

доктор техн. наук **КОПЫЛОВ С.Н./KOPYLOV S.N.**<sup>1</sup>  
**ЗДОР В.Л./ZDOR V.L.**<sup>1</sup>  
**ПОРОШИН А.А./POROSHIN A.A.**<sup>1</sup>

Принята/Accepted: 30.04.2013; Reviewed/Рецензирована: 04.09.2013; Опубликована/Published: 30.09.2013

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СРЕДСТВ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ<sup>2</sup>

### System Approach to Designing of Fire Alarm Techniques

#### Содержание

Статья посвящена вопросам проектирования средств пожарной сигнализации с использованием системного подхода. Представлен анализ результатов ранее проведенных исследований в этой области. На основе положений действующей нормативной правовой базы по пожарной безопасности сформулированы цели обнаружения пожара. Представлены математические модели, описывающие условия достижения данных целей. С позиции обоснования пространственных параметров размещения пожарных извещателей (тепловые, тепловые дифференциального действия, извещатели пламени) рассмотрена модель горения углеводородных жидкостей в условиях наличия воздушных потоков и загрязненность атмосферы воздуха пылями и аэрозольными. Рассмотрены примеры расчетов по разработанным моделям.

#### Summary

The article is devoted to the issue of designing fire alarm techniques with the use of a system approach. The analysis of the results of the previous research in this area is presented. The purposes of fire detection are formulated on the basis of the provisions of the existing legal and normative base on fire safety. The mathematical models describing the conditions for achieving these objectives are submitted. The model of hydrocarbon liquids combustion under conditions of the presence of air flows and the pollution of the atmosphere with dusts and air dredges is examined from the position of justification of spatial parameters of fire detectors placement (thermal detectors, thermal detectors of differential action, flame detectors). The examples of calculations according to the developed models are considered.

**Ключевые слова:** системный подход, пожарная автоматика, пожарная сигнализация, цели обнаружения пожара, предел огнестойкости строительных конструкций, горение углеводородных жидкостей, воздушные потоки, загрязненность атмосферы воздуха.

**Keywords:** system approach, fire automatic equipment, fire alarm, fire detection, fire resistance limit, hydrocarbon liquids combustion, air flows, atmosphere pollution.

**Вид статьи:** с практики для практики;

**Type of article:** best practice in action;

### 1. Введение

При разработке проектных решений по противопожарной защите зданий (сооружений) не-

обходимо обосновать выбор систем пожарной автоматики и их параметры. При этом следует задать цели функционирования этих систем исходя из характеристик проектируемых зданий (сооружений) и определить взаимосвязи параметров пожарной автоматики с параметрами других элементов противопожарной защиты проектируемого здания (сооружения). Такой взгляд на процесс

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Почтовый адрес: мкр. ВНИИПО, д. 12, г. Балашиха, Московская область, 143903; электронная почта: vniipo@mail.ru / Federal State Establishment All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and

Elimination of Consequences of Natural Disasters; Mail address: mkr. VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, Russia, 143903; e-mail address: vniipo@mail.ru;

<sup>2</sup> Интеллектуальный вклад авторов в создание статьи (в процентах): Порошин А.А. - 70%, Копылов С.Н. - 20%, Здор В.Л. - 10%/ Percentage contribution: Poroshin - 70%, Kopylov - 20%, Zdor - 10%

проектирования определяет системный подход к разработке решений по обеспечению пожарной безопасности зданий (сооружений).

Пожарная сигнализация является первичным звеном в процессе обнаружения и тушения пожара пожарной автоматикой. Своевременное обнаружение опасных факторов пожара напрямую сказывается на продолжительности его тушения. Что соответственно влияет на возможные социальные и материальные последствия пожаров. Поэтому обоснование выбора средств пожарной сигнализации и их параметров, а также систем пожаротушения с позиции системного подхода позволит повысить эффективность противопожарной защиты зданий (сооружений) для сокращения социальных и материальных последствий пожаров. Как в зарубежной, так и российской практике сложились определенные научно-методические подходы на основе которых обосновывается время, за которое необходимо обнаружить пожар и обеспечивается взаимосвязь параметров пожаротушения и пожарной сигнализации. Также данные методы позволяют обосновать тип пожарного извещателя и пространственные параметры их размещения для своевременного обнаружения пожара и его последующей ликвидации. Однако, данные методы развивались в период 70-90 годов прошлого столетия и не лишены недостатков. Поэтому требуется рассмотреть дальнейшее развитие методологии применения системного подхода в области проектирования средств пожарной автоматики.

## **2. Анализ результатов исследований по применению системного подхода при проектировании средств пожарной автоматики**

В российской практике вопросы использования системного подхода к обеспечению пожарной безопасности (ПБ) зданий (сооружений) системами пожарной автоматики рассмотрены в работе А.В. Матюшина [1]. На основе статистических данных проанализирована эффективность функционирования данных систем. В статье [1] говорится, что причины низкой эффективности противопожарной автоматики связаны с тем, что в нормативных документах отсутствуют регламентированные цели функционирования этих систем, критерии достижения целей и методы расчета критериев. При этом требования, предъявляемые к пожарной автоматике, не зависят от характеристик и особенностей развития пожара в помещении. Недостатки нормативных документов не позволяют установить время, за которое необходимо обнаружить пожар и обеспечить взаимосвязь противопожарных требова-

ний, предъявляемых к автоматическим установкам пожаротушения и пожарной сигнализации. В статье [1] предложен комплекс мероприятий по совершенствованию нормативных документов и приведен перечень целей функционирования средств пожарной автоматики и критерии их реализации.

Развивает положения статьи [1] публикация А.В.Матюшина, В.Н. Тимошенко, А.Н. Щеглова [2] в которой рассмотрена концепция обеспечения зданий ПБ ручными или автоматическими средствами противопожарной защиты. В основе концепции лежат положения, которые базируются на построении дерева целей (понятий). Дерево целей позволяет установить какие требования необходимо выполнить для достижения поставленной цели ПБ и показать, как отдельные элементы проектируемой системы влияют на выполнение этих целей.

Важное место в методическом обеспечении решения задач обнаружения факторов пожара занимает предложенный авторами работы [2] расчетный метод определения максимально допустимых расстояний между пожарными извещателями (ПИ). Метод обоснования требований к их размещению состоит из следующих этапов. Определяется проектный вариант развития пожара в защищаемом помещении (рассматриваются точечные модели горения твердых горючих материалов). Выбирается цель обнаружения пожара сигнализацией. Далее рассчитывается необходимое время обнаружения пожара и пороговая тепловая мощность очага для достижения поставленной цели. Определяется максимально допустимое расстояние между извещателями, при котором обеспечивается выполнение заданной цели обнаружения пожара. Выбирается тип ПИ для защиты здания или помещения от пожара.

В работе [2] определены следующие цели функционирования пожарной автоматики: обнаружение и ликвидация пожара персоналом здания с помощью огнетушителей, стволов от внутренних пожарных кранов или автоматической установкой пожаротушения (АУП) до появления в защищаемом помещении критических для жизни людей значений опасных факторов пожара (ОФП); обнаружение пожара и оповещение о нем людей за интервал времени, позволяющий людям покинуть защищаемое помещение до появления критических для их жизни значений ОФП; обнаружение пожара и приведение в действие АУП в помещении. Для каждой из вышеперечисленных целей получены расчетные формулы для определения максимально допустимых расстояний между тепловыми ПИ. Формулы получены в результате решения задачи обратной расчету температуры извещателей в притолоч-

ной струе нагретых продуктов горения в различные моменты времени. При их выводе приняты следующие допущения: передача тепла от пожара к ПИ путем теплопроводности и излучения мала по сравнению с конвективной составляющей; чувствительный элемент ПИ представляет собой физическое тело с заданными теплофизическими свойствами; неоднородность температурного поля не учитывается.

Вопросы обоснования целей функционирования пожарной автоматики с позиции ГОСТ 12.1.004-91 „Пожарная безопасность. Общие требования» и разработки расчетных методов определения максимально допустимых расстояний между точечными тепловыми и дымовыми ПИ рассмотрены в статьях Филаретова М.Б., Старшинова Б. П. и др. [3,4]. Данные статьи дополняют и развивают положения системного подхода к обеспечению ПБ, изложенного в работах [1,2].

В работе [3] отмечается, что в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 системы противопожарной защиты, должны обеспечивать требуемый уровень пожарной безопасности людей и материальных ценностей, а также характеризоваться экономическими критериями эффективности этих систем при защите материальных ценностей. Поэтому пожарная автоматика должна выполнять одну из следующих задач: обеспечивать пожарную безопасность людей; обеспечивать пожарную безопасность материальных ценностей; обеспечивать пожарную безопасность людей и материальных ценностей одновременно. На основе этих положений в [3] приводится структурная схема выбора типа установок пожаротушения и типа ПИ исходя из обозначенных целевых задач. Выбор состоит из следующих этапов: определение геометрических характеристик помещений и их негерметичности; определение типа горючих материалов, величины пожарной нагрузки и характера ее распределения; выбор расчетных схем развития пожара; определение зависимости повышения температуры в помещении от времени и определение времени до самовоспламенения пожарной нагрузки (объемной вспышки); определение критического времени до разрушения строительных или технологических конструкций; выбор типов ПИ; выбор типа огнетушащего вещества, совместимого с горючей нагрузкой защищаемого помещения; определение типа установки пожаротушения и ее нормативных параметров.

В состав факторов влияющих на выбор типа ПИ включено необходимое время обнаружения пожара для выполнения задач, стоящих перед пожарной автоматикой. Для этого требуется осуществить расчет выделяемых при пожаре тепла, газа, дыма в зависимости от скорости горения

и расчет времени наступления ОФП. Решающим при выборе типа ПИ является определение преобладающих ОФП, последовательность и время их появления.

Обобщенные результаты исследований по обоснованию области применения и выбора типа ПИ приведены в рекомендациях разработанных ВНИИПО [5]. В них для каждого типа ПИ определены факторы, влияющие на принятие решения по выбору типа детектора и определению области их применения. Даны методики расчета параметров при проектировании пожарной сигнализации с различными типами ПИ.

В публикации Кочкина А. Ю. и Черных И. В. [6] на основе исследования характеристики трех видов извещателей (теплового, дымового точечного зондирования, дымового лучевого зондирования, светового) приводятся данные по пороговому времени срабатывания ПИ. Отмечается, что данное время зависит от чувствительности ПИ, характеристик пожарной нагрузки, свойств окружающей среды, объема помещения, а также от особенностей размещения ПИ.

В США и странах европейского сообщества началом построения теории обеспечения пожарной безопасности зданий (сооружений) основанной на принципах системного подхода послужили работы [7-9]. В статье С. Бейлера [7] описывается расчетный метод определения требуемого числа тепловых, дымовых извещателей и расстояний между ними для эффективного обнаружения очагов пламенного горения твердых материалов в помещении. В 1984 г. данный метод был использован для разработки национального стандарта ассоциацией противопожарной защиты США (NFPA) [10].

В комплексных статьях Ж. Ньюмана изложена теория расчета времени срабатывания ПИ [8] и теория установок извещения о пожаре [9]. Согласно теоретическим представлениям о процессах горения твердых веществ и материалов, принципов функционирования извещателей время их срабатывания определяется характеристиками горящего материала, параметрами ПИ и геометрическими данными о зоне, в которой установлен ПИ. В [8] приводятся формулы для определения времени срабатывания различных типов ПИ при пожарах твердых горючих материалов. Методологические аспекты теории установок извещения о пожаре рассмотрены в статье [9]. Исследованы основные факторы, определяющие эффективную работу установок обнаружения и извещения о пожаре. Сформулировано основное условие безопасности, которому должны удовлетворять эти установки: время от начала пожара до момента создания опасных для человека значений опасных факторов пожара

должно быть больше или равно сумме четырех временных отрезков: времени движения детектируемого продукта пожара от очага до места расположения чувствительного элемента ПИ; времени развития пожара до достижения обнаруживаемого уровня детектируемого продукта пожара (температура, концентрация дыма, мощность УФ или ИК излучения пламени); времени срабатывания детектора; времени - требуемого для эффективной ответной реакции на срабатывание детектора. На основе имеющихся экспериментальных и теоретических данных выведены формулы для расчета составляющих этого условия безопасности.

В трудах членов Общества инженеров пожарной безопасности США (SFPE) Р. Кастера и Б. Мичема [11-13] приводится описание дальнейшего развития аналитической основы системного подхода к обеспечению пожарной безопасности, реализованного в стандарте NFPA-72. Разработанная Р. Кастером и Б. Мичемом методология состоит из двух этапов. Первый связан с определением целей обеспечения пожарной безопасности в зависимости от особенностей защищаемого здания (сооружения) и критериев их достижения. Второй связан с проектированием структуры и оценкой параметров системы противопожарной защиты на основе сценариев развития пожаров. На этом этапе определяются требуемые параметры системы противопожарной защиты необходимые для достижения поставленной цели.

Р. Кастером и Б. Мичемом сформулированы следующие цели пожарной безопасности: 1- обеспечение безопасности жизни людей (жильцов, работников, пожарных); 2- защита имущества (здания, сооружения, оборудование, материальные ценности); 3- обеспечение непрерывности функционирования производства (обеспечение работы заинтересованных сторон и непрерывности технологического цикла); 4- ограничение воздействия пожара на окружающую среду (ограничение выбросов токсичных и вредных веществ).

После задания целей обеспечения пожарной безопасности определяются количественно выраженные критерии их достижения. Данные критерии задают пороговые значения определенных физических величин, с помощью которых можно измерить степень выполнения поставленных целей. Количественный перевод целей в критерии включает определение различных воздействий факторов пожара на людей, имущество и окружающую среду. Критерии выражены в физических терминах: температура; видимость в дыму; поток лучистой энергии от пожара; мощность его тепловыделения; концентрация токсичных

веществ. Для каждого из этих факторов должно определяться время их достижения.

Наиболее детально разработан метод проектирования тепловых ПИ как фиксированной температуры, так и реагирующих на скорость ее изменения. Метод является результатом обширных экспериментальных исследований и математического моделирования процессов переноса тепла и вещества при пожарах. В основе метода лежат результаты построения математических моделей изменения температуры и скорость газов в пространстве помещения.

В исследованиях Хескестада Ж. и Деличатсиониса М. [14-16] описаны математические выражения для определения изменения температуры и скорости газов в месте расположения ПИ. Также вопросы моделирование передачи тепла к тепловому детектору, определение скорости газов и температуры в месте его расположения также рассмотрены в работах Р. Щифилити [17], С. Бейлера [18], С. Мариона [19]. Согласно утверждениям Ж. Хескестада и М. Деличатсиониса и других исследователей общая передача тепла к извещателю складывается из следующих составляющих: передача тепла благодаря теплопроводности вещества; конвективная передача тепла; передача тепла излучением. Однако, при выводе расчетных формул в дальнейшем полагается, что на начальных стадиях развития пожара передача тепла излучением может считаться незначительной. Поэтому все теоретические соображения строятся на том, что подавляющее большинство тепла поступает в ПИ через конвективную теплопередачу, величина которой пропорциональна квадратному корню скорости газов, проходящих через извещатель.

Резюмируя можно сказать следующее. В мировой практике в области проектирования систем пожарной автоматики на основе системного подхода наиболее теоретически проработан метод проектирования данных систем с тепловыми ИП. В основе метода лежат математические модели, описывающие изменение температуры и скорость нагретых газов в пространстве около извещателя. Получены расчетные формулы для определения изменения температуры и скорости газов в месте расположения ИП. При выводе расчетных формул полагается, что передача тепла посредством теплопроводности вещества и излучением незначительна. Поэтому все теоретические соображения строятся на том, что тепло от пожара поступает в ИП через конвективную составляющую, величина которой пропорциональна квадратному корню скорости горячих газов, проходящих через извещатель. Теория тепловых ИП строится на основе точечных моделей пожара. Сделано допущение о главенствующей роли

конвективной передачи тепла, пренебрегая при этом передачей тепла излучением.

В отличие от тепловых ИП теория проектирования дымовых извещателей не достаточно развита. Обоснование размещения дымовых ИП осуществляется на основе огневых испытаний. При ряде допущений о характере режима горения получены аналитические выражения для расчета значений максимально допустимых расстояний между извещателями и линиями струй горячих газов от пожара, на которых ожидается получение минимальной скорости потока для некоторой конвективной мощности тепловыделения пожара и высоты потолка помещения.

Для пламенных ИП аналитической основой их проектирования является теория излучения пламени. На основе этой теории разработана модель реакции пламенных извещателей на пожар. Реакция моделируется с помощью уравнения, описывающего взаимосвязь величины энергии излучения, достигающей извещателя и достаточной для его срабатывания, с величиной мощности излучения от него. Параметром для определения реакции ИП на излучение от пламени является расстояние между ним и пожаром.

При этом анализ используемых модельных представлений процессов горения различных веществ и материалов для проектирования пожарной автоматике показывает, что в основном применяются модели пожаров точечного типа и предполагается, что тепло поступает в ИП (для тепловых и дымовых) через конвективную составляющую. Тем не менее следует учитывать, что при горении жидких углеводородов передача тепла на объект (мишень) излучением превалирует по сравнению с конвективной составляющей. Российскими исследователями [20] на основе теории диффузионного факела, возникающего при пожарах проливов углеводородов, и методов теории пограничного слоя установлено, что тепломассообмен факела с объектами (мишенями) зависит от его геометрических характеристик и размеров облучаемого объекта. В работе *Баратова А.Н., Копылова С.Н., Молчадского И.С.* [20] показано, что основным процессом передачи тепла является лучистый теплообмен.

Следует также отметить, что в настоящее время не достаточно полно проработан вопрос об исследовании влияния наличия естественных и искусственных воздушных потоков, а также загрязненности атмосферы воздуха пылями и аэрозольными в зданиях (сооружениях) на обоснование проектных решений по пожарной сигнализации с различными типами ИП. Например, для обоснования требований к пространственным параметрам схем их размещения, для эффектив-

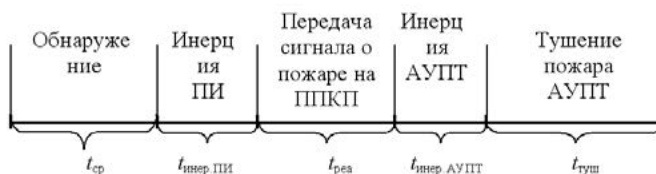
ного обнаружения пожаров пролива углеводородных жидкостей требуется определять, как изменяется тепловое радиационное излучение в зависимости от изменения параметров окружающей среды за счет потоков воздуха или наличия пыли в нем.

Рассмотрим возможные пути и соответствующие математические модели, позволяющие, в некоторой мере, определить пути решения описанных выше проблем в области разработки методов проектирования средств пожарной автоматики на основе системного подхода.

### 3. Цели обнаружения пожаров пролива углеводородных жидкостей и формализация условий их достижения

В статье 61 Федерального закона Российской Федерации [21] определены цели, которые должны быть обеспечены при применении автоматических или автономных установок пожаротушения (АУПТ). Данные установки функционируют совместно с системами пожарной сигнализации. Поэтому, исходя из целей АУПТ, можно сформулировать цели обнаружения пожара и разработать математическую модель описывающей условия их достижения.

Решение этой задачи рассмотрено с использованием временной диаграммы (см. рис.1).



ППКП – CIFD – fire control and indicating devices

АУПТ – AFS – automatic fire systems

ПИ – FD – fire detectors

**Рис.1.** Временная диаграмма процесса обнаружения и тушения пожара.

**Fig. 1.** Timing diagram of the process of detecting and extinguishing the fire

Из диаграммы видно, что интервал времени от момента возникновения пожара до момента его ликвидации состоит из следующих временных интервалов:  $t_{ср}$  – интервал времени от момента возникновения пожара до момента обнаружения контролируемого фактора пожара ПИ соответствующего типа;  $t_{инерПИ}$  – интервал времени от момента воздействия на чувствительный элемент ПИ контролируемого фактора пожара, величина которого равна или превышает порог его срабатывания и до момента выдачи сигнала на приборы приемно-контрольные пожарные (ППКП) (инерционность срабатывания ПИ);  $t_{реа}$  – интервал времени от момента срабатывания

ПИ до момента подачи сигнала по линиям связи с ППКП на АУПТ;  $t_{инер.АУПТ}$  - интервал времени от момента подачи управляющего сигнала от ППКП на включение АУПТ до момента выхода АУПТ на рабочий режим (инерционность срабатывания АУПТ);  $t_{туш}$  - интервал времени от момента подачи огнетушащего вещества АУПТ на тушение пожара до момента его ликвидации.

Для формулирования целей обнаружения пожара и разработки математической модели, описывающей условия их достижения, определены параметры выполнения целевых назначений АУПТ обозначенные в Федеральном законе [21]: необходимое время эвакуации людей из помещения (здания) при пожаре ( $t_{нев}$ ); предел огнестойкости строительных конструкций ( $t_{но}$ ); площадь пожара на момент подачи огнетушащего вещества АУПТ ( $S_{пож}$ ).

Сформулированы следующие цели обнаружения пожара:

- система обнаружения пожара должна осуществить автоматическое обнаружение пожара за время необходимое для обеспечения ликвидации пожара до возникновения критических значений опасных факторов пожара для людей (цель по обнаружению № 1);
- система обнаружения пожара должна осуществить автоматическое обнаружение пожара за время необходимое для обеспечения ликвидации пожара до наступления пределов огнестойкости строительных конструкций (цель по обнаружению № 2);
- система обнаружения пожара должна осуществить автоматическое обнаружение пожара за время необходимое для обеспечения ликвидации пожара прежде, чем его площадь превысит площадь, которую может потушить проектируемая на объекте защиты АУПТ (цель по обнаружению № 3).

На основе целевых назначений АУПТ регламентированных Федеральным законом [21], с использованием временной диаграммы (см. рис.1), построена система неравенств вида:

$$t_{cp} + t_{инер.ПИ} + t_{реак} + t_{инер.АУПТ} + t_{туш} \leq t_{нев} \quad (1)$$

$$t_{cp} + t_{инер.ПИ} + t_{реак} + t_{инер.АУПТ} + t_{туш} \leq t_{но} \quad (2)$$

$$S_{пож} \leq S_{огн.АУПТ} \quad (3)$$

где  $S_{огн.АУПТ}$  - площадь пожара, которую может потушить проектируемая на объекте АУПТ. Другие переменные в неравенствах (1)-(3) обозначены выше.

Введя параметр  $T_1 = t_{инер.ПИ} + t_{реак} + t_{инер.АУПТ}$ , который характеризует общую инерционность системы пожарной автоматики с учетом проек-

тируемых типов ПИ, линий связи, типов ППКП и АУПТ и осуществляя соответствующие преобразования, неравенства (1)-(3) приведены к виду:

$$t_{cp} \leq t_{нев} - T_1 - t_{туш} \quad (4)$$

$$t_{cp} \leq t_{но} - T_1 - t_{туш} \quad (5)$$

$$S_{пож} \leq S_{огн.АУПТ} \quad (6)$$

В неравенствах (4)-(5) время ( $t_{cp}$ ) является искомой величиной которую требуется определить в зависимости от характеристик пожара и параметров проектируемой системы противопожарной защиты здания (сооружения) или помещения.

В качестве реализации вышеизложенного подхода по определению времени ( $t_{cp}$ ) рассмотрено горение углеводородных жидкостей при постоянной ( $S_{пож} = const$ ) и переменной ( $S_{пож} = S_{пож}(t)$ ) площади в условиях наличия воздушных потоков и загрязненности атмосферы воздуха пылями и аэрозольями. Описание модели горения углеводородных жидкостей в этих условиях представлено в работах [22,23].

На данной модели с использованием неравенств (4)-(6), при определенных допущениях, получены расчетные формулы позволяющие производить оценки величины времени срабатывания ПИ ( $t_{cp}$ ) для рассмотренных целей обнаружения пожара. Так, для цели №1 (обеспечение безопасности людей) при переменной площади пожара получено неравенство вида:

$$t_{cp} \leq \frac{1}{3,6 \cdot c} \cdot \left\{ -B + \sqrt{B^2 + 7,2 \cdot c \cdot [K \cdot T_1 + t_{нев} - (T_0 + T_1)]} \right\} \quad (7)$$

В (7) параметры  $c = \frac{\psi}{\rho \cdot h}$ ;  $B = 1 - K + D \cdot T_1$ ;

$K = 1,8 \cdot c \cdot [t_{нев} - (T_0 + T_1 + T_2)]$ ;  $D = 1,8 \cdot c$  определяются по характеристикам пожара (массовая скорость выгорания жидкости ( $\psi$ ), толщина слоя растекающейся жидкости ( $h$ ), ее плотность ( $\rho$ ) и др.) и характеристикам проектируемой системы противопожарной защиты на объекте (необходимое время эвакуации ( $t_{нев}$ ), интенсивность подачи огнетушащего средства ( $J_{мп}$ ), время характеризующее инерционность пожарной автоматики ( $T_1$ )).

Также неравенство (7) применимо для оценки времен срабатывания ПИ ( $t_{cp}$ ) по выполнению цели №2 (обеспечение безопасности строительных конструкций). В данном случае требуется заменить необходимое время эвакуации ( $t_{нев}$ ) на время ( $t_{но}$ ), которое определяет предел огнестойкости

строительных конструкций согласно требованиям Федерального закона [21].

Для цели по обнаружению № 3 (огнетушащая способность АУПТ) получено неравенство вида:

$$t_{cp} \leq \frac{Q_{cm}}{1,8 \cdot c \cdot (d \cdot J_{mp} - Q_{cm})} - T_1 \quad (8)$$

где  $Q_{cm}$  – фактический расход огнетушащего средства, который может подать АУПТ, л/с. Остальные параметры описаны выше.

Следует отметить, что с позиции математического формализма неравенства (7) и (8) имеют ограничения по применимости при определенных значениях входящих в них параметров (подкоренные значения не могут быть отрицательными, недопустимо деление на ноль).

В качестве примера практического использования полученных условий достижения целей обнаружения пожара пролива углеводородных жидкостей рассмотрим горение дизельного топлива марки  $L$  вытекающего из поврежденного агрегата (переменная площадь пожара). Массовая скорость выгорания топлива  $\psi = 0,04$  кг/м<sup>2</sup>с, толщина слоя растекающейся жидкости  $h = 0,005$  м<sup>3</sup>/с, плотность  $\rho = 860$  кг/м<sup>3</sup>. Инерционность системы пожарной автоматики ( $T_1$ ) принято равной 20 с. Необходимое время эвакуации людей ( $t_{не}$ ) задавалось по трем значениям ( $t_{не} = 1$  мин; 3 мин; 5 мин). На рис.2 приведены результаты построения зависимости времени срабатывания ПИ от интенсивности подачи огнетушащего средства  $J_{mp}$  при различных значениях необходимого времени эвакуации людей с использованием неравенства (7).

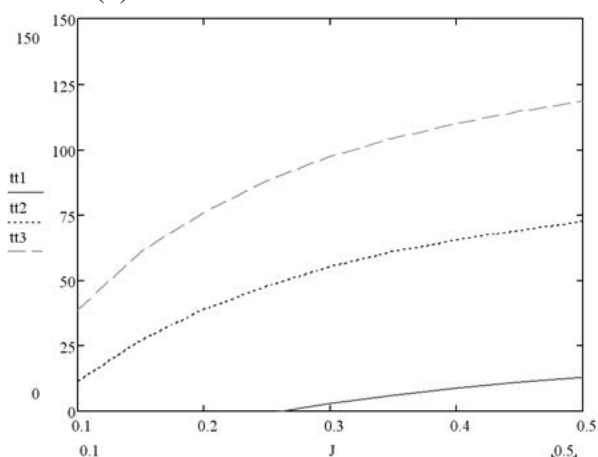


Рис. 2. Зависимость времени срабатывания ПИ  $t_{cp}$  от требуемой интенсивности подачи огнетушащего средства  $J_{mp}$  при различных значениях необходимого времени эвакуации людей  $t_{не}$

Fig. 2. The relationship between the response time of a fire detector (ПИ  $t_{cp}$ ) and the extinguishing intensity needed ( $J_{mp}$ ) in relation to different amounts of time necessary for evacuation of people ( $t_{не}$ )

Таким образом, при разработке проектных решений по противопожарной защите зданий (сооружений) в которых обращаются углеводородные жидкости, с позиции выполнения целей обнаружения пожара, на основе полученных неравенств (7) и (8) можно обосновывать требования к необходимому времени обнаружения пожара ( $t_{необ} = t_{cp}$ ) в зависимости от характеристик проектируемой системы противопожарной защиты на объекте и свойств углеводородных жидкостей.

Однако, как показывает анализ полученных неравенств, в них отсутствуют такие важные характеристики системы пожарной сигнализации как пространственные параметры размещения ПИ различного типа (расстояния между ними, высота размещения). Поэтому, полученное значение времени  $t_{cp}$  выполнения целей обнаружения пожара требуется сравнить с расчетным временем ( $t_{расч}$ ), которое определяется в зависимости от пространственных параметров схем размещения ПИ. Если  $t_{расч} \leq t_{cp}$ , то, при выбранных пространственных параметрах размещения извещателей, цели обнаружения пожара будут выполнены. В противном случае, если  $t_{расч} \geq t_{cp}$ , то цели не выполняются и необходимо пересмотреть требования к пространственным параметрам размещения ПИ таким образом, чтобы добиться выполнения условия  $t_{расч} \leq t_{cp}$ .

Для реализации данной сравнительной задачи осуществлена разработка математических моделей позволяющих определять зависимости пространственных параметров размещения ПИ от расчетного времени ( $t_{расч}$ ). Построение моделей рассмотрено применительно к тепловым ПИ, тепловым ПИ дифференциального действия и извещателям пламени. Учтены особенности распределения тепловых потоков при горении углеводородных жидкостей пожара в условиях наличия воздушных потоков и загрязненности атмосферы воздуха пылями и аэрозольными частицами. В силу ограничения статьи по объему ниже представлено описание модели для тепловых ПИ (ТПИ).

#### 4. Модель определения пространственных параметров размещения тепловых пожарных извещателей для обнаружения горения углеводородных жидкостей в условиях наличия воздушных потоков и загрязненности атмосферы воздуха пылями и аэрозольными частицами

В основе определения пространственных параметров размещения ТПИ лежит определение количества тепла ( $Q$ ), которое поступает в объем воздуха ( $V$ ) вокруг чувствительного элемен-

та ТПИ в единицу времени при тепловом излучении пожара пролива углеводородных жидкостей. В качестве описания последнего применена модифицированная модель поверхностного источника. В модельном представлении пламя описывается трехмерным объемным телом. Радиационное излучение осуществляется с наружной оболочки этого тела и рассчитывается через коэффициент излучения и интенсивность тепловыделения. Горение рассматривается как диффузионное и происходит с открытой поверхности. Пламя рассматривается как оптически „серый” монохроматический поверхностный излучатель. При расчете радиационного излучения геометрическая форма пламени заменяется эквивалентной цилиндрической поверхностью с сохранением реальных значений высоты пламени ( $L$ ) и диаметра очага пожара ( $2R$ ). Более подробное описание модели пожара пролива углеводородной жидкости дано в работе [21].

Для получения расчетных формул по определению пространственных параметров размещения ТПИ исследованы как частные случаи (пламя направлено вертикально вверх и пламя отклоняется под воздействием воздушного потока в плоскости расположения извещателя), так и более общий случай (пламя отклоняется в произвольной плоскости по отношению к извещателю). При этом рассмотрены различные случаи загрязнения атмосферы воздуха пылями и аэрозольными.

Для примера, на рис.3 приведена схема расположения оси пламени и извещателя при наличии воздушного потока в плоскости ТПИ (угол наклона -  $\Theta$ ).

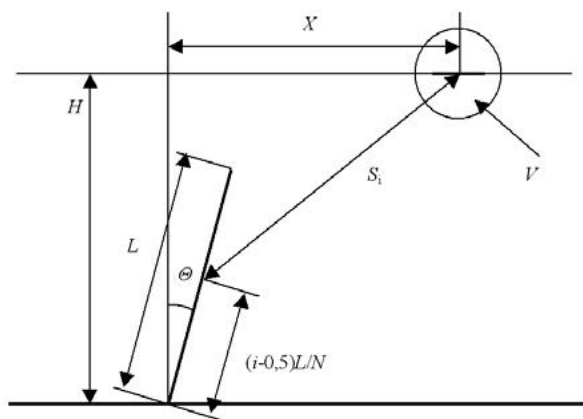


Рис. 3. Схема расположения оси пламени и извещателя

Fig. 3. Scheme showing location of the flame axis and fire detector

На основе определения количества тепла  $Q$ , поступающего в единицу времени в объем  $V$  около извещателя получена формула для вычисления расчетного времени срабатывания ТПИ:

$$t_{расч} = \frac{\rho C_p (T_{ср} - T_{нач})}{0,75 \xi \alpha E \exp(-\alpha S) \varphi} \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $кг/м^3$ ;  $C_p$  – изобарная теплоемкость воздуха,  $Дж/кг \cdot K^0$ ;  $T_{нач}$  – начальная температура воздуха,  $^0K$ ;  $T_{ср}$  – температура срабатывания ТПИ,  $^0K$ ;  $\xi$  – коэффициент учета кривизны поверхности пламени представленной в виде цилиндра в сравнении с поверхностью прямоугольника;  $\alpha$  – коэффициент загрязненности атмосферы пылями или аэрозольными (в исследованиях принято если  $\alpha$  менее 0,15, то рассматривается прозрачная атмосфера, если  $\alpha$  от 0,15 до 0,60 – загрязненная атмосфера, если  $\alpha$  более 0,60 – сильно загрязненная атмосфера);  $E$  – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения,  $кВт/м^2$ ;  $S$  – среднее расстояние от поверхности пламени до извещателя, м;  $\varphi$  – угловой коэффициент облучения.

Для получения выражения по расчету углового коэффициента облучения ( $\varphi$ ) цилиндрическая поверхность была разбит по высоте на  $N$  частей таким образом, чтобы высота каждого из полученных  $i$ -х частей цилиндра была близка к их ширине ( $2R$ ). Определено расстояние  $S_i$  от центра  $i$ -й частей цилиндра до места размещения извещателя (см. рис.3).

Получена формула для расчета углового коэффициента облучения вида:

$$\varphi = \frac{2RL}{\pi N} \sum_{i=1}^N \frac{\left[ \left( X - \frac{(i-0,5)L}{N} \sin \Theta \right) \cos \Theta - \left( H - \frac{(i-0,5)L}{N} \cos \Theta \right) \sin \Theta \right]}{\left[ \left( X - \frac{(i-0,5)L}{N} \sin \Theta \right)^2 + \left( H - \frac{(i-0,5)L}{N} \cos \Theta \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

Аналогичные формулы для вычисления ( $\varphi$ ) выведены для более общего случая, когда пламя отклоняется в произвольной плоскости по отношению к извещателю. Для геометрического описания данного случая был введен дополнительный угол  $\Psi$  и использованы положения теории векторной алгебры для его вычисления.

Как видно из рис.3, расстояние ( $S$ ) и угловой коэффициент облучения ( $\varphi$ ) являются функциями от расстояния ( $X$ ), на котором размещается извещатель от оси пламени, высоты их размещения  $H$ , а также углов наклона пламени  $\Theta$  и  $\Psi$  в различных плоскостях под воздействием воздушных потоков:  $S=S(X,H,\Theta,\Psi)$  и  $\varphi=\varphi(X,H,\Theta,\Psi)$ . Для исследования характера изменения пространственных параметров размещения ТПИ с учетом времени их срабатывания необходимо совместно

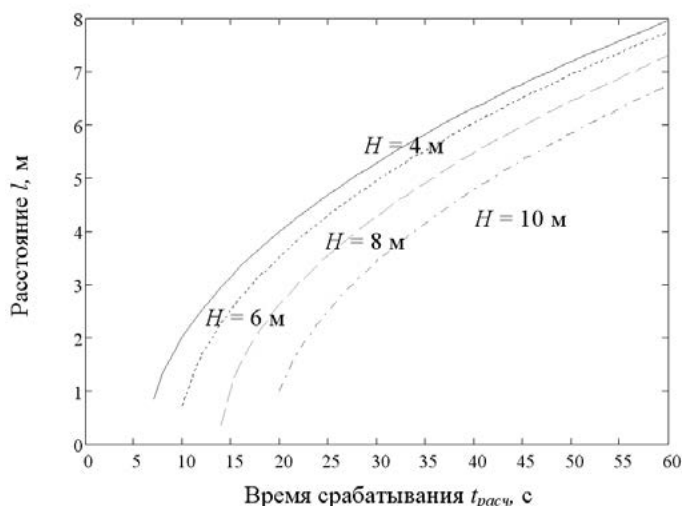


решить уравнение (9) и соответствующие уравнения для углового коэффициента облучения (см. формула 10 для рассматриваемого случая отклонения пламени под воздействием воздушного потока). Так как эти уравнения имеют сложную аналитическую структуру их исследование осуществлено на основе методов численного моделирования. Применен метод касательных.

В силу того, что по времени  $t_{cp}$  срабатывания извещателей, задаваемому для выполнения соответствующих целей обнаружения пожара, требуется определить расчетное время срабатывания ( $t_{расч}$ ) численное исследование проводилось путем решения обратной задачи. То есть, при численном моделировании определялась функция вида  $l = F(t_{расч}, H, \Theta, \Psi, \alpha)$ , где  $l$  – расстояние между ТПИ. Данное расстояние определяется по расстоянию  $X$ , на котором размещается извещатель от оси пламени.

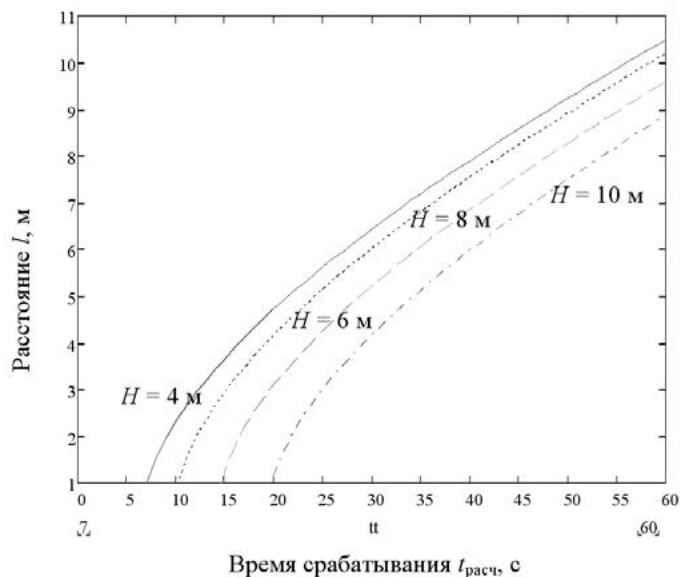
На рис. 4 и 5 приведены примеры данной функции полученной по результатам численного моделирования при различных параметрах модели  $l = F(t_{расч}, H, \Theta, \Psi, \alpha)$ . Рассматривалось горение дизельного топлива марки  $L$  с вышеописанными исходными данными (см. раздел 2 статьи).

Аналогичные математические модели разработаны для тепловых ПИ дифференциального действия и извещателей пламени.



**Рис. 4.** Зависимость расстояния  $l$  от времени срабатывания ТПИ  $t_{расч}$  при различных высотах ( $H$ ) их размещения (углы наклона пламени  $\Theta = -30^\circ$  и  $\Psi = 90^\circ$ , прозрачная атмосфера ( $\alpha = 0,15$ ))

**Fig. 4.** The relationship between distance  $l$  and the response time of the heat detector (ТПИ  $t_{расч}$ ) located at different heights ( $H$ ) (flame angles  $\Theta = -30^\circ$  и  $\Psi = 90^\circ$ , transparent atmosphere ( $\alpha = 0,15$ ))



**Рис. 5.** Зависимость расстояния  $l$  от времени срабатывания ТПИ  $t_{расч}$  при различных высотах ( $H$ ) их размещения (углы наклона пламени  $\Theta = 30^\circ$  и  $\Psi = 90^\circ$ , прозрачная атмосфера ( $\alpha = 0,15$ ))

**Fig. 5.** The relationship between distance  $l$  and the response time of the heat detector (ТПИ  $t_{расч}$ ) located at different heights ( $H$ ) (flame angles  $\Theta = -30^\circ$  и  $\Psi = 90^\circ$ , transparent atmosphere ( $\alpha = 0,15$ ))

Рассмотрим, как можно применить описанные модели и результаты численного моделирования по ним при разработке проектных решений по противопожарной защите. Осуществляется разработка проектных решений по противопожарной защите помещения с обращением дизельного топлива марки  $L$ . В помещении по технологическому процессу монтируется система вентиляции и кондиционирования (наличие искусственных воздушных потоков). В помещении возник проектный пожар дизельного топлива вытекающего из агрегата (исходные данные по данной жидкости см. выше). Предлагается применить автоматическую систему пожаротушения с интенсивности подачи огнетушащего средства  $J_{тр}$  равной  $0,2 \text{ л/м}^2\text{с}$ . По соответствующим методикам осуществлены расчеты необходимого времени эвакуации людей из помещения при пожаре. Предположим, что  $t_{нев} = 180 \text{ с}$ . Инерционность системы пожарной автоматики принята равной  $20 \text{ с}$ . При таких исходных данных для выполнения цели №1 (обеспечение безопасности людей) получаем, что ТПИ должны обнаружить тепловой поток от пожара за время не более  $35 \text{ с}$  (см. рис. 2). Если бы необходимое время эвакуации людей из помещения при пожаре составляло  $t_{нев} = 60 \text{ с}$ , то цель была не выполнена. Время  $t_{cp}$  принимает значения меньше нуля (см. рис. 2). Поэтому требуется пересмотреть исходные данные по интенсивно-

сти подачи огнетушащего средства  $J_{mp}$  с 0, 2 л/м<sup>2</sup>с до 0, 3 л/м<sup>2</sup>с и более.

Теперь определим, на какой высоте и какие расстояния между ТПИ должны быть чтобы обеспечить обнаружение теплового потока от пожара дизельного топлива в помещении за время не более 35 с при наличии воздушного потока отклоняющего пламя на соответствующие углы. Принято, что атмосфера воздуха в помещении прозрачная ( $\alpha = 0,15$ ).

Воспользуемся результатами численного моделирования по определению зависимости  $l = F(t_{расч}, H, \theta, \psi, \alpha)$ . По графикам рис.4 определяем, что при  $t_{расч} = t_{не} = t_{расч} = 35$  с для высоты размещения ТПИ  $H=10$  м расстояние  $l$  должно составлять порядка 4м. Соответственно, при  $H=8$  м расстояние  $l = 4,5$ м, при  $H=6$  м расстояние  $l = 5,2$ м, при  $H=4$  м расстояние  $l = 5,7$ м.

Как видно из примера расчета в количественной форме реализуются положения системного подхода к проектированию противопожарной защиты помещения. Изменяя исходные данные по параметрам противопожарной защиты достигается выполнение обозначенных в Федеральном законе [21] целей по системам пожарной автоматики.

## 5. Заключение

Осуществлено дальнейшее развитие методологических положений по применению системного подхода к обеспечению пожарной безопасности зданий (сооружений) пожарной сигнализации с использованием других элементов противопожарной защиты.

Полученные результаты исследований могут быть использованы при формировании нормативной правовой базы, регламентирующей требования для проектирования средств пожарной сигнализации, а также для развития методов проведения огневых испытаний пожарных извещателей различных типов с учетом различных условий их функционирования

## Список литературы

1. Матюшин А.В. *Функциональная эффективность противопожарной автоматики // Системы обеспечения пожарной безопасности объектов*; Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992, С. 31–41.
2. Матюшин А.В., Тимошенко В.Н., Щеглов А.Н. *Системный подход к обеспечению противопожарной защиты зданий*. Юб. сб. тр. – М.: ВНИИПО, 1997, С. 270-283.
3. Филаретов М.Б., Романцов М.С. *Обеспечение требуемого уровня пожарной безопасности системами пожарной автоматики // Проблемы*

4. Филаретов М.Б., Старшинов Б. П., Жевлаков А.Ф., Смирнов Н.В., Варламова Т. В. *Средства пожарной автоматики. Выбор типа. // Снижение риска гибели людей при пожарах: Материалы XVIII науч.-практ. конф. - Ч. 2. - М.: ВНИИПО, 2003, С. 22–29.*
5. Средства пожарной автоматики. Область применения. Выбор типа: Рекомендации / Пивоваров В.В., Цариченко С.Г., Здор В.Л., Былинкин В.А. и др.- М.: ВНИИПО, 2004, 96 с.
6. Кочкин А. Ю., Черных И. В. *Модели формирования принципов расчетно-аналитического обоснования выбора пожарных извещателей / Вести. Вост.-Сиб. ин-та МВД России. 2004, № 4, С. 75-89.*
7. Beyler C., *A design method for flaming fire detection*, „Fire Technology”, 1984, vol. 20, № 4, pp. 5-16.
8. Newman J., *Prediction of fire detector response*, „Fire Safety Journal”, 1987, vol. 12, № 3, pp. 205–211.
9. Newman J., *Principles for fire detection*, „Fire Technology”, 1988, № 2, pp. 116–127.
10. National Fire Alarm Code USA (NFPA – 72), National Fire Protection Association USA, 2002 Edition, Minneapolis, MA 02269-9101, 2002, 258 p.
11. Custer R., Meacham B. *Performance-based fire safety engineering: An Introduction of basic concepts*, SFPE (Society of Fire Protection Engineers), Handbook of Fire Protection Engineering, 1995 (<https://www.sfp.org/> электронная библиотека).
12. Custer R., Meacham B. *Introduction to performance-based fire safety*, SFPE (Society of Fire Protection Engineers), Handbook of Fire Protection Engineering, 1997 (<https://www.sfp.org/> электронная библиотека).
13. Custer R., Meacham B., *Engineering guide to performance based fire protection analysis and design*, SFPE (Society of Fire Protection Engineers), Handbook of Fire Protection Engineering, 1999 (<https://www.sfp.org/> электронная библиотека).
14. Heskestad G., Delichatsios M., *The initial convective flow in fire*, Seventeenth Symposium on Combustion The Combustion Institute, 1979, Pittsburgh.
15. Heskestad G., Delichatsios M., *Environments of fire detectors. Phase 1: Effect of fire size ceiling height and material*, National Technical Information Service (NTIS), Measurements vol. I (NBS-GCR-77-86), 1986, Analysis vol. II (NBS-GCR-77-95), 1995, Springfield, VA 22151.

16. Heskestad G. Delichatsios M. A., *Update: The initial convective flow in fire*, "Fire Safety Journal", 1989, vol. 15, № 5, pp. 8–15.
17. Schifilit R., *Use of fire plume theory in the design and analysis of fire detector and sprinkler response*, Master's thesis, Worcester Polytechnic Institute, Center for Firesafety Studies, Worcester, MA, 1986, ([https://www.sfpe.org/электронная библиотека](https://www.sfpe.org/электронная_библиотека)).
18. Beyler C., *A Design method for flaming fire detection*, "Fire Technology", 1984, vol. 20, №4, pp. 17–24.
19. Marrion C., *Designing and analysing the response of detection systems: An Update to Previous Correlations*, "Fire Protection Engineering", SFPE, 1998 ([https://www.sfpe.org/электронная библиотека](https://www.sfpe.org/электронная_библиотека)).
20. Баратов А.Н., Копылов С.Н., Молчадский И.С., *Теплообмен в диффузионном факеле*, Исторические и современные аспекты решения проблем горения, тушения и обеспечения безопасности людей при пожарах: материалы XX Международной науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО, 2007, С. 144–146.
21. Федеральный закон от 22 июля 2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в редакции Федерального закона от 10.07.2012 г. № 117-ФЗ).
22. Копылов С.Н., Здор В.Л., Порошин А.А., *Исследование процесса радиационного теплового воздействия на произвольно ориентированную в пространстве площадку для целей проектирования пожарной сигнализации*, "Пожарная безопасность", 2009, №2, С. 47–59.
23. Порошин А.А., *Обоснование параметров схем размещения пожарных извещателей для обнаружения горения углеводородных жидкостей в условиях загрязнения атмосферы*, "Пожарная безопасность", 2010, №3, С. 106–112.

**Копылов Сергей Николаевич**, полковник внутренней службы, д-р технических наук, действительный член НАНПБ, начальник научно-исследовательского центра автоматических установок обнаружения и тушения пожаров ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Руководит научно-исследовательскими работами в области пожарной автоматики и средств пожаротушения. Область научных интересов: разработка научно-методических подходов, методов и средств обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения с использованием систем пожарной автоматики; разработка новых технологий пожаротушения и принципов нормирования в данной области. Автор более 150 научных трудов, имеет 8 авторских свидетельств на изобретения и патенты. Является членом ученого совета ФГБУ ВНИИПО МЧС России.

**Здор Владимир Леонидович**, полковник внутренней службы, заместитель начальника научно-исследовательского центра автоматических установок обнаружения и тушения пожаров ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Специализируется в области разработки методов проектирования систем пожарной сигнализации и нормативных документов по нормированию и испытанию средств пожарной автоматики. Автор более 60 научных трудов, имеет 5 авторских свидетельств на изобретения.

**Порошин Алексей Александрович** – капитан внутренней службы, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра автоматических установок обнаружения и тушения пожаров ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Специализируется в области разработки методов проектирования систем пожарной сигнализации с учетом особых условий функционирования объектов защиты, создания испытательных стендов средств пожарной автоматики. Автор более 25 статей.