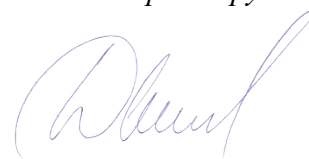


На правах рукописи



Захаров Дмитрий Юрьевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ОЦЕНКИ ТАКТИЧЕСКИХ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГАЗОДЫМОЗАЩИТНИКОВ**

2.10.1. Пожарная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2026

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

Научный руководитель: **Гринченко Борис Борисович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Кобылкин Сергей Сергеевич**
доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», профессор
кафедры безопасности и экологии горного производства

Коршунов Игорь Васильевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России», начальник
кафедры пожарно-строевой и газодымозащитной
подготовки (в составе учебно-научного комплекса
пожаротушения)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Защита диссертации состоится 17 декабря 2026 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 04.2.005.02 на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по адресу: 153040, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33, ауд. 1101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России: <https://www.edufire37.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 04.2.005.02
кандидат технических наук, доцент

Колбашов Михаил Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень разработанности. В соответствии с Указом Президента РФ от 1 января 2018 г. № 2, обеспечение пожарной безопасности отнесено к приоритетам государственной политики на период до 2030 года. Успешность тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ (ПАСР) в непригодной для дыхания среде (НДС) в решающей степени определяется действиями звеньев газодымозащитной службы (ГДЗС). Вместе с тем, статистика гибели пожарных – как в России, так и за рубежом – показывает, что более 51 % случаев связаны со стрессом и физическим перенапряжением, преимущественно обусловленным сердечно-сосудистыми нарушениями. Это свидетельствует о том, что существующие детерминированные методики расчета, основанные на усредненном расходе воздуха ($45 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$) и давлении в баллонах, не учитывают главного лимитирующего фактора – индивидуального функционального состояния человека, действующего в экстремальных условиях пожара.

Таким образом, складывается объективное противоречие между необходимостью точного прогнозирования времени работы звеньев ГДЗС, напрямую связанного с безопасностью личного состава, и отсутствием научно обоснованного инструментария, учитывающего сочетанное воздействие физической нагрузки, теплового стресса и персональных особенностей газодымозащитников. Разрешение этого противоречия представляет собой научную задачу, имеющую существенное теоретическое и прикладное значение для совершенствования тактики пожаротушения и ПАСР, а также для повышения уровня безопасности личного состава, работающего в непригодной для дыхания среде.

Проблематика тактических возможностей звеньев ГДЗС получила развитие в исследованиях отечественных ученых – В.Б. Габдуллин, Б.Б. Гринченко, М.О. Баканов, А.Д. Ищенко, С.С. Кобылкин, И.В. Коршунов, В.И. Логинов, А.В. Смагин, В.М. Стрелец, Д.В. Тараканов, В.В. Терехнев, Д.Н. Шалявин, Д.С. Шупнев – а также зарубежных исследователей N. Gledhill, G.P. Horn, V.K. Jamnik, K. Lambert, T.T. Romet.

Однако теоретические и практические вопросы, связанные с выявлением закономерностей физиологических откликов организма газодымозащитников на время эффективной работы в агрессивной среде пожара и разработке необходимого спектра методологического инструментария по переходу от субъективных показателей работы и обеспечения безопасного пребывания звеньев ГДЗС в НДС к количественным показателям с учетом лимитирующих детерминант временного ресурса, остались не изученными.

Таким образом, **научная задача** диссертации заключается в разработке научно-методического аппарата для количественной оценки и прогнозирования тактических возможностей газодымозащитников, работающих в составе звеньев ГДЗС. Решение этой задачи имеет значение для развития отрасли знаний в области пожарной безопасности и служит основой для научного обоснования тактики тушения пожаров и ПАСР.

Объект исследования – процесс выполнения газодымозащитниками оперативных задач в условиях непригодной для дыхания среды.

Предмет исследования – тактические возможности звена ГДЗС, лимитируемые функциональным состоянием личного состава.

Цель исследования заключается в разработке научно-методического аппарата для количественной оценки и прогнозирования тактических возможностей звеньев ГДЗС на основе учета функционального состояния газодымозащитников.

Для достижения цели исследования были поставлены и решались следующие **задачи**:

1. Провести анализ детерминант, влияющих на тактические возможности звена ГДЗС, и разработать ресурсно-эргономическую модель их оценки.

2. Обосновать переход от субъективной оценки тяжести работ к объективному количественному показателю – мощности, развиваемой газодымозащитником, и на его основе исследовать закономерности изменения индивидуальных параметров состояния газодымозащитников при комбинированном воздействии физической нагрузки и нагревающего микроклимата.

3. Разработать и верифицировать регрессионную модель прогнозирования времени работы газодымозащитников.

4. Разработать программный информационно-аналитический комплекс, обеспечивающий поддержку принятия управленческих решений при планировании тактических действий и оптимизации ротации звеньев ГДЗС.

5. Подготовить и апробировать практические рекомендации по использованию полученных результатов в оперативной деятельности пожарно-спасательных подразделений и в учебном процессе ведомственных образовательных организаций.

Научная новизна:

1. Разработана ресурсно-эргономическая модель оценки тактических возможностей звеньев ГДЗС, которая, в отличие от существующих подходов, рассматривает их не как функцию технических параметров, а как интегральный результат взаимодействия трех групп детерминант (средовой, технической и персонализированной), выступающих структурными элементами модели. В рамках модели обосновано введение понятия «детерминанта тактических возможностей» как структурной единицы, объединяющей факторы по их природе (средовые, технические, персонализированные) для их сочетанного анализа. В отличие от традиционно используемого термина «фактор», обозначающего отдельную переменную, детерминанта вводится как категория более высокого уровня, позволяющая систематизировать разнородные влияющие переменные и обеспечить возможность их комплексного анализа в рамках единой модели. Такой подход позволяет перейти от усредненного нормирования к персонализированному прогнозу времени безопасной работы звена ГДЗС.

2. Обоснован и реализован метод количественной оценки функциональных затрат организма газодымозащитника при выполнении оперативных задач в непригодной для дыхания среды, базирующийся на переходе к объективному показателю механической мощности (Вт). Установлен коэффициент влияния массы снаряжения на развиваемую мощность ($0,66 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$), что создает научно обоснованную основу для объективного нормирования тяжести различных тактических задач и оценки их влияния на функциональное состояние.

3. Впервые получены экспериментальные данные о совместном влиянии физической нагрузки (35-170 Вт) и нагревающего микроклимата (20-30 °С) на динамику физиологических показателей газодымозащитников: легочной вентиляции, частоте сердечных сокращений и температуре тела. Выявлен и количественно оценен комплексный эффект синергетического воздействия этих факторов на скорость развития утомления, заключающийся в нелинейном ускорении истощения функциональных резервов организма при сочетанном действии теплового и физического стресса.

4. Разработана и верифицирована регрессионная модель прогнозирования времени работы газодымозащитника в зависимости от мощности физической нагрузки и температуры окружающей среды ($T_{\text{раб}} = 29,15 - 0,1453 \cdot W - 0,0050 \cdot T_{\text{окр}}$; $R^2 = 0,982$; $\text{RMSE} = 0,77$ мин). Установлен принцип лимитирующего звена для перехода от индивидуального прогноза к оценке тактических возможностей звена ГДЗС, что позволяет заменить усредненный нормативный подход персонализированным расчетом.

5. Разработан научно-обоснованный алгоритм и информационно-аналитический комплекс поддержки принятия решений, отличающийся реализацией принципа персонализации прогноза на основе индивидуальных параметров газодымозащитников и содержащий алгоритм оптимизации ротации звеньев, применение, которого позволяет минимизировать риск достижения критических функциональных состояний личным составом при обеспечении непрерывности выполнения боевой задачи.

Теоретическая значимость исследования заключается в установлении количественных зависимостей изменения расхода дыхательных ресурсов, частоты сердечных сокращений (ЧСС) и температуры тела газодымозащитников от мощности физической нагрузки и температуры окружающей среды, что расширяет научные представления о тактических возможностях звеньев ГДЗС в экстремальных условиях пожара.

Практическая значимость исследования подтверждается разработкой и внедрением программного комплекса для оценки тактических возможностей и оптимизации ротации звеньев ГДЗС, практических рекомендаций для должностных лиц (руководитель тушения пожара (РТП), начальник контрольно-пропускного пункта ГДЗС (НКПП ГДЗС), командир звена ГДЗС, постовой на посту безопасности ГДЗС), позволяющих повысить обоснованность тактических решений. Результаты внедрены в деятельность Главного управления МЧС России по Ивановской области, а также в учебный процесс Ивановской пожарно-спасательной академии и Академии ГПС МЧС России.

Методология и методы исследования. Диссертационная работа выполнена на основе системного подхода, в рамках которого деятельность звена ГДЗС рассматривается как единая система «газодымозащитник – средства индивидуальной защиты органов дыхания и зрения – непригодная для дыхания среда». Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования (регрессионный анализ), теории вероятностей и математической статистики (t-критерий Стьюдента, корреляционный анализ Пирсона), а также теория планирования эксперимента. Программная реализация полученных моделей и алгоритмов выполнена с применением объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Ресурсно-эргономическая модель оценки тактических возможностей звеньев ГДЗС, структурными элементами которой являются три детерминанты (средовая, техническая и персонализированная), объединяющие факторы по их природе для комплексного анализа. Модель устанавливает взаимосвязь тактических возможностей с мощностью физической нагрузки, параметрами среды и индивидуальными параметрами состояния газодымозащитника и позволяет перейти от усредненного нормирования к персонализированному прогнозу.

2. Метод количественной оценки функциональных затрат организма газодымозащитника на основе мощности нагрузки.

3. Закономерности изменения функционального и теплового состояния газодымозащитников (ЧСС, легочная вентиляция, температура тела) при одновременном воздействии физической нагрузки и нагревающего микроклимата.

4. Регрессионная модель прогнозирования времени работы звена ГДЗС, обладающая высокой точностью прогноза.

5. Информационно-аналитический комплекс поддержки принятия решений и практические рекомендации для должностных лиц, обеспечивающие повышение безопасности и эффективности действий звеньев ГДЗС.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в ходе исследования результатов обеспечивается репрезентативностью выборки ($n=40$, 600 наблюдений), корректным использованием методов математической статистики при обработке полученных результатов исследования ($p < 0,05$) и верификацией моделей по данным реальных пожаров.

Результаты исследований представлены на конференциях всероссийского и международного уровня: Системы безопасности (Москва, АГПС МЧС России, 2024 г.); Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации (Москва, АГПС МЧС России, 2024 г.); Актуальные вопросы тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ (Железногорск, СПСА ГПС МЧС России, 2025 г.); Новые технические, организационные и методические решения в области пожарной безопасности (Балашиха, ВНИИПО МЧС России, 2025 г.); Пожарная и аварийная безопасность (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2023-2025 гг.); Актуальные вопросы профессиональной подготовки пожарных и спасателей (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2024, 2025 гг.); Актуальные вопросы пожаротушения (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2024, 2025 гг.); Современные проблемы обеспечения безопасности (Екатеринбург, УИ ГПС МЧС России, 2026 г.), Современные аспекты пожарной безопасности (Балашиха, ВНИИПО МЧС России, 2026 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 3 – в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России, 2 – в изданиях, входящих в международную

систему цитирования Scopus. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Личный вклад автора заключается в проведении анализа литературных источников по теме исследования, выполнении экспериментальной части работы и обработке полученных результатов. Постановка цели и задач исследования, интерпретация результатов диссертационного исследования и формирование выводов по работе осуществлялось совместно с научным руководителем.

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

1. В Главном управлении МЧС России по Ивановской области при разработке документов предварительного планирования действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ с применением сил и средств ГДЗС.

2. В учебной деятельности ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» при организации и проведении учебных занятий по дисциплине «Пожарно-прикладная подготовка» (специальность 20.05.01 «Пожарная безопасность» профиль «Пожарная безопасность государства»).

3. В учебной деятельности ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» при организации и проведении учебных занятий по дисциплинам «Организация газодымозащитной службы» (специальность 20.05.01 «Пожарная безопасность» профиль «Пожарная безопасность государства») и «Информационные системы поддержки принятия решения» (направление подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность», профиль «Пожарная безопасность»).

4. В научной деятельности ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» при выполнении научно-исследовательских работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 176 страницах, состоит из 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Работа содержит 27 рисунков, 28 таблиц и 3 приложения. Список литературы содержит 152 цитируемые публикации.

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 «Разработка ресурсно-эргономической модели работы звена газодымозащитной службы» проведен анализ специфики работы в НДС, статистики гибели пожарных, а также существующих методов расчета тактических возможностей.

Показано, что традиционные детерминированные подходы учитывают исключительно запас воздуха в баллонах дыхательных аппаратов со сжатым воздухом (ДАСВ), используя средний расход $45 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$, что не соответствует реальным нагрузкам. На основе анализа литературных источников впервые сформулировано авторское определение: «Тактические возможности звена ГДЗС» – это объем трудовых операций, выполняемых газодымозащитниками при тушении пожара и проведении аварийно-спасательных работ (включая учения и ликвидацию чрезвычайных ситуаций (ЧС)), ограниченный запасом временных ресурсов средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения (СИЗОД) и лимитируемый функциональным состоянием личного состава. Данное понятие представляет собой интегральную характеристику, подлежащую количественной оценке и прогнозированию.

Для количественной оценки тактических возможностей разработана ресурсно-эргономическая модель, структурными элементами которой выступают детерминанты тактических возможностей. Под детерминантой в рамках модели понимается качественно обособленная группа факторов (переменных), объединенных общим механизмом влияния на время и эффективность работы газодымозащитника в НДС. В отличие от традиционно

используемого в пожарно-тактической литературе термина «фактор», обозначающего отдельную переменную (температура, масса снаряжения, ЧСС и т.д.), детерминанта вводится как структурная единица модели, позволяющая систематизировать факторы по их природе и механизму воздействия. В составе модели (рисунок 1) выделены три детерминанты: средовая (температура, видимость), техническая (масса и эргономика снаряжения) и персонализированная (физическое и психоэмоциональное состояние газодымозащитника). Такое структурирование является необходимым условием для учета не изолированного, а сочетанного влияния разнородных переменных на тактические возможности звена ГДЗС.



Рисунок 1 – Детерминанты ресурсно-эргономической модели тактических возможностей звеньев ГДЗС

Анализ показал, что в рамках средовой и технической детерминант основными управляемыми факторами, требующие количественной оценки их влияния на индивидуальные параметры состояния газодымозащитника, является температура окружающей среды и масса носимого снаряжения (как характеристики детерминант «среда» и «техника» соответственно).

В главе 2 «Исследование ресурсно-эргономической модели работы звена газодымозащитной службы» решена задача перехода от субъективных оценок к количественным показателям, что являлось необходимым условием для дальнейшего математического моделирования тактических возможностей.

Проблема, выявленная в первой главе, заключалась в отсутствии объективных критериев оценки тяжести выполняемых газодымозащитниками работ. Для объективизации нагрузки предложено использовать показатель мощности W (Вт), развиваемой газодымозащитником при движении. Выбор данного показателя обусловлен его прямой связью с массой перемещаемой системы (тело + снаряжение) и скоростью выполнения работ. Это позволяет перейти от качественного описания фактора массы к его количественной оценке через интегральный показатель мощности.

С использованием формулы (1) и ее дифференцирования по массе был установлен коэффициент влияния массы снаряжения. Каждый дополнительный килограмм экипировки требует увеличения развиваемой мощности на $0,66 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$ для поддержания заданной скорости.

$$W = \frac{V \cdot m \cdot (2,11 + G \cdot 0,25) + 2,2 \cdot m - 151}{10,5} \rightarrow \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{V \cdot (2,11 + 0,25 \cdot G) + 2,2}{10,5}, \quad (1)$$

где W – рассчитываемая мощность нагрузки (Вт); V – скорость движения полотна беговой дорожки (км/ч); m – масса тела (кг); G – угол наклона, % (в исследовании $G = 1 \%$).

В формуле (1) используются эмпирические коэффициенты (2,11; 0,25; 2,2; 151; 10,5), полученные при калибровке беговой дорожки и обеспечивающие переход от исходных

размерностей (км/ч, кг, %) к размерности мощности (Вт). Коэффициент влияния массы снаряжения ($\frac{\Delta W}{\Delta m}$) имеет размерность Вт/кг и составляет 0,66 Вт·кг⁻¹ при V= 2 км/ч и G= 1 %).

Полученный коэффициент имеет приоритетное практическое значение – он позволяет для любого комплекта снаряжения (минимального или дополнительного) рассчитать фактическую мощность, которую будет развивать газодымозащитник, и, следовательно, прогнозировать его физиологические затраты еще до начала выполнения задачи.

На основе расчетных значений мощности нагрузки создана классификационная шкала, связывающая мощность, эквивалентную массу снаряжения и типовые тактические задачи (таблица 1). Данная шкала впервые устанавливает количественное соответствие между тактическим замыслом и объективными функциональными затратами, что позволяет командиру звена ГДЗС осознанно выбирать темп и режим работы.

Таблица 1 – Мощность нагрузки и соответствие типовым задачам

Степень	Мощность нагрузки, Вт	Соотношение масса, кг	Типовая задача ГДЗС
W ₁	35±6	0-10	Быстрая разведка, движение по горизонтали
W ₂	69±10	10-20	Работа с ручным инструментом
W ₃	103±14	20-30	Прокладка рукавной линии, подъем по лестнице
W ₄	137±18	30-40	Вскрытие конструкций
W ₅	171±22	> 40	Эвакуация пострадавшего, экстремальная нагрузка

Разработанная шкала легла в основу планирования экспериментального исследования, позволив стандартизировать нагрузку и обеспечить воспроизводимость результатов. Эксперимент проводился на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России с участием 40 газодымозащитников-добровольцев (возраст 23,5±6,4 лет, максимальное потребление кислорода (МПК) 52,8±7,8 мл·кг⁻¹·мин⁻¹). Все участники имели действующую квалификацию «газодымозащитник».

Протокол включал выполнение ступенчато возрастающей нагрузки на беговой дорожке в полной боевой экипировке (БОП, ДАСВ «Зевс») при температурных режимах: 20, 25, 30 °С. Выбор таких режимов обусловлен их соответствием реальным условиям работы: 20 °С – комфортные условия (фон), 25 °С – типичные условия рабочей зоны в удалении от очага пожара, 30 °С – нагревающий микроклимат, характерный для работы вблизи очага пожара.

В ходе непрерывного мониторинга регистрировались ЧСС, легочная вентиляция (по манометру ДАСВ), сатурация (SpO₂), а также рассчитывались показатели теплового состояния – средневзвешенная температура кожи (СВТ_{кожи}), температура «ядра» тела (t_p) и теплосодержание организма (Q). Критерием прекращения эксперимента служило достижение индивидуальной максимальной ЧСС (220 – возраст) либо добровольный отказ участника, что обеспечивало безопасность испытуемых и соответствовало требованиям биоэтики.

Полученные экспериментальные данные позволили не только подтвердить адекватность разработанной классификационной шкалы, но и выявить функциональные закономерности. В частности, зафиксировано, что фактический расход дыхательной смеси при выполнении работ средней и тяжелой степени (ступени W₃–W₅) составляет от 50 до 95 л·мин⁻¹, что в 1,5-2 раза превышает нормативный показатель 45 л·мин⁻¹. Выявленные закономерности свидетельствуют о необходимости пересмотра существующих нормативов и учета реальной интенсивности работ при планировании.

В третьей главе «Разработка математической модели прогнозирования тактических возможностей звена ГДЗС с учетом параметров состояния газодымозащитников» проведен анализ экспериментальных данных и построена прогнозная модель. Анализ полученных данных (n = 600 наблюдений) подтвердил сильную корреляционную связь между мощностью нагрузки (W) и ЧСС (r = 0,97), а также между W и легочной вентиляцией (r = 0,92). Выявлен комплексный эффект – повышение температуры среды с 20 до 30 °С при максимальной нагрузке (W₅) приводило к дополнительному росту

легочной вентиляции на 12 % и ЧСС на 6 %, ускоряя достижение наступления предельного индивидуального лимита.

Основным этапом стало определение количественных критериев предельных индивидуальных лимитов. В отличие от существующих подходов, ориентированных исключительно на падение давления в дыхательном аппарате, в качестве момента исчерпания ресурса принималось достижение хотя бы одного из двух индивидуальных лимитов: индивидуальной максимальной частоты сердечных сокращений ($ЧСС_{\text{макс}} = 220 - \text{возраст}$); пороговой средней температуры тела ($СТТ = 38,5^\circ\text{C}$), предшествующей развитию гипертермии. Предложенный подход позволил перейти от субъективных ощущений утомления к объективным, измеримым показателям, непосредственно характеризующим безопасность газодымозащитника.

На основе экспериментальных данных была построена множественная линейная регрессионная модель для прогнозирования времени работы $T_{\text{раб}}$ до момента достижения указанных лимитов. Анализ показал, что усложнение модели не дает статистически значимого прироста точности (прирост R^2 менее 0,001), поэтому в качестве оптимального решения была выбрана линейная модель (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионных моделей прогнозирования оставшегося времени работы ($T_{\text{раб}}$)

Предиктор	Коэффициент (β)	Стандартная ошибка	t-статистика	p-value	Примечание
Полная модель (с нелинейными членами)					
Константа	29,38	2,22	13,23	<0,001	
Мощность, W	-0,177	0,0095	-18,66	<0,001	Основной значимый фактор
Температура, $T_{\text{окр}}$	0,049	0,173	0,28	0,777	Незначим в полной модели
Возраст	0,0085	0,0065	1,31	0,192	Незначим
W^2	0,000107	0,000026	4,59	<0,001	Указывает на нелинейность
$T_{\text{окр}}^2$	-0,0017	0,0034	-0,49	0,622	Незначим
$W \cdot T_{\text{окр}}$	0,00039	0,00026	1,51	0,131	Незначим
$R^2 = 0,983$, $R^2_{\text{скорр}} = 0,983$, F-стат. = 3317 ($p < 0,001$)					
Упрощенная практическая модель					
Константа	29,15	0,29	100,75	<0,001	
Мощность, W	-0,1453	0,0011	-134,62	<0,001	Высоко значим
Температура, $T_{\text{окр}}$	-0,0050	0,0103	-0,49	0,626	Незначим, но оставлен
$R^2 = 0,982$, $R^2_{\text{скорр}} = 0,982$, F-стат. = 9457 ($p < 0,001$), RMSE = 0,77 мин					

В результате сравнительного анализа была выбрана упрощенная практическая модель, обладающая наилучшим соотношением точности и простоты:

$$T_{\text{раб}} = 29,15 - 0,1453 \cdot W - 0,0050 \cdot T_{\text{окр}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – прогнозируемое время (мин), W – мощность нагрузки (Вт), $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды ($^\circ\text{C}$).

Модель обладает высокой прогностической способностью ($R^2 = 0,982$), объясняя 98,2 % дисперсии зависимой переменной. Стандартная ошибка прогноза (RMSE) составляет всего 0,77 минуты, что приемлемо для оперативного планирования.

Физическая интерпретация полученных коэффициентов подтверждает теоретические предпосылки, заложенные в ресурсно-эргономической модели. Доминирующий коэффициент при мощности ($-0,1453 \text{ мин} \cdot \text{Вт}^{-1}$) означает, что увеличение физической нагрузки на 100 Вт (например, переход от разведки к спасению пострадавшего) сокращает прогнозируемое время работы в среднем на 14,5 минут. Малый и статистически незначимый в данном диапазоне ($p = 0,626$) коэффициент при температуре ($-0,005 \text{ мин} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) указывает на то, что в исследованных условиях ($20\text{--}30^\circ\text{C}$) основным лимитирующим фактором является эндогенное тепло,

генерируемое работающими мышцами, а не внешний нагрев. Выявленные закономерности, однако, не умаляют важности учета температуры, особенно при экстраполяции на реальные условия пожара, где она может достигать 50-60 °С и выше, что требует введения оперативного коэффициента безопасности.

Графически модель представлена в виде поверхности отклика (рисунок 2) и номограммы (рисунок 3).

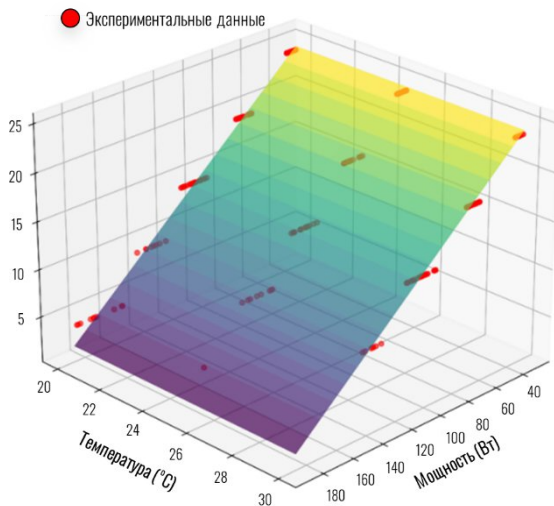


Рисунок 2 – Поверхность отклика
 $T_{\text{раб}} = f(W, T_{\text{окр}})$

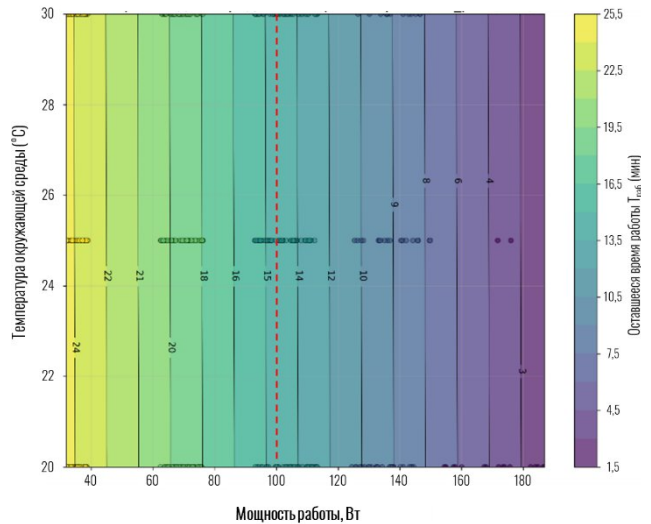


Рисунок 3 – Номограмма
для определения $T_{\text{раб}}$

Вместе с тем, предложенная модель обладает функциональной гибкостью и может быть алгебраически преобразована для решения обратной задачи – определения допустимого уровня физической нагрузки при заданных ограничениях по времени работы и параметрам окружающей среды. Преобразованное уравнение позволяет рассчитать максимальную мощность, которую может развивать газодымозащитник, чтобы его работа оставалась в безопасных временных рамках. Например, для обеспечения 15 минут непрерывной работы при температуре окружающей среды 25 °С допустимая мощность нагрузки должна составлять около 97 Вт. Разработанный инструмент планирования позволяет заблаговременно адаптировать темп и интенсивность выполнения оперативных задач к текущим условиям, минимизируя риски для личного состава и повышая общую эффективность действий подразделения. Разработанная модель выступает связующим звеном между параметрами состояния газодымозащитников и тактикой, преобразуя научные данные в практический инструмент для принятия обоснованных решений как на этапе планирования, так и в ходе оперативной работы.

В четвертой главе «Информационно-аналитическое обеспечение оценки тактических возможностей звена газодымозащитной службы» представлена реализация разработанных моделей в виде программного комплекса и его верификация.

Разработан прототип программного комплекса, основанный на объектно-ориентированном подходе (классы GDZS_Fighter, GDZS_Squad, GDZS_Group). Архитектура комплекса (рисунок 4) базируется на трех фундаментальных принципах – иерархичности (отдельный газодымозащитник – звено ГДЗС – группировка звеньев ГДЗС), персонализации (учет индивидуальных функциональных особенностей) и сценарного нормирования нагрузки (задание нагрузки через типовые тактические задачи).

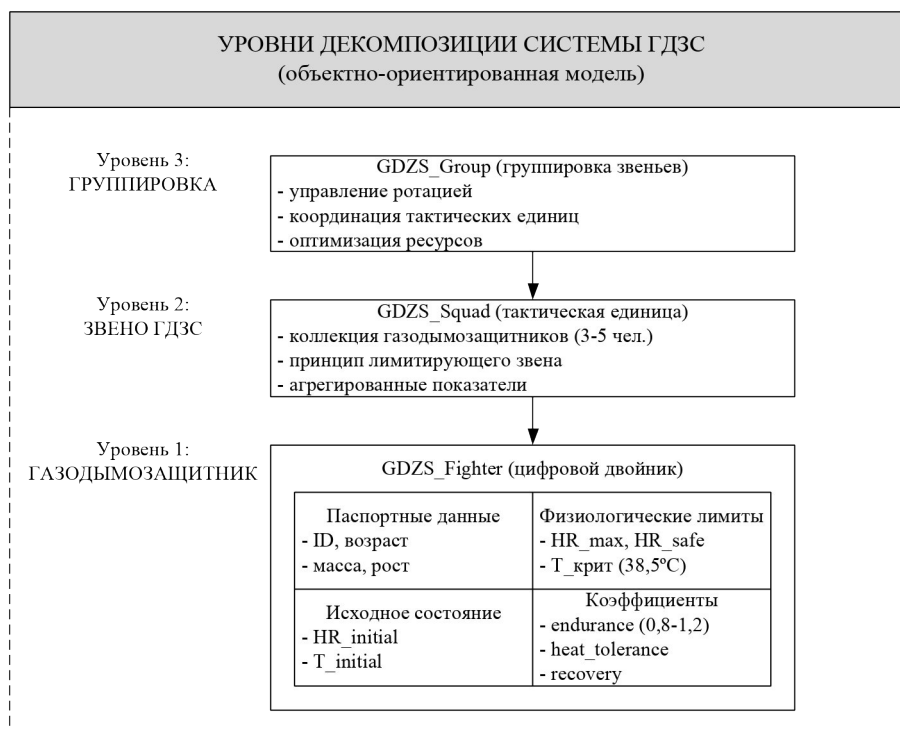


Рисунок 4 – Иерархическая декомпозиция программного комплекса как системы

Ключевой особенностью является введение коэффициентов тренированности (выносливости, теплоустойчивости, восстановления), статистически обоснованных на основе анализа МПК участников эксперимента (таблица 3). Данные коэффициенты позволяют количественно учесть тот факт, что газодымозащитники с высоким уровнем аэробной производительности (МПК > 58 мл/кг/мин) демонстрируют достоверно более низкую скорость прироста ЧСС (на 16,7 %) и температуры тела (на 31,6 %) при стандартизированной нагрузке по сравнению с газодымозащитниками, имеющими низкий уровень подготовленности. Игнорирование установленных различий, характерное для нормативных методик, приводит к систематическим ошибкам прогноза, а именно завышению ресурса для слабоподготовленных и его занижению для высокотренированных.

Таблица 3 – Индивидуальные показатели состояния газодымозащитников с различным уровнем МПК на стандартизированную нагрузку МПК (нагрузка W₄, 137 Вт)

Группа (МПК)	Δ ЧСС, уд/мин	Δ СТТ, °C
Низкий (<47)	104,5 ± 6,2	1,9 ± 0,2
Средний (47-58)	96,3 ± 5,1	1,6 ± 0,2
Высокий (>58)	87,1 ± 4,8	1,3 ± 0,1

Реализованный в классе GDZS_Squad принцип лимитирующего звена ГДЗС (время безопасной работы звена ГДЗС определяется по минимальному прогнозу среди его членов) впервые позволяет количественно оценить, как включение в состав газодымозащитника с низкой физической готовностью сокращает тактические возможности всей группы. Разработанный принцип имеет прямое практическое значение для комплектования звеньев ГДЗС и распределения нагрузки.

Интерфейс комплекса позволяет задать состав группировки, выбрать сценарий работ и условия среды, после чего автоматически рассчитывается прогноз для каждого газодымозащитника, интегральная оценка состояния звена ГДЗС и формируется оптимальный график ротации (диаграмма Ганта) с цветовой индикацией пороговых индивидуальных лимитов (рисунок 5).

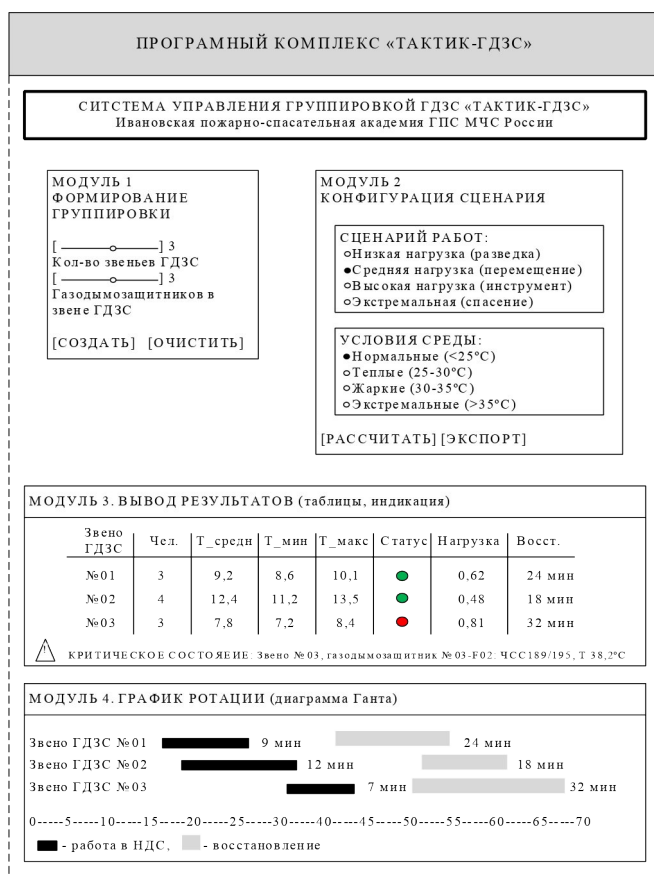


Рисунок 5 – Структура пользовательского интерфейса

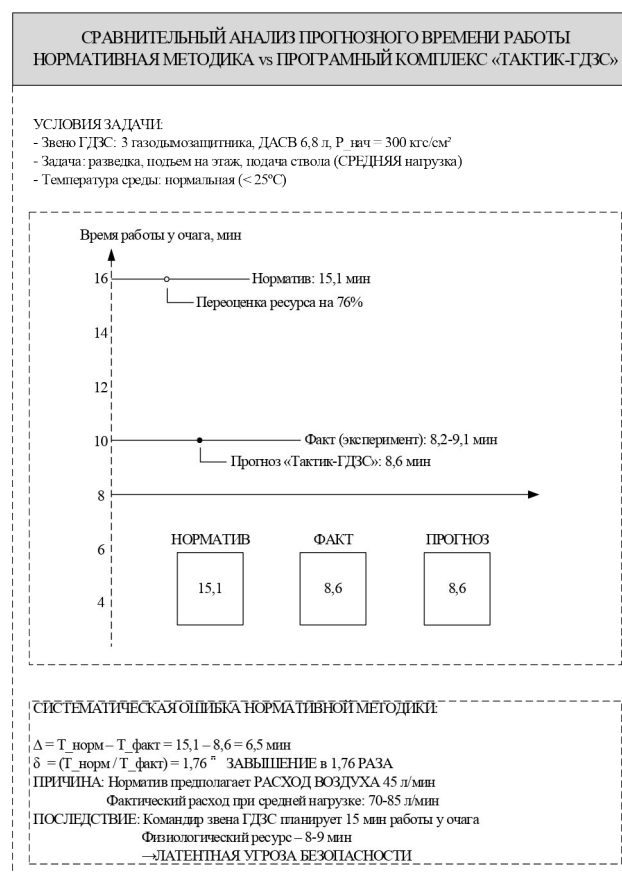


Рисунок 6 – Сравнение нормативной методики и разработанной модели

Цветовая индикация (зеленый ● – норма, желтый ● – внимание, красный ● – критично) обеспечивает мгновенное восприятие ситуации и снижает когнитивную нагрузку на руководителя тушения пожара. Время выполнения полного цикла расчета составляет менее 40 секунд, что соответствует требованиям оперативности.

Верификация комплекса проведена по трем направлениям:

1. Сравнение с существующими подходами, где показано, что детерминированная методика (приказ МЧС России от 27.06.2022 г. № 640 «Об утверждении Правил использования СИЗОД личным составом подразделений пожарной охраны») завышает время работы у очага в 1,7-1,8 раза для типовых задач средней тяжести (рисунок 6).

Данный факт подтверждает, что ориентация на усредненный норматив расхода воздуха (45 л·мин⁻¹) создает неявную угрозу безопасности, то есть командир звена ГДЗС планирует 15-минутную работу, тогда как фактический функциональный ресурс ограничен 8-9 минутами (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение прогнозов для типовой задачи

Источник прогноза	Время у очага, мин
Нормативная методика	15,1
Программный комплекс	8,6
Эксперимент	8,2-9,1

2. Сравнение с реальными пожарами, где представлен сравнительный анализ пожаров (ТРЦ «Зимняя вишня», пожар в Российской государственной библиотеке) который показал, что прогноз комплекса отличается от фактического времени работы не более чем на $\pm 11\%$, в то время как нормативный прогноз завышал ресурс до 47 % (таблица 5). При этом важно отметить, что разработанный комплекс демонстрирует устойчивую тенденцию к осторожному (консервативному) прогнозированию, что создает необходимый запас безопасности, тогда как нормативная методика в ряде случаев дает оптимистичную и потенциально опасную оценку.

Таблица 5 – Верификация на данных реальных пожаров

Объект	Факт, мин	Прогноз комплекса, мин	Приказ МЧС России от 27.06.2022 г. № 640, мин
ТРЦ «Зимняя вишня», г. Кемерово	15,0	13,4	14,6
Российская государственная библиотека, г. Москва	11,0	10,2	16,2

3. Имитационное моделирование реализовано для гипотетического пожара длительностью 60 мин с участием трех звеньев ГДЗС, в котором традиционный подход привел к достижению пороговых индивидуальных лимитов (индекс нагрузки $I_{load} > 0,85$) в 41,7 % циклов. Использование разработанного информационно-аналитического комплекса позволило полностью исключить подобные случаи. В результате доказано, что применение предложенного подхода позволяет гарантированно предотвратить развитие опасных для жизни и здоровья состояний, связанных с переутомлением и перегревом.

На основе результатов разработаны практические рекомендации для РТП, начальника контрольно-пропускного пункта ГДЗС, постового на посту безопасности ГДЗС, командира звена ГДЗС и руководителей профессиональной подготовки. Рекомендации включают как простые эмпирические правила (например, применение поправочных коэффициентов к нормативному расходу воздуха в зависимости от типа работ), так и алгоритмы работы с разработанным программным комплексом. Все рекомендации апробированы в ходе опытной эксплуатации в подразделениях Главного управления МЧС России по Ивановской области и внедрены в учебный процесс профильных вузов, что подтверждено соответствующими актами.

В приложении приведены результаты экспериментального исследования и расчет влияния массы снаряжения на мощность, развиваемую газодымозащитником, акты внедрения результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены новые научно обоснованные результаты, совокупность которых позволяет решить важную научную задачу – разработку научно-методического аппарата для количественной оценки и прогнозирования тактических возможностей звеньев ГДЗС при тушении пожаров и ПАСР на основе учета индивидуальных параметров состояния газодымозащитников. Выполненное исследование позволило сделать следующие основные выводы.

1. Сформулирован понятийный аппарат исследования: дано определение «тактические возможности звена ГДЗС»; разработана ресурсно-эргономическая модель, структурными элементами которой являются детерминанты (средовая, техническая, персонализированная), объединяющие факторы по их природе для сочетанного анализа. Модель позволяет перейти от усредненного нормирования к персонализированному прогнозу.

2. Впервые для задач пожарной тактики обоснован переход к объективному показателю – мощности нагрузки (Вт); установлен коэффициент влияния массы снаряжения ($0,66 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$). Проведено экспериментальное исследование ($n=40$), в результате которого получены данные о динамике индивидуальных показателей газодымозащитников (ЧСС, легочная вентиляция, температура тела) при одновременном воздействии физической нагрузки (35-170 Вт) и нагревающего микроклимата (20-30 °C); выявлен и количественно оценен комплексный эффект анализируемых факторов.

3. Разработана и верифицирована регрессионная модель прогнозирования времени работы $T_{\text{раб}} = 29,15 - 0,1453 \cdot W - 0,0050 \cdot T_{\text{окр}}$, обладающая высокой прогностической способностью ($R^2=0,982$; $\text{RMSE}=0,77$ мин).

4. Создан информационно-аналитический комплекс, реализующий разработанные модели на основе объектно-ориентированного подхода. Комплекс обеспечивает персонализированный прогноз (с учетом возраста, исходного состояния и уровня

тренированности), автоматизированное построение оптимальных графиков ротации звеньев ГДЗС и наглядную визуализацию.

5. Проведена комплексная верификация, подтвердившая, что разработанный научно-методический аппарат устраняет систематическую ошибку переоценки ресурса, присущую действующим детерминированным подходам (завышение в 1,7-1,8 раза), и позволяет при соблюдении рекомендаций, полностью исключить риск превышения критических индивидуальных лимитов.

6. Разработаны практические рекомендации для должностных лиц, которые внедрены в деятельность подразделений МЧС России и учебный процесс профильных вузов, что подтверждает практическую значимость работы.

Автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук, доценту, советнику РААСН Максиму Олеговичу Баканову за научные консультации, помощь в организации и проведении экспериментальных исследований и постоянную поддержку на всех этапах выполнения диссертационной работы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК

1. Баканов М.О., **Захаров Д.Ю.**, Суровегин А.В., Кузнецов И.А., Катин Д.С. Анализ влияния физической нагрузки на организм газодымозащитников в условиях термонеutralной температуры воздуха // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2(51). С. 5-17.

2. Баканов М.О., Гринченко Б.Б., **Захаров Д.Ю.** Ресурсно-эргономическая модель оценки эффективности работы звеньев ГДЗС в непригодной для дыхания среде // Безопасность жизнедеятельности. 2025. № 10(298). С. 28-39.

3. Баканов М.О., Гринченко Б.Б., **Захаров Д.Ю.** Комплексная оценка функционального состояния газодымозащитников в условиях теплового стресса // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2026. № 2(41). С. 202-214.

Научные публикации в изданиях, входящих в международные системы цитирования

4. Гринченко Б.Б., Шипилов Р.М., Баканов М.О., Румянцева В.Е., **Захаров Д.Ю.** Прогнозирование параметров работы участников тушения пожара на примере предприятий текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 1(409). С. 164-173. doi 10.47367/0021-3497_2024_1_164.

5. Гринченко Б.Б., Баканов М.О., Румянцева В.Е., **Захаров Д.Ю.** Особенности организации поисково-спасательных работ на объектах текстильной промышленности при пожаре // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 1(415). С. 226-233. doi 10.47367/0021-3497_2025_1_226.

Свидетельства о регистрации баз данных и программ для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616817. Программное средство для прогностического моделирования предельного времени работы газодымозащитников на основе регрессионного анализа влияния мощности труда и температуры окружающей среды (THERMO-WORK PREDICTOR: аналитический модуль ГДЗС) / М.О. Баканов, Б.Б. Гринченко, **Д.Ю. Захаров**; заявитель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – № 2026615747; заявл. 03.03.2026; опубл. 11.03.2026.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617251. Веб-ориентированное программное средство для оперативного прогнозирования ресурса безопасной работы звена газодымозащитной службы в условиях комбинированной тепловой и физической нагрузки (FIRE-TIME WEB: веб-калькулятор безопасного времени ГДЗС) / М.О. Баканов, Б.Б. Гринченко, **Д.Ю. Захаров**; заявитель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-

спасательная академия ГПС МЧС России. – № 2026615750; заявл. 03.03.2026; опубл. 13.03.2026.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617320. Программное средство для сценарного моделирования и оперативного прогнозирования рабочего времени звена газодымозащитной службы с учетом уровня нагрузки, физиологических параметров и индивидуальных особенностей газодымозащитников (THERMO-TACTIC: Платформа моделирования ГДЗС) / М.О. Баканов, Б.Б. Гринченко, **Д.Ю. Захаров**; заявитель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – № 2026615742; заявл. 03.03.2026; опубл. 16.03.2026.

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026622178. База данных мониторинга функционального и теплового состояния газодымозащитников при выполнении физической нагрузки в разных микроклиматических режимах / **Д.Ю. Захаров**, Б.Б. Гринченко, М.О. Баканов, Д.А. Ульянов; заявитель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – № 2026620531; заявл. 19.02.2026; опубл. 15.05.2026.

Публикации в других изданиях

10. Шипилов Р.М., Гринченко Б.Б., **Захаров Д.Ю.**, Сорокин А.А. Влияние уровня физических качеств газодымозащитников на показатели максимального потребления кислорода // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции, Иваново, 23 ноября 2023 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2023. С. 761-765.

11. **Захаров Д.Ю.** Физиологические особенности организма при выполнении боевых действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции, Иваново, 23 ноября 2023 года. Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2023. С. 439-443.

12. Баканов М.О., **Захаров Д.Ю.** Влияние теплового стресса на эффективность боевых действий пожарных: экспериментальные исследования микроклиматических условий. Постановка задачи // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Материалы IX международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Москва, 19–20 марта 2024 года. Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 81-85.

13. Баканов М.О., **Захаров Д.Ю.** Влияние теплового стресса на эффективность боевых действий пожарных // Актуальные вопросы профессиональной подготовки пожарных и спасателей: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 20 марта 2024 года. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. С. 76-81.

14. Баканов М.О., **Захаров Д.Ю.** Ответные реакции организма газодымозащитников на возрастающую физическую нагрузку // Актуальные вопросы пожаротушения: Сборник материалов III Всероссийского круглого стола, Иваново, 28-29 марта 2024 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. С. 15-19.

15. **Захаров Д.Ю.**, Баканов М.О., Гринченко Б.Б. Исследование физиологических показателей участников тушения пожара при выполнении ступенчатой нагрузки // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». 2024. № 33-1. С. 320-323.

16. **Захаров Д.Ю.**, Гринченко Б.Б., Баканов М.О. Исследование физиологических показателей участников тушения пожара при выполнении возрастающей физической нагрузки // Пожарная и аварийная безопасность: Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, посвященной 375-летию пожарной охраны России, Иваново, 21 ноября 2024 года. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. С. 387-392.

17. **Захаров Д.Ю.**, Гринченко Б.Б., Баканов М.О. Факторы, влияющие на скорость потребления дыхательных ресурсов газодымозащитниками // Безопасность в Арктической зоне: современные вызовы и пути их решения: Сборник материалов Всероссийского круглого стола, Иваново, 30 января 2025 года. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2025. С. 43-49.

18. **Захаров Д.Ю.**, Гринченко Б.Б., Баканов М.О. Специфика работы газодымозащитников в условиях непригодной для дыхания среды // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: Сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 22 апреля 2025 года. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2025. С. 116-119.

19. **Захаров Д.Ю.**, Гринченко, Б.Б., Баканов, М.О. Исследование корреляции между интенсивностью расхода дыхательных ресурсов и частотой сердечных сокращений газодымозащитников // Новые технические, организационные и методические решения в области пожарной безопасности: сборник материалов научно-практической конференции молодых ученых, приуроченной ко Дню российской науки. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. С. 119-125.