

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КЛАССА А МОДУЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ ПОРОШКОВОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ В СХЕМЕ ТУШЕНИЯ ЛОКАЛЬНО ПО ПОВЕРХНОСТИ

Кицак А.И., Палубец С.М., Надточий Д.Н., Лобач Д.С.

Цель. Разработка методики измерения параметров тушения пожара класса А модульной установкой порошкового пожаротушения (МУПП) кратковременного действия в схеме тушения локально по поверхности и экспериментальное определение значений данных параметров, обеспечивающих эффективное тушение пожара указанного класса.

Методы. Достижение поставленной цели осуществлялось разработкой процедур измерений параметров тушения пожара класса А (времени тушения пожара, интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения, скорости частиц порошка в данной зоне и удельного расхода порошка на тушение пожара) и экспериментальным определением значений данных параметров в условиях близких к натурным при применении МУПП.

Результаты. Определены условия эффективного тушения пожара класса А огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара в схеме тушения локально по поверхности.

Разработана методика измерений параметров тушения пожаров класса А МУПП кратковременного действия в схеме тушения локально по поверхности.

Проведены экспериментальные исследования эффективности тушения пожара класса А огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара (длительностью ~1 с) и различных режимах тушения.

Построены экспериментальные зависимости среднего времени тушения и среднего удельного расхода огнетушащего порошка типа «Вексон-АВС 25» на тушение модельного очага пожара подкласса А1 от средней интенсивности подачи порошка в зону горения в схеме тушения локально по поверхности.

Установлено наличие оптимального значения интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара, при котором время тушения и соответственно удельный расход порошка на тушение пожара минимальны. Данное значение рекомендуется в качестве нормативного при оценке огнетушащей способности МУПП, применяемой для тушения пожаров подкласса А1 огнетушащим порошком «Вексон-АВС 25».

Область применения исследований. Решение задач повышения надежности тушения пожаров класса А МУПП и совершенствования методики оценки их огнетушащей способности.

Ключевые слова: очаг пожара, огнетушащий порошок, модуль порошкового пожаротушения, активные центры пламени, гетерогенное ингибирование, время ингибирования, нормативные значения параметров тушения.

(Поступила в редакцию 8 апреля 2022 г.)

Введение

В настоящее время основным критерием эффективности тушения пожаров различных классов модульными установками порошкового пожаротушения (МУПП) согласно СТБ 11.13.19-2010¹ и ГОСТ Р 53280.4-2009² является отсутствие повторного воспламе-

¹ Система стандартов пожарной безопасности. Установки порошкового пожаротушения автоматические модули. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 11.13.19-2010. – Введ. 20.08.10. – Минск: Госстандарт, 2010. – 18 с.

² Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 4. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования и методы испытаний. ГОСТ Р 53280.4-2009. – Введ. 18.02.09 – Москва: Стандартинформ, 2010. – 17 с.

нения модельных очагов пожаров на защищаемой площади или в защищаемом объеме в течение 10 мин.

В то же время основными характеристиками качества тушения пожаров современных автоматических установок пожаротушения (водяного, пенного) по СТБ 11.16.06-2011³ являются заданные интенсивность подачи огнетушащего вещества в зону горения и равномерность расхода вещества на тушение, при которых гарантируется тушение пожара по защищаемой поверхности.

Причинами отсутствия в действующих стандартах (отечественном и международных) нормированных значений огнетушащих концентраций порошковых составов, применяемых для тушения пожаров различных классов,^{4, 5, 6, 7} называются: недостаточная изученность физико-химических процессов тушения пламени огнетушащими порошками, дисперсная разнородность применяемых для тушения составов порошков, влияние на результат тушения условий подачи порошка в зону горения и мощности тепловыделения самих пожаров.

Тушение пожаров огнетушащим порошком имеет ряд особенностей. К ним относится в первую очередь наличие широкого спектра механизмов тушения огнетушащего порошка, в частности, теплового (охлаждение зоны горения и горючего материала), химического (гетерогенное и гомогенное ингибирование активных центров пламени), разбавляющего, изолирующего, огнепреграждающего. Другой особенностью является то, что частицы порошка не обладают «смачивающей» способностью и не накапливаются в зоне горения, а пребывают в ней ограниченное время, в результате чего основные механизмы тушения теплового и химического ингибирования активных центров пламени осуществляются во время движения частиц порошка. Эффективность тушения при этом зависит как от физико-химических характеристик частиц порошка, так и от условий тушения пожара, определяемых соотношением времени пребывания частиц огнетушащего порошка в зоне горения и характерными временами нагрева и ингибирования активных центров пламени.

Время пребывания частиц огнетушащего порошка в зоне горения определяется их скоростью в данной зоне, направлением движения и толщиной зоны горения.

Время ингибирования зависит от размеров частиц порошка их кинетических и диффузионных характеристик, а также от объемной плотности в зоне горения.

Время нагрева частиц огнетушащего порошка определяется их размерами, а также теплопроводностью и теплоемкостью.

Отсутствие контроля условий тушения пожара огнетушащим порошком (скорости частиц порошка, направления подачи и их объемной плотности в зоне горения) не позволяло однозначно оценивать результаты тушения пожара МУПП с различными пневмозагрузочными характеристиками и схемами их расположения над очагом пожара.

В связи с этим для объективной оценки огнетушащей эффективности МУПП кратковременного действия в схеме тушения локально по поверхности необходимо проведение комплекса работ по разработке методики и определению основных параметров тушения: средней интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения и среднего удельного

³ Система стандартов пожарной безопасности. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 11.16.06-2011 / ГОСТ Р 51043-2002. – Введ. 30.05.11. – Минск: Госстандарт, 2011. – 30 с.

⁴ Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems: NFPA 17. – 2021 Edition. – National Fire Protection Association, 2021.

⁵ UL Standard for Safety Fire Testing of Fire Extinguishing Systems for Protection of Commercial Cooking Equipment: UL 300. – Inc. June 10, 2019. – Underwriters' Laboratories, 2019.

⁶ UL Standard for Safety Pre-Engineered Dry and Wet Chemical Extinguishing System Units: UL1254. – Inc. Apr 03, 2019. – Underwriters' Laboratories, 2019.

⁷ Fixed firefighting systems. Powder systems. Part 1: Requirements tests methods for components: CEN EN 12416-1:2001+A2-2007. – Inc. June 20, 2007. – European Committee for Standardization, 2007.

расхода порошка на тушение при одновременном контроле условий тушения, в частности, скорости частиц порошка в зоне горения.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- собрать и откалибровать устройство определения средней скорости частиц огнетушащего порошка, выпускаемого из МУПП;
- определить режимы подачи огнетушащего порошка в зону горения и скорости частиц порошка в зоне горения, обеспечивающие тушение пожаров класса А в схеме тушения локально по поверхности;
- определить зависимости среднего времени тушения и среднего удельного расхода огнетушащего порошка на тушение модельных очагов пожаров класса А от средней интенсивности его подачи в зону горения и средней скорости частиц порошка в схеме тушения локально по поверхности;
- определить нормированные значения средней интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения, среднего удельного расхода порошка и соответствующие им средние скорости частиц порошка в зоне горения, обеспечивающие надежное тушение пожаров класса А.

Основная часть

Условия эффективного тушения пожаров класса А огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара в схеме тушения локально по поверхности. Рассмотрим типичную модель тушения пожаров класса А (например, горение древесины) локально по поверхности МУПП. Огнетушащий порошок подается на горящую поверхность по направлению близкому к нормали к фронту пламени струей либо в виде пространственного облака ограниченных размеров. В некоторый момент времени в зоне горения формируется дисперсный слой частиц порошка. При этом часть частиц порошка слоя может осесть в обуглившимся зазорах горящего материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, может отразиться от материала и снова попасть в реакционную область под действием сил гравитации или безвозвратно покинуть ее.

Тушение пожара огнетушащим порошком обеспечивается двумя основными процессами: передачей тепла частицам порошка посредством их нагрева и химическим ингибированием продуктов горения либо поверхностью частиц порошка (гетерогенное ингибирование), либо веществами, образующимися при их испарении или разложении в результате поглощения тепла (гомогенное ингибирование).

Количество тепла Q_{ext} , поглощенное частицами порошка за время выпуска τ_{ext} его из МУПП, равно [1]

$$Q_{ext} = \left[J c_p (T_g - T_p) \left(1 - (1 - \delta) \exp \left[-\frac{\tau_{int}}{\tau_{rel}} Bi \right] \right) S_{ext} + \mu \kappa \sigma T_f^4 \right] \tau_{ext}, \quad (1)$$

где T_g – средняя температура в зоне горения, К;

T_p – температура частиц порошка в момент входа в зону горения, К;

c_p – удельная теплоемкость частиц порошка, Дж/(кгК);

$J = \frac{m_p + n_p}{\tau_{ext} S_{ext}}$ – интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/м²с;

m_p – масса частиц порошка, осевших на горящем материале, кг;

n_p – масса частиц порошка, покинувших зону пожара, после упругого отражения от нагретого материала кг;

τ_{ext} – время выпуска порошка из резервуара, с;
 S_{ext} – площадь поверхности горения, м²;
 $\delta = m_p / (m_p + n_p)$ – относительная масса частиц порошка, осевших на горючем материале;
 $\tau_{\text{int}} = 2h/v$ – время взаимодействия частиц порошка с зоной горения, с;
 h – средняя толщина зоны горения (пламени), м;
 v – средняя скорость частиц порошка в момент соприкосновения с нагретым горючим материалом, м/с;
 $\tau_{\text{rel}} \sim c_p \rho d^2 / \lambda_p$ – характерное время нагрева (остывания) частиц порошка, с;
 ρ – плотность материала частиц порошка, кг/м³;
 d – характерный геометрический размер частиц порошка, м;
 λ_p – коэффициент теплопроводности материала частиц порошка, Вт/(м·К);
 T_f – температура факела пламени, К;
 μ – приведенный коэффициент поглощения слоя частиц порошка;
 κ – степень черноты пожара;
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Больцмана;
 $Bi = h_c d / \lambda_p$ (h_c – средний коэффициент конвективной теплопередачи на поверхности раздела теплового слоя и твердого тела, Вт/(м²·К)).

Параметр h_c можно оценить из соотношения для числа Нуссельта $Nu = h_c d_p / \lambda_g$ (λ_g – коэффициент теплопроводности горючего газа) при теплопередаче от нагретого слоя газа к частице порошка [2]. Число Нуссельта для тел очень малого размера равно ~ 2 [2].

Из выражения (1) следует, что количество тепла аккумулированного частицами порошка зависит в общем случае как от их теплофизических характеристик, так и от дисперсности (характерных размеров) частиц и условий подачи в зону горения. Для эффективного охлаждения зоны горения необходимо, чтобы время нахождения частиц в этой зоне τ_{int} было больше времени τ_{rel} .

Оценка времени τ_{rel} для частиц огнетушащих порошков, наиболее часто применяемых при тушении пожаров, бикарбоната натрия и моноаммонияфосфата с диаметром частиц $d \sim 50$ мкм показывает, что оно равно $1,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,2 \cdot 10^{-2}$ с соответственно. Значения чисел Био для данных сортов огнетушащих порошков при тех же диаметрах частиц порошка и средней теплопроводности нагретого (~ 700 °С) газа (воздуха) $\lambda_g = 6,71 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), равны 0,033 и 0,53 соответственно.

С учетом чисел Био значение t_{int} для эффективной передачи тепла частицам порошка должно быть больше 39 мс для частиц бикарбоната натрия и 42 мс для частиц моноаммонияфосфата.

Нагрев частиц огнетушащего порошка происходит как в зоне реакции окисления продуктов горения, так и в зоне пламени.

Эффективность гетерогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных центров пламени, оцениваемая относительным изменением их массы m/m_0 (m – масса ингибированных центров пламени, кг; m_0 – масса активных центров пламени до момента начала тушения, кг), определяется следующими соотношениями [3]:

в кинетической области протекания реакции ингибирования за время t_{int}

$$\frac{m}{m_0} = \frac{3(1-\varepsilon)}{2Fd_p} \gamma u \Delta\tau_k \left(\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau_k} - \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau_k}\right) \right] \right), \quad (2)$$

где $\Delta\tau_k$ – эффективное время длительности реакции, равное

$$\Delta\tau_k = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{\text{Nu}_d D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}; \quad (3)$$

в диффузионной области протекания реакции ингибирования за время t_{int}

$$\frac{m}{m_0} = 9 \frac{\text{Nu}_d D (1-\varepsilon)^2}{F^2 \varepsilon d_p^2} \Delta\tau_g \left(\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau_g} - \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau_g}\right) \right] \right), \quad (4)$$

где $\Delta\tau_g$ – эффективное время длительности реакции в диффузионной области, равное

$$\Delta\tau_g = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (5)$$

В соотношениях (2)–(5) применяются следующие обозначения:

γ – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью дисперсной частицы;

u – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с;

F – фактор формы частиц порошка (для шарообразных частиц $F=1$);

$\varepsilon = 1 - \rho_n/\rho$ – порозность слоя частиц порошка;

ρ_n – насыпная плотность частиц порошка в зоне горения, кг/м³;

d_p – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м;

Nu_d – критерий Нуссельта для процесса диффузии;

D – коэффициент диффузии активных частиц пламени, м²/с.

Из выражений (2), (4) следует, что, как и в случае теплового механизма тушения пожара, эффективность механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени определяется дисперсностью частиц огнетушащего порошка и условиями подачи его в зону горения, в частности, временем нахождения частиц в зоне горения t_{int} .

Эффективность механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени зависит также от порозности ε частиц порошка в зоне реакции (их насыпной плотности в данной зоне). Данный параметр влияет как на интенсивность гетерогенного ингибирования, так и на время Δt протекания реакции ингибирования при нестационарном взаимодействии.

Оценки величины $\Delta\tau_k$ для атома кислорода с молярной массой $\mu = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и диаметром $1,5 \cdot 10^{-10}$ м показали, что она составляет $\Delta\tau_k = 3,8 \cdot 10^{-5}$ с при атмосферном давлении $P = 10^5$ Па, температуре в зоне горения $T = 973$ К, диаметре частиц огнетушащего порошка $d_p = 50$ мкм и порозности $\varepsilon = 0,9$. При порозности частиц $\varepsilon = 0,5$: $\Delta\tau_k = 4,7 \cdot 10^{-7}$ с.

Сопоставление проведенных оценок характерных длительностей теплового нагрева и реакции ингибирования для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков свидетельствует о большой инерционности теплового механизма тушения пожара, что сильно снижает его вклад в результат тушения пожара при больших скоростях частиц порошка в зоне горения. Высокие скорости частиц порошка при тушении пожаров необхо-

димы для преодоления частицами (особенно с малыми размерами) сопротивления встречного потока нагретых газов очага возгорания и обеспечения в зоне горения высокой их массовой плотности.

Влияние мощности пожара на скорость частиц огнетушащего порошка, подаваемого в зону горения МУПП, требует определения оптимальных значений скоростей частиц для реализации эффективного тушения пожаров различной мощности.

Основные положения методики определения параметров тушения пожара класса А МУПП кратковременного действия в схеме тушения локально по поверхности. Для выполнения поставленных задач разработана методика проведения измерений значений параметров тушения пожаров класса А МУПП кратковременного действия в схеме тушения локально по поверхности. Она включает следующие положения.

1. Рабочие характеристики, включая показатели точности методики измерений. Рабочими характеристиками являются: средняя интенсивность подачи порошка в зону горения, средний удельный расход огнетушащего порошка на тушение пожара и средняя скорость частиц порошка в зоне горения.

Средняя интенсивность подачи огнетушащего порошка в зону горения I_{cp} , кг/с·м² определяется по формуле

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n, \quad (6)$$

где I_n – интенсивность подачи огнетушащего порошка в зону горения в n -ном эксперименте, кг/с·м²; N – число экспериментов.

При равномерном распределении огнетушащего порошка по поверхности тушения интенсивность подачи огнетушащего порошка I_n в зону горения равна

$$I_n = \frac{m_n}{S_{\text{св}} t_n}, \quad (7)$$

где m_n – масса огнетушащего порошка, израсходованного на тушение очага пожара в n -ном эксперименте, кг;

t_n – время выпуска порошка из МПП в n -ном эксперименте, с;

$S_{\text{св}}$ – площадь тушения, м².

Средний удельный расход огнетушащего вещества G_{cp} , кг/м², равен

$$G_{\text{cp}} = I_{\text{cp}} \tau, \quad (8)$$

где τ – время тушения пожара.

Средняя скорость частиц порошка в зоне горения V_{cp} , м/с, определяется по формуле

$$V_{\text{cp}} = l / \Delta t_{\text{cp}}, \quad (9)$$

где l – длина пути, проходимая частицами порошка, м;

Δt_{cp} – среднее время прохождения частицами порошка пути l , с.

Диапазоны измерений контролируемых параметров:

- интенсивность подачи огнетушащего порошка – 0,1 ÷ 10 кг/с·м²;
- удельный расход огнетушащего вещества – 0,06 ÷ 10 кг/м²;
- скорость частиц порошка в зоне горения – 0,1 ÷ 80 м/с.

Показателем точности измерений является расширенная неопределенность измерений с указанием уровня доверия и коэффициента охвата.

Относительная погрешность прямых измерений составляет не более 5 %.

Результаты измерений представляются в виде средних значений определяемых величин с указанием расширенной неопределенности измерений.

2. Оборудование и средства измерений, применяемые при определении параметров тушения. Для определения значений параметров тушения используется лабораторная установка порошкового пожаротушения (далее – ЛУПП) и устройство определения скорости фронта струи огнетушащего порошка, выпускаемого ЛУПП.

ЛУПП выполнена в виде цилиндрической емкости, образованной двумя металлическими кольцами, перемещающимися по вертикальному направляющим. Сверху установки закреплен ресивер для заполнения воздухом с заданным давлением, контролируемым манометром. Выход ресивера соединен через электромагнитный клапан с узлом крепления резервуара, заполняемым огнетушащим порошком. Под установкой расположен поддон для сбора выпущенного из резервуара огнетушащего порошка и размещения модельного очага пожара.

Технические характеристики ЛУПП:

- габариты – 2600×1050×1050 мм;
- максимальная защищаемая площадь – 0,5 м²;
- максимальный защищаемый объем – 1 м³;
- максимальная масса огнетушащего порошка, засыпаемого в резервуар, – 1 кг;
- максимальное пневматическое давление, которое обеспечивает выпуск наибольшего количества засыпаемого в резервуар огнетушащего порошка, – 1 МПа;
- объем ресивера – 1,55 дм³.

Устройство определения скорости фронта струи огнетушащего порошка включает две металлические стойки с юстировочными узлами, два лазерных источника излучения и два приемника излучения, а также широкополосный двулучевой осциллограф типа Agilent DSO 5052A с шириной полосы пропускания 500 МГц. Стойки располагаются по обе стороны ЛУПП напротив друг друга. На одной из них крепятся в юстировочных узлах, расположенных на определенном расстоянии между собой (100 ± 5 мм) друг под другом, источники излучения. На другой стойке в юстировочных узлах крепятся приемники излучения так, чтобы излучение источников попадало на приемники примерно по их центру. Приемники излучения подключаются к осциллографу.

Технические характеристики установки определения скорости порошковой струи:

- пределы измерения модуля скорости фронта струи огнетушащего порошка – 0,1 ÷ 80 м/с;
- ширина измеряемого фронта струи огнетушащего порошка – 0,2 ÷ 2 м;
- диапазон высот от уровня поверхности расположения очагов пожара, на которых производится измерение скорости фронта струи порошка, – 0,1 ÷ 2,5 м;
- относительная погрешность измерения скорости – ~4,8 %.

Скорость частиц огнетушащего порошка оценивается исходя из фиксированного расстояния между пучками лазерного излучения и регистрируемого осциллографом интервала времени между перекрытиями фронтом частиц порошка пучков лазерного излучения.

Для контроля времени тушения модельных очагов пожара и времени выпуска огнетушащего порошка используются скоростные видеокамеры с числом записи 120 кадров в 1 с.

При проведении измерений применяются и другие вспомогательные средства измерений, входящие в Государственный реестр Республики Беларусь.

3. Метод измерений. Определение параметров тушения МУПП осуществляется методом косвенных измерений на основании результатов прямых измерений величин, функционально связанных с искомыми параметрами.

Прямым измерениям подлежат:

- масса огнетушащего порошка, подаваемого в зону горения;
- время подачи порошка в зону горения;
- площадь горящей поверхности;
- время тушения пожара;
- длина пути, проходимая частицами порошка в устройстве измерения скорости фронта струи огнетушащего порошка;
- время прохождения этого пути.

4. Порядок проведения измерений. Схема измерений включает выполнение ряда процедур при проведении экспериментальных работ по определению эффективности тушения (времени тушения) модельных очагов пожаров подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения, подаваемым в зону горения ЛУПП при различных режимах тушения.

Таковыми процедурами являются:

- подготовка тестовых очагов пожара с характеристиками согласно СТБ 11.13.04-2009⁸;
- подготовка ЛУПП и установки определения скорости порошковой струи к работе;
- поджог тестового очага пожара заданного класса и контроль его свободного горения согласно СТБ 11.13.04-2009;
- контроль давления воздуха в ресивере ЛУПП, под которым огнетушащий порошок подается в зону горения;
- контроль времени подачи порошка в зону горения;
- контроль скорости частиц огнетушащего порошка вблизи зоны горения;
- контроль времени тушения модельных очагов пожаров;
- контроль равномерности подачи огнетушащего порошка в зону горения;
- составление отчета о проведенных измерениях.

5. Обработка результатов измерений. Обработка результатов измерений включает:

- определение средней массы m_{cp} огнетушащего порошка, поданного в очаг пожара, кг;
- определение среднего времени выпуска t_{cp} огнетушащего порошка из загрузочного резервуара ЛУПП, с;
- определение среднего времени тушения τ_{cp} пламенного горения модельных очагов пожаров подкласса А1, с;
- определение средней (в общем случае) площади S_{cp} тушения пожара, м²;
- определение среднего по числу проведенных экспериментов (с заданным режимом тушения) значения интенсивности I_{cp} подачи порошка в зону горения модельных очагов пожара класса А;
- определение среднего значения удельного расхода G_{cp} огнетушащего порошка на тушение модельных очагов пожаров класса А.

6. Форма представления результатов измерений. Результаты определения параметров тушения МУПП представляются в следующем виде:

$$X_{cp} \pm \Delta, \quad (10)$$

где X_{cp} – средние значения величин определяемых параметров; Δ – расширенная неопределенность измерений указанных величин.

Расширенная неопределенность измерений равна произведению суммарной стандартной неопределенности определяемых величин и коэффициента охвата k , который характеризует уровень доверия найденной стандартной неопределенности.

⁸ Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная техника. Огнетушители переносные. Общие технические условия: СТБ 11.13.04-2009. – Введ. 06.04.09. – Минск: Госстандарт, 2009. – 38 с.

По результатам проведенных измерений строятся зависимости средних значений времени тушения модельных очагов пожара класса А и удельных расходов огнетушащего порошка на тушение пожаров от средних значений интенсивности подачи порошка в зону горения.

По построенным зависимостям определяются минимальные средние значения времени тушения модельных очагов пожара класса А, удельного расхода огнетушащего порошка на тушение и соответствующее им среднее значение интенсивности подачи порошка в зону горения.

Найденные средние значения параметров тушения: интенсивности подачи порошка в зону горения и удельного расхода огнетушащего порошка, при которых время тушения модельных очагов пожара класса А минимально, принимаются в качестве нормативных значений для контроля огнетушащей способности МУПП.

Опробование методики и предварительные результаты экспериментальной оценки параметров тушения пожаров класса А с применением ЛУПП в схеме тушения локально по поверхности. Для определения значений основных параметров тушения пожара класса А1: интенсивности подачи порошка в зону горения и удельного расхода огнетушащего порошка использовались модельные очаги пожара подкласса А1 ранга 0,1А⁹.

Тушение очагов пожаров осуществлялось огнетушащим порошком марки «Вексон-АВС 25», основной компонент огнетушащего состава которого – фосфат аммония.

В ходе экспериментов производилась последовательность измерений времени тушения модельных очагов пожара для различных навесок огнетушащего порошка в выпускном резервуаре ЛУПП и различных давлений воздуха в ресивере. Выпуск порошка осуществлялся через выходное отверстие выпускного резервуара ЛУПП различных диаметров (13, 24 мм).

Скорость фронта струи порошка определялась вблизи ближней к выходному отверстию выпускного резервуара ЛУПП горячей поверхности очага пожара.

Результаты измерений параметров тушения очагов пожара подкласса А1 ранга 0,1А огнетушащим порошком «Вексон-АВС 25» в схеме тушения локально по площади представлены в таблице. При оценке интенсивности подачи порошка в зону горения площадь горения принималась равной площади проекции очага пожара на горизонтальную поверхность. Средние значения параметров тушения определялись в серии экспериментов, количеством не менее 3.

Таблица. – Параметры тушения модельных очагов пожаров подкласса А1

№ п/п	Интенсивность подачи огнетушащего порошка в зону горения ($I \pm \Delta$), кг/м ² с	Время тушения пожара ($\tau \pm \Delta$), с	Удельный расход огнетушащего порошка ($G \pm \Delta$), кг/м ²	Скорость частиц порошка в момент соприкосновения с нагретым горючим материалом ($v \pm \Delta$), м/с
1	1,59 ± 0,20	0,283 ± 0,017	0,450 ± 0,030	21,27 ± 0,46
2	2,25 ± 0,19	0,092 ± 0,017	0,200 ± 0,016	13,35 ± 0,26
3	2,87 ± 0,33	0,042 ± 0,017	0,120 ± 0,018	11,96 ± 0,28
4	2,89 ± 0,35	0,033 ± 0,017	0,095 ± 0,017	23,25 ± 0,46
5	3,23 ± 0,39	0,067 ± 0,017	0,220 ± 0,023	17,14 ± 0,22
6	6,04 ± 0,92	0,049 ± 0,017	0,290 ± 0,041	34,81 ± 0,54

По данным таблицы построены зависимости среднего значения времени тушения модельных очагов пожара подкласса А1 ранга 0,1А и среднего удельного расхода огнетушащего порошка на тушение очагов от интенсивности подачи его в зону горения. Данные зависимости представлены на рисунке 1.

⁹ См. сноску 8.

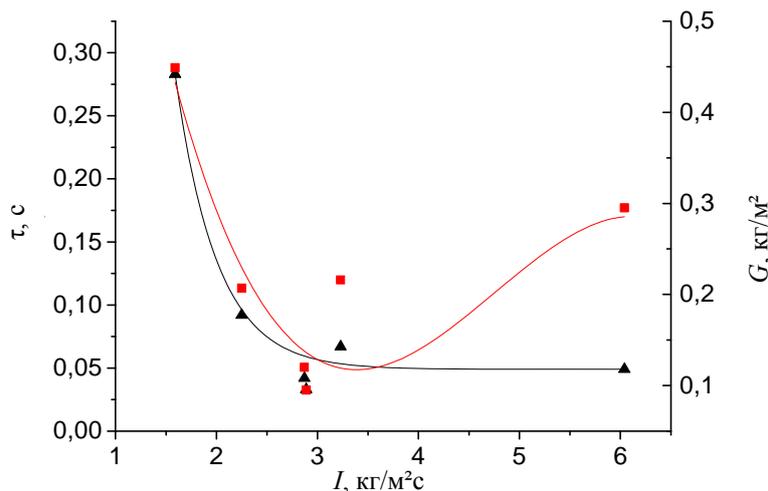


Рисунок 1. – Зависимости времени τ тушения (\blacktriangle) модельного очага пожара подкласса А1 и удельного расхода G огнетушащего порошка (\blacksquare) от интенсивности I подачи порошка в зону горения

Из рисунка 1 видно, что время тушения очага пожара уменьшается с ростом интенсивности подачи порошка в зону горения, достигает минимального значения и затем практически не изменяется при дальнейшем увеличении интенсивности подачи порошка в зону горения. Средняя интенсивность подачи порошка в зону горения, при которой время тушения очага минимально, равна $2,89 \pm 0,35$ кг/м²с. Соответствующий этой интенсивности средний удельный расход порошка на тушение пожара равен $0,095 \pm 0,017$ кг/м². Средняя скорость частиц порошка, при которой достигнуто минимальное время тушения очага, как видно из таблицы, равна $23,25 \pm 0,46$ м/с.

Таким образом, согласно разработанной методике, в качестве нормативных значений интенсивности I подачи порошка в зону горения и удельного расхода G огнетушащего порошка «Вексон-АВС 25» на тушение пожара подкласса А1 МУПП кратковременного действия в схеме тушения локально по площади можно принять следующие величины:

$$I = 2,87 \pm 0,33 \text{ кг/м}^2\text{с};$$

$$G = 0,095 \pm 0,017 \text{ кг/м}^2.$$

Обсуждение результатов

Полученные значения параметров тушения определены для случая тушения модельного очага пожара подкласса А1 наинижего ранга. Они требуют корректировки для учета изменений условий тушения при тушении пожаров большей мощности.

Из представленных в таблице значений скоростей частиц порошка следует, что явной зависимости эффективности тушения (времени тушения) пожара подкласса А1 огнетушащим порошком «Вексон-АВС 25» от скорости частиц порошка в зоне горения не наблюдается.

Данное обстоятельство можно объяснить тем, что в процессе тушения участвовал в основном гетерогенный механизм ингибирования активных центров пламени. Причем скорость процесса ингибирования была, очевидно, больше тех скоростей частиц порошка в зоне реакции окисления, которых удалось достичь на ЛУПП и при которых возможно было бы ожидать уменьшение эффективности реакции ингибирования (увеличение времени тушения). Время тушения при этом зависело только от объемной плотности частиц порошка в зоне горения.

При тушении модельных пожаров на обугленной поверхности древесины не наблюдалось наличия пленки расплава солей фосфата аммония огнетушащего порошка «Вексон-АВС 25», способствующей прекращению гетерогенного горения (тления) древесины вследствие изоляции продуктов терморазложения древесины от доступа кислорода. Тушение

скрытого горения в данном случае осуществлялось, очевидно, поглощением тепла частицами порошка, осевшими в обугленных зазорах древесины, и естественным процессом теплообмена нагретой поверхности с окружающей средой при быстром понижении ее температуры до температуры ниже температуры воспламенения горючих газов пиролиза.

Проведенные оценки толщины теплового слоя (зоны пламени) над поверхностью очага пожара, при прохождении которого частицы моноаммонияфосфата порошка могут расплавиться и полимеризоваться на поверхности горючего материала в виде пленки, показали, что при температуре внутри слоя ~ 500 °С, диаметре частиц огнетушащего порошка ~ 50 мкм и скорости их движения ~ 10 м/с она равна $\sim 0,2$ м.

Данные условия образования пленки расплава вполне могли реализоваться на практике в проводимых экспериментах тушения модельных очагов пожара подкласса А1 ранга 0,1 А. Отсутствие же ее в реальности на нагретом углистом слое древесины требует дополнительных исследований. Возможно, она появляется, но быстро разрушается в процессе дальнейшего нагрева, либо происходит интенсивное терморазложение частиц порошка с образованием свободных радикалов при попадании на сильно нагретую поверхность древесины.

Особенностью зависимостей, приведенных на рисунке, является наличие оптимального значения интенсивности подачи порошка в зону горения, при котором время тушения и удельный расход порошка на тушение очагов пожара подкласса А1 минимально. Наличие оптимального значения интенсивности подачи порошка в зону горения, позволяющего эффективно тушить пожар подкласса А1, можно объяснить существованием характерного значения объемной плотности частиц порошка в зоне горения, требуемой для тушения. Интенсивности тушения, обеспечивающие объемные плотности частиц порошка в зоне горения меньше данных характерных значений, приводят к росту времени тушения пожара или отсутствию его тушения. Интенсивности же тушения, формирующие в зоне горения объемные плотности частиц порошка больше характерных значений, не уменьшают времени тушения, а ведут только к увеличению удельного расхода порошка на тушение пожара.

Заключение

Определены условия эффективной реализации теплового и химического (гетерогенного ингибирования) механизмов тушения пожара класса А огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара в схеме тушения локально по поверхности. Они заключаются в том, что подача порошка в зону горения должна осуществляться с такой скоростью и под таким углом, чтобы время пребывания частиц порошка в зоне горения было больше характерного времени нагрева частиц порошка и химического ингибирования активных центров пламени.

Проведенные оценки характерных длительностей теплового нагрева и реакции ингибирования активных центров для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков свидетельствуют о большой инерционности теплового механизма тушения пожара. В результате этого можно предположить, что при больших скоростях частиц порошка в зоне реакции окисления и малой ее толщине практически отсутствует поглощение частицами порошка тепла и не происходит ее охлаждения. Нагрев частиц огнетушащего порошка реально может происходить только при движении их в пламени очага пожара вследствие несравненно большей толщины этой зоны горения по сравнению с толщиной зоны реакции окисления продуктов горения. Этот процесс будет приводить к охлаждению всего горючего материала вследствие траты его тепла на нагрев, плавление и испарение частиц порошка. Эффективное охлаждение зоны реакции окисления и всего горючего материала происходит в основном благодаря снижению тепловыделения в результате химического ингибирования активных частиц продуктов горения.

Разработаны основные положения методики измерений параметров тушения пожаров класса А МУПП кратковременного действия в схеме тушения локально по поверхности.

Проведены экспериментальные исследования эффективности тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком «Вексон-АВС 25» в зависимости от параметров тушения (средней интенсивности подачи порошка в зону горения, среднего удельного расхода его на тушение) и средней скорости частиц порошка вблизи зоны реакции окисления продуктов горения.

Установлено наличие оптимального значения интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара, при котором время тушения и соответственно удельный расход порошка на тушение пожара минимальны. Данное значение рекомендуется в качестве нормативного при оценке огнетушащей способности МУПП, применяемой для тушения пожаров подкласса А1 огнетушащим порошком «Вексон-АВС 25».

Влияния скоростей частиц огнетушащего порошка «Вексон-АВС 25», величины которых были реализованы в экспериментах, на проявление тепловых эффектов тушения (появления пленки расплава), а также на результаты тушения пожаров подкласса А1 не обнаружено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кицак, А.И. Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена / А.И. Кицак // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 391–401. – DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401.
2. Абдурегимов, И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения / И.М. Абдурегимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т.21, № 4. – С. 60–82. – EDN: OZZUSH.
3. Кицак, А.И. Закономерности гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в нестационарных условиях взаимодействия / А.И. Кицак, С.М. Палубец // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXII Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2020. – С. 324–331.

**Разработка методики измерений параметров тушения пожара класса А
модульной установкой порошкового пожаротушения кратковременного действия
в схеме тушения локально по поверхности**

**Development of a methodology for measuring the parameters of class A fire extinguishing
by a powder fire extinguishing modular installation of short-term action
in the scheme of extinguishing locally on the surface**

Кицак Анатолий Ильич

кандидат физико-математических наук
Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, отдел исследований автоматических систем противопожарной охраны, ведущий научный сотрудник

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь

Email: kitsak48@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7116-8156

Anatoly I. Kitsak

PhD in Physics and Mathematics Sciences
Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Department of Research of Automatic Fire Protection Systems, Leading Researcher

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus

Email: kitsak48@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7116-8156

Палубец Сергей Михайлович

Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, заместитель начальника института – начальник центра испытаний

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь

Email: 3337044@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1170-0403

Sergey M. Palubets

Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Deputy Head of the Institute – Head of the Testing Center

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus

Email: 3337044@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1170-0403

Надточий Денис Николаевич

Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, отдел исследований автоматических систем противопожарной охраны, начальник отдела

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь

Email: 3337044@gmail.com

Denis N. Nadtochiï

Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Department of Research of Automatic Fire Protection Systems, Head of Department

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus

Email: 3337044@gmail.com

Лобач Денис Сергеевич

Филиал «Институт переподготовки и повышения квалификации» государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра специальной подготовки, старший преподаватель

Адрес: д. Светлая Роща, 1,
222515, Борисовский р-н,
Минская обл., Беларусь

Email: oppippk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0618-1645

Denis S. Lobach

Branch «Institute for Retraining and Professional Development» of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Special Training, Senior Lecturer

Address: Svetlaya Roshcha village, 1,
222515, Borisov district,
Minsk region, Belarus

Email: oppippk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0618-1645

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR MEASURING THE PARAMETERS OF CLASS A FIRE EXTINGUISHING BY A POWDER FIRE EXTINGUISHING MODULAR INSTALLATION OF SHORT-TERM ACTION IN THE SCHEME OF EXTINGUISHING LOCALLY ON THE SURFACE

Kitsak A.I., Palubets S.M., Nadtochii D.N., Lobach D.S.

Purpose. Development of a methodology for measuring the parameters of extinguishing class A fire with a modular powder extinguishing system (MPES) of short-term action in the extinguishing scheme locally on the surface and experimental determination of the values of these parameters that ensure effective extinguishing of a fire of this class.

Methods. The achievement of purpose was carried out by the development of procedures for measuring the parameters of class A fire extinguishing (fire extinguishing time, intensity of the supply of extinguishing powder to the combustion zone, speed of powder particles in this zone, and specific consumption of powder for extinguishing the fire) and experimental determination of the values of these parameters in conditions close to the natural when using the MPES.

Findings. The conditions for effective extinguishing of class A fire with a general-purpose extinguishing powder with short-term effect on the fire source in the extinguishing scheme locally on the surface are determined.

A method of measuring the parameters of extinguishing fires of class A with the MPES of short-term action in the extinguishing scheme locally on the surface has been developed.

Experimental studies of the effectiveness of extinguishing class A fire with a general-purpose extinguishing powder with a short-term effect on the fire source (duration ~ 1 s) and various extinguishing modes have been carried out.

Experimental dependences of the average extinguishing time and the average specific consumption of the extinguishing powder of the «Vekson-ABC 25» type for extinguishing a model fire of subclass A1 on the average intensity of the powder supply to the combustion zone in the extinguishing scheme locally on the surface are constructed.

It has been established that there is an optimal value of the intensity of the supply of extinguishing powder to the fire source, at which the extinguishing time and, accordingly, the specific consumption of powder for extinguishing the fire are minimal. This value is recommended as a normative one when evaluating the fire extinguishing capacity of the MPES used to extinguish fires of subclass A1 with the fire extinguishing powder «Vekson-ABC 25».

Application field of the research. Solving the problems of increasing the reliability of extinguishing fires of class A by MPES and improving the methodology for assessing their extinguishing ability.

Keywords: fire source, extinguishing powder, powder extinguishing module, active flame centers, heterogeneous inhibition, inhibition time, regulatory values of extinguishing parameters.

(The date of submitting: April 8, 2022)

REFERENCES

1. Kitsak A.I. Model' teplovogo mekhanizma tusheniya požara podklassa A1 ognētushashchim poroshkom obshchego naznacheniya v usloviyakh nestatsionarnogo teploobmena [Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary Heat Exchange Conditions]. *Devices and Methods of Measurements*, 2019. Vol. 10, No. 4. Pp. 391–401. (rus). DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401.
2. Abduragimov I.M. O mekhanizme ognētushashchego deystviya sredstv požarotusheniya [About mechanisms of fire extinguishing action of fire extinguishing means]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2012. Vol. 21, No. 4. Pp. 60–82. EDN: OZZUSH.
3. Kitsak A.I., Palubets S.M. Zakonomernosti geterogennogo ingibirovaniya aktivnykh tsentrov plameni chastitsami ognētushashchego poroshka v nestatsionarnykh usloviyakh vzaimodeystviya [Regularities of heterogeneous inhibition of active flame centers by fire extinguishing powder particles in non-stationary interaction conditions]. Proc. XXVII Intern. scientific-practical. conf. «Aktual'nye problemy požarnoy bezopasnosti». Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2020. Pp. 324–331.