

*На правах рукописи*



Гринченко Борис Борисович

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬЮ УЧАСТНИКОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в учебно-научном комплексе автоматизированных систем и информационных технологий Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

- Научный руководитель:** **Топольский Николай Григорьевич,**  
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий систем и информационных технологий ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России»
- Официальные оппоненты:** **Порошин Александр Алексеевич,**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник НИЦ ОУП ПБ ФГБУ «Всероссийский орден «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны»
- Таранцев Александр Алексеевич,**  
Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»
- Ведущая организация:** ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий)

Защита диссертации состоится 22 апреля 2020 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 205.002.01 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4, зал диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте: <https://academygps.ru/upload/iblock/8fc/8fcfd409437ef722c14c6b4c32630803.pdf>

Автореферат разослан 26 февраля 2020 г.

Отзыв на автореферат с заверенной подписью и печатью просим направить в Академию Государственной противопожарной службы МЧС России по указанному адресу.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Р.Ш. Хабибулин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Концепция обеспечения общественной безопасности в Российской Федерации определяет пожары как вид наиболее значимых угроз устойчивому социально-экономическому развитию страны. Защита общества от пожаров достигается путем реализации комплекса взаимоувязанных государственных функций, одной из которых является своевременное и качественное их тушение. Процесс эффективной борьбы с пожарами включает в себя комплекс работ в непригодной для дыхания среде (НДС), который ограничен временем защитного действия дыхательного аппарата (ДА), поэтому участники тушения пожара нуждаются в постоянном управлении безопасностью. В существующей системе обеспечения безопасности работ в НДС сложилась следующая ситуация: с одной стороны, анализ безопасности проводится только на качественном уровне с использованием ограниченного массива данных, что не позволяет учитывать активное влияние участников тушения пожара на процесс управления безопасностью, с другой стороны, необходимые для количественного анализа данные получают путем мониторинга параметров безопасности, однако отсутствие механизмов принятия решений, учитывающих структуру результатов мониторинга, снижает функциональные возможности современных систем безопасности и является препятствием к их дальнейшему развитию. При этом специфика борьбы с пожарами определяет ряд требований к получению, обработке и отображению информации для принятия решений, поэтому результаты мониторинга могут быть использованы на практике в виде информационно-аналитической системы.

**Степень разработанности темы исследования.** В разработку информационных систем поддержки управления существенные результаты внесли отечественные и зарубежные ученые: С.В. Агеев, Н.Н. Брушлинский, А.Д. Ищенко, С.А. Качанов, А.В. Матюшин, Е.А. Мешалкин, А.А. Порошин, С.В. Соколов, В.М. Стрелец, Д.В. Тараканов, А.А. Таранцев, Н.Г. Топольский, А.В. Федоров, А.Н. Членов, P. Dollar, G. Cottrell и др.

Однако теоретические и практические вопросы управления, связанные с дистанционным мониторингом параметров безопасности участников тушения пожара в непригодной для дыхания среде, остались не изучены. Таким образом, решаемая в диссертации **научная задача** состоит в разработке моделей и алгоритмов поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде на основе мониторинга параметров безопасности. Результаты решения данной научной задачи имеют важное значение для развития отрасли знаний в области управления безопасностью участников тушения пожара на основе информации, получаемой посредством мониторинга.

**Объектом исследования** является процесс управления безопасностью участников тушения пожара, а **предметом исследования** – информационно-аналитическая поддержка управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертации является повышение эффективности управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде путем разработки и практического применения моделей и алгоритмов поддержки управления на основе мониторинга параметров безопасности.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ системы управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде.
2. Разработаны модели поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде.
3. Разработан алгоритм синтеза информационных ресурсов на основе моделирования мониторинга параметров безопасности участников тушения пожара.
4. Разработан алгоритм и программный комплекс поддержки управления безопасностью участников тушения пожара в непригодной для дыхания среде.

**Научная новизна.** В процессе выполнения диссертации были получены новые научные результаты:

1. Дескриптивная модель поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде, в которой впервые определен групповой и персонализированный уровень мониторинга безопасности, что обеспечивает лицо, принимающее решение, информацией для выбора варианта управляющего воздействия.
2. Вероятностная модель поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, которая, в отличие от известных, позволяет декомпозировать общую работу в непригодной для дыхания среде на элементарные работы, для которых определены нормативные значения риска реализации деструктивных событий как на групповом, так и персонализированном уровне мониторинга безопасности.
3. Алгоритм синтеза информационных ресурсов для поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, позволяющий при мониторинге определять плановые значения параметров безопасности.
4. Алгоритм поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, обеспечивающий лицо, принимающее решение, необходимой информацией для выбора варианта управляющего воздействия на основе сопоставления плановых и фактических значений параметров безопасности при работе в непригодной для дыхания среде.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в разработке моделей и алгоритмов поддержки управления безопасностью участников тушения пожара на основе результатов мониторинга параметров безопасности.

**Практическая значимость** исследования направлена на повышение эффективности управления безопасностью участников тушения пожара путем применения разработанных моделей и алгоритмов, реализованных в виде программного комплекса поддержки управления безопасностью при работе в непригодной для дыхания среде.

**Методология и методы исследования.** В диссертации использованы методы теории принятия решений, методы системного анализа, теория сетевого планирования, теория алгоритмов, теория вероятностей и математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модели поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде на персонализированном и групповом уровне мониторинга безопасности.
2. Алгоритмы поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде необходимые, для формирования плановых параметров безопасности участников тушения пожара и сравнения их с фактическими, получаемыми посредством мониторинга.
3. Практические рекомендации по применению моделей и алгоритмов для выполнения условий безопасности участников тушения пожара на персонализированном и групповом уровне мониторинга безопасности.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность результатов, их внутренняя непротиворечивость обеспечиваются применением апробированного математического аппарата и корректным использованием исходных данных, экспериментальным исследованием с использованием статистических критериев согласия Пирсона, Шапиро-Уилка, Колмогорова, а также их согласованностью с работами других исследователей.

Основные результаты диссертации обсуждались на международных научно-технических конференциях: Системы безопасности (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016, 2017 гг.); Пожарная и аварийная безопасность (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2016–2018 гг.); Пожарная безопасность: проблемы и перспективы (Воронеж, ВИ ГПС МЧС России, 2016 г.); Информационные технологии в сфере РСЧС и ГО (Химки, АГЗ МЧС России, 2018 г.); Актуальные проблемы пожарной безопасности (Балашиха, ВНИИПО МЧС России, 2019 г.) и др.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 4 – в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России, 3 – в изданиях, входящих в международную систему цитирования. Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, базы данных, патент на полезную модель.

**Личный вклад автора.** В совместных публикациях результаты, связанные с разработкой моделей и алгоритмов поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде на основе результатов мониторинга, получены автором лично.

**Внедрение результатов работы.** Разработанные в диссертации теоретические положения, использованы:

1. В 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.
2. В производственной и опытно-конструкторской деятельности компании АО «Дыхательные системы – 2000» при разработке системы управления безопасностью участников тушения пожара на основе мониторинга показателей рабочего давления в баллонах дыхательных аппаратов со сжатым воздухом.
3. В Главном управлении МЧС России по Ивановской области при разработке документов предварительного планирования действий по тушению пожаров с применением сил и средств газодымозащитной службы.
4. В научной деятельности ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также при подготовке учебных пособий и методических рекомендаций по изучению дисциплин.
5. В учебной деятельности ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» при организации и проведении учебных занятий по дисциплинам «Пожарная тактика» (специальность 20.05.01 «Пожарная безопасность») и «Информационные системы поддержки принятия решения» (направление подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность» (уровень магистратуры), профиль «Пожарная безопасность»).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 155 страниц. Работа иллюстрирована 61 рисунком и содержит 24 таблицы и 3 приложения. Список литературы включает в себя 159 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту и сведения о внедрении и апробации результатов исследования.

**В главе 1 «Анализ системы управления безопасностью участников тушения пожара»** в целях постановки и исследования научной задачи рассмотрена специфика управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде. Результаты анализа пожаров, взятых на статистический учет, показывают положительную тенденцию к их снижению, однако данная тенденция не наблюдается для динамики гибели сотрудников пожарной охраны, о чем свидетельствует отрицательное значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена между пожарами, взятыми на статистический учет и гибелью пожарных. Показано, что основными причинами гибели пожарных являются: работа в непригодной для дыхания среде (25 %), воздействие высокой температуры при пожаре (21 %), обрушение строительных конструкций при пожаре (17 %). Работа в непригодной для дыхания среде относится к одному из сложнейших направлений видов деятельности участников тушения пожара и требует повышенного уровня планирования, нормирования, а также управления. Определено, что существующие модель и алгоритм планирования и управления безопасностью участников тушения пожара в непригодной для дыхания среде основаны на средних и максимальных значениях легочной вентиляции, что не в полной мере отвечает требованиям условий безопасности. Современные дыхательные аппараты оборудуются дистанционными системами мониторинга параметров безопасности участников тушения пожара, что определяет возможность получения нового вида информации для повышения безопасности при управлении работами в НДС.

В ходе ретроспективного анализа доказано, что одним из основных направлений повышения уровня безопасности участников тушения пожара в НДС является развитие управленческой деятельности путем внедрения механизмов информационной поддержки на основе мониторинга параметров безопасности. Сделан аргументированный вывод в необходимости разработки вероятностной модели поддержки управления, позволяющей оценить риск наступления деструктивных событий, связанных с недостатком времени защитного действия и запаса воздуха дыхательного аппарата. Определены требования к разработке вероятностной модели поддержки управления, применяемой для повышения уровня безопасности участников тушения пожара.

Выполнен анализ структуры мониторинга и управления безопасностью работ в НДС, в ходе которого определен ряд недостатков существующей детерминированной модели и линейного алгоритма. Рассмотрены пути развития системы мониторинга при работе в НДС. Показано, что процедуры принятия решений носят качественный характер и основаны на сопоставлении средних значений параметров безопасности вследствие использования ограниченного массива данных, что не позволяет учитывать активное влияние специфики работ участников тушения пожара на процесс управления безопасностью. Определена необходимость детального анализа результатов мониторинга параметров безопасности для разработки и внедрения процедур принятия решений на основе количественных показателей, учитывающих математическую структуру результатов мониторинга.

Поставлена **научная задача**, состоящая в разработке моделей и алгоритмов поддержки управления безопасностью участников тушения пожара в непригодной для дыхания среде на основе мониторинга параметров безопасности. Определен перечень научных результатов, обеспечивающих решение научной задачи, состоящей в следующих теоретических положениях: дескриптивная модель поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, которая позволяет осуществлять управляющие воздействия на групповом и персонализированном уровне мониторинга; вероятностная модель поддержки управления безопасностью работ в непригодной для дыхания среде, разработанная на основе теории управления риском реализации деструктивных событий, в которой реализован критерий безопасности и обоснованы его значения; алгоритм синтеза информационных ресурсов на основе результатов мониторинга и моделирования параметров безопасности участников тушения пожара; алгоритм поддержки управления безопасностью работ в НДС, позволяющий производить управляющие воздействия в режиме реального времени.

Для практической реализации и апробации теоретических положений определена необходимость разработки программного комплекса информационной поддержки управления безопасностью при решении задач планирования и применения участников тушения пожара при мониторинге их состояния в процессе решения задач в НДС.

**В главе 2 «Разработка моделей поддержки управления безопасностью участников тушения пожара»** рассмотрен комплекс деструктивных событий, реализация которых на практике может являться препятствием для успешного выполнения поставленных перед участниками тушения пожара задач, а в исключительных случаях приводить к их травмированию и/или гибели. Для исследования реализации деструктивных событий использован метод вероятностного моделирования, для которого разработаны детерминированная и вероятностная модели информационной поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в НДС.

**Детерминированная модель.** Введен комплекс работ  $R$ , представляющий собой совокупность элементарных работ  $R_i$ , для реализации которого потребуется ресурс времени  $T$  (мин) и ресурс воздуха  $V$  (л), рассчитываемые по формуле:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n T_i, \quad V = V_0 + \sum_{i=1}^n V_i, \quad T_z = T_{z0} + \sum_{i=1}^n T_{zi}, \quad (1)$$

где  $T_0$  – время для выполнения непредвиденных работ  $R_0$ , мин;  $T_i$  – время для выполнения  $i$ -й работы, мин;  $V_0$  – объем воздуха для выполнения непредвиденных работ  $R_0$ , л;  $V_i$  – объем воздуха, необходимый для успешной реализации  $i$ -й работы  $R_i$ , л;  $T_{z0}$  – время защиты при объеме воздуха  $V_0$ , мин;  $T_{zi}$  – время защиты при объеме воздуха  $V_i$ , мин.

Тогда условие безопасности при работе в НДС для каждой из элементарных работ  $R_i$  задается строгим неравенством:

$$T_{zi} > T_i. \quad (2)$$

**Вероятностная модель.** Рассмотрим оценку вероятности реализации деструктивных событий  $Q_i$  для каждой составляющей комплекса работ  $R_i$ . Тогда с вероятностной точки зрения ресурс времени представляет собой интервалы значений:

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max}, \quad T_{zi}^{\min} \leq T_{zi} \leq T_{zi}^{\max}. \quad (3)$$

Таким образом, чтобы сравнить по соотношению (2) интервалы значений (3) в соответствии с вероятностным подходом, необходимо определить закон распределения сравниваемых случайных величин. Следовательно, при анализе интервальных значений (3) можно перейти к анализу их вероятностных оценок  $\langle \bar{T}_{zi}, D_{zi} \rangle$  и  $\langle \bar{T}_i, D_i \rangle$ .

Сформируем модель управления безопасностью в терминах теории управления рисками, показателей безопасности:

$$Q_i \leq Q_i^*, \quad (4)$$

где  $Q_i^*$  – приемлемый уровень локального риска. При выполнении работы за интервал времени, характеризуемый параметрами  $\langle \bar{T}_i, D_i \rangle$  и объемом воздуха  $V_i$ , который обеспечивает интервал времени защитного действия, характеризуемый параметрами  $\langle \bar{T}_{zi}, D_{zi} \rangle$ , необходимо определить риск  $Q_i$  реализации события, состоящего в том, что объема воздуха  $V_i$  будет недостаточно для выполнения работы  $R_i$ .

Время защиты и время реализации работы являются непрерывными случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения, тогда решение задачи управления безопасностью предусматривает вычисление обобщенного критерия  $Z_i$  двух случайных величин с параметрами  $\langle \bar{T}_i, D_i \rangle$  и  $\langle \bar{T}_{zi}, D_{zi} \rangle$  по формуле:

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2D\pi}} \exp\left(-\frac{(T-\bar{T})^2}{2D}\right), \quad Q_i = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{Z_i}{\sqrt{2}}\right) \right], \quad Z_i = \frac{\bar{T}_{zi} - \bar{T}_i}{\sqrt{D_{zi} + D_i}}, \quad (5)$$

где  $D$  – дисперсия случайной величины, мин<sup>2</sup>;  $\bar{T}$  – математическое ожидание случайной величины, мин.

С методической точки зрения для удобства аналитического расчета уровней риска  $Q$  для случая, когда  $Q \in [0,01; 0,05]$ , можно воспользоваться формулой:

$$Q_i = a \exp(-bZ_i^n), \quad (6)$$

где  $a, b, n$  – константы модели;  $\langle a = 0,5; b = 1,2; n = 1,25 \rangle$ .

Для того чтобы управлять безопасностью при выполнении работы  $R_i$ , необходимо при фиксированных значениях  $\langle \bar{T}_i, D_i \rangle$  выбрать такой объем воздуха  $V_i$  с параметрами  $\langle \bar{T}_{zi}, D_{zi} \rangle$ , при котором значение  $Z_i$ , рассчитанное по формуле (5), будет не менее значения  $Z_i^*$ , соответствующего предельно допустимому значению риска  $Q_i^*$ :

$$Z_i^* = \left[ \frac{1}{b} \ln\left(\frac{a}{Q_i^*}\right) \right]^{1/n}, \quad (7)$$

где  $Q_i^*$  – нормативное значение величины риска реализации события  $S$ .

Определены нормативные значения критерия безопасности:

1 – нормальные условия работы  $Z^* = 1,68$  (при  $Q^* = 0,05$ );

2 – сложные условия работы  $Z^* = 2,57$  (при  $Q^* = 0,01$ ).

**Нормативные значения уровня риска.** В детерминированной постановке задачи управления значение ресурса времени определяем по формуле (1)  $T_{\text{дем}} = T_0 + T_{\text{cp}}$ , учитывая, что  $T_0 = T_{\text{cp}} \cdot \Omega$ , получаем  $T_{\text{дем}} = T_{\text{cp}} \cdot (1 + \Omega)$ , где  $\Omega$  – коэффициент безопасности.

В вероятностной постановке задачи ресурс времени определим  $T_{\text{вер}} = T_{\text{cp}} + t_{\rho,r} \cdot \sigma$ , где  $t_{\rho,r}$  – квантиль критерия Стьюдента при вероятности  $\rho$  и степени свободы  $r$ . В общем случае стандартное отклонение не известно, поэтому воспользуемся известной оценкой соотношения среднего значения и стандартного отклонения на основе коэффициента

вариации случайной величины  $d$ , учитывая, что  $\sigma = T_{cp} \cdot d$ . Тогда  $T_{вер} = T_{cp} \cdot (1 + t_{\rho,r} \cdot d)$ , и задача обоснования приемлемого уровня риска  $Q_i^*$  на основе принятого в практике ведения работ в НДС коэффициента безопасности  $\Omega$  сводится к определению вероятности  $P$  и соответствующего ей значению риска  $Q_i = 1 - P$  при степени свободы  $\nu$  для определенного расчетом квантиля распределения Стьюдента  $t_{\rho,r} = \frac{\Omega}{d}$ , полученного из тождеств:  $T_{дем} = T_{вер} \rightarrow 1 + \Omega = 1 + t_{\rho,r} \cdot d$ .

Результат расчета локального риска для работ, проводимых в нормальных и сложных условиях, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Значения локального риска для разных по тяжести условий работ в НДС

Условия работы в НДС	Детерминированная модель		Вероятностная модель				
	Коэффициент безопасности	Соотношение	$r$	$d$	$t_{p,r}$	$P$	$Q$
Нормальные	$\Omega = 0,5$	$T_0 = 1,5 \cdot T_i$	2	0,115	4,3	0,95	0,05
Сложные	$\Omega = 1$	$T_0 = 2,0 \cdot T_i$	2	0,101	9,9	0,99	0,01

С использованием разработанного критерия безопасности предложена вероятностная модель поддержки управления безопасностью работ в непригодной для дыхания среде. В модели на основе анализа нормативных значений критерия безопасности производится сравнение плановых параметров безопасности участников тушения пожара с фактическими, получаемыми от системы мониторинга. В соответствии с рисунком 1 представлена общая структура модели управления при выполнении комплекса работ  $R$  в НДС.

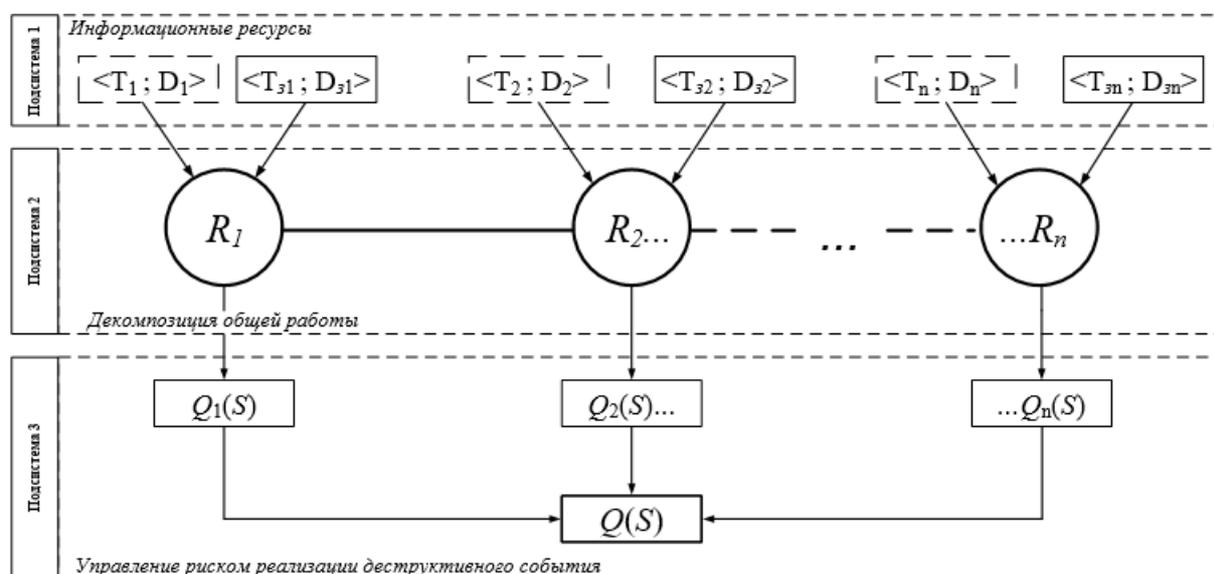


Рисунок 1 – Общая структура вероятностной модели поддержки управления

Методы проектирования и практической реализации систем дистанционного мониторинга для решения задач обеспечения безопасности участников тушения при работе в непригодной для дыхания среде, позволяет представить структуру модели в виде совокупности подсистем: информационной; декомпозиционной; аналитической. Информационная подсистема включает в себя средства сбора данных о текущих значениях дыхательных ресурсов, декомпозиционная подсистема позволяет выделять из общего комплекса работ в НДС элементарные составляющие, для которых производится синтез информационных ресурсов, аналитическая подсистема направлена на оценку уровня риска реализации деструктивного события  $S$ . Для практической реализации вероятностной модели поддержки управления безопасностью необходимо иметь интервалы фактических значений параметров безопасности, которые получают в режиме реального времени от системы мониторинга, и плановые значения параметров безопасности, которые получают путем исследования.

С целью обоснования применения вероятностной модели поддержки управления было проведено экспериментальное исследование, состоящее из общего комплекса работ  $R$  и декомпозированных структурных элементов  $R_i$ :

$R_1$  – движение до места проведения работ (400 м);  $R_2$  – реализация работ;  $R_3$  – обратный путь до места дислокации (400 м).

После получения экспериментальных данных была проведена их обработка при помощи методов математической статистики, с учетом проверки однородности выборочных совокупностей. Статистическому исследованию подлежал ресурс воздуха, который представлен давлением  $P$  (атм). Выдвигаемая гипотеза  $H_0$  – эмпирические данные подчиняются нормальному закону распределения. Для проверки гипотезы применялись критерии статистического согласия Пирсона ( $\chi^2$ ) и Шапиро-Уилка. По результатам проверки было доказано, что экспериментальные данные, представляющие собой параметры модели управления, подчиняются закону нормальному распределения. Основные показатели нормального распределения ресурса воздуха и результаты проверки гипотезы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные показатели нормального распределения

$N$ вида работы	$X_{cp}$ , (атм)	$\sigma$ , (атм)	Критерий Пирсона ( $\chi^2$ )	Критерий Шапиро-Уилка	Гипотеза $H_0$
$R_1$	9	2	0,839 > 0,1	0,95 $\geq$ 0,94	+
$R_2$	11	3	-	0,91 $\geq$ 0,84	+
$R_3$	9	2	0,25 > 0,1	0,95 $\geq$ 0,94	+

Произведено графическое представление теоретической и эмпирической модели расхода воздуха для критерия Пирсона ( $\chi^2$ ) (рисунок 2).

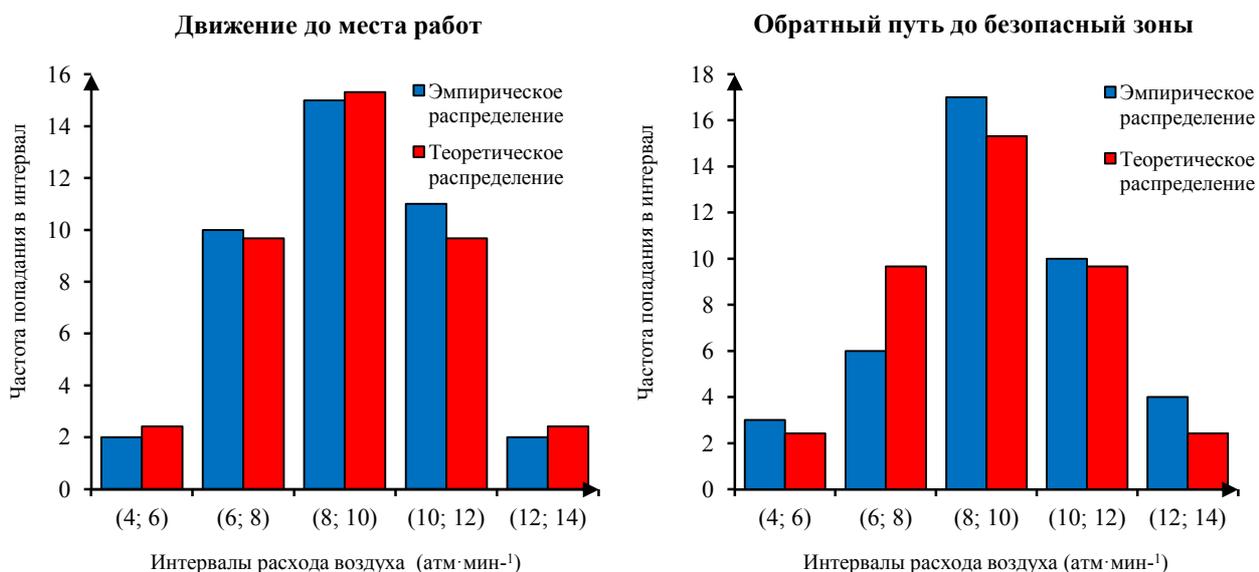


Рисунок 2 – Графический анализ эмпирических и теоретических данных

Подтверждение нормальности данных доказало адекватность модели управления безопасностью и возможность ее применения в виде информационно-аналитической структуры программного комплекса, для реализации лицом, принимающим решение, процедур поддержки управления безопасностью участников тушения пожара.

В главе 3 «Синтез информационных ресурсов для поддержки управления безопасностью участников тушения пожара» разработан алгоритм синтеза информационных ресурсов параметров безопасности, включающий в себя дискретную модель двух случайных величин  $V$  и  $T$ . Атрибутами алгоритма являются множества:

$$\langle R, Ran, \langle V; T \rangle \rangle, \quad (8)$$

где  $R$  – множество элементарных работ с элементами  $\langle R_1; R_2; R_n \rangle$ ,  $Ran$  – множество случайных равномерно распределенных чисел,  $Ran \in (0; 1)$ ,  $\langle V; T \rangle$  – множество дискретных значений исследуемых случайных величин.

С целью синтеза информационных ресурсов были использованы результаты исследования по расходу ресурсов воздуха –  $V$  и ресурсов времени –  $T$ . В качестве элементарной работы выбрано движение 100 м по горизонтальному участку местности, что обеспечивает необходимую динамику параметров безопасности и позволяет проводить мониторинг при их изменении во времени и пространстве. На основе этих данных показано формирование информационных ресурсов поддержки управления при помощи графического анализа интегральных плотностей распределения ресурсов  $V$  и  $T$  (рисунок 3). Полученные результаты информационных ресурсов для поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при выполнении элементарной работы представлены в таблице 3.

Анализ информационных ресурсов позволяет проводить мероприятия по планированию и нормированию необходимых ресурсов безопасности (воздуха, времени) в ходе решения задач, предусматривающих работу в непригодной для дыхания среде.

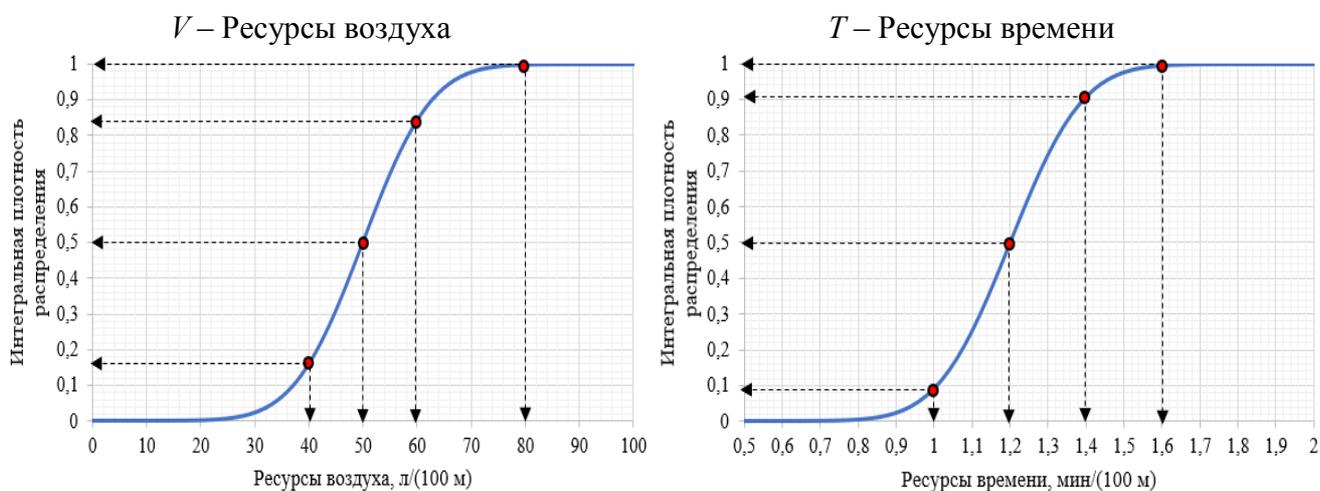


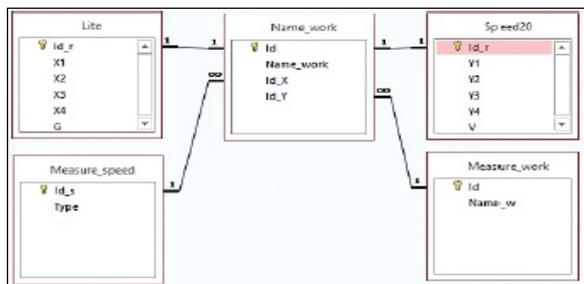
Рисунок 3 – Интегральные плотности распределения информационных ресурсов

Таблица 3 – Информационные ресурсы для решения задач управления

$V$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
Размерность, л / (100 м)	40	50	60	80
Распределение вероятностей	0,16	0,5	0,84	1,00
$T$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
Размерность, мин / (100 м)	1,0	1,2	1,4	1,6
Распределение вероятностей	0,09	0,5	0,91	1,00

Очевидно, что учесть всю специфику и многообразие работ в непригодной для дыхания среде не представляется возможным, поэтому был разработан алгоритма синтеза информационных ресурсов, необходимый для поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, позволяющий при мониторинге определять плановые значения параметров безопасности. На основе алгоритма синтеза сформирована база данных информационных ресурсов (рисунок 5), в которой представлены наиболее часто встречающиеся элементарные работы. Архитектура базы данных включает в себя схему данных (рисунок 5 а), в которой используются сохраненные результаты мониторинга и моделирования параметров безопасности при выполнении работ в непригодной для дыхания среде. Итоговый запрос (рисунок 5 в) позволяет выводить фрагменты информационных ресурсов (рисунок 5 б), которые представлены в вероятностном виде для работы системы мониторинга и моделирования параметров безопасности участников тушения пожара и в детерминированном виде для случаев нештатной ситуации.

Достоинством информационных ресурсов является возможность получения, обобщения, накопления, сохранения и цифровой обработки данных, принадлежащих определенному виду работ, что в дальнейшем позволит синтезировать данные в единую информационно-управляющую систему.

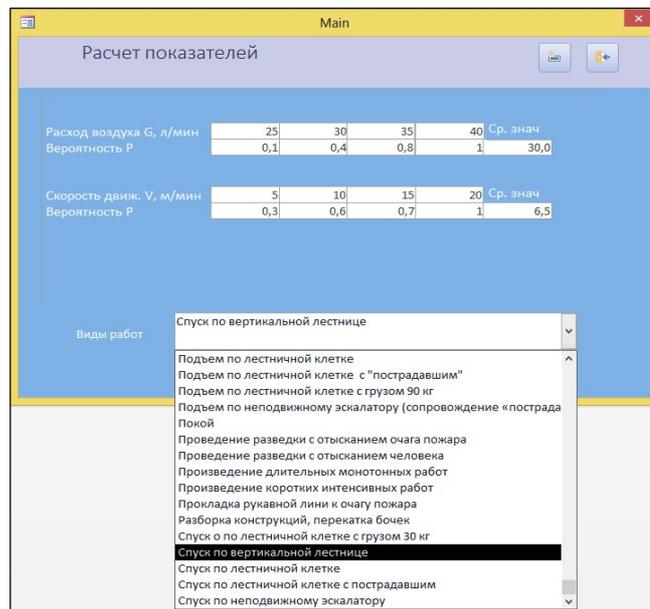


а) Схема данных

Id_r	Y1	Y2	Y3	Y4	V
1	0,15	0,45	0,6	1	10
2	0,2	0,4	0,7	1	11
3	0,3	0,45	0,6	1	6,5
4	0,3	0,45	0,7	1	6,5
5	0,25	0,4	0,65	1	10

Id_r	X1	X2	X3	X4	G
1	0,1	0,3	0,8	1	12,5
2	0,2	0,5	0,9	1	12,5
3	0,25	0,5	0,75	1	12,5
4	0,1	0,5	0,9	1	12,5
5	0,15	0,25	0,8	1	12,5

б) Фрагменты информационных ресурсов



в) Интерфейс базы данных

Рисунок 5 – Интерфейс и содержание базы данных информационных ресурсов

Массив данных и математическая структура результатов мониторинга определяет возможность их практического применения в виде программного комплекса информационно-аналитической поддержки для возможности реализации процедур управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде.

**В главе 4 «Программный комплекс поддержки управления безопасностью участников тушения пожара»** разработана дескриптивная модель поддержки управления безопасностью участников тушения пожара в непригодной для дыхания среде (рисунок б), которая состоит из информационной подсистемы контроля параметров безопасности и аналитической подсистемы оценки уровня риска наступления деструктивного события. При этом специфика работ в непригодной для дыхания среде определяет наличие двух уровней контроля за безопасностью участников тушения пожара: персонализированного и группового. Модель построена следующим образом: база данных информационных ресурсов, необходимых для поддержки управления безопасностью, обеспечивает процедуру принятия решений на основе анализа риска наступления деструктивного события индивидуально каждого газодымозащитника через устройство информационной поддержки и звеньев газодымозащитной службы в целом, через оператора системы.

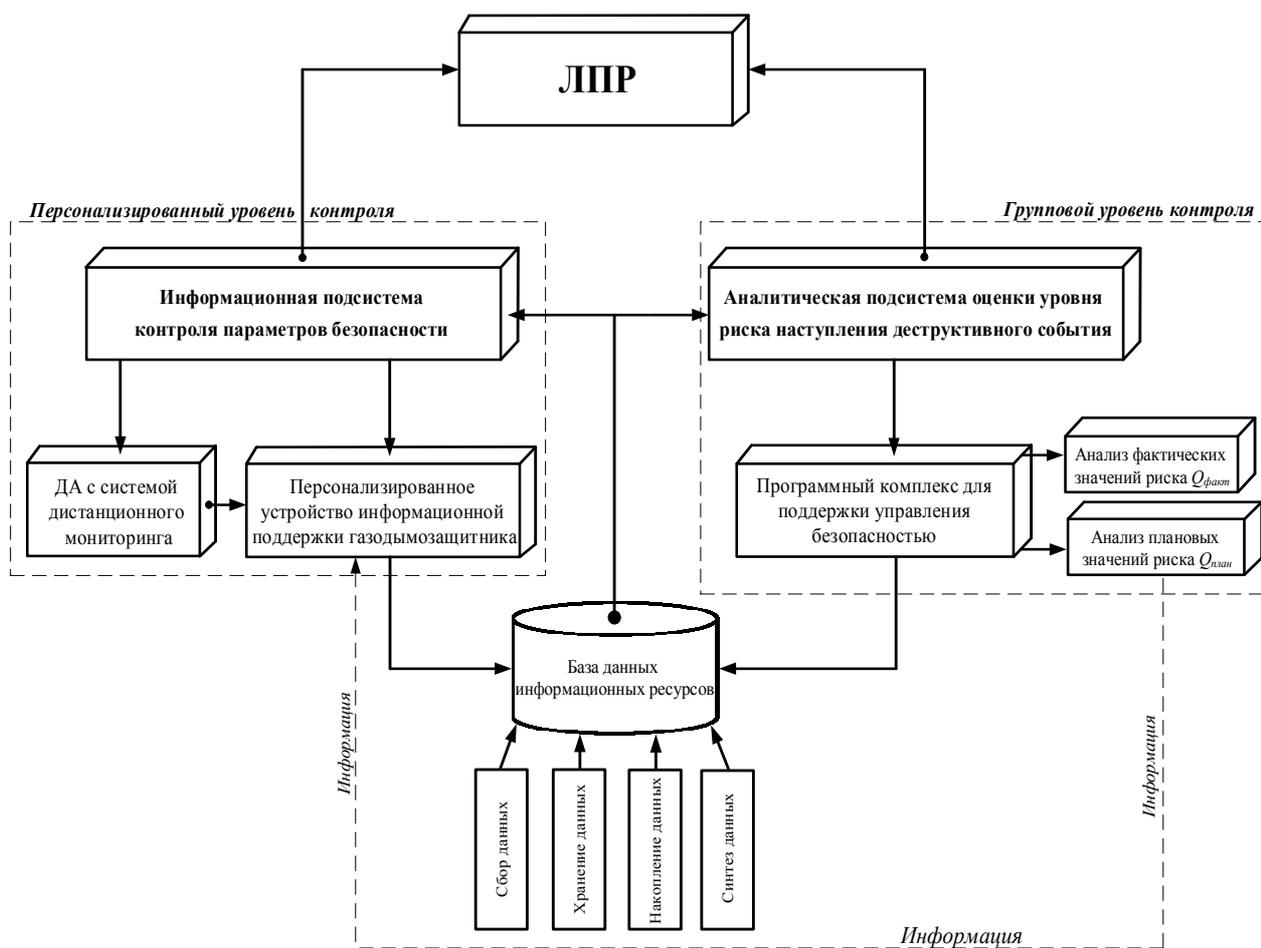


Рисунок 6 – Deskриптивная модель поддержки управления безопасностью

Принятие управленческих решений осуществляется путем разработанного алгоритма поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, представленного на рисунке 7. В качестве параметра безопасности при реализации комплекса работ  $R$  используется значения давления воздуха в баллоне дыхательного аппарата ( $P$ , атм);  $k = 0,1, \dots, n$  – номера точек мониторинга параметра безопасности при реализации работы  $R$  ( $n$  – номер конечной точки мониторинга);  $P_{факт}$  – фактическое значение параметра безопасности в точке мониторинга с номером  $k$ ;  $P_{k_1}^*$  и  $P_{k_2}^*$  – первое, и второе критическое значение параметра безопасности  $P$  в точке мониторинга с номером  $k$ . Уровень риска при выполнении работ отображается на экране персонализированного устройства в виде цветowych индикаций. Информация от устройства дублируется на пост управления, обеспечивая его функционирование на групповом уровне, где лицом, принимающим решение, реализуются следующие управляющие воздействия:  $K$  – работа в плановом режиме (зеленый фон);  $L$  – снижение времени на реализацию последующей за  $R_i$  работой (желтый фон);  $M$  – завершение работы, вывод звена ГДЗС в безопасную зону, высылка резервного звена ГДЗС (красный фон).

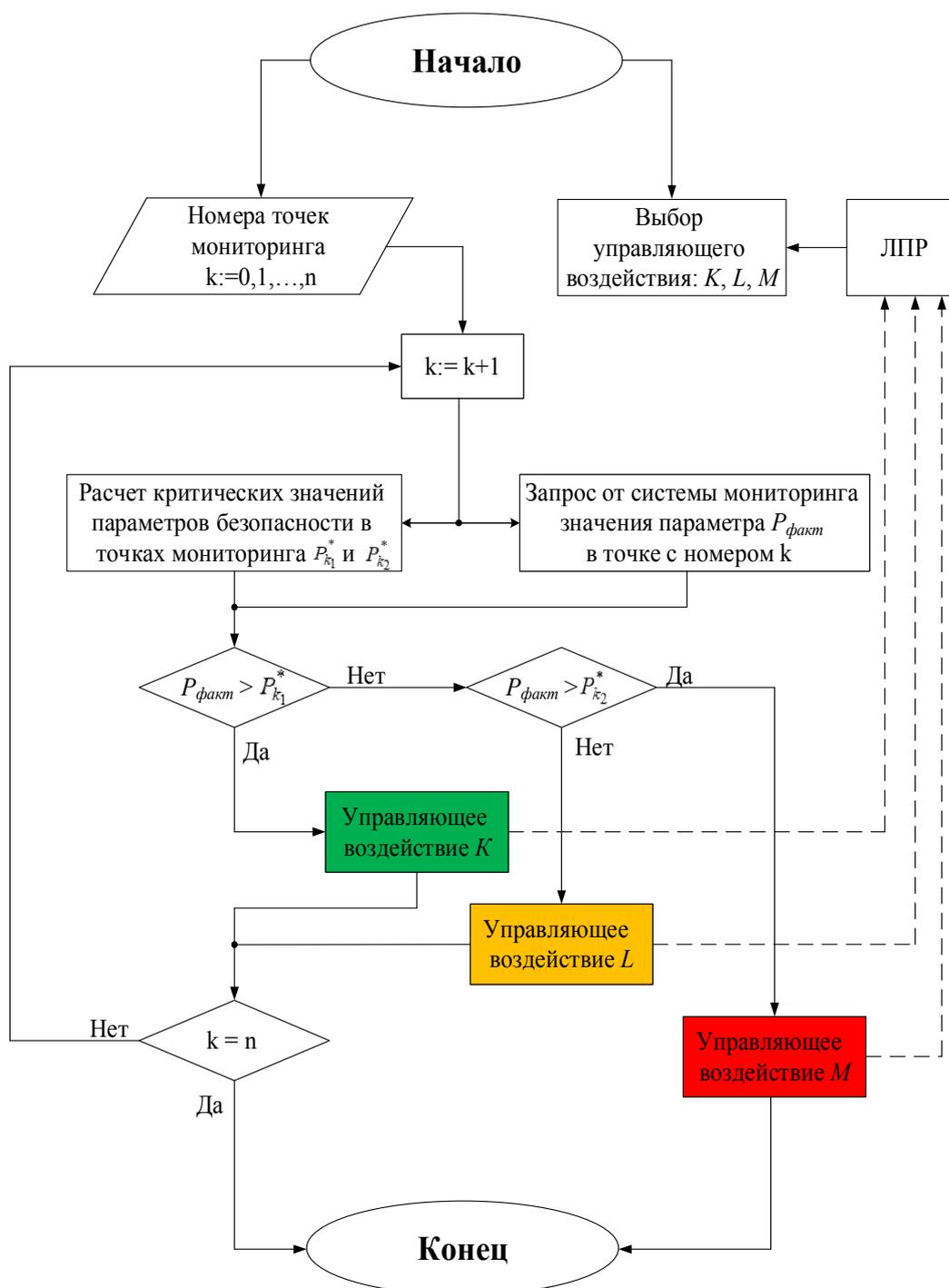


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма поддержки управления безопасностью

Таким образом, на основе полученных значений параметров безопасности в режиме реального времени посредством мониторинга производится сравнение плановых характеристик параметров безопасности с фактическими, что в совокупности позволяет корректировать действия участников тушения пожара с учетом специфики расхода воздуха индивидуально каждого газодымозащитника, повышая уровень безопасности при работе в непригодной для дыхания среде в условиях, ограниченных временем защитного действия дыхательного аппарата при выполнении комплекса работ  $R$ .

Для моделирования плановых параметров безопасности основных видов работ в точках мониторинга разработан программный комплекс (рисунке 8 б)), функциональная схема которого включает шесть взаимосвязанных блоков, представленных на рисунке 8 а).

В первом блоке производится ввод данных: формируется вероятностная модель параметров безопасности участников тушения пожара при выполнении элементарных работ (дискретный закон распределения его значений).

Во втором блоке осуществляется генерация псевдослучайных чисел, которые подчиняются заданному распределению.

В третьем блоке комплекс работ  $R$  разбивается на элементарные составляющие  $R_i$ , для каждой из которых определяется значение плановых параметров безопасности посредством сопоставления значений псевдослучайного числа и относительных частот «выпадения» значений оценок вероятностной модели. Общий ресурс параметров безопасности для работы  $R$  представляет собой сумму элементарных составляющих работ  $R_i$ . Количество итераций в соответствии с требованиями к точности метода Монте–Карло повторяется не менее чем  $10^5$  раз, результат каждой вычислительной операции сохраняется в базе данных. После производится ранжирование выпадающих значений, группировка значений в интервалы, построение гистограммы и полигона частот случайной величины. Сохраненную информацию результатов мониторинга и моделирования параметров безопасности можно извлекать из компьютера для дальнейшего детального анализа.

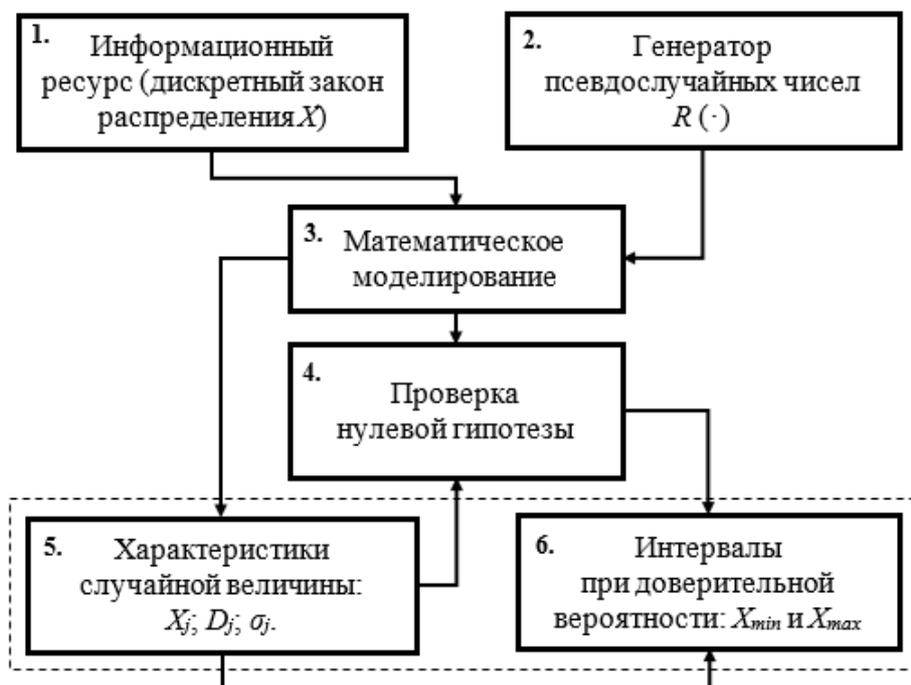
В четвертом блоке выдвигается статистическая гипотеза, состоящая в том, что случайная величина, соответствующая критерию безопасности, подчиняется нормальному закону распределения. При доказательстве нулевой гипотезы используются два критерия статистического согласия:

1 – критерий Пирсона с оценкой достоверности моделирования по распределению  $\chi^2$ , полученный на основе аппроксимации Корниша–Фишера;

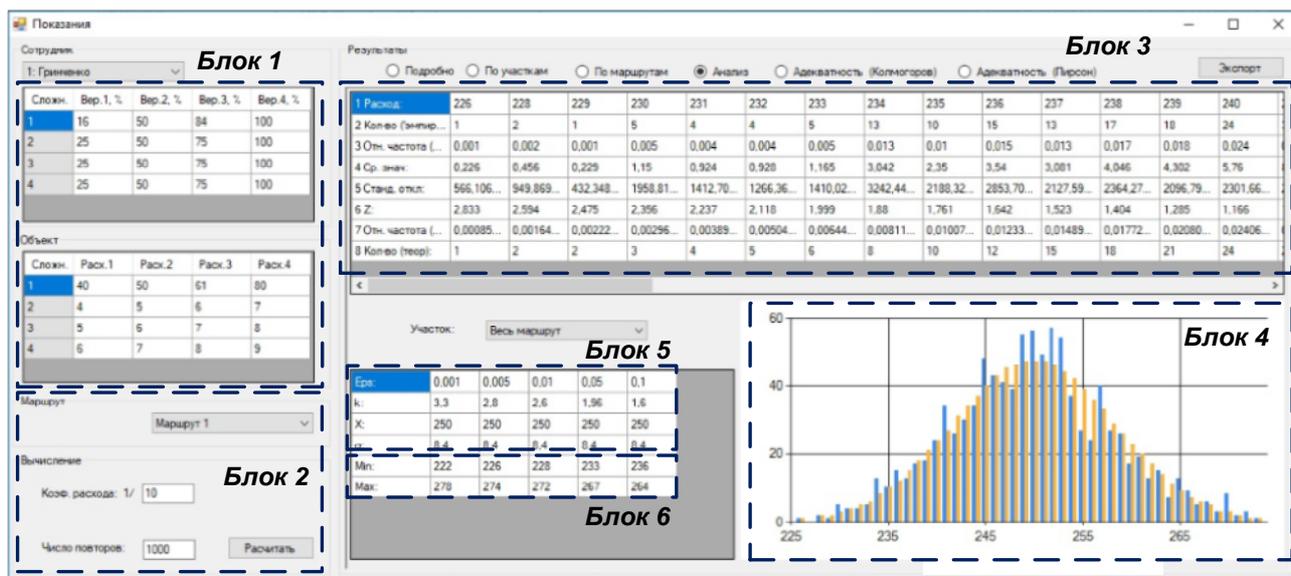
2 – критерий Колмогорова, в котором принятие гипотезы осуществляется на основе уровня значимости  $\alpha$ .

В пятом блоке формируются числовые характеристики случайной величины: математическое ожидание, дисперсия и стандартное отклонение.

В шестом блоке выводятся интервалы значений исследуемой случайной величины при различных значениях уровня риска. Далее значения на основе истинных вероятностных характеристик формируют теоретическую модель ресурса воздуха и определяют доверительные интервалы, необходимые для расчета плановых параметров безопасности.



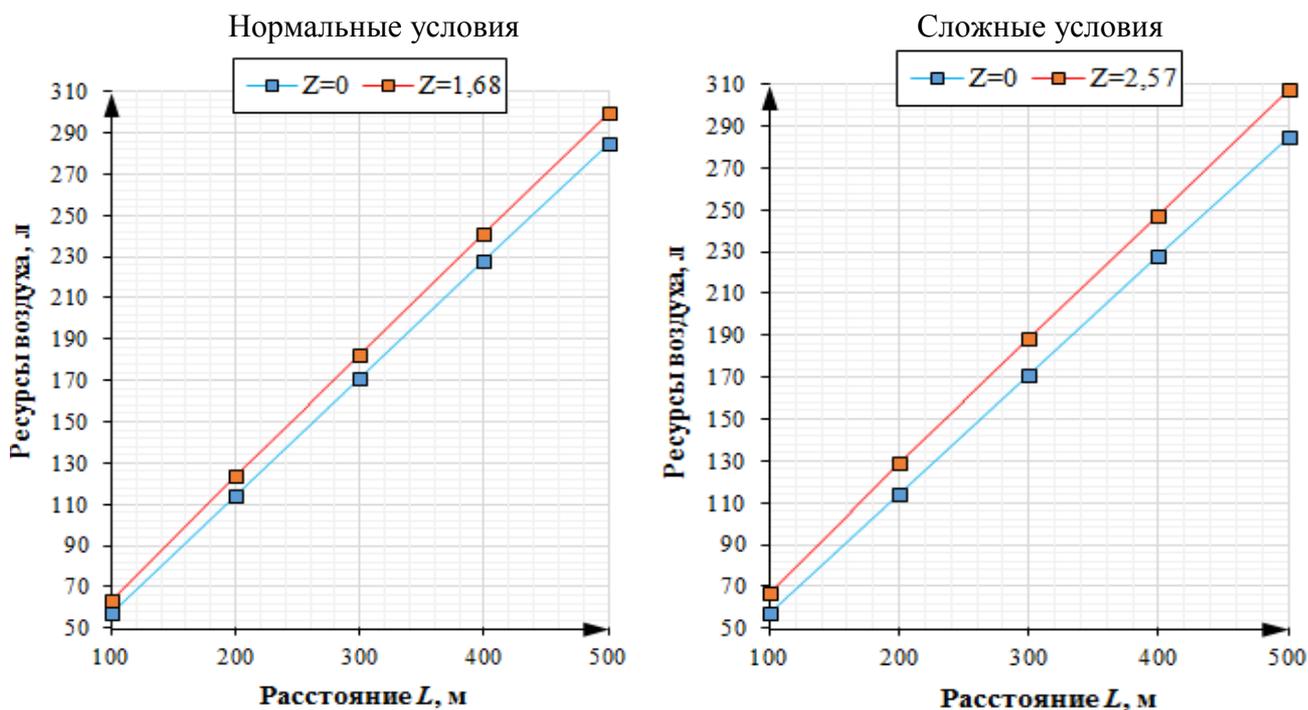
а) Функциональная схема программного комплекса



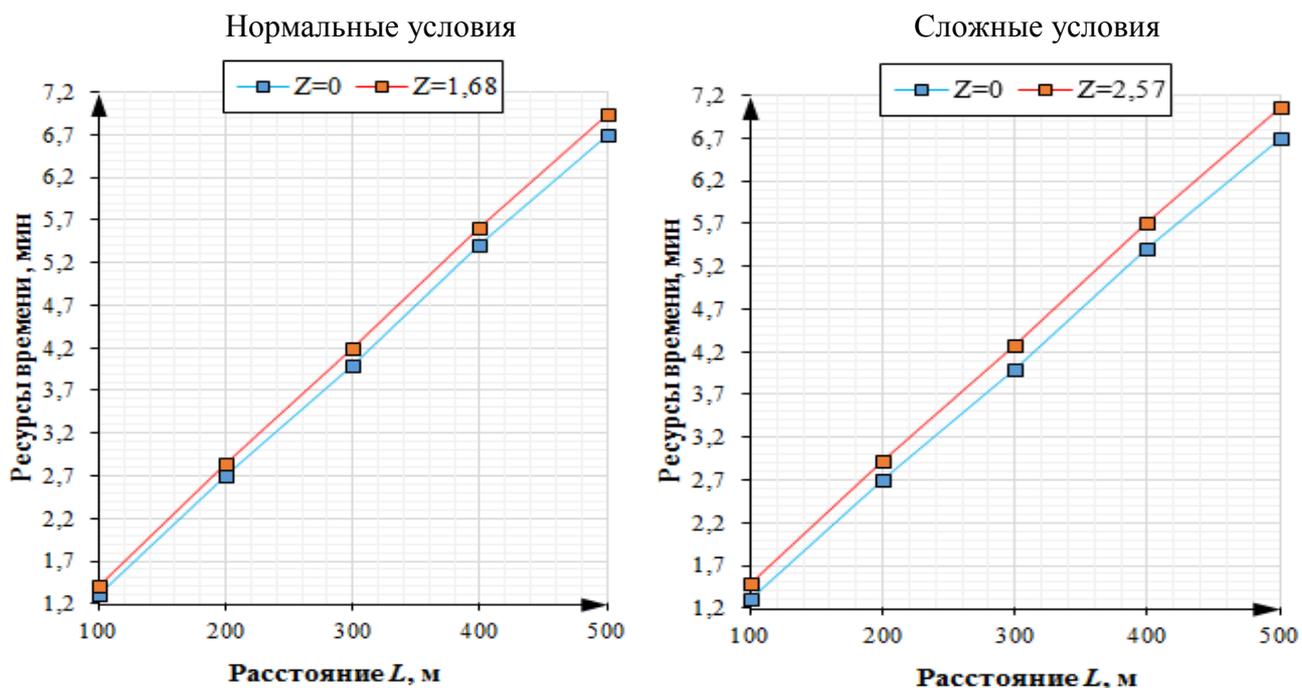
б) Структурные элементы программного комплекса

Рисунок 8 – Интерфейс программного комплекса  
для поддержки управления безопасностью

Сформированы практические рекомендации по применению моделей и алгоритмов для выполнения условий безопасности участников тушения пожара на персонализированном и групповом уровне мониторинга безопасности при планировании комплекса работ пожарно-спасательных подразделений для нормальных и сложных условий при движении по горизонтальному участку местности в виде номограмм, которые представлены на рисунке 9.



а) Ресурсы воздуха



б) Ресурсы времени

Рисунок 9 – Номограммы для формирования плановых параметров безопасности

Применение номограмм для информационно-аналитической поддержки управления позволят ЛПР использовать результаты мониторинга параметров безопасности при выполнении работ в непригодной для дыхания среде в условиях ограниченного времени.

**В приложении** приведены результаты экспериментального исследования и проверка теоретической гипотезы критерием статистического согласия Шапиро-Уилка, акты внедрения результатов диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты, полученные в процессе решения научной задачи, состоящей в разработке моделей и алгоритмов поддержки управления безопасностью участников тушения пожара при работе в непригодной для дыхания среде на основе мониторинга параметров безопасности, заключаются в следующем:

1. Проведен корреляционный анализ пожаров, взятых на статистический учет и случаев гибели пожарных на основе коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Выполнен ретроспективный анализ средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения по отношению к этапам развития системы управления безопасностью участников тушения пожара. Показано, что для решения научной задачи с учетом современного состояния информационного обеспечения необходимо использовать методы теории принятия решений в совокупности с методами теории вероятностей и математической статистики.

2. Разработана вероятностная модель поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, в которой впервые реализован критерий безопасности и получены его нормативные значения для нормальных и сложных условий работ в непригодной для дыхания среде. Для подтверждения адекватности модели управления проведено ее экспериментальное исследование, в рамках которого применялись критерии статистического согласия Пирсона и Шапиро-Уилка.

3. Разработан алгоритм синтеза информационных ресурсов для поддержки управления безопасностью участников тушения пожара. Алгоритм предназначен для формирования метаданных, представленных в виде дискретного распределения вероятностей значений параметров безопасности, используемых в базе данных информационных ресурсов, необходимых для поддержки управления безопасностью участников тушения пожара.

4. Разработана дескриптивная модель поддержки управления безопасностью участников тушения пожара в непригодной для дыхания среде, которая осуществляет поддержку управления лица, принимающего решение, как на групповом, так и на персонализированном уровне мониторинга безопасности. Выполнена практическая реализация моделей и алгоритмов в виде программного комплекса информационной поддержки управления безопасностью участников тушения пожара.

5. Разработан алгоритм поддержки управления безопасностью участников тушения пожара, который предназначен для выявления этапов работ, на которых необходимо реализовать мероприятия безопасности. Алгоритм основан на сопоставлении интервалов значений плановых и фактических параметров безопасности с использованием разработанного критерия безопасности. Даны рекомендации по практическому применению алгоритма при работе в непригодной для дыхания среде участниками тушения пожара.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Гринченко, Б.Б. Вероятностная оценка необходимого запаса воздуха в дыхательных аппаратах при работе на пожаре [Электронный ресурс] / Б.Б. Гринченко // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – 2017. – № 4 (74). – С. 155–162. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/27-04-17.ttb.pdf> (дата обращения 20.10.2019).
2. Гринченко, Б.Б. Автоматизированная система управления безопасностью при работах на пожарах в непригодной для дыхания среде [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 4. – С. 32–36. DOI: 10.25257/FE.2018.4.32-36.
3. Гринченко, Б.Б. Экспериментальное исследование расхода воздуха при использовании спасательных устройств [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов, М.О. Баканов, С.Н. Никишов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 3 (32). – С. 33–41.
4. Гринченко, Б.Б. Структура информационной системы поддержки управления безопасностью газодымозащитников [Электронный ресурс] / Б.Б. Гринченко // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – 2019. – № 3 (85). – С. 77–85. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-3/09-03-19.ttb.pdf> (дата обращения 20.10.2019).

**Научные публикации в изданиях, входящих в международные системы цитирования:**

5. Гринченко, Б.Б. Модель управления безопасностью при работах на пожарах в непригодной для дыхания среде [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – № 6. – С. 45-51. DOI: 10.18322 / PVB.2018.27.06.45–51 (международная база данных CA(pt)).
6. Гринченко, Б.Б. Информационные ресурсы поддержки управления безопасностью работ в непригодной для дыхания среде [Текст] / Б.Б. Гринченко, Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – № 5. – С. 51–58. DOI: 10.18322 / PVB.2019.28.05.51–58 (международная база данных CA(pt)).
7. Гринченко, Б.Б. Многофакторный мониторинг динамики пожара в зданиях текстильной промышленности [Текст] / Б.Б. Гринченко, А.В. Кузнецов, Д.В. Тараканов, М.О. Баканов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019. – № 4 (382). – С. 153–159 (международные базы данных CA(pt), Scopus).

**Программа для ЭВМ, патент на полезную модель, база данных**

8. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663825. Программное обеспечение для информационно-аналитической системы управления газодымозащитниками на пожарах в техногенных чрезвычайных ситуациях [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов, заявл. 23.10.2017, опубл. 12.12.2017 г.

9. Патент на полезную модель №186673. Персонализированное устройство информационной поддержки газодымозащитника [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов; заявл. 16.10.2018, опубл. 29.01.2019. Бюл. №4.

10. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации базы данных № 2019620566. Информационные ресурсы системы поддержки управления газодымозащитниками [Текст] / Б.Б. Гринченко; заявл. 28.03.2019, опубл. 11.04.2019 г.

**Публикации в других изданиях**

11. Гринченко, Б.Б. Вероятностная модель динамики параметров работы газодымозащитников [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XI международной научно-практической конференции, посвященной году пожарной охраны. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 324–325.

12. Гринченко, Б.Б. Оценка динамики параметров работы газодымозащитников на основе вероятностного подхода [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Системы безопасности – 2016: материалы 25 международной научно-технической конференции. – Москва: АГПС МЧС России, 2016. – С. 279–280.

13. Гринченко, Б.Б. Метод моделирования параметров работы газодымозащитников [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: сборник материалов VII всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2016. – Т. 1. – № 1 (7). С. 203–205.

14. Гринченко, Б.Б. Информационная система управления безопасностью пожарных [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XII международной научно-практической конференции, посвященной году гражданской обороны. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 267–269.

15. Гринченко, Б.Б. Информационная система управления безопасностью газодымозащитников при пожарах в зданиях [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Системы безопасности – 2017: материалы 26 международной научно-технической конференции. – Москва: АГПС МЧС России, 2017. – С. 203–205.

16. Гринченко, Б.Б. Экспериментальное исследование параметров работ по устранению аварий с выбросом АХОВ на элементах транспортной инфраструктуры [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XIII международной научно-практической конференции, посвященной году культуры безопасности. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 341–344.

17. Гринченко, Б.Б. Моделирование расхода воздуха в дыхательном аппарате на основе вероятностного подхода [Текст] / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Информационные технологии в сфере РСЧС и ГО: Сборник трудов XXVIII Международной научно-практической конференции. – Химки: АГЗ МЧС России, 2018. – С. 44–48.

18. Гринченко, Б.Б. Информационно-аналитическая система управления безопасностью газодымозащитников [Текст] / Б.Б. Гринченко, Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI международной научно-практической конференции. – Балашиха: ВНИИПО МЧС России, 2019. – С. 607–609.