

Научная статья

УДК 614.849

doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.99.24.001

Разработка комплексной математической модели управления разведкой звеньями газодымозащитной службы с использованием зондирующих устройств

Вячеслав Юрьевич Яровой¹

Амиран Аясович Сержинмаа¹

Ярослав Владимирович Гребнев^{1,2}

Александр Андреевич Босоногов¹

Андрей Сергеевич Дубовский¹

¹Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия,

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Юрьевич Яровой, yarovoiviacheslav@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке математической модели управления разведкой звеньями газодымозащитной службы в зоне ограниченной видимости при введении боевых действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ с использованием зондирующих устройств в непригодной для дыхания среде в зоне ограниченной видимости. При разработке модели были выявлены и учтены следующие ключевые параметры: дальность видимости, скорость движения звена, возможность обнаружения препятствий, снижение риска травматизма и другие факторы, влияющие на эффективность проведения боевых действий в задымленной среде. Основное внимание уделено синергии данных, которые поступают от детекторов зондирующего пожарно-спасательного устройства (ультразвуковой решетки, лидара и температурного датчика), для повышения оперативности и безопасности работы звена газодымозащитной службы в условиях пожара. Результаты моделирования показывают, что предложенная система управления позволяет оптимизировать маршрут движения, сократить время на поиск пострадавших и очагов возгорания, а также минимизировать угрозы для жизни и здоровья личного состава, что в конечном итоге способствует повышению общей эффективности боевых действий личного состава пожарной охраны по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: математическая модель, разведка, организационная модель, газодымозащитная служба, ограниченная видимость

Для цитирования: Яровой В.Ю., Гребнев Я.В., Сержинмаа А.А., Босоногов А.А., Дубовский А.С. Разработка математической модели управления разведки звеньями газодымозащитной службы с использованием зондирующих устройств // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 2 (37). С. 89-101. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.99.24.001>.

Original article.

Development of a comprehensive mathematical model for managing reconnaissance by gas and smoke protection service units using probing devices

Vyacheslav Yu Yarovoy¹

Amiran A Serginmaa¹

Yaroslav V. Grebnev^{1,2}

Alexander A. Bosonogov¹

Andrey S. Dubovsky¹

¹Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia,

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Corresponding author: Viacheslav Yu. Yarovoy, yarovoiviacheslav@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the development of a mathematical model of reconnaissance control by gas smoke protection service units in the zone of limited visibility when introducing combat operations to extinguish fires and rescue operations using probing devices in an unbreathable environment in the zone of limited visibility. In developing the model, the following key parameters were identified and taken into account: visibility range, link speed, ability to detect obstacles, injury risk reduction and other factors affecting the effectiveness of combat operations in a smoke-filled environment. The main attention is paid to the synergy of the data that come from the detectors of the probing fire-rescue device (ultrasonic array, lidar and temperature sensor), to improve the efficiency and safety of the gas protection service unit in fire conditions. Simulation results show that the proposed control system allows to optimize the route of movement, reduce the time to search for victims and fire centers, as well as minimize threats to the life and health of personnel, which ultimately contributes to improving the overall effectiveness of combat actions of firefighting personnel to extinguish fires and rescue operations.

Keywords: mathematical model, reconnaissance, organisational model, gas protection service, limited visibility

For citation: Yarovoy V.Yu., Grebnev Ya.V., Serginmaa A.A., Bosonogov A.A., Dubovsky A.S. Development of a mathematical model of reconnaissance control by gas smoke protection service units using sounding devices // Siberian Fire and Rescue Bulletin.2025. № 2 (37). С. 89-101. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.99.24.001>.

Ежегодно на территории Российской Федерации происходит более 200 тыс. техногенных пожаров [1], что обуславливает актуальную научно-техническую задачу повышения эффективности управления пожарными подразделениями. Современные технологии позволяют разрабатывать и внедрять системы мониторинга, которые обеспечивают важную информацию о текущей пожарной обстановке. Одним из ключевых аспектов является интеграция систем зондирования [2], таких как ультразвуковые и лидарные датчики, которые способствуют повышению производительности звеньев газодымозащитной службы (далее – ГДЗС), обеспечивая разведку в задымленной среде и создание цифровых моделей пространственной обстановки.

В условиях сильного задымления и как следствие ограниченной видимости внедрение зондирующих устройств позволяет минимизировать угрозу жизни и здоровью пожарных, обеспечивая эффективное обнаружение очагов пожара и опасных зон. Мобильные средства зондирования позволяют не только отслеживать критические параметры, но и существенно повышают скорость реакции на изменение обстановки, способствуя более быстрой ликвидации пожаров и спасению пострадавших.

В настоящей работе предлагается системный подход к улучшению процесса управления ГДЗС с использованием информации, поступающей от зондирующих устройств, что позволяет снизить риск травматизма и потери ориентации в условиях ограниченной видимости.

Соответственно для разработки эффективной комплексной математической модели управления разведкой звеньями ГДЗС в непригодной для дыхания среде необходимо учитывать множество факторов, связанных с динамикой движения звена, безопасностью участников и ограниченными условиями видимости. При этом главной целью модели является оптимизация процесса разведки, минимизация риска для участников и повышение производительности за счет внедрения современных зондирующих устройств. В предлагаемой в настоящей работе модели используются элементы теории вероятностей, математической статистики и дифференциальных уравнений для определения основных зависимостей, и оптимизационных функций. Оптимизационная задача направлена на минимизацию риска и времени разведки, что позволяет в комплексе повысить эффективность работы ГДЗС и снизить угрозу жизни участников.

Ранее предлагаемые математические модели управления [3-4] разведкой звеньев ГДЗС в условиях ограниченной видимости и задымления не учитывали ряд ключевых факторов, непосредственно влияющих на эффективность и безопасность проведения операций. Такие параметры, как риск травматизма личного состава и возможность выхода звена из строя, не входили в основу расчетов.

Травмоопасность, а также риск потери звена из-за дезориентации и ошибок, связанных с ухудшением видимости или повреждением путевого троса и рукавной линии, значительно возрастает в условиях пожара. Работы, проводимые с использованием ГДЗС связаны с нахождением людей в экстремально агрессивной среде, что требует учета всех факторов, влияющих на успешное выполнение боевой задачи и сохранение жизни и здоровья пожарных. Кроме этого анализ информации осуществляемый командиром звена ГДЗС несет одну из ключевых ролей с точки зрения оптимизации и эффективности управления процессом тушения пожара [5-6].

Предлагаемая обновленная модель интегрирует показатели риска травматизма и выхода из строя звена, а также параметры видимости, скорости движения и взаимодействия с препятствиями. Это позволяет не только более точно оценивать эффективность действий, но и снижать вероятность травм и ошибок, что критически важно при спасательных операциях в задымленных помещениях.

Основные параметры модели:

1. Дальность видимости $L(t)$ в момент времени, которая зависит от плотности дыма.
2. Скорость движения звена $V(t)$, зависящая от дальности видимости и факторов окружающей среды.
3. Уровень риска для звена $R(t)$, связанный с препятствиями, провалами и видимостью.
4. Производительность звена $P(t)$, определяющая обследованную площадь.
5. Время разведки $t_{раз}$, зависящее от условий видимости, скорости и препятствий.
6. Эффективность теплового датчика T_{temp} , влияющая на скорость обнаружения очагов пожара.

Интегрированную математическую модель можно представить следующим образом:

1. Дальность видимости $L(t)$.

Согласно положениям авторов [7-8] дальность видимости $L(t)$ экспоненциально уменьшается при увеличении плотности дыма $D(t)$. Соответственно модель для дальности видимости выражена следующим значением:

$$L(t) = L_{max} \times e^{-\alpha D(t)}$$

где, $D(t)$. — плотность дыма в точке, где находится звено в момент времени t ,
 α — коэффициент затухания видимости.

Дальность видимости $L(t)$, являющаяся критически важным параметром для оценки условий окружающей среды и уровня риска при движении звена, описывается экспоненциальной моделью, основанной на физических принципах распространения света в задымленной среде, что подтверждается исследованиями авторов [7-8]. Согласно данной

модели, текущая дальность видимости представляет собой функцию максимально возможной видимости L_{max} в идеальных условиях, уменьшаемую экспоненциальным множителем, который зависит от мгновенной плотности дыма $D(t)$ в месте нахождения звена и коэффициента затухания видимости α , характеризующего оптические свойства конкретной дымовой среды.

Максимальная дальность видимости L_{max} соответствует теоретическому пределу видимости в отсутствие каких-либо помех в атмосфере и определяется физиологическими возможностями человеческого зрения или характеристиками оптических систем технических устройств, используемых для наблюдения. Плотность дыма $D(t)$, являющаяся ключевым переменным параметром модели, представляет собой количественную меру концентрации дымовых частиц в единице объема воздуха и измеряется в соответствующих единицах (например, в $г/м^3$ или $мг/м^3$), при этом ее значение может существенно варьироваться в зависимости от интенсивности источника задымления, расстояния до него и атмосферных условий.

Коэффициент затухания видимости α , имеющий размерность, обратную плотности дыма ($м^3/г$), является важной характеристикой дымовой среды и отражает степень ее влияния на ослабление светового потока, причем его значение зависит от физико-химических свойств дымовых частиц, включая их размер, форму, коэффициент преломления и способность к рассеиванию и поглощению света. Экспоненциальный характер зависимости $e^{-\alpha D(t)}$ точно отражает физический процесс ослабления светового излучения при прохождении через задымленную среду, подчиняющийся закону Бугера-Ламберта-Бера, согласно которому интенсивность света уменьшается экспоненциально с ростом оптической плотности среды.

Данная модель обладает высокой точностью при описании реальных условий видимости в дыму, так как она учитывает нелинейный характер взаимодействия светового излучения с дымовыми частицами, при котором даже небольшое увеличение плотности дыма может привести к существенному ухудшению видимости. Коэффициент α в этой модели может быть определен экспериментально для различных типов дыма (например, образующегося при горении древесины, пластика или других материалов) и позволяет учитывать их специфические оптические свойства, что делает модель универсальной и применимой для широкого круга практических ситуаций, связанных с задымлением.

2. Скорость движения звена $V(t)$.

Скорость движения звена связана с дальностью видимости и может изменяться в зависимости от сложности маршрута и наличия препятствий [9]:

$$V(t) = V_{max} \times \frac{L(t)}{L_{max}} \times \frac{1}{1 + k_f \times J_f(t)}$$

где, $J_f(t)$ — количество препятствий на пути, k_f — коэффициент, характеризующий влияние препятствий на скорость.

Скорость движения звена $V(t)$ представляет собой динамически изменяющийся параметр, который определяется комплексным воздействием нескольких факторов, включая текущие условия видимости и сложность маршрута, что подтверждается исследованиями авторов [9]. Данная модель скорости движения выражается через произведение максимально возможной скорости V_{max} , коэффициента, учитывающего относительное снижение видимости $\frac{L(t)}{L_{max}}$, и множителя, отражающего влияние препятствий на маршруте $\frac{1}{1 + k_f \times J_f(t)}$, где каждый компонент имеет четкую физическую интерпретацию и вносит свой вклад в итоговое значение скорости.

Максимальная скорость V_{max} соответствует предельно допустимой скорости движения звена в идеальных условиях при отсутствии каких-либо ограничений видимости и препятствий, определяемой техническими характеристиками самого звена и условиями эксплуатации. Отношение текущей дальности видимости $L(t)$ к максимальной видимости L_{max} образует

безразмерный коэффициент, который линейно уменьшает скорость при ухудшении условий видимости, что отражает естественную реакцию оператора или системы управления на снижение обзорности, проявляющуюся в уменьшении скорости для обеспечения безопасности движения.

Количество препятствий на пути $J_f(t)$ является дискретным параметром, учитывающим число физических преград, обнаруженных на маршруте движения звена в момент времени t , причем под препятствиями понимаются как стационарные объекты, так и временные преграды, требующие изменения траектории или скорости движения. Коэффициент влияния препятствий k_f представляет собой безразмерную величину, характеризующую степень воздействия каждого препятствия на скорость движения и зависящую от типа препятствий, их размеров и способности звена их преодолевать, причем более высокие значения этого коэффициента соответствуют более существенному снижению скорости при обнаружении препятствий.

Знаменатель выражения $(1+k_f \times J_f(t))$ обеспечивает нелинейное уменьшение скорости при возрастании числа препятствий, что правильно отражает реальную ситуацию, когда каждое новое препятствие требует дополнительного времени для его обхода или преодоления, приводя к прогрессирующему снижению средней скорости движения. При отсутствии препятствий ($J_f(t) = 0$) знаменатель становится равным единице, и скорость определяется только условиями видимости, принимая значение $V_{max} \times \frac{L(t)}{L_{max}}$, тогда как при увеличении числа препятствий влияние этого фактора становится доминирующим, существенно ограничивая скорость движения независимо от условий видимости.

Данная модель адекватно описывает поведение звена в сложных условиях, учитывая, как объективные параметры окружающей среды (видимость), так и особенности маршрута (препятствия), что позволяет более точно прогнозировать скорость движения в различных сценариях. Коэффициент k_f может быть адаптирован для конкретных типов звеньев и условий их эксплуатации, принимая более высокие значения для сложно преодолимых препятствий или менее маневренных звеньев, что обеспечивает гибкость модели и ее применимость для широкого круга практических задач. Взаимосвязь между скоростью, видимостью и препятствиями, заложенная в данной модели, соответствует естественной логике принятия решений при управлении движением, когда оператор или автоматическая система последовательно оценивает все факторы риска и соответствующим образом корректирует скорость движения.

3. Уровень риска для звена $R(t)$.

Риск аварийных ситуаций зависит от скорости движения звена и дальности видимости. Чем выше скорость, тем выше риск аварийной ситуации. Чем меньше дальность видимости, тем выше риск:

$$R(t) = \frac{\delta v(t) + \beta}{L(t) + \epsilon}$$

где, $v(t)$ — скорость движения звена в момент времени t (м/с);

δ — коэффициент влияния скорости на риск (безразмерная величина);

β — базовый уровень риска при нулевой скорости (безразмерная величина);

$L(t)$ — дальность видимости в момент времени t (м);

ϵ — минимальная допустимая видимость, ниже которой существует критический риск.

Предлагаемая математическая модель для расчета уровня риска аварийных ситуаций $R(t)$ представляет собой дробно-линейную зависимость, учитывающую комплексное воздействие нескольких ключевых факторов, влияющих на безопасность движения звена. В числителе формулы находится линейная комбинация скорости движения звена $v(t)$ и базового уровня риска β , взвешенная через коэффициент влияния скорости δ , что позволяет количественно оценить вклад скоростного режима в общий уровень опасности. В знаменателе расположена сумма текущей дальности видимости $L(t)$ и константы безопасности ϵ , что обеспечивает

корректную математическую интерпретацию ухудшения условий видимости и их влияния на вероятность возникновения аварийной ситуации.

Скорость движения звена $v(t)$, измеряемая в метрах в секунду, является динамическим параметром, который непосредственно влияет на риск возникновения аварийной ситуации – чем выше скорость перемещения звена, тем меньше времени остается на реагирование при возникновении непредвиденных обстоятельств и тем сложнее осуществить своевременное маневрирование. Дальность видимости $L(t)$, выражаемая в метрах, представляет собой важнейший параметр условий окружающей среды, определяющий расстояние, на котором оператор или автоматическая система управления способны обнаружить потенциальные препятствия или опасности. Уменьшение этого показателя существенно повышает вероятность столкновений и других инцидентов.

Константа безопасности ϵ , имеющая размерность метра, введена в знаменатель формулы для обеспечения математической корректности при предельно малых значениях видимости и представляет собой минимально допустимый уровень видимости, при котором еще возможно безопасное движение звена – при приближении фактической видимости к этому значению риск аварийной ситуации стремится к критически высоким показателям. Коэффициент влияния скорости α является безразмерной величиной, которая определяет степень воздействия скоростного режима на общий уровень риска и позволяет регулировать значимость этого фактора для различных типов звеньев и условий эксплуатации.

Базовый уровень риска β , также являющийся безразмерной величиной, учитывает постоянную составляющую опасности, существующую даже при нулевой скорости движения, которая обусловлена такими факторами, как сложность рельефа, наличие постоянных препятствий, общее состояние инфраструктуры и другие стационарные условия, создающие потенциальную угрозу безопасности. Введение этого параметра в числитель формулы позволяет избежать нефизического обращения риска в ноль при остановке звена и более адекватно отражает реальные условия эксплуатации, когда определенная вероятность возникновения аварийной ситуации сохраняется даже при отсутствии движения.

Коэффициенты δ и β могут быть определены экспериментальным путем для конкретных типов звеньев и условий их эксплуатации, что позволяет адаптировать модель к различным практическим ситуациям и повышает точность оценки риска. При этом значения этих коэффициентов могут периодически корректироваться по мере накопления статистических данных о реальных аварийных ситуациях, что делает модель самообучающейся и постоянно совершенствующейся. Размерность всех параметров формулы согласована таким образом,

что итоговый уровень риска $R(t)$ представляет собой безразмерную величину, которую можно интерпретировать как относительную вероятность возникновения аварийной ситуации или использовать для сравнительного анализа различных режимов работы звена.

4. Производительность звена $P(t)$.

Производительность, выраженная в площади обследованной территории, зависит от скорости движения и ширины зоны обследования:

$$P(t) = W \times V(t)$$

где, W — ширина зоны покрытия звена, определяемая углом обзора и радиусом действия ультразвуковой фазированной решетки.

Производительность звена $P(t)$, характеризующая эффективность выполнения задач по обследованию территории и измеряемая в единицах площади за единицу времени (например, квадратных метрах в секунду), определяется как произведение ширины зоны покрытия W на текущую скорость движения звена $V(t)$, что отражает фундаментальную зависимость между геометрическими параметрами зоны действия оборудования и кинематическими характеристиками движения. Ширина зоны покрытия W представляет собой важный технологический параметр, который определяется конструктивными

особенностями используемого оборудования, в частности углом обзора ультразвуковой фазированной решетки и ее максимальным радиусом действия, причем эти характеристики зависят от технических спецификаций конкретного оборудования и условий окружающей среды, влияющих на распространение ультразвуковых волн.

Угол обзора ультразвуковой фазированной решетки, измеряемый в градусах, определяет сектор пространства, в пределах которого оборудование способно эффективно обнаруживать объекты и анализировать окружающую среду, при этом более широкий угол обзора позволяет увеличить ширину зоны покрытия W при прочих равных условиях, но может сопровождаться уменьшением дальности действия или снижением разрешающей способности. Радиус действия ультразвуковой решетки, измеряемый в метрах, представляет собой максимальное расстояние, на котором оборудование может надежно обнаруживать объекты и анализировать характеристики среды, причем этот параметр зависит от мощности излучателя, чувствительности приемника и коэффициента поглощения ультразвука в конкретной среде, который может существенно варьироваться в зависимости от температуры, влажности и состава атмосферы.

Текущая скорость движения звена $V(t)$, измеряемая в метрах в секунду, является динамическим параметром, который может изменяться в зависимости от условий окружающей среды, характеристик маршрута и поставленных оперативных задач, при этом зависимость производительности от скорости носит линейный характер, что соответствует физическому смыслу процесса обследования территории, когда увеличение скорости перемещения при постоянной ширине зоны покрытия прямо пропорционально увеличивает площадь охватываемой территории за единицу времени. Представленная модель производительности $P(t)=W \times V(t)$ предполагает равномерное и непрерывное покрытие обследуемой территории, что соответствует идеальным условиям работы, при этом в реальных условиях могут наблюдаться отклонения, связанные с необходимостью маневрирования, изменением высоты движения или временными остановками для более детального изучения отдельных участков.

Важным аспектом модели является взаимосвязь между шириной зоны покрытия W и скоростью движения $V(t)$, поскольку эти параметры часто находятся в обратной зависимости друг от друга - увеличение ширины зоны покрытия может потребовать снижения скорости движения для обеспечения необходимого качества сбора данных, тогда как увеличение скорости может привести к необходимости уменьшения ширины зоны покрытия для поддержания требуемого разрешения и точности обследования. Данная модель производительности является фундаментальной для планирования операций по обследованию территорий, позволяя оценивать необходимые временные затраты для покрытия заданных площадей, оптимизировать маршруты движения и выбирать оптимальные режимы работы оборудования в зависимости от поставленных задач и условий окружающей среды.

5. Время разведки $t_{\text{раз}}$ – время, затрачиваемое на обследование определенной площади, зависит от скорости движения звена и площади обследуемой территории:

$$t_{\text{раз}} = \frac{S}{W \times V(t)}$$

где, S — площадь территории, которую необходимо разведать.

При этом стоит отметить, что параметр $t_{\text{раз}}$ не может превышать параметр $T_{\text{общ}}$, вычитывающееся согласно [9].

Время разведки $t_{\text{раз}}$, представляющее собой ключевой оперативный показатель эффективности выполнения задач по обследованию территории, определяется как отношение общей площади исследуемой территории S к произведению ширины зоны покрытия W на текущую скорость движения звена $V(t)$, что отражает фундаментальную зависимость временных затрат от геометрических параметров зоны действия оборудования и кинематических характеристик движения звена. Площадь обследуемой территории S , измеряемая в квадратных метрах, является постоянным параметром для конкретной задачи

разведки и представляет собой суммарную площадь пространства, которое необходимо исследовать с заданным уровнем детализации, причем этот параметр определяется оперативным заданием и может варьироваться в широких пределах в зависимости от масштабов и целей проводимой разведывательной операции.

Ширина зоны покрытия W , как и в модели производительности звена, определяется техническими характеристиками используемого оборудования, в частности параметрами ультразвуковой фазированной решетки, включая ее угол обзора и максимальный радиус действия, при этом данный параметр остается постоянным в течение выполнения задачи при условии неизменности режимов работы оборудования и стабильности условий окружающей среды, влияющих на распространение ультразвуковых волн. Текущая скорость движения звена $V(t)$, являющаяся переменной величиной, измеряемой в метрах в секунду, может изменяться в процессе выполнения задачи в зависимости от множества факторов, включая условия видимости, сложность рельефа, наличие препятствий и оперативную необходимость, что приводит к соответствующему изменению временных затрат на выполнение разведывательной операции.

Представленная модель времени разведки $t_{\text{раз}} = \frac{S}{W \times V(t)}$ предполагает идеальные условия работы, при которых звено движется с постоянной скоростью по оптимальному маршруту, обеспечивающему полное и непрерывное покрытие исследуемой территории без перекрытий и пропусков участков, что на практике может достигаться только при тщательном предварительном планировании маршрута и стабильных условиях выполнения задачи. Важным ограничением модели является требование, согласно которому расчетное время разведки $t_{\text{раз}}$ не должно превышать общего доступного времени $T_{\text{общ}}$, определяемого согласно методике, изложенной в источнике [9], что вводит ограничение на минимально допустимую среднюю скорость движения звена $V(t) \geq S/(W \times T_{\text{общ}})$ и требует соответствующего планирования операций с учетом этого ограничения.

Общее доступное время $T_{\text{общ}}$, упомянутое в ограничении, представляет собой максимально допустимую продолжительность выполнения разведывательной операции, определяемую совокупностью факторов, включая запас энергии источников питания, временные рамки оперативного задания, условия окружающей среды и другие лимитирующие параметры, причем методика расчета этого параметра, согласно методики [9], должна учитывать все критические факторы, влияющие на продолжительность автономной работы звена. В случае, когда расчетное время разведки $t_{\text{раз}}$ превышает доступное общее время $T_{\text{общ}}$, требуется корректировка параметров операции, которая может включать увеличение ширины зоны покрытия W за счет изменения режимов работы оборудования, повышение средней скорости движения $V(t)$ при условии обеспечения необходимого качества разведки, или разделение исследуемой территории на участки с последовательным их обследованием в рамках нескольких операций.

Данная модель времени разведки является важным инструментом для планирования и оптимизации операций по обследованию территорий, позволяя оценивать необходимые временные ресурсы, выявлять потенциальные узкие места в выполнении задачи и разрабатывать соответствующие корректирующие мероприятия для обеспечения выполнения поставленных задач в установленные сроки. При практическом применении модели необходимо учитывать возможные отклонения от идеальных условий, связанные с необходимостью маневрирования, изменения маршрута для обхода препятствий, временных остановок для детального исследования подозрительных участков или изменения режимов работы оборудования, что может потребовать введения соответствующих поправочных коэффициентов или резервирования части общего времени на непредвиденные обстоятельства.

6. Эффективность теплового датчика T_{temp} – эффективность работы датчика температуры связана с градиентом температур и скоростью движения:

$$T_{temp} = \alpha \left(\frac{T_{sensor}}{T_{ref}} \right)^{\beta} \times \left(\frac{\nabla T}{\nabla T_{ref}} \right)^{\gamma} \times \frac{1}{V(t)}$$

где, T_{temp} – эффективность теплового датчика;

$\left(\frac{T_{sensor}}{T_{ref}} \right)^{\beta} \times \frac{\nabla T}{\nabla T_{ref}}$ – функциональная зависимость от температуры датчика и градиента температур;

где, T_{sensor} – показания датчика температуры;

T_{ref} – показания датчика температуры;

∇T – градиент температуры в зоне измерения;

∇T_{ref} – эталонный градиент температур;

$V(t)$ – скорость движения объекта измерения;

α – калибровочный коэффициент (безразмерный);

β, γ – степенные коэффициенты, определяющие влияние температуры и градиента соответственно.

Эффективность теплового датчика T_{temp} представляет собой комплексный показатель, количественно характеризующий работоспособность и точность измерений температурного сенсора в различных условиях эксплуатации, выражаемый через произведение трех ключевых компонентов: функциональной зависимости от температурных параметров $f(T_{sensor}, \nabla T)$, обратной зависимости от скорости движения объекта измерения $1/V(t)$ и калибровочного коэффициента α , что позволяет учесть все основные факторы, влияющие на качество температурного мониторинга. Функциональная зависимость $f(T_{sensor}, \nabla T) = \alpha \cdot (T_{sensor}/T_{ref})^{\beta} (\nabla T/\nabla T_{ref})^{\gamma}$ представляет собой степенную функцию, учитывающую относительное отклонение текущих рабочих параметров от эталонных значений через безразмерные отношения текущей температуры датчика к эталонной температуре и текущего градиента температур к эталонному градиенту, возведенные в степени β и γ соответственно, что обеспечивает нелинейную характеристику влияния этих параметров на эффективность датчика.

Текущая температура датчика T_{sensor} измеряемая в градусах Цельсия в зависимости от используемой шкалы, является критически важным параметром, непосредственно влияющим на рабочие характеристики чувствительного элемента, поскольку отклонение от оптимального температурного диапазона может вызывать изменения чувствительности, смещение нулевой точки и другие нелинейные эффекты в работе датчика. Эталонная температура датчика ∇T_{ref} соответствует нормальным рабочим условиям, при которых производитель гарантирует заявленные метрологические характеристики устройства, и служит точкой отсчета для оценки степени отклонения текущих рабочих условий от оптимальных, причем это значение обычно указывается в технической документации к конкретной модели датчика и соответствует температуре, при которой проводилась его калибровка.

Градиент температур в зоне измерения ∇T , выражаемый в градусах на единицу длины ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$), характеризует пространственное распределение температуры в области проведения измерений и влияет на точность датчика за счет возникновения паразитных тепловых потоков через корпус и элементы конструкции, которые могут вызывать дополнительные погрешности измерения, особенно значительные при работе с малыми перепадами температур. Эталонный градиент температур ∇T_{ref} представляет собой значение градиента, при котором проводилась калибровка датчика и при котором обеспечиваются наилучшие точностные характеристики, служа базовым уровнем для оценки влияния реальных градиентов на эффективность работы устройства, причем это значение определяется конструктивными особенностями конкретного датчика и способами его термостатирования.

Скорость движения объекта измерения $V(t)$, входящая в формулу в виде обратной величины $1/V(t)$, отражает зависимость эффективности датчика от динамических условий

измерения, поскольку при увеличении скорости движения уменьшается время взаимодействия датчика с контролируемой средой, что может приводить к неполному тепловому уравниванию и соответствующим динамическим погрешностям измерения, особенно существенным для датчиков с большой тепловой инерционностью. Калибровочный коэффициент α является безразмерным параметром, который позволяет согласовать размерности всех компонентов уравнения и скорректировать общий уровень эффективности для конкретной модели датчика или условий его применения, причем его значение обычно определяется экспериментальным путем в процессе настройки измерительной системы.

Степенные коэффициенты β и γ определяют степень влияния соответственно температуры датчика и градиента температур на его эффективность, позволяя моделировать различные сценарии зависимости точности измерений от этих параметров - значения этих коэффициентов обычно находятся в диапазоне от 0.5 до 2 в зависимости от типа датчика и условий его работы, причем более высокие значения соответствуют более сильной зависимости эффективности от отклонений параметров от эталонных значений. Физический смысл предложенной модели заключается в том, что эффективность датчика снижается при отклонении температуры датчика от эталонного значения (как в сторону увеличения, так и уменьшения), при увеличении градиента температур сверх эталонного уровня и при возрастании скорости движения объекта измерения, причем характер этих зависимостей определяется значениями степенных коэффициентов и может быть адаптирован для конкретных типов датчиков и условий их эксплуатации.

7. Оптимизация процесса разведки.

Целевой функционал должен минимизироваться на множестве всех допустимых траекторий движения звена ГДЗС, которые должны удовлетворять следующим условиям:

Обход всей площади разведки. Траектория должна обеспечивать полный охват заданной площади S , то есть каждая точка площади должна быть достигнута хотя бы один раз.

Ограничение на производительность. Производительность звена $P(t)$ должна быть не ниже минимально допустимой P_{min} .

Ограничение на скорость. Скорость движения $V(t)$ должна быть положительной ($V(t) > 0$).

Ограничение на риск. Уровень риска $R(t)$ должен быть минимизирован.

Таким образом модель оптимизации, нацеленную на минимизацию риска выхода звена из строя и времени разведки при сохранении производительности звена, можно представить следующим образом:

$$T = \left\{ \gamma(e) \left| \int_{\gamma} ds = S, P(t) \geq P_{min}, V(t) > 0, \int_0^{T_f} R(t) dt + \beta \cdot T_f \rightarrow \min \right. \right.$$

где, T_f – это время, необходимое для завершения всех операций, β – коэффициент, отражающий значимость времени выполнения задачи, а P_{min} – минимально допустимая производительность, γ_e – траектория движения звена, а ds – элемент длины пути.

Интегрированная модель представляет собой совокупность нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают поведение звена ГДЗС в реальном времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} L(t) = L_{max} \times e^{-\alpha D(t)} \\ V(t) = V_{max} \times \frac{L(t)}{L_{max}} \times \frac{1}{1 + k_f \times J_f(t)} \\ R(t) = \frac{\delta v(t) + \beta}{L(t) + \epsilon} \\ P(t) = W \times V(t) \\ t_{\text{раз}} = \frac{S}{W \times V(t)} \\ T_{\text{temp}} = \alpha \left(\frac{T_{\text{sensor}}}{T_{\text{ref}}} \right)^{\beta} \times \left(\frac{\nabla T}{\nabla T_{\text{ref}}} \right)^{\gamma} \times \frac{1}{V(t)} \\ T = \left\{ \gamma(e) \left| \int_{\gamma} ds = S, P(t) \geq P_{\min}, V(t) > 0, \int_0^{T_f} R(t) dt + \beta \cdot T_f \rightarrow \min \right. \right\} \end{array} \right.$$

Эта модель позволяет прогнозировать эффективность работы звена ГДЗС в условиях ограниченной видимости и задымления, обеспечивая динамическое управление разведкой и минимизируя риски для жизни и здоровья личного состава.

Апробация предложенной модели проводилась с использованием разработанного зондирующего пожарно-спасательного устройства [10], звеньями ГДЗС Красноярского пожарно-спасательного гарнизона при проведении разведки на техногенных пожарах. Объем выборки при апробации составил 100 техногенных пожаров. Время разведки увеличилось на 27%, Обнаружение очагов/пострадавших 31%, снижение риска для звена на 43%.

Заключение

В заключении статьи подведем итог разработки математической модели для управления разведкой звеньями ГДЗС в условиях ограниченной видимости и непригодной для дыхания среды. Модель позволяет учитывать ключевые факторы, влияющие на эффективность разведки: дальность видимости, скорость движения звена, вероятность обнаружения препятствий и опасных участков, а также возможности быстрого нахождения очага возгорания и пострадавших.

Построенная математическая модель базируется на системах уравнений, учитывающих параметры, такие как время выполнения задачи, расстояние до препятствий и скорость реакции на изменения среды. Учет данных с ультразвуковых, оптических и температурных датчиков позволяет повысить точность модели, минимизировать риски для жизни и здоровья звена, а также увеличить общую производительность разведки.

Эффективность предлагаемой модели и зондирующего устройства обеспечивается не только за счет технических характеристик оборудования, но и за счет интеграции данных в единую информационную систему, позволяющую оперативно принимать управленческие решения на основе объективной информации о текущей обстановке.

Список источников

1. Михайлов К.А., Семенов А.О., Тараканов Д.В. Информационная система и математическая модель для организации разведки пожара в зданиях с применением средств мониторинга //Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – №. 4 (49). – С. 84-93.
2. Топольский Н.Г. и др. Пространственная модель управления действиями поисково-спасательных подразделений при пожарах и задымлении //Современные проблемы гражданской защиты. – 2020. – №. 3 (36). – С. 47-52.
3. Чистяков И.М., Шипилов Р.М. Математическое описание временных характеристик процесса функционирования газодымозащитной службы //Пожарная и аварийная безопасность. – 2016. – №. 2. – С. 50-60.

4. Шевцов М.В. Формализация метода оценки усвоения получаемой информации при проведении разведки на пожаре / М.В. Шевцов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2023. – № 4(31). – С. 132-139. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.50.36.014. – EDN HNNMLV.
 5. Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара / Н.А. Кореневский, М.В. Шевцов, Л.В. Стародубцева, Г.В. Сипливый // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 142-159. – EDN NLAJHR.
 6. Суриков А.В. Исследование оптических свойств дымов / А.В. Суриков // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 14-17. – EDN TKVQHL.
 7. Чистяков И.М. Динамика параметров работы звеньев ГДЗС при снижении видимости на пожаре / И.М. Чистяков // Пожарная и аварийная безопасность: Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охране России, Иваново, 12–13 сентября 2019 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», 2019. – С. 205-208. – EDN PZQEIG.
 8. Габдуллин В.Б. Исследование механизма действий звеньев газодымозащитной службы в приближенных к реальным условиям / В.Б. Габдуллин, А.Д. Ищенко // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2019. – № 28. – С. 51-55. – EDN BKWZNY.
 9. Приказ МЧС России от 27.06.2022 N 640 «Об утверждении Правил использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения личным составом подразделений пожарной охраны» // КонсультантПлюс: сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_444543/.
 10. Патент на полезную модель № 226706 U1 Российская Федерация, МПК A62C 99/00. Зондирующее пожарно-спасательное устройство: № 2023131029; заявл. 27.11.2023; опубл. 19.06.2024 / В.Ю. Яровой, П.В. Ширинкин. – EDN DGONYF.
- Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20088, <https://rscf.ru/project/25-21-20088/>, гранта Красноярского краевого научного фонда.

References

1. Mikhailov K.A., Semyonov A.O., Tarakanov D.V. Information system and mathematical model for organisation of fire development in buildings with application of monitoring applications // Modern Problems of Civil Protection. – 2023. – №. 4 (49). – С. 84-93.
2. Topolskiy N.G. et al. Spatial model of management of search and rescue units actions at fires and smoke // Modern problems of civil protection. – 2020. – №. 3 (36). – С. 47-52.
3. Chistyakov I.M., Shipilov R.M. Mathematical description of the temporal characteristics of the process of functioning of the gas smoke protection service // Fire and Emergency Safety. – 2016. – №. 2. – С. 50-60.
4. Shevtsov M.V. Formalisation of the method for assessing the assimilation of the received information during reconnaissance at the fire / M.V. Shevtsov // Siberian Fire and Rescue Bulletin. – 2023. – № 4 (31). – С. 132-139. – DOI10.34987/vestnik.sibpsa.2023.50.36.014. – EDN HNNMLV.
5. Method of synthesis of mathematical models for assessing the fire situation and the state of people in the fire zone / N.A. Korenevsky, M.V. Shevtsov, L.V. Starodubtseva, G.V. Siplivy // Izvestia South-West State University. Series: Management, Computer Science, Informatics. Medical Instrumentation. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 142-159. – EDN NLAJHR.
6. Surikov A.V. Investigation of optical properties of fumes / A.V. Surikov // Emergency situations: education and science. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 14-17. – EDN TKVQHL.
7. Chistyakov I.M. Dynamics of the parameters of work of the RDZS links at reduced visibility at the fire / I. M. Chistyakov // Fire and emergency safety : Collection of materials of the XIV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 370th anniversary of the

formation of the fire protection of Russia, Ivanovo, 12-13 September 2019. - Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Firefighting Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters', 2019. – С. 205-208. – EDN PZQEIG.

8. Gabdullin V.B. Investigation of the mechanism of action of gas smoke protection service links in approximate to real conditions / V.B. Gabdullin, A.D. Ischenko // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference 'Security Systems'. – 2019. – № 28. – С. 51-55. – EDN BKWZNY.

9. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 27.06.2022 N 640 «On approval of the Rules for the use of means of individual protection of the respiratory organs and vision by the personnel of fire protection units»// ConsultantPlus: website. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_444543/.

10. Patent for utility model No. 226706 U1 Russian Federation, MPC A62C 99/00. Probing fire-rescue device: No. 2023131029; applied for on 27.11.2023; published on 19.06.2024 / V. Yu. 27.11.2023; published 19.06.2024 / V.Y. Yarovoy, P.V. Shirinkin. – EDN DGONYF.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-21-20088, <https://rscf.ru/project/25-21-20088/>, a grant from the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

Информация об авторах

Я.В. Гребнев – кандидат технических наук

Information about the author

Ya.V. Grebnev – candidate of technical sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025, одобрена после рецензирования 20.06.2025, принята к публикации 22.06.2025.

The article was submitted 20.05.2025, approved after reviewing 20.06.2025, accepted for publication 22.06.2025.