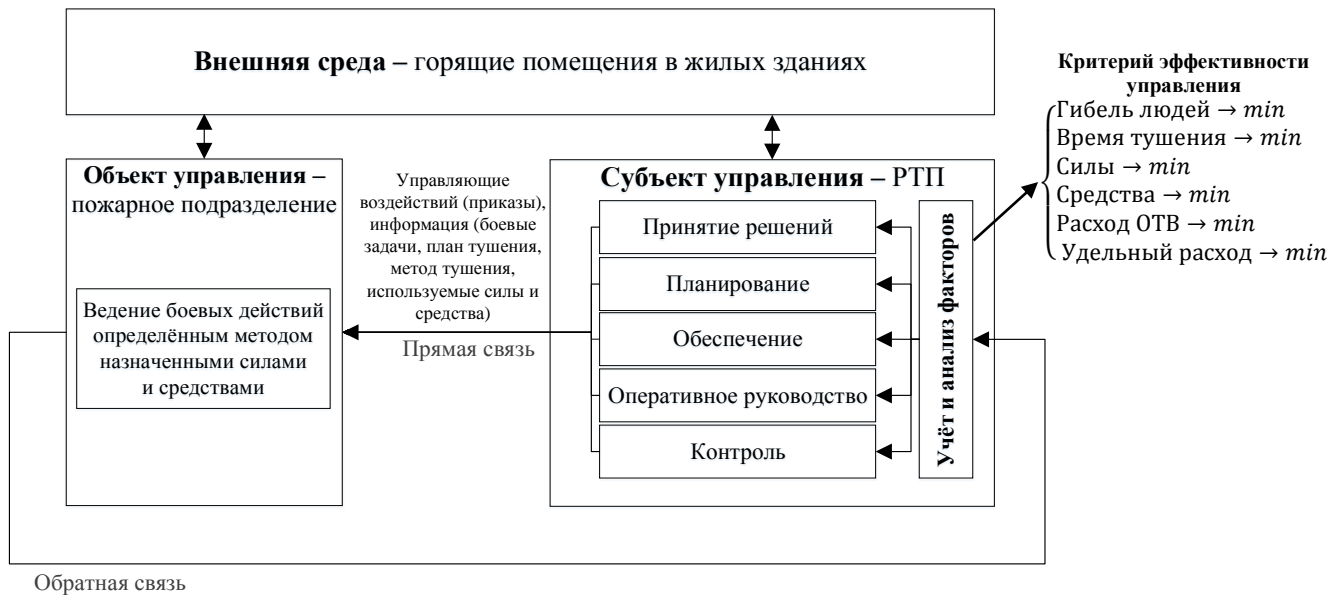


Рисунок 6 – Структура задачи управления пожарным подразделением

При планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях, от своевременности реализации задачи управления РТП по подаче ствольщиком первого пожарного ствола на решающем направлении зависит результативность тушения пожара. При применении ручных пожарных стволов ствольщикам требуется поддерживать подачу ОТВ непосредственно в очаг пожара с соблюдением правил техники безопасности и охраны труда. Подача ОТВ в очаг пожара при тушении пожаров в небольших по площади помещениях, рассматриваемых в исследовании, осуществляется прямыми струями. В данном случае, площадь тушения можно представить в виде эллипса, основным параметром которого является глубина тушения. На сегодняшний день для практических расчетов при планировании боевых действий по тушению пожаров в соответствии с действующими нормативными актами используют следующие значения параметра глубины тушения для ручных пожарных стволов $h_T = 5$ метров, для лафетных $h_T = 10$ метров.

В диссертации проведены аналитические и практические исследования по определению значения параметра глубины тушения пожарных стволов (ПС). В отличие от выполнявшихся ранее исследований, значение параметра глубины тушения рассмотрено как модель определения глубины тушения пожара по критериям (расход ОТВ, напор перед насадком,

диаметр насадка). Таким образом, при расчётах значение параметра глубины тушения пожара является не справочной величиной, а вычисляется, что повышает эффективность планирования сил и средств при ведении боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях.

В исследовании обосновано, что значение глубины тушения может служить критерием эффективности боевых действий по тушению пожара. Условием локализации пожара в данном случае будет выполнение неравенства:

$$h_T > \sqrt{\frac{4Q_{CT}}{\pi I_{TP}}}, \quad (4)$$

где h_T – глубина тушения любыми пожарными стволами, м; Q_{CT} – расход пожарного ствола, л·с⁻¹; I_{TP} – требуемая интенсивность тушения пожара, л·с⁻¹·м⁻²;

Предложенная модель определения значения параметра глубины тушения пожара использована в алгоритме поддержки принятия решений РТП на основе оценки скорости роста площади пожара, представленном на рисунке 7. Данный алгоритм повышает точность расчетов сил и средств при планировании боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях в среднем на 9% по сравнению с классическим применением значения параметра глубины тушения, что позволяет снизить расход огнетушащих веществ и как следствие уменьшить материальный ущерб. В качестве критерия эффективности ведения боевых действий по тушению пожара используется удельный расход ОТВ

Алгоритм поддержки принятия решений РТП (рисунок 7) реализован в программе «SiS Calculation», рекомендованной в качестве информационного сопровождения функционирования системы управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в жилых зданиях, для анализа произошедших пожаров, для профессиональной подготовки личного состава пожарной охраны.

Прибывая на пожар, личный состав пожарной охраны реализует поставленные задачи управления и принятия решений РТП, осуществляя подачу ОТВ в очаг пожара на глубину тушения, при этом в 95 % случаев используются водяные пожарные стволы. Для того, чтобы ограничить распространение огня в плоскости горения, в начальный период тушения ОТВ подаются по фронту распространения пожара. При тушении пожаров в многоквартирных жилых зданиях, в основном состоящих из помещений прямоугольной формы небольшой площади, когда огнём охвачена лишь часть помещения, здания, рационально выполнять задачу – наступление навстречу распространяющемуся огню, применяя метод фронтального тушения пожара.

В исследовании разработан алгоритм поддержки принятия решений РТП при фронтальном методе тушения пожара, решающий задачу оценки возможности применения фронтального метода тушения для локализации и ликвидации пожара (рисунок 8).

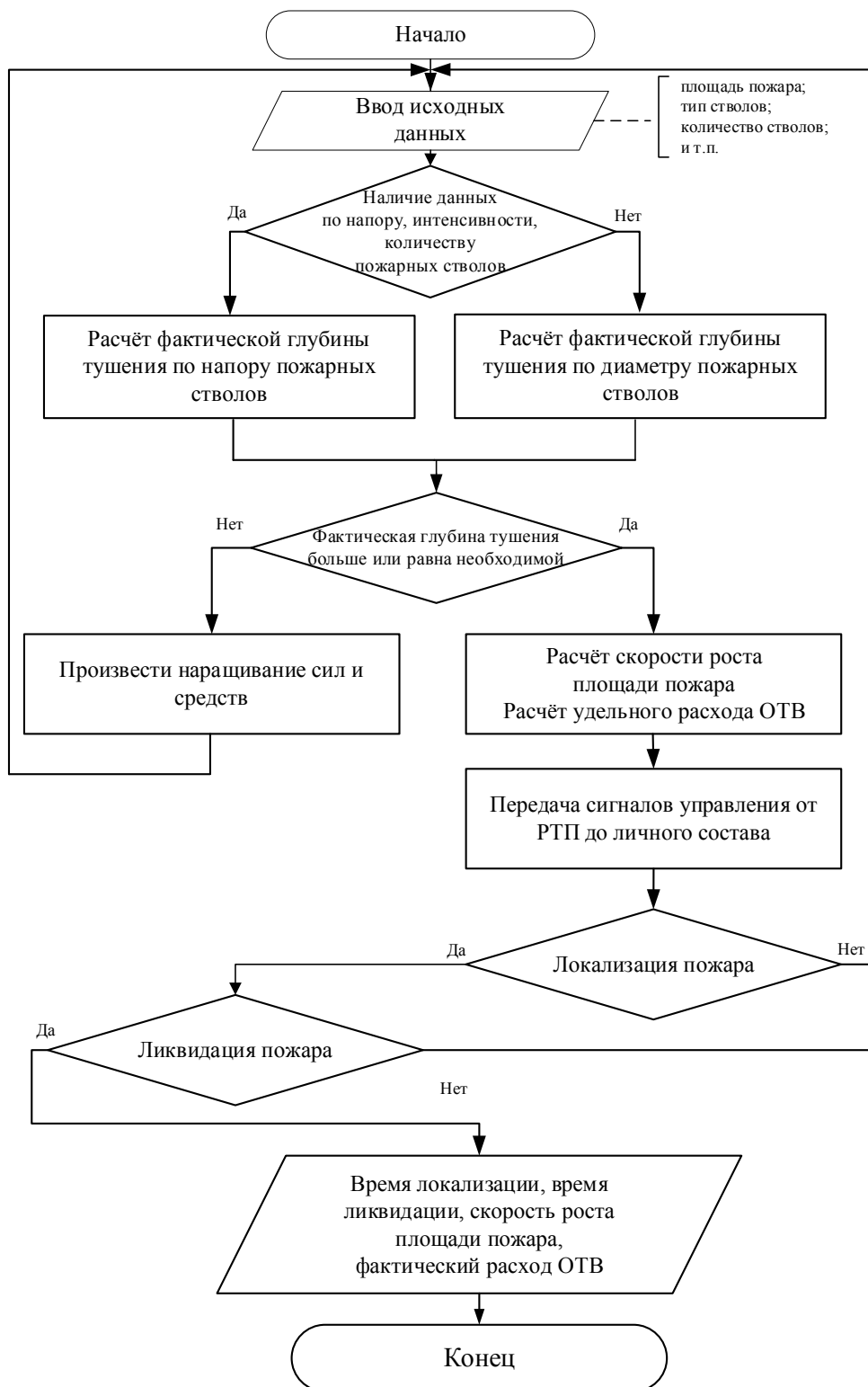


Рисунок 7 – Алгоритм поддержки принятия решений РТП на основе оценки скорости роста площади пожара

Время локализации пожара будет зависеть от промежутка времени свободного развития пожара, начала ведения эффективных действий по тушению пожара, требуемой и фактической скоростей сосредоточения расходов огнетушащих веществ. При невозможности проведения наступления по направлению распространения огня, необходимо использовать другой метод.

$\tau_{св}$ – время от начала возгорания до введения сил и средств первого пожарного подразделения
 τ_1 – время сосредоточения сил и средств первого пожарного подразделения
 S_T – площадь тушения, м²
 a – ширина площади пожара, м
 d – диаметр насадка ПС, м
 H – напор перед насадком ПС, м.вод.ст.
 $I_{тр}$ – требуемая интенсивность подачи ОТВ, л/м² · с
 $\bar{V}_ф$ – фактическая усреднённая скорость сосредоточения ОТВ, л/с²

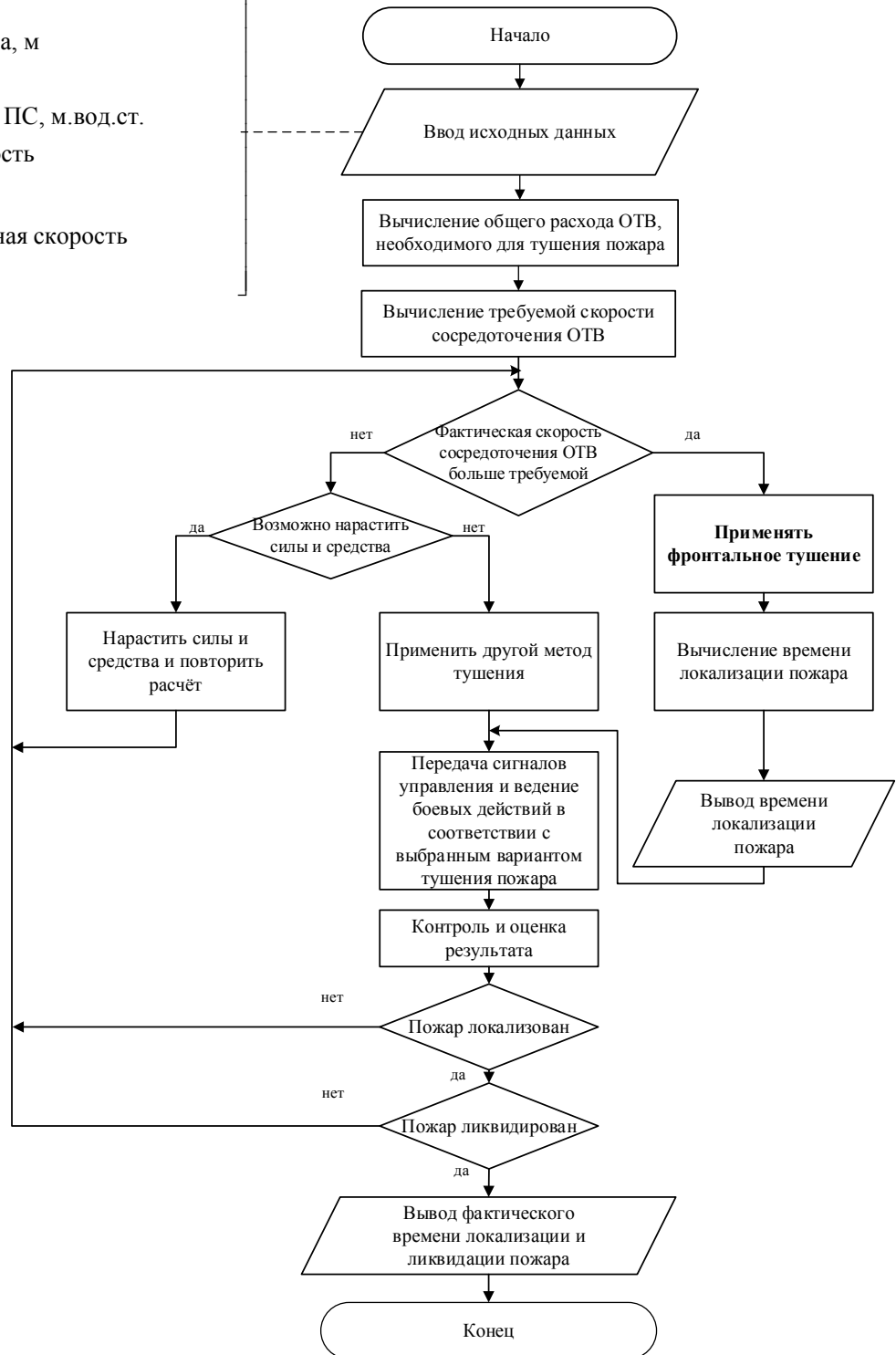
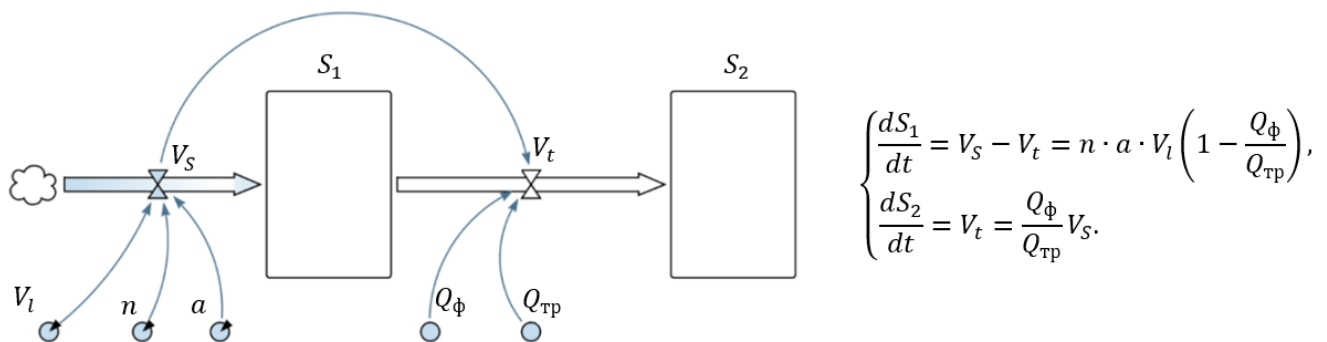


Рисунок 8 – Алгоритм поддержки принятия решения РТП при фронтальном методе тушения пожара, решающий задачу оценки возможности применения фронтального метода тушения для локализации и ликвидации пожара

В третьей главе «Оценка эффективности разработанной модели и алгоритмов поддержки принятия решений руководителя тушения пожара» приведены результаты оценки модели и алгоритмов на основе статистического анализа, имитационного моделирования и сравнительного анализа применимости к ранее потушенным пожарам.

Оценка эффективности модели поддержки принятия решений РТП при планировании и отработке боевых действий на основе оценки функции ценности вариантов тушения пожара производилась путём сравнительного анализа результатов её применения к реальным пожарам. Анализ показал, что принятие решения на основе предлагаемой модели в большинстве случаев может повысить эффективность принятия решения РТП, что выражается в сокращении боевых позиций личного состава, участвующего в тушении пожара в среднем в 1,4 раза, сокращении расхода огнетушащего вещества при тушении пожара в среднем в 1,45 раза.

Оценка эффективности алгоритма поддержки принятия решений РТП при фронтальном методе тушения (см. рисунок 8) производилась на основе имитационного моделирования, исходя из гипотезы об эффективности предлагаемого алгоритма (лежащего в основе имитационной модели), при сходимости результатов моделирования и результатов статистического анализа тушения пожаров в жилых зданиях. Предложенные в алгоритме математические соотношения рассмотрены в терминах системной динамики (рисунок 9). Результаты моделирования показали свою сходимость с результатами разработанного алгоритма поддержки принятия решения РТП при фронтальном методе тушения.



S_1 – площадь пожара, S_2 – площадь потушенного пожара, V_s – скорость тушения пожара, V_l – линейная скорость распространения пожара, n – количество направлений развития пожара, a – ширина площади пожара, Q_ϕ – фактический расход ОТВ, $Q_{тр}$ – требуемый расход ОТВ

Рисунок 9 – Графическая интерпретация имитационной модели

Оценка эффективности алгоритма поддержки принятия решений РТП на основе оценки скорости роста площади пожара (см. рисунок 7) выполнена путём проверки адекватности полученных выражений, которые лежат в основе алгоритма. В работе описана методика проведения и результаты серии экспериментов по определению значения параметра глубины тушения пожара ручными пожарными стволами. В диссертации доказан положительный экономический эффект при использовании полученных научных результатов.

В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения диссертационной работы. **В приложениях** представлен программный код разработанных продуктов и акты внедрения результатов научного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования для повышения эффективности принятия решений РТП при планировании боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях на основе методов теории полезности получены следующие основные научные и практические результаты.

Проведен анализ динамики пожаров и материального ущерба от пожаров в жилых зданиях. Обосновано, что динамика пожаров в Российской Федерации имеет отрицательную направленность, но прямой материальный ущерб в городах в период с 2008 по 2019 годы вырос на 3950 млн. рублей. В Российской Федерации и Краснодарском крае в среднем уменьшается риск столкновения с пожаром (опасными факторами пожара) на 3,4 % в год, риск гибели при пожаре – на 2,75 % в год, риск гибели от пожара – на 7,7 % в год. Риск гибели при пожаре в Краснодарском крае выше, чем в Южном федеральном округе и в среднем по Российской Федерации.

Проведен комплексный анализ процесса принятия управленческих решений РТП. Обосновано, что данная задача решается в условиях ограничения времени, условиях неопределенности, быстрого изменения факторов внешней среды и многокритериального выбора. Наиболее важным этапом принятия решения РТП является выбор наилучшей альтернативы из возможных вариантов тушения пожара.

С учетом требований, предъявляемых к моделям поддержки принятия управленческих решений для планирования и отработки боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях, сделан выбор в пользу методов теории полезности, так как они наиболее полно подходят для решения многокритериальных задач в условиях определенности и неопределенности, в четкой и в нечеткой среде, с учетом структуры предпочтения РТП. Было выявлено 9 наиболее часто встречающихся ошибок при принятии управленческих решений РТП, предложены пути их снижения за счет повышения степени автоматизации системы управления, в том числе внедрением систем поддержки принятия решений РТП, в основе которых модели и алгоритмы поддержки принятия управленческих решений.

На основе применения теории полезности к решению задачи поддержки принятия решения РТП для планирования боевых действий разработана модель поддержки принятия решения РТП на основе оценки функции ценности, позволяющая выбрать рациональный

вариант ведения боевых действий по тушению пожара.

Разработан алгоритм поддержки принятия решения РТП на основе оценки скорости роста площади пожара, позволяющий РТП оценить достаточность количества сил и средств при планировании и отработке боевых действий по тушению пожара с использованием водяных пожарных стволов.

Разработан алгоритм поддержки принятия решения РТП при фронтальном методе тушения пожара, позволяющий РТП определить возможность использования фронтального метода тушения пожара имеющимися силами и средствами.

Разработанная модель поддержки принятия решения РТП на основе оценки функции ценности вариантов тушения пожара, а также алгоритмы поддержки принятия решения РТП на основе оценки скорости роста площади пожара и поддержки принятия решения РТП при фронтальном методе тушения пожара повышают эффективность планирования боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях.

Для обоснования сил и средств пожаротушения в алгоритме поддержки принятия решений РТП на основе функции ценности вариантов тушения пожара разработана модель определения параметра глубины тушения пожара по расходу ПС и по напору воды перед его насадком, позволяющая повысить точность значения данного параметра для расчетов сил и средств при планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях. Проведена серия экспериментов по определению глубины тушения водяными пожарными стволами. Проверка гипотезы о согласованности теоретической и эмпирической зависимости параметра глубины тушения по критерию Колмогорова – Смирнова для уровня значимости 0,05 показали сходимость теоретических и практических результатов для углов наклона водяного пожарного ствола 30 и 45°.

На основе анализа применимости полученных научных результатов к массиву проработанных статистических данных и описаний реальных пожаров проведена оценка их достоверности, которая доказала эффективность разработанных моделей и алгоритмов поддержки принятия решений РТП. Полученные результаты позволяют увеличить точность вычислений по расчету сил и средств при планировании и отработке боевых действий по тушению пожаров в жилых зданиях в среднем на 9 %, уменьшить объем затраченного огнетушащего вещества в среднем в 1,45 раза, сократить количество боевых позиций личного состава на тушение пожара в среднем в 1,4 раза.

Доказана экономическая эффективность разработанной модели и алгоритмов поддержки принятия решения РТП при планировании боевых действий по тушению пожаров в многоквартирных жилых зданиях, заключающаяся в сокращении материального ущерба от пожара в среднем на 8 %.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, позволяют повысить качество экспертизы и анализа результатов планирования боевых действий с пожаром после его тушения. Полученные результаты рекомендованы для использования при составлении документов предварительного планирования действий по тушению пожаров, для организаций, занимающихся разработкой и производством пожарной техники и оборудования для пожарных подразделений, для интеграции в современные системы поддержки принятия решений подразделений пожарной охраны.

Таким образом, полученные научные результаты в совокупности позволяют сделать вывод о том, что цель, поставленная в диссертационном исследовании, достигнута, задачи диссертационного исследования решены в полном объеме.

Основные положения диссертационной работы опубликованы

в следующих периодических изданиях из перечня ВАК:

1. Журавлев, Н.М. Определение площади тушения пожара ручными водяными пожарными стволами при выработке управленческих решений [Текст] / Н.М. Журавлев, А.Ю. Намычкин, Д.В. Тараканов, Н.М. Хыонг, М.В. Шевцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2008 – № 2. – С. 59-61.

2. Журавлев, Н.М. Формализация и постановка задачи при управлении пожарными подразделениями в процессе тушения пожара [Текст] / Н.М. Журавлев, А.Н. Денисов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2010 – № 2. – С. 35-40.

3. Журавлев, Н.М. Формализация и постановка задачи пожарным подразделениям при тушении пожара [Электронный ресурс] / Н.М. Журавлев, А.Н. Денисов // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 2 (30). – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-2/05-02-10.ttb.pdf> (дата обращения: 05.05.2021).

4. Журавлев, Н.М. Глубина тушения пожара как основание для ресурсного обоснования сил и средств пожарных подразделений [Электронный ресурс] / А.Н. Денисов, Н.М. Журавлев, М.В. Шевцов, В.Б. Захаревский // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – № 5 (39). – 9 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-5/02-05-11.ttb.pdf> (дата обращения: 21.03.2021).

5. Журавлев, Н.М. Формализация задач управления ресурсами пожарной охраны в компьютерных информационных системах [Электронный ресурс] / Н.М. Журавлев, А.Н. Денисов // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 2 (43). – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-5/02-05-11.ttb.pdf> (дата обращения: 29.04.2021).

6. Журавлев, Н.М. Анализ причин для разработки системы поддержки принятия управленческих решений руководителя тушения пожаров [Электронный ресурс] / Н.М. Журавлев, А.Н. Денисов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2020. – № 2 – 8 с. – Режим доступа: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V20202/12.pdf> (дата обращения: 11.05.2021).

Другие научные издания

7. Журавлев, Н.М. Экспериментальное обоснование граничных условий при истечении воды из пожарного лафетного ствола /Н.М. Журавлев, А.Ю. Намычкин, Д.В. Тараканов [и др] // Материалы семнадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности»- СБ-2008. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008 – С. 185-187.

8. Журавлев, Н.М. Коррекция парадигм управления безопасностью / С.В. Гундар, А.Н. Денисов, В.Б. Захаревский, Н.М. Журавлев // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Тезисы докладов XXI Международной научно-практической конференции. – Ч.2. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – С. 90-92.

9. Журавлев, Н.М. Первый закон пожарной тактики / С.В. Гундар, А.Н. Денисов, Н.М. Журавлев, М.В. Шевцов // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации. Третья межведомственная научно-практическая конференция (17 апреля 2009 года), часть 1. – Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России, 2009. – С. 124.

10. Журавлев, Н.М. Метод оперативного управления пожарными подразделениями / А.Н. Денисов, В.Б. Захаревский, Н.М. Журавлев, М.В. Шевцов // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XVII международной конференции. – М.: РГГУ, 2009. – С. 323-327.

11. Журавлев, Н.М. Методы и принципы управления системой пожарной безопасности / Перспективы развития информационных технологий. II ежегодная всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (11 марта 2010 года). – Новосибирск: ЦНРС, 2010. – С. 268-273.

12. Журавлев, Н.М. Условия выбора и задачи принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре / Материалы 20-й научно-технической конференции «Системы безопасности» - СБ-2011. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2011. – С. 211-215.

13. Журавлев, Н.М. Сравнительный анализ отказов конструктивных элементов основных пожарных автомобилей / С.А. Шкунов, Н.М. Журавлев // 2-й межвузовский научно-практический семинар: «Надежность и долговечность машин и механизмов». – Иваново, 2011. – С. 25-31.

14. Журавлев, Н.М. Алгоритм принятия управленческих решений для руководителя тушения пожара в условиях неопределенности [Электронный ресурс] / Н.М. Журавлев // Инновационные исследования как локомотив развития современной науки: от теоретических парадигм к практике: электронный сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции. – М.: НИЦ МИСИ, 2019. – С. 193-196. – Режим доступа: <http://conference-nicmisi.ru/innovatsionnye-issledovaniya-kak-lokomotiv-razvitiya-sovremennoj-nauki-ot-teoreticheskikh-paradigm-k-praktike.html> (дата обращения: 15.05.2021).

15. Журавлев, Н.М. Поддержка принятия решения руководителя тушения пожара на основе системно-динамической модели фронтального тушения пожара / Н.М. Журавлев // Материалы IV всероссийской научно-практической конференции «Приоритетные направления развития Российской науки». – г. Санкт-Петербург, 14 июля 2020 г. – С.125-131.

16. Журавлев, Н.М. Об оценке эффективности решений задач управления пожарной безопасностью на примере анализа пожарных рисков [Текст] / Н.М. Журавлев // Материалы VII международной научно-практической конференции в двух частях, часть 2: «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С.32-35.

Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ

17. Журавлев, Н.М. Свид. 2018661392 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для ЭВМ «Экспресс-оценка опасных факторов пожара» / Н.М. Журавлев, Е.А. Ягодка; заявители и правообладатели Журавлев Николай Михайлович (RU), Ягодка Евгений Александрович (RU). – № 2018661392; заявл. 05.07.2018; опублик. 07.09.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

18. Журавлев, Н.М. Свид. 2021613498 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для ЭВМ «SiS calculation» / Н.М. Журавлев, А.Н. Денисов; заявители и правообладатели Журавлев Николай Михайлович (RU), Денисов Алексей Николаевич (RU). – № 2021613498; заявл. 01.03.2021; опублик. 09.03.2021, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.