

УДК 614.842.6

DOI 10.48612/ntp/d2x8-t6ta-d6tu

## **НОРМАТИВНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ**

**М. А. МАРЕЕВ**

Главное управление пожарной охраны МЧС России,  
Российская Федерация, г. Москва  
Академия ГПС МЧС России  
Российская Федерация, г. Москва  
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново  
E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Тушение пожаров характеризуется высокой динамикой, неопределенностью и необходимостью принятия решений в условиях дефицита времени. Целью работы является развитие научных основ тактики тушения пожаров на основе метода электрогидравлических аналогий, позволяющего формализовать описание боевых действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ. Обоснована правомерность применения метода аналогий для исследования процессов тушения пожаров. Разработана нормативно-параметрическая система соответствия между элементами электрической цепи и параметрами боевых действий (приоритет боевой задачи, поток огнетушащих веществ, операционное сопротивление, организационная инерция, буферный запас). Доказана применимость законов Кирхгофа для анализа баланса информационных и материальных потоков в оперативно-тактических структурах. Получено интегральное уравнение динамики (10), объединяющее резистивные, индуктивные и емкостные составляющие процесса тушения. На примере метода интервального охлаждения резервуаров показана его практическая реализация для обоснования тактических решений.

**Ключевые слова:** научные основы тактики тушения пожаров, метод электрогидравлических аналогий, теория цепей, боевые действия, аварийно-спасательные работы, нормативный метод.

## **A NORMATIVE-PARAMETRIC MODEL OF COMBAT OPERATIONS DURING A FIRE BASED ON THE ELECTROHYDRAULIC ANALOGY METHOD**

**M. A. MAREEV**

Fire Main Office EMERCOM of Russia,  
Russian Federation, Moscow  
Academy of the state service of EMERCOM of Russia  
Russian Federation, Moscow  
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education  
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation  
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo  
E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Firefighting is characterized by high dynamics, uncertainty, and the need to make decisions under time constraints. The purpose of this work is to develop the scientific foundations of firefighting tactics based on the method of electrohydraulic analogies, which allows for the formalization of firefighting and rescue operations. The validity of using the method of analogies for studying firefighting processes has been substantiated. A normative and parametric system has been developed to establish a correspondence between the elements of an electrical circuit and the parameters of firefighting operations (priority of the combat mission, flow of firefighting agents, operational resistance, organizational inertia, and buffer reserve). The applicability of Kirchhoff's laws for analysing the balance of information and material flows in operational and tactical structures has been proven. An integral dynamic equation (10) has been obtained that combines the resistive, inductive, and capacitive components of the extinguishing process. Using the example of the interval cooling method for tanks, its practical implementation for substantiating tactical decisions is demonstrated.

**Key words:** scientific foundations of fire extinguishing tactics, the method of electrohydraulic analogies, circuit theory, combat operations, emergency rescue operations, and the regulatory method.

### Введение

Разработка научных основ тактики тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ является одним из приоритетных направлений исследований в области пожарной безопасности. Процессы тушения пожаров представляют собой сложную междисциплинарную задачу, требующую учета физических, организационных, социальных и тактических аспектов. Особую сложность представляет управление силами и средствами при тушении пожаров: решения принимаются в условиях острого дефицита времени, неполноты информации и высокой ответственности за жизнь людей и сохранность материальных ценностей<sup>1</sup>.

Традиционные методы обоснования тактических решений при тушении пожаров базируются преимущественно на качественных принципах, экспертных оценках и эмпирическом опыте, обобщенном в руководящих документах и справочной литературе.<sup>2, 3</sup> Такой подход имеет объективные ограничения при решении задач формализации боевых действий и прогнозирования последствий принимаемых тактических решений.

В исследованиях в области пожарной безопасности предлагается использовать метод аналогий, позволяющий переносить знания и математический аппарат из одной предметной области в другую при наличии структурного сходства описываемых их уравнений [1]. Классическим примером является метод электрогидравлических аналогий (ЭГА), устанавливающий соответствие между процессами в электрических цепях и гидравлических системах [2, 3]. Развитие этого метода применительно к боевым действиям на пожаре открывает новые возможности для развития научных основ тактики тушения пожаров [4].

Анализ рецензируемых исследований за последние пять лет позволяет выделить несколько ключевых направлений в области моделирования пожаров. Значительный объем работ посвящен физическому моделированию динамики опасных факторов пожара [5, 6]. Другое направление связано с моделированием поведения людей и эвакуации [7, 8, 9]. Третье направление составляет моделирование тактических решений и действий оперативных

подразделений [10,11,12]. В работах [17–23] разработаны модели и алгоритмы поддержки принятия опорных решений в тактике тушения пожаров, основанные на теории конечных цепей Маркова, графоаналитическом подходе и нейросетевых методах. Формализованы граничные условия идентификации ситуаций на месте пожара, а также условия многозадачности ведения боевых действий при тушении пожаров на различных объектах. Указанные работы подтверждают актуальность формализации тактических решений, однако используют преимущественно стохастические и нейросетевые подходы, оставляя открытым вопрос применения детерминированных методов анализа динамики боевых действий на основе физических аналогий.

Особого внимания заслуживают работы, в которых предпринимаются попытки применения аппарата теории цепей для описания информационных и материальных потоков в оперативно-тактических структурах [13].

Наряду с несомненными достижениями, в существующих исследованиях сохраняется ряд существенных пробелов. Большинство моделей фокусируются либо на физике процесса, либо на поведенческих аспектах, оставляя в тени центральное звено – деятельность руководителя тушения пожара (РТП) как субъекта тактического управления. Отсутствует единая методологическая база, позволяющая с единых позиций описывать разнородные процессы (движение техники, расход огнетушащих веществ, передачу информации, принятие решений). Недостаточно развит аппарат формализованного описания тактических воздействий, привязанный к действующей нормативной базе.

Таким образом, выявляется научная проблема, заключающаяся в противоречии между сложностью задач тактики тушения пожаров и отсутствием формализованного методологического аппарата, позволяющего описывать динамику боевых действий и обосновывать тактические решения на основе объективных данных.

Цель исследования заключается в развитии научных основ тактики тушения пожаров на основе метода электрогидравлических аналогий, позволяющего переносить

<sup>1</sup> Стратегия в области развития гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций до 2030 года: утв. Указом Президента РФ от 16.10.2019. № 501. М., 2019.

<sup>2</sup> Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны: приказ МЧС России от 16.09.2024 № 777. М., 2024.

<sup>3</sup> Иванников, В. П. Справочник руководителя тушения пожара / В. П. Иванников, П. П. Ключ. М.: Стройиздат, 1987. 288 с.

математический аппарат теории цепей в область боевых действий по тушению пожаров.

Для достижения цели необходимо установить содержательное соответствие между параметрами электрогидравлической системы и боевыми действиями, доказать применимость балансовых соотношений, получить интегральное уравнение динамики тушения и апробировать примененный метод на примере конкретной тактической задачи (интервальное охлаждение резервуаров).

Научная новизна заключается в применении метода ЭГА к развитию научных основ тактики тушения пожаров, разработке нормативно-параметрической системы соответствия (привязанной к законодательству Российской Федерации) и получении интегрального уравнения динамики (10), описывающего переходные процессы в оперативно-тактических структурах.

Практическая значимость состоит в создании методологической основы для разработки автоматизированных систем обоснования тактических решений при тушении пожаров различного типа, а также для применения в обучающих симуляторах и при планировании действий подразделений пожарной охраны.

#### Теоретическая основа метода аналогий

Возможность переноса математических моделей из одной предметной области в другую базируется на принципе формального изоморфизма систем дифференциальных уравнений [1]. Если процессы в двух физически различных системах описываются уравнениями одинаковой структуры, то методы исследования, разработанные для одной системы, могут быть применены к другой.

Классическим примером служит соответствие между электрическими и гидравлическими системами. Для последовательной электрической RLC-цепи справедливо уравнение:

$$L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) + \frac{1}{C} \int_0^t I(\tau) d\tau = E(t) \quad (1)$$

Для гидравлической системы с инерционным элементом, сопротивлением и емкостью:

$$Lr \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{Rr}{dt} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{Cr} = P(t) \quad (2)$$

Математическая тождественность структуры уравнений (1) и (2) является строгим основанием для применения аппарата теории цепей в гидравлике [2, 3].

При переходе к боевым действиям на пожаре ситуация принципиально иная. Процессы тушения пожаров не описываются уравнениями, тождественными (1) и (2) – они изначально не имеют аналитического описания. Поэтому речь идет не о математическом изоморфизме (который требуется доказать), а о построении модели по аналогии. Правомочность такого подхода определяется двумя условиями:

1. Содержательным соответствием между элементами исходной системы (боевых действий) и элементами модели (электрической цепи);

2. Выполнением в моделируемой системе фундаментальных законов сохранения, аналогичных законам Кирхгофа.

Обоснование первого условия (содержательного соответствия) представлено в таблице 1 и базируется на нормативных документах, регламентирующих деятельность пожарной охраны. Каждому параметру электрической цепи поставлен в соответствие количественно измеряемый показатель процесса тушения, значение которого определяется действующими правовыми актами.

Обоснование второго условия (применимости законов Кирхгофа) требует отдельного рассмотрения, поскольку информация и тактические команды, в отличие от электрического тока, не подчиняются закону сохранения. Доказательство базируется на следующих положениях.

Первый закон Кирхгофа (баланс потоков в узле). Рассмотрим произвольный узел оперативно-тактической структуры – например, рукавное разветвление или пост безопасности. В установившемся режиме тушения суммарный поток ресурсов (вода, личный состав, техника), входящий в узел, равен суммарному потоку, выходящему из узла. Это следует из принципа материального баланса: узел не является источником или стоком ресурсов, он лишь перераспределяет их. Для информационных потоков аналогичное утверждение требует введения граничных условий: если рассматривать не саму информацию, а ее материальные носители (радиосигналы, донесения на бумаге), то закон сохранения выполняется. В рамках настоящего исследования принято допущение, что все информационные потоки имеют материальную основу и подчиняются балансовым соотношениям.

Второй закон Кирхгофа (баланс приоритетов в контуре). Рассмотрим замкнутый тактический контур, например: руководитель тушения пожара (РТП) → начальник боевого участка → звено ГДЗС → доклад РТП. В таком контуре сумма всех приоритетов (приказов, распоряжений, корректирующих воздействий) равна

сумме потерь приоритета на преодоление операционных сопротивлений. Это утверждение является следствием принципа причинности: для достижения результата на выходе контура необходимо приложить на входе приоритет, достаточный для компенсации всех потерь.

Таким образом, применение аппарата теории цепей к боевым действиям на пожаре обосновано соответствием параметров и выполнением балансовых соотношений, аналогичных законам Кирхгофа. Речь идет о моделировании по аналогии, правомерность которого подтверждается верификацией модели на реальных данных (см. раздел «Обсуждение результатов и заключение»).

#### Нормативная база исследования

Количественные значения параметров устанавливаются исключительно на основе действующих нормативных правовых актов Российской Федерации, что обеспечивает объективность, воспроизводимость результатов и юридическую значимость получаемых оценок. В работе использованы:

Федеральные законы: № 52-ФЗ (ст. 5)<sup>4</sup>, № 283-ФЗ (ст. 12)<sup>5</sup>, № 69-ФЗ (ст. 9)<sup>6</sup> – для определения социальных гарантий личного состава; приказы МЧС России: № 777 (Боевой устав) – для ранжирования пожаров; № 77 – для времени выполнения упражнений<sup>7</sup>; № 640 – для определения численности звеньев ГДЗС<sup>8</sup>; постановление Правительства РФ № 794 – для определения уровней реагирования на ЧС; справочные данные: Справочник РТП, СНиП 2.04.02-84 – для гидравлических расчетов и интенсивности подачи огнетушащих веществ; рекомендации по тушению пожаров в резервуарах [13, 14] и ГОСТ 31385-2016 – для определения критических параметров резервуаров.

#### Результаты исследования

Для построения модели введем ряд понятий, каждому из которых поставим в соответствие количественную меру, определяемую нормативными документами. Обобщение разработанной системы аналогий представлено в табл. 1.

Таблица 1. Нормативно-параметрическая система аналогий для развития научных основ тактики тушения пожаров

Электрическая цепь	Гидравлическая система	Система тушения пожара	Нормативная база / Метод расчета	Размерность	Интерпретация в деятельности РТП
<b>1. Источники и приоритеты</b>					
Напряжение (ЭДС), U, E	Перепад давления, ΔP	Приоритет боевой задачи, U <sub>орг</sub>	ФЗ № 52-ФЗ (ст.5), ФЗ № 283-ФЗ (ст.12), ФЗ № 69-ФЗ (ст.9) – суммы страховых выплат; ФСЛ-2025 – стоимость объекта; Приказ № 777 – ранг пожара; Постановление	безразм.	Количественная мера приоритета боевой задачи. Определяется суммой социальных гарантий, стоимостью объекта и нормативным рангом

<sup>4</sup> Федеральный закон от 28 марта 1998 г. № 52-ФЗ «Об обязательном государственном страховании жизни и здоровья военнослужащих, граждан, призванных на военные сборы, лиц рядового и начальствующего состава органов внутренних дел Российской Федерации, Государственной противопожарной службы, сотрудников учреждений и органов уголовно-исполнительной системы, сотрудников войск национальной гвардии Российской Федерации, сотрудников органов принудительного исполнения Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).

<sup>5</sup> Федеральный закон от 30.12.2012 № 283-ФЗ (ред. от 15.12.2025, с изм. от 03.03.2026) «О социальных

гарантиях сотрудникам некоторых федеральных органов исполнительной власти и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

<sup>6</sup> Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 № 69-ФЗ.

<sup>7</sup> Об утверждении Порядка подготовки личного состава пожарной охраны: приказ МЧС России от 05.02.2025 № 77. М., 2025.

<sup>8</sup> Об утверждении Правил использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения личным составом подразделений пожарной охраны: приказ МЧС России от 27.06.2022 № 640. М., 2022.

Электрическая цепь	Гидравлическая система	Система тушения пожара	Нормативная база / Метод расчета	Размерность	Интерпретация в деятельности РТП
			№ 794 – уровень ЧС		
Источник ЭДС	Насос	РТП, оперативный штаб, ЦУКС	Боевой устав (Приказ №777)	–	Генератор приоритета боевой задачи. Определяет решающее направление
Источник тока, J	Водоисточник с насосом	Пожарный гидрант, водоем, ПНС, АЦ	СНИП 2.04.02-84, паспортные данные оборудования	л/с	Гарантированный расход воды при заданном напоре
<b>2. Пассивные элементы</b>					
Сопrotивление, R	Гидравлическое сопротивление, $R_r$	Операционное сопротивление, $R_{оп}$	СНИП 2.04.02-84; Справочник РТП (Иванников В.П., 1987) – таблицы удельных сопротивлений рукавов; Приказ МЧС №77 – коэффициенты условий работы	УЕП·с/ед.рес.	Мера потерь приоритета боевой задачи при преодолении препятствий (удаленность, высота, сложность подъезда, условия работы, качество связи)
Емкость, С	Гидравлическая емкость, $C_r$	Буферный запас ресурсов, $C_б$	Паспорт ПА; Распоряжение МЧС №7 – нормы запаса пенообразователя; Расписание выездов – резерв сил и средств	л/УЕП, м <sup>3</sup> /УЕП, чел./УЕП, ед.тех./УЕП	Объем резерва ресурсов (вода, пенообразователь, личный состав, техника), обеспечивающий непрерывность боевых действий
Индуктивность, L	Инерционность потока, $L_r$	Организационная инерция, $L_{орг}$	Приказ МЧС №77 – нормативы времени выполнения упражнений (боевое развертывание); Расписание выездов – время следования	УЕП·с <sup>2</sup> /ед.рес.	Запаздывание реакции системы на управляющее воздействие. Характеризует время мобилизации ресурсов
<b>3. Поточковые переменные</b>					
Сила тока, I	Расход, Q	Поток ресурсов, $I_{рес}$	Нормативная интенсивность подачи ОТВ (Справочник РТП); Нормативы численности звеньев ГДЗС (Приказ	л/с, чел./с, ед.тех./с	Нормативная интенсивность применения сил и средств в единицу времени

Электрическая цепь	Гидравлическая система	Система тушения пожара	Нормативная база / Метод расчета	Размерность	Интерпретация в деятельности РТП
			№640); Расписание выездов		
Заряд, $q$	Объем, $V$	Общий расход ресурса, $q_{рес} = \int I_{рес} dt$	Оперативные данные учета расхода ОТВ, хронометраж работы личного состава	$m^3, л, чел \cdot ч$	Интегральный показатель. Суммарный объем поданной воды/пены, отработанных человеко-часов
<b>4. Топология</b>					
Узел цепи	Точка соединения трубопроводов	Рукавное разветвление, пост ГДЗС, пункт сосредоточения техники	1-й закон Кирхгофа	–	Точка распределения ресурсов. Сумма входящих потоков равна сумме исходящих
Контур цепи	Замкнутый гидравлический контур	Цикл постановки и реализации тактической задачи: РТП – приказ – БУ – выполнение – доклад	2-й закон Кирхгофа	УЕП	Баланс приложенного приоритета боевой задачи и потерь на преодоление операционных сопротивлений

Приоритет боевой задачи представляет количественную меру приоритета задачи, инициирующей движение потоков ресурсов. Он является интегральным показателем, аккумулирующим разнородные факторы: социальную значимость  $S_{соц}$  (страховые выплаты личному составу), экономическую значимость  $S_{экон}$  (стоимость объекта), интенсивность горения  $i_{гор}$  (площадь пожара, зона поражения), сложность условий  $C_{усл}$  (ранг пожара), усложнение обстановки  $P_{внеш}$  (уровень реагирования).

Для обеспечения размерной однородности каждый фактор нормируют к своему максимальному значению, зафиксированному в нормативных документах:  $S_{соц} = S_{соц} / S_{соц,макс}$ ;  $S_{экон} = S_{экон} / S_{экон,макс}$ ;  $i_{гор} = i_{гор} / i_{гор,макс}$ ;  $C_{усл} = C_{усл} / C_{усл,макс}$ ;  $P_{внеш} = P_{внеш} / P_{внеш,макс}$ .

Интегральная формула приоритета боевой задачи приобретает вид:

$$U_{орг} = k_1 \cdot S_{соц} + k_2 \cdot S_{экон} + k_3 \cdot i_{гор} + k_4 \cdot C_{усл} + k_5 \cdot P_{внеш}, \quad (3)$$

где  $k_1 \dots k_5$  – весовые коэффициенты, определяющие относительную значимость факторов. Коэффициенты получены по методу анализа иерархий Т. Саати [15] на основе экспертного опроса 25 действующих руководителей тушения пожара (стаж не менее 10 лет, опыт участия в тушении крупных пожаров не менее 50). Групповое отношение согласованности  $CR = 0,016$

(допустимо  $<0,1$ ), что подтверждает высокую согласованность мнений экспертов. Установлены следующие значения:  $k_1 = 0,35$  (социальная значимость),  $k_2 = 0,25$  (экономическая значимость),  $k_3 = 0,20$  (интенсивность горения),  $k_4 = 0,12$  (сложность условий),  $k_5 = 0,08$  (коэффициент усложнения обстановки). Данные веса соответствуют иерархии приоритетов, закрепленной в действующем законодательстве Российской Федерации в области пожарной безопасности.

Для обеспечения метрологической состоятельности модели вводится условная единица приоритета (УЕП). 1 УЕП соответствует 1/100 от максимального нормированного значения приоритета боевой задачи  $U_{орг, макс}$ . Значение  $U_{орг, макс}$  достигается при следующих нормативных условиях: численность личного состава, задействованного на боевом участке, более 75 чел. (ранг пожара № 5); площадь пожара, соответствующая максимальной для данного класса объектов; уровень чрезвычайной ситуации (при соответствующей сложности пожара) – федеральный. Таким образом, УЕП является безразмерной, но нормативно-привязанной величиной, что обеспечивает воспроизводимость результатов расчетов на основе действующих нормативных правовых актов.

Поток ресурсов  $I_{рес}$  представляет собой количественную меру интенсивности применения сил и средств в единицу времени.

Дифференциация производится по типам ресурсов: расход огнетушащих веществ (л/с), интенсивность задействования личного состава (чел./с), количество единиц техники (ед.тех./с). Нормативные значения определяются по Справочнику РТП, Приказу МЧС России № 640 (нормативы численности звеньев ГДЗС) и расписанию выездов гарнизона.

По аналогии с законом Ома для электрической цепи, в предлагаемой модели вводится соотношение:

$$I_{\text{рес}} = \frac{U_{\text{орг}}}{R_{\text{оп}}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{оп}}$  – операционное сопротивление. Данное выражение является модельным предположением (а не законом), содержательный смысл которого заключается в следующем: чем выше приоритет задачи ( $U_{\text{орг}}$ ), тем больший поток ресурсов на нее направляется; чем выше операционные трудности ( $R_{\text{оп}}$ ), тем меньший поток ресурсов может быть реализован. При выявлении нелинейных эффектов зависимость может быть уточнена введением показателя степени  $\beta$ .

Операционное сопротивление  $R_{\text{оп}}$  представляет количественную меру потерь приоритета боевой задачи при преодолении препятствий. В боевых действиях оно носит комплексный характер и включает: сопротивление удаленности (гидравлическое сопротивление рукавных линий)  $R_{\text{уд}} = S_{\text{уд}} \cdot L$ , где  $S_{\text{уд}}$  – удельное гидравлическое сопротивление рукава,  $L$  – длина линии; сопротивление высоты подачи:  $R_{\text{выс}} = \rho \cdot g \cdot H/Q$ ; сопротивление сложности подъезда  $R_{\text{под}} = R_{\text{уд}} \cdot k_{\text{под}}$ ; сопротивление сложности обстановки (работа в СИЗОД, угроза взрыва)  $R_{\text{усл}} = R_{\text{уд}} \cdot k_{\text{усл}}$ ; информационное сопротивление (качество и устойчивость каналов связи, задержки передачи сигналов)  $R_{\text{инф}}$ .

Общее операционное сопротивление участка:

$$R_{\text{оп}} = (R_{\text{уд}} + R_{\text{выс}}) \cdot k_{\text{усл}} \cdot k_{\text{под}} + R_{\text{инф}}. \quad (5)$$

Коэффициенты  $k_{\text{усл}}$  и  $k_{\text{под}}$  применены к сумме  $R_{\text{уд}} + R_{\text{выс}}$ , что отражает комплексный характер операционного сопротивления. Сложность подъезда ( $k_{\text{под}}$ ) влияет не только на время разворачивания (часть  $R_{\text{уд}}$ ), но и на возможность подачи стволов на высоту (часть  $R_{\text{выс}}$ ). Аналогично, условия работы в СИЗОД ( $k_{\text{усл}}$ ) увеличивают общее операционное сопротивление пропорционально всем пространственным факторам. Такой подход является модельным допущением, требующим эмпирической верификации для каждого конкретного типа боевых действий.

Все составляющие приводятся к единой размерности (УЕП·с/ед.рес.) через переводные коэффициенты, определяемые по гидравлическим таблицам (СНиП 2.04.02-84, Справочник РТП) и времени упражнений (Приказ МЧС России № 77).

Буферный запас ресурсов  $C_б$  характеризует объем резерва, который можно оперативно мобилизовать для обеспечения непрерывности боевых действий. Определяется на основе паспортных данных пожарных автомобилей (запас огнетушащих веществ), расписания выездов гарнизона (резерв сил и средств) и приказа МЧС России № 640 (запас воздуха в дыхательных аппаратах). В терминах электрогидравлической аналогии буферный запас соответствует емкости:

$$C_б^{\text{отв}} = \frac{V_{\text{зап}}}{U_{\text{орг}}}, \quad C_б^{\text{лс}} = N_{\text{рез}}, \quad C_б^{\text{вр}} = \frac{V_{\text{возд}}}{q_{\text{потр}}}. \quad (6)$$

Организационная инерция  $L_{\text{орг}}$  количественно характеризует запаздывание реакции системы на управляющее воздействие (аналог индуктивности в электрической цепи). Определяется на основе нормативов времени выполнения оперативных действий (боевое развертывание, время следования, время перегруппировки) по Приказу МЧС России № 77:

$$L_{\text{орг}} = \tau_{\text{разв}} \cdot R_{\text{оп}} \cdot k_{\text{н}}. \quad (7)$$

где  $\tau_{\text{разв}}$  – нормативное время разворачивания (с),  $k_{\text{н}}$  – коэффициент организационной эффективности ( $0 < k_{\text{н}} \leq 1$ ), отражающий отношение реального времени реакции системы к теоретическому.

### Топологическое представление и законы Кирхгофа

Процесс тушения пожара в терминах метода ЭГА представляется в виде ориентированного графа, узлами которого являются источники приоритета боевой задачи (руководитель тушения пожара, оперативный штаб), потребители (очаги горения, участки защиты) и точки распределения ресурсов (рукавные разветвления, посты ГДЗС, пункты сосредоточения техники). Ветвями графа служат маршруты ресурсов, характеризующиеся операционным сопротивлением  $R_{\text{оп}}$  и организационной инерцией  $L_{\text{орг}}$ .

Применимость законов Кирхгофа к потокам ресурсов (включая информационные) обосновывается аппаратом теории графов и следующими положениями.

Первый закон Кирхгофа (баланс потоков в узле). Для любой вершины графа, не являющейся источником или стоком ресурсов (например, рукавное разветвление, пост ГДЗС),

в установившемся режиме тушения суммарный поток ресурсов, входящий в узел, равен суммарному потоку, выходящему из узла. Это следует из принципа материального баланса: входящий поток ресурсов в любой узел системы равен исходящему, так как узел не создает и не уничтожает ресурсы, а лишь перераспределяет их. Для информационных потоков аналогичное утверждение базируется на том, что информация рассматривается через её материальные носители (радиосигналы, доклады), подчиняющиеся закону сохранения энергии.

Таким образом, для любого узла распределения выполняется условие:

$$\sum I_{\text{рес, вх}} = \sum I_{\text{рес, вых}} \quad (8)$$

где  $I_{\text{рес}}$  – потоки ресурсов (огнетушащих веществ, личного состава, информации, техники) на соответствующих ветвях.

Второй закон Кирхгофа (баланс приоритетов в контуре). Рассмотрим замкнутый тактический контур, например: «РТП → начальник боевого участка → исполнитель (ствольщик, звено ГДЗС) → доклад РТП». В таком контуре сумма всех приложенных приоритетов боевой задачи (источников ЭДС) равна сумме падений приоритета на преодоление операционных сопротивлений:

$$\sum U_{\text{орг}} = \sum (I_{\text{рес}} \cdot R_{\text{оп}}), \quad (9)$$

где  $U_{\text{орг}}$  – приоритет боевой задачи (аналог напряжения),  $I_{\text{рес}}$  – поток ресурсов на соответствующем участке,  $R_{\text{оп}}$  – операционное сопротивление (аналог электрического сопротивления).

Данное утверждение является следствием принципа причинности: для достижения тактического результата на выходе контура необходимо приложить на входе приоритет, достаточный для компенсации всех потерь.

Интегральное уравнение динамики организационной системы тушения пожара.

Для замкнутого тактического контура, включающего несколько боевых участков, уравнение динамики объединяет все три типа пассивных элементов – резистивные (операционное сопротивление), индуктивные (организационная инерция) и емкостные (буферные запасы ресурсов):

$$\sum_{j=1}^m U_{\text{орг},j} = \sum_{i=1}^n L_{\text{орг},i} \cdot \frac{dI_{\text{рес},i}}{dt} + \sum_{i=1}^n I_{\text{рес},i} \cdot R_{\text{оп},i} + \sum_{i=1}^n \frac{q_{\text{рес},i}}{C_{б,i}} \quad (10)$$

где:  $U_{\text{орг},j}$  – приоритет боевой задачи  $j$ -го источника (РТП, оперативный штаб, ЦУКС), УЕП;

$L_{\text{орг},i}$  – организационная инерция  $i$ -го боевого участка (аналог индуктивности), УЕП·с<sup>2</sup>/ед.рес.;  $R_{\text{оп},i}$  – операционное сопротивление  $i$ -го боевого участка (аналог сопротивления), УЕП·с/ед.рес.;  $C_{б,i}$  – буферный запас ресурсов на  $i$ -м боевом участке (аналог емкости), ед.рес./УЕП;

$q_{\text{рес},i} = \int I_{\text{рес},i} dt$  – общий расход ресурса на  $i$ -м боевом участке (аналог электрического заряда), ед.рес.;

$I_{\text{рес},i}$  – поток ресурсов на  $i$ -м боевом участке, ед.рес./с;

$m$  – количество источников приоритета боевой задачи;

$n$  – количество боевых участков.

Уравнение (10) впервые объединяет статические (резистивные), динамические (индуктивные) и интегральные (емкостные) характеристики процесса тушения пожара. Оно позволяет моделировать как установившиеся, так и переходные режимы боевых действий, включая периоды наращивания сил, перегруппировки и истощения запасов огнетушащих веществ.

Разработанная модель соответствует базовым принципам тактики тушения пожаров и развивает их применительно к условиям чрезвычайных ситуаций, характеризующихся высокой динамикой и неопределенностью [16].

### Верификация законов Кирхгофа на примере тушения резервуара РВС-5000

Для демонстрации адекватности предложенного метода ЭГА выполним верификацию законов Кирхгофа на гидравлическом уровне, оперируя в привычных для практики пожарной охраны единицах – метрах водяного столба (м вод. ст.). Переход от гидравлических параметров к электрическим аналогам (потоку ресурсов  $I_{\text{рес}}$  в УЕП/с, напряжению  $U_{\text{орг}}$  в УЕП) осуществляется с помощью масштабного коэффициента  $k_{\text{пер}}$ , который калибруется по нормативной интенсивности подачи огнетушащего вещества. Для рассматриваемого примера подачи пены на тушение резервуара РВС-5000 1 м вод. ст. напора на насосе соответствует 1,2 УЕП приоритета боевой задачи, а расходу 1 л/с соответствует поток ресурсов  $I_{\text{рес}} = 0,02$  УЕП/с. Таким образом, гидравлические расчеты, представленные ниже, являются прямым подтверждением применимости топологических законов Кирхгофа к модели (10) после пересчета в единую систему единиц.

Осуществим верификацию законов Кирхгофа для пожара в резервуаре типа

РВС-5000, горящего в режиме факельного горения.

Исходные данные: диаметр резервуара  $D = 22,8$  м, высота  $H = 11,9$  м. Площадь горения  $S = 408$  м<sup>2</sup>. Требуемая интенсивность подачи пены  $I = 0,12$  л/(с·м<sup>2</sup>). Общий требуемый расход  $Q_{\text{общ}} = S \cdot I = 408 \cdot 0,12 = 49$  л/с.

Расчет распределения потоков (первый закон Кирхгофа). Подачу пены осуществляют три пеноподъемника. Каждый пеноподъемник содержит ствол-генератор ГПС-2000 с расходом  $Q_{\text{ств}} = 18$  л/с. По первому закону Кирхгофа для узла распределения (разветвления на три ветви):

$$Q_n = Q_{\text{ветв1}} + Q_{\text{ветв2}} + Q_{\text{ветв3}} = 3 \cdot Q_{\text{ств}} = 3 \cdot 18 = 54 \text{ л/с.} \quad (11)$$

Условие баланса выполняют: общий расход, подаваемый насосом (54 л/с), равен сумме потоков в трех параллельных ветвях. Здесь  $Q_{\text{ветв}i}$  – расход в  $i$ -й ветви к пеноподъемнику. Внутри каждой ветви несколько рукавов последовательно соединены.

Проверка потерь (второй закон Кирхгофа). Рассчитаем потери в контуре «насос – рукавная линия – пеногенератор – атмосфера – насос».

Потери в рукавной линии одного пеноподъемника (6 рукавов  $d = 77$  мм,  $L = 120$  м суммарно,  $S_{\text{уд}} = 0,034$ )<sup>9</sup>:

$$h_{\text{рук}} = n \cdot S_{\text{уд}} \cdot Q_{\text{ств}}^2 = 6 \cdot 0,034 \cdot 18^2 = 66 \text{ м вод.ст.} \quad (12)$$

Потери в пеноподъемнике включают геометрическую высоту подъема и потери в рукавах:

$$h_{\text{пп}} = H + h_{\text{рук}} = 11,9 + 66 = 77,9 \text{ м вод.ст.} \quad (13)$$

Минимальный напор на насосе  $H_n$  составляет:

$$H_n = H_{\text{ств}} + h_{\text{рук}} + H_{\text{геом}} = 60 + 66 + 11,9 = 137,9 \text{ м вод.ст.} \quad (14)$$

Проверка по второму закону Кирхгофа: алгебраическая сумма потерь напора в замкнутом контуре «насос – рукав – пеногенератор – атмосфера – насос» равна нулю:

$$H_n - h_{\text{рук}} - H_{\text{геом}} - H_{\text{ств}} = 137,9 - 66 - 11,9 - 60 = 0 \quad (15)$$

Баланс выполняется. В (10) величина  $S_{\text{уд}} = 0,034$  выражена в м вод.ст.·с<sup>2</sup>/л<sup>2</sup> при расходе в л/с, что эквивалентно  $S_{\text{уд}} = 3,4 \cdot 10^4$  Па·с/м<sup>4</sup> в системе СИ.

#### Прикладной аспект: управление охлаждением резервуаров при пожаре

Рассмотрим применение разработанного метода для анализа процесса охлаждения резервуара с нефтепродуктом (РВС) при пожаре, вызванном атакой БПЛА [17] (рис. 1).

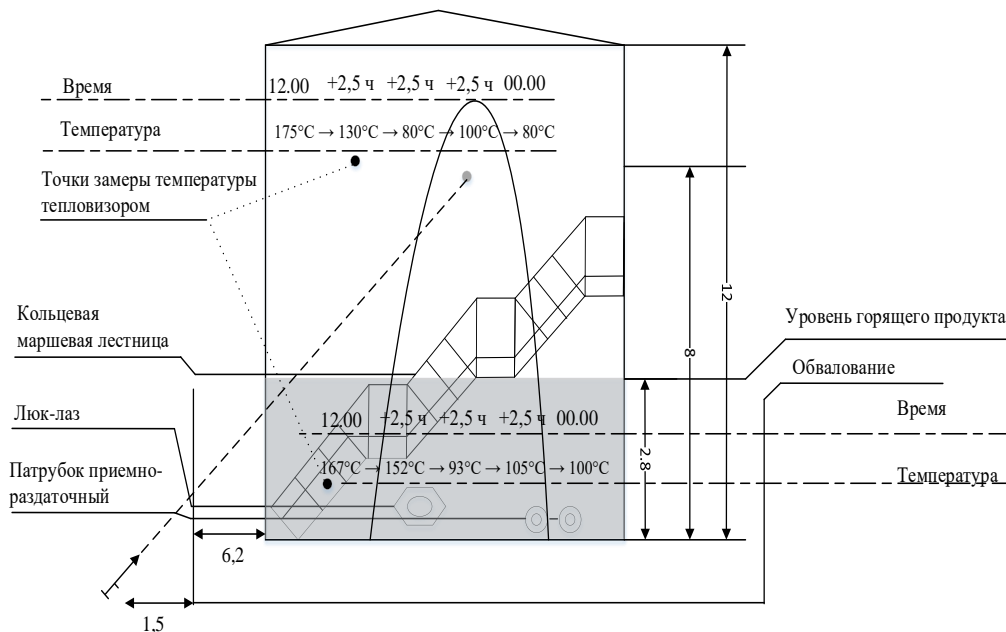


Рис. 1. Начальная фаза тушения горящего РВС объемом 5000 м<sup>3</sup>

<sup>9</sup> Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987. 254 с.

Традиционная тактика предполагает непрерывную подачу воды. Однако, как показал анализ реального пожара на РВС-5000, непрерывное охлаждение не приводило к существенному снижению уровня топлива.

Переход к методу интервального охлаждения (циклическому чередованию фаз подачи и прекращения подачи воды) позволил снизить уровень горячего на 2,5 м за 28 часов (рис. 2).

В табл. 2 представлена интерпретация фаз метода в терминах доминирующих членов уравнения (10).

Ключевым параметром, определяющим безопасность интервального режима, является максимально допустимое время прекращения охлаждения  $t_{\text{пауз}}$  :

$$t_{\text{пауз}} = \delta \cdot \frac{T_{\text{крит}} - T_{\text{нач}}}{V_{\text{нагр}}} \cdot \eta_{\text{охл}}^{-1} \cdot \chi_{\text{ст}}, \quad (16)$$

где:  $T_{\text{крит}}$  – критическая температура стенки (для стали принимается равной 250-300 °С)<sup>10</sup>;

$T_{\text{нач}}$  – температура стенки в момент прекращения подачи воды, °С;  $V_{\text{нагр}}$  – скорость нагрева стенки при отсутствии охлаждения, °С/с;

$\eta_{\text{охл}}$  – коэффициент эффективности охлаждения (зависит от типа стволов, угла

атаки, равномерности орошения), безразмерный;

$\chi_{\text{ст}}$  – коэффициент состояния стенки (наличие теплозащитного покрытия, коррозии), безразмерный;

$\delta = 0,8$  – гарантийный запас (рекомендуемое значение по результатам верификации).

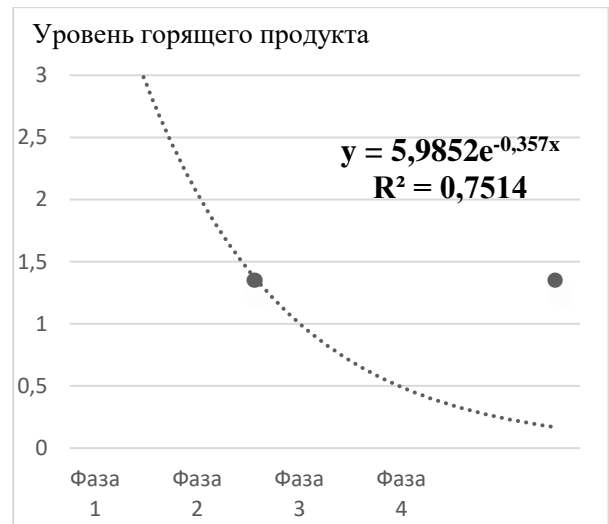


Рис. 2. Динамика изменения уровня горящего продукта по фазам метода интервального охлаждения

Таблица 2. Интерпретация метода интервального охлаждения в терминах модели

Фаза цикла	Доминирующий член уравнения (10)	Физический смысл	Управленческое действие
Охлаждение (t=2-2,5 ч)	Резистивный $\sum(I_{\text{pec}} \cdot R_{\text{оп}})$	Преодоление гидравлического сопротивления при подаче воды	Контроль расхода воды, поддержание требуемого напора
Прекращение охлаждения (t=0,25-0,5 ч)	Емкостной $\sum(c_{\text{с1}} \int I_{\text{pec}} dt)$	Накопление тепловой энергии в стенке резервуара	Мониторинг температуры стенки, оценка запаса времени до достижения $T_{\text{крит}}$
Переходный процесс (включение/отключение)	Индуктивный $\sum(L_{\text{орг}} \cdot \frac{dI_{\text{pec}}}{dt})$	Запаздывание восстановления расхода воды после включения	Координация действий личного состава, синхронизация включения стволов

Расчет для резервуара типа РВС-5000 (диаметр 22,8 м, высота 11,9 м, площадь горения 408 м<sup>2</sup>) при следующих исходных данных:  $T_{\text{крит}} = 300$  °С,  $T_{\text{нач}} = 80$  °С,  $V_{\text{нагр}} = 73$  °С/ч  $\approx 0,0203$  °С/с,  $\eta_{\text{охл}} = 0,7$ ,  $\chi_{\text{ст}} = 1,0$ , дает:

$$t_{\text{пауз}} = 0,8 \cdot \frac{300 - 80}{0,0203} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot 1,0 \approx$$

$$\approx 0,8 \cdot 10837 \cdot 1,428 \approx 12400 \text{ с} \approx 3,44 \text{ ч.}$$

Полученное теоретическое значение (3,44 ч) представляет собой верхнюю границу допустимого времени паузы, определённую из условия недопущения критического нагрева стенки. Однако практика тушения реальных пожаров показывает, что с учетом неравномерности орошения, локальных перегревов,

<sup>10</sup> ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и

нефтепродуктов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.

ветрового воздействия и необходимости гарантированного запаса безопасное время паузы принимается равным 0,25-0,5 ч. Это соответствует введению в расчет дополнительного коэффициента запаса  $\delta_{\text{практ}} = 0,07-0,15$  от теоретического значения, что апробировано в ходе тушения пожара в Энгельском районе (2025 г.) и г. Приморск (2026 г.).

Таким образом, разработанный метод позволяет количественно интерпретировать процесс интервального охлаждения и обосновать оптимальные тактические решения с учетом гарантийного запаса, определяемого условиями конкретного пожара.

### Обсуждение результатов и заключение

Разработана нормативно-параметрическая система аналогий, устанавливающая однозначное соответствие между элементами электрической цепи и тактическими параметрами боевых действий по тушению пожаров (таблица 1). Показано, что для узлов распределения ресурсов и замкнутых тактических контуров выполняются балансовые соотношения, эквивалентные первому и второму законам Кирхгофа — уравнения (8) и (9).

Получено дифференциальное уравнение динамики тактического контура (10), впервые объединяющее статическую (операционное сопротивление), индуктивную (организационная инерция) и емкостную (буферный запас ресурсов) составляющие. Уравнение позволяет моделировать переходные процессы при развертывании и перераспределении сил и средств.

На примере интервального охлаждения резервуара РВС-5000 при пожаре, вызванном атакой БПЛА [17], проведена апробация разработанного метода. Модель воспроизводит эмпирически найденные фазы подачи (2-2,5 ч) и прекращения охлаждения (0,25-0,5 ч). Расчет по формуле (16) с использованием параметров модели ( $\eta_{\text{охл}} = 0,7$ ,  $\chi_{\text{ст}} = 1,0$ ,  $\delta = 0,8$ ) дает теоретическую верхнюю границу допустимого

времени паузы  $t_{\text{пауз}} \approx 3,44$  ч. Применение гарантийного запаса  $\delta_{\text{практ}} = 0,07-0,15$  позволяет получить безопасное время паузы 0,25-0,5 ч, что согласуется с данными реальных пожаров.

Выявлены ключевые ограничения модели: линейная зависимость в уравнении (4) является эвристическим упрощением; при резких изменениях обстановки вероятны нелинейные эффекты (гиперболизация рисков); параметры приоритета боевой задачи  $U_{\text{орг}}$  содержат весовые коэффициенты, определяемые в настоящее время экспертным путем (хотя согласованность экспертов подтверждена значением  $CR = 0,016$ ); применение законов Кирхгофа к информационным потокам основано на допущении о материальном носителе информации, что не отражает смыслового содержания передаваемых данных.

Сравнение с результатами других исследователей [4–13] показывает, что предложенный подход органично дополняет существующие разработки, заполняя нишу формализованного описания тактической деятельности при тушении пожаров. Предложенный в настоящей работе метод электрогидравлических аналогий дополняет существующие подходы к тактике тушения пожаров и формализации тактического управления [17–23], предлагая альтернативный – детерминированный – инструмент описания переходных процессов в оперативно-тактических структурах, что особенно важно при резких изменениях обстановки в ходе тушения пожаров.

Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением ретроспективного анализа пожаров различных типов (здания, резервуарные парки, лесные массивы) для независимой верификации и уточнения параметров модели; разработкой методики объективного расчета приоритета боевой задачи на основе данных систем мониторинга (площадь пожара, стоимость объекта, число людей в зоне риска); интеграцией предложенного математического аппарата в геоинформационные системы и программные тренажеры для РТП.

### Список литературы

1. Heaviside Oliver (1850-1925). *Electromagnetic theory*. London: The Electrician, 1893. XXI, 466 p.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. Т. 1: Электрические цепи: учебник для вузов. 12-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 831 с.
3. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика: учебник для вузов по специальности

«Теплогазоснабжение и вентиляция». М.: Стройиздат, 1987. 413 с.

4. Мареев М. А. Особенности применения метода электрогидравлических аналогий для поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 3 (44). С. 22–29.

5. Parsa V., Santiago A., Laím L. *Computational Fluid Dynamics of Compartment Fires: A Review of Methods and Applications*. Applied Sciences, 2025, vol. 15, issue 5, P. 2342.

6. Fully-developed compartment fire dynamics in large-scale mass timber compartments / Pope I., Gupta V., Xu H. [et al.]. *Fire Safety Journal*, 2023, vol. 141, p. 104022.
7. Самошин Д. А., Холщевников В. В. Проблемы нормирования времени начала эвакуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Т. 25, № 5. С. 37–51.
8. Bakhshian E., Martinez-Pastor B. Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, vol. 10, issue 10, pp. 485–507.
9. Comfort L., Chang S. Transition in dynamic events: The 2020 lightning complex fires in Northern California as an adaptive system. *Risk Analysis*, 2025, vol. 45, issue 12, pp. 4318–4331.
10. Мареев М. А. Моделирование процессов управления, используя метод электрогидравлических аналогий при тушении пожаров на промышленных объектах // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 2 (51). С. 161–166.
11. Моделирование ситуационных задач по ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах в современных условиях / П. В. Данилов, А. К. Кокурин, А. О. Семенов [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 4 (45). С. 13–18.
12. Тараканов Д. В., Баканов М. О., Захаров Д. Ю. Использование агентного моделирования при тушении пожаров в зданиях // *Августовские научные чтения: сборник научных трудов по материалам II и IV Международных научно-практических конференций*. Смоленск: Общество с ограниченной ответственностью «НОВАЛЕНСО», 2017. С. 161–164.
13. Поддержка принятия управленческих решений выбора оптимальной боевой позиции лафетного ствола с осциллятором / А. В. Ермилов, С. Н. Никишов, А. В. Кузнецов [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 1 (50). С. 30–36.
14. Денисов А. Н. Формализация задачи управления ствольщиком на позиции по тушению пожара // *Технологии техносферной безопасности*. 2017. № 2 (72). С. 122–129.
15. Саати Т. Л. Принятие решений с помощью метода анализа иерархий // *Методы менеджмента качества*. 2022. № 7. С. 54–60.
16. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами 3-е изд. М.: Лепан, 2019. 480 с.
17. Мареев М. А. Поддержка управления при ведении боевых действий по тушению пожаров в случаях с ударными беспилотными летательными аппаратами // *Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов*. М.: Академия государственной противопожарной службы, 2024. № 13. С. 119–125.
18. Аникин С. Н., Данилов М. М., Денисов А. Н. Управление альтернативами выбора принятия опорных решений в тактике тушения пожаров // *Computational Nanotechnology*. 2020. Т. 7, № 4. С. 39–47. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-4-39-47. EDN: TEEGJR.
19. Условия многозадачности управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении подвижного железнодорожного состава на металлургических предприятиях / А. Н. Денисов, М. М. Данилов, С. Н. Аникин [и др.] // *Computational Nanotechnology*. 2022. Т. 9, № 1. С. 39–46. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-1-39-46. EDN: MWXKIY.
20. Моделирование выбора решений управленческих задач при тушении пожара в подземных сооружениях / С. Н. Аникин, М. М. Данилов, А. Н. Денисов [и др.] // *Computational Nanotechnology*. 2023. Т. 10, № 3. С. 72–82. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-3-72-82. EDN: RNTIBJ.
21. Денисов А. Н., Нгуен Т. Т. Формализация граничных условий для моделей и алгоритмов задачи идентификации ситуаций, складывающихся на месте пожара // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 1-2. С. 26–30. DOI: 10.37882/2223-2966.2023.01-2.05. EDN: ETADMQ.
22. Denisov, A., Gundar, S., Danilov, M., Podkosov, S. (2023). Aviation Method of Extinguishing Landscape Fires - Experimental Substantiation of Parameters. In: Beskopylny, A., Shamtsyan, M., Artiukh, V. (eds) XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022". INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 575. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2\\_284](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_284)
23. Генезис развития, современные реалии научно-методического и нормативного правового обоснования понятий «крупный пожар», «сложный (затяжной) пожар» / А. Н. Денисов, А. А. Порошин, М. М. Данилов [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2025. Т. 34, № 2. С. 5–19. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.5-19. EDN: XVYUPE.

## References

1. Heaviside Oliver (1850-1925). *Electromagnetic theory*. London: The Electrician, 1893. XXI, 466 p.
2. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2 t. Tom 1. Elektricheskie tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering.

In 2 vols. Vol. 1. Electrical Circuits]. 12th ed. Moscow: Yurayt, 2023. 831 p.

3. Altshul A. D., Zhivotovskiy L. S., Ivanov L. P. *Gidravlika i aerodinamika* [Hydraulics and Aerodynamics]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 413 p.

4. Mareev M. A. Osobennosti primeneniya metoda elektrogidravlicheskih analogiy dlya podderzhki upravleniya pozharno-spasatel'nymi podrazdeleniyami pri tushenii pozharov [Features of Applying the Method of Electrohydraulic Analogies to Support the Management of Fire and Rescue Units in Fire Fighting]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, issue 3 (44), pp. 22–29.

5. Parsa V., Santiago A., Laím L. Computational Fluid Dynamics of Compartment Fires: A Review of Methods and Applications. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, issue 5, P. 2342.

6. Fully-developed compartment fire dynamics in large-scale mass timber compartments / Pope I., Gupta V., Xu H. [et al.]. *Fire Safety Journal*, 2023, vol. 141, p. 104022.

7. Samoshin D. A., Kholshchevnikov V. V. Problemy normirovaniya vremeni nachala evakuatsii [Problems of regulating the time of the beginning of evacuation]. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, issue 5, pp. 37–51.

8. Bakhshian E., Martinez-Pastor B. Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, vol. 10, issue 10, pp. 485–507.

9. Comfort L., Chang S. Transition in dynamic events: The 2020 lightning complex fires in Northern California as an adaptive system. *Risk Analysis*, 2025, vol. 45, issue 12, pp. 4318–4331.

10. Mareev M. A. Modelirovanie protsessov upravleniya, ispol'zuya metod elektrogidravlicheskih analogiy pri tushenii pozharov na promyshlennykh ob'ektakh [Modeling of control processes using the method of electrohydraulic analogies in extinguishing fires at industrial facilities]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 2 (51), pp. 161–166.

11. Modelirovanie situatsionnykh zadach po likvidatsii chrezvychnykh situatsiy na potentsial'no opasnykh ob'ektakh v sovremennykh usloviyakh [Modeling of Situation Tasks for Emergency Response at Potentially Dangerous Facilities in Modern Conditions] / P. V. Danilov, A. K. Kokurin, A. O. Semenov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 4 (45), pp. 13–18.

12. Tarakanov D. V., Bakanov M. O., Zakharov D. Yu. Ispol'zovanie agentnogo modelirovaniya pri tushenii pozharov v zdaniyakh [The use of agent-based modeling in the firefighting of

buildings]. *Avgustovskie nauchnye chteniya: sbornik nauchnykh trudov po materialam II i IV Mezhdunarodnykh nauchno-prakticheskikh konferentsiy*, 2017, pp. 161–164.

13. Podderzhka prinyatiya upravlencheskikh resheniy vybora optimal'noy boevoy pozitsii lafetnogo stvola s ostillyatorom [Support for Making Management Decisions on Choosing the Optimal Combat Position for a Gun Barrel with an Oscillator] / A. V. Ermilov, S. N. Nikishov, A. V. Kuznetsov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 1 (50), pp. 30–36.

14. Denisov A. N. Formalizatsiya zadachi upravleniya stvol'shchikom na pozitsii po tusheniyu pozhara [Formalization of the Task of Controlling a Firefighter at a Firefighting Position]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2017, vol. 2 (72), pp. 122–129.

15. Saaty T. L. Prinyatie resheniy s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhiy [Decision Making with the Analytic Hierarchy Process]. *Metody menedzhmenta kachestva*, 2022, issue 7, pp. 54–60.

16. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. 3rd ed. Moscow: Lenand, 2019. 480 p.

17. Mareev M. A. Podderzhka upravleniya pri vedenii boevykh deystviy po tusheniyu pozharov v sluchayakh s udarnymi bespilotnymi letatel'nymi apparatami: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodyh uchenykh i specialistov [Support for control during combat operations to extinguish fires in cases with strike unmanned aerial vehicles: materials of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists]. *Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2024, issue 13, pp. 119–125.

18. Anikin S. N., Danilov M. M., Denisov A. N. Upravlenie al'ternativami vybora prinyatiya opornykh resheniy v taktike tusheniya pozharov [Management of Alternatives for Making Supportive Decisions in Fire Fighting Tactics]. *Computational Nanotechnology*, 2020, vol. 7, issue 4, pp. 39–47. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-4-39-47.

19. Usloviya mnogozadachnosti upravleniya pozharno-spasatel'nymi podrazdeleniyami pri tushenii podvizhnogo zheleznodorozhnogo sostava na metallurgicheskikh predpriyatiyakh [Conditions for Multitasking in the Management of Fire and Rescue Units during the Extinguishing of Rolling Stock at Metallurgical Enterprises] / A. N. Denisov, M. M. Danilov, S. N. Anikin [et al.]. *Computational Nanotechnology*, 2022, vol. 9, issue 1, pp. 39–46. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-1-39-46.

20. Modelirovanie vybora resheniy upravlencheskikh zadach pri tushenii pozhara v podzemnykh sooruzheniyakh [Modeling the choice of solutions for managerial tasks in extinguishing fires in underground structures] / S. N. Anikin, M. M. Danilov A. N. Denisov [et al.]. *Computational Nanotechnology*, 2023, vol. 10, issue 3, pp. 72–82. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-3-72-82.

21. Denisov, A. N., Nguyen, T. T. Formalizatsiya granichnykh usloviy dlya modeley i algoritmov zadachi identifikatsii situatsiy skladyvayushchikhsya na meste pozhara [Formalization of boundary conditions for models and algorithms of the problem of identification of situations developing at the fire site]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2023, issue 1-2, pp. 26–30. DOI: 10.37882/2223-2966.2023.01-2.05.

22. Denisov, A., Gundar, S., Danilov, M., Podkosov, S. Aviation Method of Extinguishing Landscape Fires – Experimental Substantiation of Parameters. In: Beskopylny, A., Shamtsyan, M., Artiukh, V. (eds.) *XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022»*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 575. Cham: Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2\_284.

23. Genezis razvitiya, sovremennye realii nauchno-metodicheskogo i normativnogo pravovogo obosnovaniya ponyatiy «krupnyy pozhar», «slozhnyy (zatyazhnoy) pozhar» [Genesis of Development, Current Realities of Scientific and Methodological and Regulatory Legal Justification of the Concepts of «Major Fire» and «Complex (Prolonged) Fire»] / A. N. Denisov, A. A. Poroshin, M. M. Danilov [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2025, vol. 34, issue 2, pp. 5–19. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.5-19.

*Мареєв Михаил Александрович*

Главное управление пожарной охраны МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

старший инспектор

Академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

преподаватель

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

соискатель ученой степени

E-mail: mareev.mikhail@mail.ru

*Mareev Mikhail Alexandrovich*

Main Directorate of Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Moscow

Senior Inspector

Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Moscow

lecturer

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

applicant for an academic degree

E-mail: mareev.mikhail@mail.ru