ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ПОЖАРОВ И АВАРИЙ

УДК 614.841

канд. физ.-мат. наук Кицак А.И., Палубец С.М., Надточий Д.Н., Лобач Д.С.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КЛАССА А УСТАНОВКОЙ ПОРОШКОВОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА В СХЕМЕ ТУШЕНИЯ ЛОКАЛЬНО ПО ПОВЕРХНОСТИ

Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, г. Минск

**Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск*

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности тушения пожаров различных классов модульными установками порошкового пожаротушения и совершенствования нормативной базы оценки их огнетушащей способности.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования эффективности тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на него частицами порошка с учетом их теплофизических и динамических характеристик.

Разработана математическая модель гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка на основе решения уравнения переноса массы активных частиц пламени при заданных краевых и начальных условиях процесса ингибирования.

Установлено, что инерционность процесса нагрева частиц порошка на 3–5 порядков больше инерционности процесса гетерогенного ингибирования активных частиц пламени, что снижает эффективность отвода тепла из зоны горения, и, соответственно, не способствует быстрому охлаждению горючего материала и изоляции его от доступа кислорода при больших скоростях частиц огнетушащего порошка в зоне горения.

Экспериментально определено значение средней интенсивности подачи порошка «Вексон-АВС 25» в зону горения, обеспечивающие эффективное тушение пожара класса А при кратковременном воздействии на него. Данные значения рекомендованы в качестве нормативного для внесения изменений в требования действующего стандарта испытаний модулей порошкового пожаротушения СТБ 11.13.19-2010.

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

Ph.D. (Phys. and Math.) A.I. Kitsak, S.M. Palubets, D.N. Nadtochii, D.S. Lobach*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF EXTINGUISHING FIRES OF CLASS A WITH THE POWDER EXTINGUISHING EQUIPMENT OF MODULAR TYPE IN THE EXTINGUISHING SCHEME LOCALLY ON THE SURFACE

The establishment «Research institute of fire safety and emergencies» of the Ministry for emergency situations of the Republic of Belarus, Minsk

** State educational institution «University of civil protection of the Ministry for emergency situations of the Republic of Belarus», Minsk*

The relevance of the work is the need to increase the reliability of extinguisping fires of various classes with modular powder extinguishing equipment and to improve the regulatory framework for assessing their extinguishing capacity.

Theoretical and experimental studies of the efficiency of extinguishing a fire with a general-purpose extinguishing powder with short-term exposure of powder particles, taking into account their thermophysical and dynamic characteristics, have been carried out.

A mathematical model of heterogeneous inhibition of active flame centers by fire extinguishing powder particles based on solving the equation of mass transfer of active flame particles under given boundary and initial conditions of the inhibition process has been developed.

It is established that the inertia of the process of heating powder particles is 3–5 orders of magnitude greater than the inertia of the process of heterogeneous inhibition of active flame particles, which reduces the efficiency of heat removal from the combustion zone, and, accordingly, does not contribute to rapid cooling of the combustible material and isolation from oxygen access at high speeds of particles of extinguishing powder in the combustion zone.

The value of the average intensity of the «Vexon-ABC 25» powder supply to the burning zone was determined experimentally, which ensures effective extinguishing of a Class A fire with short-term exposure to it. This value is recommended as a normative value for making changes to the requirements of the current standard for testing powder fire extinguishing modules STB 11.13.19-2010.

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

Введение

В настоящее время огнетушащие порошки остаются одними из наиболее эффективных и доступных средств пожаротушения. Они широко применяются в ручных, переносных огнетушителях, лафетных и модульных установках порошкового пожаротушения. Область применения огнетушащих порошков и различных систем порошкового пожаротушения, а также требования к их эксплуатационным характеристикам регулируются отдельными национальными и международными стандартами [1–6]. Однако до настояще-

го времени ни в одном из них не приводятся требования к значениям огнетушащих концентраций порошковых составов для гарантированного тушения пожара применяемыми средствами их подачи в зону горения.

Причинами отсутствия в действующих стандартах нормированных значений огнетушащих концентраций порошковых составов, применяемых для тушения пожаров различных классов, называются [7–9]: 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 огнетушащими порошками имеет ряд особенностей. Одна из них состоит в том, 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 (химическое ингибирование активных продуктов горения и охлаждение зоны горения и горючих веществ) осуществляются во время движения частиц порошка. Поскольку данные процессы происходят не мгновенно, то результат тушения зависит от времени пребывания частиц порошка в зоне горения, т.е. от их скорости. Чем меньше время взаимодействия частиц огнетушащего порошка с активными частицами пламени, тем ниже эффективность протекания механизмов тушения.

Другой особенностью является применение для тушения пожаров высокоскоростных способов доставки огнетушащего порошка в зону горения. Они реализуются различными схемами в ручных, переносных огнетушителях, а также лафетных и модульных установках порошкового пожаротушения (далее – МУПП). Необходимость обеспечения больших скоростей частиц порошка обусловлена их высокой дисперсностью и зависимостью концентрации частиц порошка в зоне горения от мощности тепловыделения очага пожара, тепловые потоки которого препятствуют попаданию малоразмерных частиц в зону реакции окисления.

Таким образов, в технологии тушения пожара порошками присутствуют противоположности: с одной стороны, необходимо обеспечить большие скорости частиц порошка для достижения достаточной для тушения пожара концентрации частиц порошка в зоне горения, с другой, чрезмерные скорости частиц порошка снижают эффективность действия основных механизмов тушения пожара.

Наиболее характерна данная проблема для случая тушения пожаров МУПП импульсного и кратковременного действия. В настоящее время указанные особенности тушения пожаров МУПП не учитываются при определении их огнетушащей способности. В то же время данные установки находят широкое применение в практике тушения пожаров.

В связи с этим представляется важным провести оценку (теоретическую и экспериментальную) влияния скорости частиц огнетушащего

порошка на эффективности тушения пожаров различных классов при кратковременном воздействии порошка на очаг пожара.

Известно [8], что режимы и способы тушения пожаров огнетушащими составами зависят от вида горения и агрегатного состояния горючих веществ. В случае тушения пожаров огнетушащим порошком общего назначения параметры тушения (концентрационные, интенсивностные) различных классов пожаров будут отличаться вследствие специфики горения веществ и особенностей проявления механизмов тушения порошков.

Учитывая тот факт, что основу производимых в настоящее время огнетушащих составов порошков составляет ограниченное число типов химических веществ (в частности, наиболее часто применяются соли бикарбонатов, фосфорноаммонийные соли и хлориды щелочных металлов), которые в своих группах мало отличаются теплофизическими и дисперсными характеристиками, представляется возможным оценить концентрационные пределы значений их огнетушащей способности, достаточные для тушения пожаров различных классов.

Целью настоящей работы является определение значений основных параметров тушения пожара класса А: средней интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения, среднего удельного расхода огнетушащего порошка на тушение пожара, обеспечивающих эффективное (с точки зрения надежности и экономности расхода порошка) тушение пожаров при кратковременном воздействии порошка типа «Вексон АВС-25» на очаг пожара в схеме тушения локально по площади, а также оценка влияния средней скорости частиц огнетушащего порошка на эффективность тушения пожара.

Модель тушения пожара класса А локально по поверхности МУПП

Согласно ГОСТ 27331-87 к пожарам класса А относят горение твердых горючих материалов (далее – ТГМ). Обширное число ТГМ составляют так называемый подкласс А1, горение которых сопровождается тлением. Примером их являются целлюлозосодержащие материалы (дерева, бумаги, хлопка и другие волокнистые вещества).

Особенностью горения веществ данного типа является то, что оно может происходить одновременно в нескольких режимах: гомогенном (пламенное горение (объемное окисление) газообразных продуктов терморазложения горючего вещества) и гетерогенном (беспламенное горение (поверхностное окисление) образовавшегося твердого углеродного остатка). Поэтому при тушении пожаров данного класса необходимо обеспечить тушение обоих видов горения.

Эффективность пожаротушения зависит не только от типа применяемого огнетушащего состава и его основных механизмов тушения, но и от способа подачи состава в зону горения. Применяют способы тушения по поверхности (локальный по поверхности) или по объему (локальный по объему) [10].

Тушение по поверхности предполагает воздействие огнетушащего состава непосредственно на горящую поверхность и создание на

площади защищаемого помещения либо части его (локальное тушение) огнетушащей концентрации применяемого огнетушащего вещества. Объемный способ тушения заключается в создании огнетушащей концентрации огнетушащего вещества в объеме защищаемого помещения или части объема (тушение локально по объему).

Рассмотрим типичную модель тушения пожаров подкласса А1 локально по поверхности МУПП. Огнетушащий порошок подается на горящую поверхность по направлению 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 обуглившихся 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.

За время пребывания частиц порошка в зоне горения, которое зависит от их скорости и эффективной толщины данной зоны, они нагреваются до определенной температуры, а также участвуют в химических процессах тушения (в основном в гетерогенном и гомогенном ингибировании активных центров пламени).

Нагрев частиц порошка приводит к проявлению двух условных форм теплового механизма тушения пожара: охлаждению зоны горения увеличением теплоотвода от горючего вещества и уменьшению теплоотдачи от него. Первая из этих форм реализуется при расходе поглощенного частицами порошка тепла на их расплав и отдачу его теплопередачей в окружающую среду. Вторая форма теплового механизма тушения пожара выражается в терморазложении частиц порошка на составляющие компоненты, которые затем связывают (ингибируют) активные центры пламени и таким образом снижают теплоотдачу горючего материала.

Химическая реакция гетерогенного ингибирования заключается в адсорбировании поверхностью частиц порошка в зоне горения активных центров пламени и их рекомбинации с другими активными частицами пламени, достигшими этой поверхности.

Процесс гомогенного ингибирования активных центров пламени происходит в объеме зоны реакции окисления и заключается в связывании активных центров (атомарного водорода и гидроксильных радикалов) гидридами щелочных металлов, образующихся при терморазложении солей огнетушащего порошка. Гидриды металлов образуются в результате взаимодействия атомов металлов, являющихся продуктами терморазложения солей огнетушащего порошка с гидроксильными радикалами продуктов горения при отдаче высвобождающейся при этом энергии взаимодействия частицам огнетушащего порошка.

Математические модели основных механизмов тушения пожара класса А огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном взаимодействии частиц порошка с активными

частицами пламени в схеме тушения локально по поверхности

Охлаждение зоны горения огнетушащим порошком происходит вследствие отбора части тепла, запасенного горючим материалом, движущимся частицам огнетушащего порошка в результате их нагрева конвекцией и поглощения ими теплоровой радиации. При условии малоинерционности процесса поглощения частицами порошка лучистого потока пламени количество аккумулированного тепла Q_{ext} в случае тушения пожаров класса А можно оценить из соотношения [11].

$$Q_{ext} = \left[Jc_p(T_g - T_p)(1-(1-\delta)\exp\left[-\tau_{\text{int}} / \tau_{rel} \right])S_{ext} + \mu\delta\sigma T_f^4 \right]\tau_{ext}, \quad (1)$$

где $J = (m_p + n_p)/(\tau_{ext} S_{ext})$ – интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/м²с; m_p – масса частиц порошка, осевших на горючем 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; c_p – удельная теплоемкость частиц порошка, Дж/(кгК); T_g – средняя температура в зоне горения, К; T_p – температура частиц порошка в момент входа в зону горения, К; $\delta = m_p/(m_p + n_p)$ – 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); $\tau_{rel} \sim c_p\rho_p d^2/\lambda_p$ – характерное время нагрева (остывания) частиц порошка, с (ρ_p – плотность материала частиц порошка, кг/м³, d – характерный геометрический размер частиц порошка, м; λ_p – коэффициент теплопроводности материала частиц порошка, Вт/(м·К)); μ – приведенный коэффициент поглощения слоя частиц порошка; δ – степень черноты пожара; $\delta = 5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Больцмана; T_f – температура факела пламени, К.

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 t_{rel}.

Оценка времени t_{rel} для частиц огнетушащих порошков, наиболее часто применяемых при тушении пожаров, бикарбоната натрия и моноаммонияфосфата с диаметром частиц $d_p \sim 50$ мкм показывает, что оно равно $1{,}3\cdot10^{-3}$ с и $2{,}2\cdot10^{-2}$ с соответственно. С учетом числа Био, входящего в экспоненциальный множитель (2), значение τ_{int} для эффективной передачи тепла частицам порошка должно быть больше 39 мс для частиц бикарбоната натрия и 44 мс для частиц моноаммо-

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

Нестационарный процесс гетерогенного ингибирования активных центров пламени происходит в каналах слоя частиц огнетушащего порошка, образованного в зоне окисления горючего газа.

Ранее в работе [12] получены соотношения для скорости реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка с применением квазистационарного метода оценки кинетики диффузии активных частиц пламени (метода равнодоступной поверхности [13]) и учетом инерционности процесса массопереноса, обусловленного конечностью времени протекания химических превращений на ингибирующей поверхности.

Представляет научный интерес получить соотношения для концентрации активных центров пламени C ингибированных частицами огнетушащего порошка, исходя из решения уравнения сохранения массы горючего газа при заданных начальных и краевых условиях ингибирования.

Запишем уравнение переноса активных центров пламени внутри канала с эквивалентным радиусом R_{eq} в цилиндрической системе координат с учетом однородности распределения частиц в объеме канала и участия их только в диффузионном движении

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial^2 r}\right), \qquad (2)$$

где $C = C(t,r)$; r – поперечная координата системы отсчета, связанной с центром канала; D – коэффициент диффузии, м^2/с.

Уравнение (2) записано в предположении малости коэффициента продольной молекулярной диффузии активных частиц пламени.

Дополним уравнение (2) граничными и начальными условиями [14]. В кинетической области протекания реакции ингибирования:

$$\left(D\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=R_{eq}} = -\left(\frac{\gamma u}{4}C\right)_{r=R_{eq}}; \qquad (3)$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; \qquad (4)$$

$$C\left(t=0, r=0\right) = C_0; \qquad (5)$$

$$C\left(t\to\infty\right) = 0. \qquad (6)$$

В диффузионной области реакции ингибирования граничные условия выражаются равенствами:

$$\left(C\left(r,t\right)\right)_{r=R_{eq}} = 0; \qquad (7)$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=0} = 0. \qquad (8)$$

Начальные условия совпадают с соотношениями (5) и (6).

В уравнениях (3)–(8) γ – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью частицы порошка; u – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с; C_0 – исходная концентрация активных частиц пламени, кг/м^3; R_{eq} – эквивалентный радиус канала слоя частиц огнетушащего порошка в зоне реакции, м.

Условия (3), (7) отражают динамику гетерогенного ингибирования активных частиц в кинетической и диффузионной областях реакции

ингибирования. Условия (4), (8) свидетельствуют о конечном значении концентрации активных частиц на оси канала. Условие (6) указывает на то, что решение (1) должно быть затухающим при больших значениях t.

Решая уравнение (3) при заданных условиях (4) - (8), получим следующие соотношения для средней массы m ингибированных центров пламени частицами порошка за время взаимодействия t_{int}:

в кинетической области реакции ингибирования

$$m_k = \frac{\gamma u}{4} S_{ch} C_0 (t_{\text{int}} - \tau_k \left(1 - \exp[-\frac{t_{\text{int}}}{\tau_k}]\right) \frac{8}{d_{eq}^2} \int_0^{d_{eq}/2} J_0(\sqrt{\frac{\gamma u}{D d_{eq}}} r)\, r dr) \ , \qquad (9)$$

в диффузионной области реакции ингибирования

$$m_d = \frac{N_u D}{d_{eq}} S_{ch} C_0 (t_{\text{int}} - \tau_d \left(1 - \exp[-\frac{t_{\text{int}}}{\tau_d}]\right) \frac{8}{d_{eq}^2} \int_0^{d_{eq}/2} J_0(\sqrt{\frac{5}{d_{eq}}} r) r dr) \ . \qquad (10)$$

В соотношениях (10)–(11) применяются следующие обозначения:

S_{ch} – эффективная площадь поверхности каналов, образованных частицами слоя порошка, равная

$$S_{ch} = SH \frac{6(1-\varepsilon)}{F d_p} \ , \qquad (11)$$

где Nu_d – критерий Нуссельта для процесса диффузии;

S – площадь основания слоя дисперсных частиц порошка в толще горючего газа, м^2;

H – высота слоя, м;

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

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

ρ_p – насыпная плотность частиц порошка в зоне горения, кг/м^3;

ρ – истинная плотность частиц порошка;

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

$d_{eq} = 2R_{eq}$ – эквивалентный диаметр канала слоя частиц порошка, равный:

$$d_{eq} = \frac{2F\varepsilon d_p}{3(1-\varepsilon)} \qquad (12)$$

$t_{\text{int}} = l_{\text{int}} / v$ – время взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени (l_{int} – эффективная длина взаимодействия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м; v – скорость частиц порошка в реакционной зоне);

τ_k – время ингибирования активных центров пламени в кинетической области протекания реакции, равное:

$$\tau_k = \frac{2 d_p \varepsilon F}{3(1-\varepsilon)\gamma u}; \qquad (13)$$

τ_d – время ингибирования активных центров пламени в диффу-

зионной области протекания реакции, равное:

$$\tau_d = \frac{4}{56,25}\frac{d_p^2}{D}\frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}. \qquad (14)$$

В стационарном режиме протекания реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка, т.е. когда $t_{\text{int}} >> \tau_k$ и τ_d, выражения (9) и (10) перепишутся в следующем виде:

$$m_k = \frac{\gamma u}{4} V C_0 \frac{6(1-\varepsilon)}{F d_p}\left(t_{\text{int}} - \tau_k \frac{8}{d_{eq}^2}\int_0^{d_{eq}/2} J_0\left(\sqrt{\frac{\gamma u}{D d_{eq}}}\, r\right) r dr\right) \qquad (15)$$

$$m_d = \frac{3}{2} N_u D V C_0 \frac{6(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon F^2 d_d^2}\left(t_{\text{int}} - \tau_d \frac{8}{d_{eq}^2}\int_0^{d_{eq}/2} J_0\left(\sqrt{\frac{5}{d_{eq}}}\, r\right) r dr\right); \qquad (16)$$

где $V = SH$ – объем слоя частиц огнетушащего порошка в зоне реакции окисления активных частиц продуктов горения.

Из полученных выражений (9), (10) для оценки масс ингибированных активных частиц в кинетической и диффузионной области протекания реакции ингибирования следует, что, как и в случае соответствующих масс, определенных по методу равнодоступной поверхности, эффективность ингибирования определяется не только физико-химическими и дисперсными характеристиками огнетушащего порошка, но и условиями тушения.

Процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше время взаимодействия t_{int} их с активными центрами пламени и чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования τ_k и τ_d.

Однако имеются существенные различия в соотношениях для оценки времени ингибирования активных центров в кинетической области процесса ингибирования. Так, время ингибирования в данной области, полученное в результате решения уравнения массопереноса активных частиц, как видно из соотношения (13), линейно зависит от эффективного диаметра частиц порошка.

В то же время оценка его способом равнодоступной поверхности [12] дает квадратичную зависимость от размера частиц порошка. Наблюдаемую разницу можно объяснить достаточной приближенностью оценки данного параметра способом равнодоступной поверхности.

В стационарном режиме протекания реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка, т.е. когда $t_{\text{int}} >> \tau_k$ и τ_d, соотношения для масс ингибированных активных частиц пламени, полученные в обоих способах их оценки, совпадают между собой.

Величины длительностей τ_k и τ_d реакций ингибирования фактически определяют границы скоростей частиц огнетушащего порошка,

при которых процесс тушения может происходить эффективно.

Оценка величины τ_d для атома кислорода с молярной массой $\mu = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и диаметром $1,5 \cdot 10^{-10}$ м в диффузионной области реакции ингибирования показала, что она составляет $\tau_d = 2,4 \cdot 10^{-5}$ с при атмосферном давлении P = 10^5 Па, температуре в зоне горения T = 973 K, диаметре частиц огнетушащего порошка d_p = 50 мкм и порозности ε = 0,9. При порозности частиц ε = 0,5: τ_d = $3,0 \cdot 10^{-7}$ с. В случае использования для тушения пожара порошка с диаметром частиц d_p = 10 мкм и порозности его ε = 0,9 величина τ_d = $1,0 \cdot 10^{-6}$ с, а при ε = 0,5 длительность реакции ингибирования равна τ_d = $1,2 \cdot 10^{-8}$ с.

Сопоставление приведенных оценок τ_{rel} и τ_d, рассчитанных при тех же значениях характерных размеров частиц (d_p = 50÷10 мкм), показывает, что инерционность процесса нагрева частиц порошка на 3–5 порядков больше инерционности процесса гетерогенного ингибирования активных частиц пламени. Это обстоятельство свидетельствует о том, что при больших скоростях движения частиц огнетушащего порошка за время их взаимодействия с зоной горения может не осуществляться эффективный отбор тепла из зоны горения и, соответственно, не происходить гомогенное ингибирование активных центров пламени и не образовываться пленка расплава порошка при тушении пожара подкласса А1. В тушении пожара преимущественно будет участвовать процесс гетерогенного ингибирования активных частиц пламени вследствие его меньшей инерционности.

Результаты экспериментальных оценок параметров тушения пожара класса А огнетушащим порошком «Вексон АВС-25» в схеме тушения локально по площади

Для оценки влияния скорости частиц огнетушащего порошка на эффективность тушения пожара класса А проведены экспериментальные исследования зависимости времени тушения модельных очагов пожара подкласса А1 ранга 0,1А [15] и удельного расхода порошка на тушение от интенсивности подачи его в зону горения. Для проведения экспериментов использовалась лабораторная установка порошкового пожаротушения (далее – ЛУПП), позволявшая подавать в очаг пожара различные массы порошка из резервуара при различных создаваемых в нем давлениях вытесняющего воздуха.

Скорость частиц порошка определялась вблизи зоны горения очага с применением устройства измерения скорости струи сыпучих материалов. Для тушения очагов пожаров использовался огнетушащий порошок марки «Вексон-АВС 25», основным компонентом огнетушащего состава которого является фосфат аммония.

Результаты исследования эффективности тушения очагов пожара подкласса А1 ранга 0,1 А огнетушащим порошком «Вексон-АВС 25» в схеме тушения локально по площади представлены в таблице и на рисунке.

Таблица. – Параметры тушения модельных очагов пожаров подкласса А1

№ п/п	$(I \pm \Delta)$, кг/м²с	$(\tau \pm \Delta)$, с	$(G \pm \Delta)$, кг/м²	$(v \pm \Delta)$, м/с
1	1,59 ± 0,2	0,283 ± 16,6	0,45 ± 0,03	21,27 ± 0,46
2	2,25 ± 0,19	0,092 ± 16,6	0,2 ± 0,016	13,35 ± 0,26
3	2,87 ± 0,33	0,042 ± 16,6	0,12 ± 0,018	11,96 ± 0,28
4	2,89 ± 0,35	0,033 ± 16,6	0,095 ± 0,017	23,25 ± 0,46
5	3,23 ± 0,39	0,067 ± 16,6	0,22 ± 0,023	17,14 ± 0,22
6	6,04 ± 0,92	0,049 ± 16,6	0,29 ± 0,041	34,81 ± 0,54

В таблице приведены значения основных параметров тушения модельных очагов пожаров (средней интенсивности I подачи порошка в очаг пожара, среднего времени τ тушения пожара, среднего удельного расхода G порошка и средней скорости v частиц порошка вблизи зоны горения), определенные при различных режимах тушения. Δ – расширенная неопределенность измерений указанных величин.

Интенсивность I подачи порошка в зону горения равнялась отношению среднего массового расхода в единицу времени огнетушащего порошка на тушение пожара к площади пожара. Площадь пожара равнялась площади проекции очага пожара на плоскость нормальную относительно направления струи подачи порошка в очаг.

Удельный расход порошка G на тушение пожара определялся произведением интенсивности I подачи порошка в зону горения на время тушения τ. Время тушения модельного очага пожара подкласса А1 ранга 0,1А в экспериментах принималось равным времени тушения пламенного горения. Это время определялось при покадровом воспроизведении зарегистрированного видео тушения очага. Критерием тушения пожара являлось отсутствие повторного воспламенения его через 10 мин после подачи порошка в очаг пожара.

По данным таблицы построены зависимости среднего значения времени тушения модельных очагов пожара подкласса А1 (1) и среднего удельного расхода огнетушащего порошка (2) «Вексон-АВС 25» на тушение очагов от интенсивности подачи его в зону горения.

Данные зависимости представлены на рисунке.

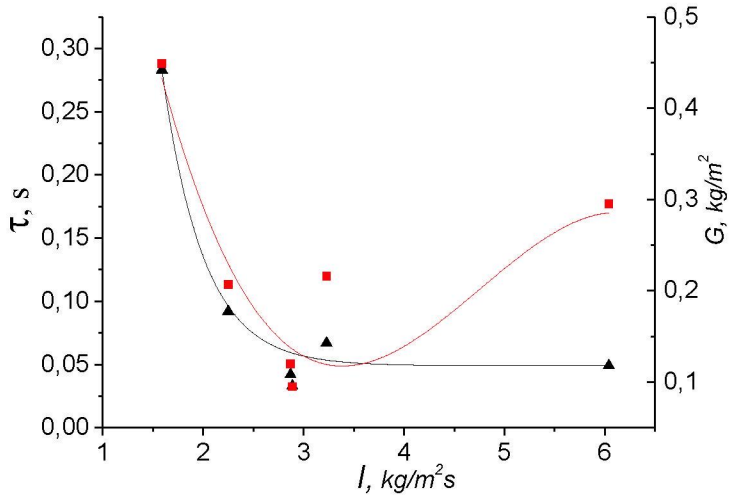

Рисунок. – Зависимости времени τ тушения (▲) модельного очага пожара подкласса А1 и удельного расхода G огнетушащего порошка (■) от интенсивности I подачи порошка в зону горения

Из рисунка видно, что время тушения очага пожара уменьшается с ростом интенсивности тушения, 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 ± 0,35) кг/м²с. Соответствующий этой интенсивности средний удельный расход порошка на тушение пожара равен (0,095 ± 0,017) кг/м². Средняя скорость частиц порошка, при которой достигнуто минимальное время тушения очага, равна (23,25 ± 0,46) м/с.

Обсуждение результатов экспериментальной оценки влияния скорости частиц огнетушащего порошка на эффективность тушения пожара

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 отсутствует.

Полученный результат можно объяснить тем, что в процессе тушения участвовал в основном гетерогенный механизм ингибирования активных центров пламени. Причем скорость процесса ингибирования была, очевидно, больше скоростей частиц порошка в зоне реакции окисления, которых удалось достичь на ЛУПП и при которых возможно было бы торможение реакции ингибирования (увеличение времени тушения). Время тушения при этом зависело только от массового расхода частиц порошка в зоне горения.

Тепловой механизм тушения пожара существенно не проявлялся, о чем свидетельствовало отсутствие пленки расплава солей моноаммонияфосфата на обугленной поверхности древесины. Тушение скрытого горения в данном случае осуществлялось, очевидно, поглощением тепла частицами порошка, осевшими в обугленных зазорах древесины,

и естественным процессом теплообмена с окружающей средой при быстром понижении ее температуры до температуры ниже температуры воспламенения горючих газов в результате прекращения пламенного горения.

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 для диаметра частиц огнетушащего порошка ~50 мкм и скорости их движения ~10 м/с она равна ~0,2 м при температуре внутри слоя ~500 °С. При движении частиц порошка со скоростью 20 м/с в тепловом слое с такой же температурой для образования пленки расплава толщина его должна быть вдвое больше.

Данные условия образования пленки расплава вполне могли реализоваться на практике в проводимых экспериментах тушения модельных очагов пожара подкласса А1 ранга 0,1А. Отсутствие же ее в реальности на нагретом углистом слое древесины требует дополнительных исследований. Возможно, она появляется, но быстро разрушается в процессе ее дальнейшего нагрева.

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 минимальны. 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 время тушения, а ведут только к увеличению удельного расхода порошка на тушение пожара.

Выводы

Разработана математическая модель гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка на основе решения уравнения переноса массы активных частиц пламени при заданных краевых и начальных условиях процесса ингибирования.

Установлено, что инерционность процесса нагрева частиц порошка на 3–5 порядков больше инерционности процесса гетерогенного ингибирования активных частиц пламени, что снижает эффективность отвода тепла из зоны горения и, соответственно, не способствует быстрому охлаждению горючего материала и изоляции его от доступа кислорода при больших скоростях частиц огнетушащего порошка в зоне горения.

Проведено экспериментальное исследование влияния скорости частиц огнетушащего порошка на эф-

фективность тушения пожара подкласса А1 и определено значение средней интенсивности подачи порошка типа «Вексон-АВС 25» в зону горения, обеспечивающие эффективное тушение пожара при кратковременном воздействии на него. Данное значение рекомендовано в качестве нормативного для внесения изменений в требования действующего стандарта испытаний модулей порошкового пожаротушения
СТБ 11.13.19-2010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems NFPA 17, National Fire Protection Association, 2013.

2. Standard for Safety UL 300: Fire Extinguishing Systems for Protection of Restaurant Cooking Areas, Fire Testing OL Underwriters Laboratories Inc. Jan 18, 2017

3. Standard for Safety UL1254: Pre-Engineered Dry Chemical Extinguishing System Units, Underwriters Laboratories Inc. Apr 03, 2019.

4. Система стандартов пожарной безопасности. Установки порошкового пожаротушения автоматические. Модули - общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 11.13.19-2010. – Введ. 20.08.2010. – Минск: Учреждение «Научно-исследовательский ин-т пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, 2010. – 18 с.

5. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащее вещество. Часть 4. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования. Методы испытаний. ГОСТ Р 53280.4-2009 – Введ. 18.02.2009 – Москва: Федеральное государственное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский и-т противопожарной обороны», 2010. – 17 с.

6. EN 12416-1:2001 Fixed firefighting systems. Powder systems. Part 1: Requirements tests methods for components. Jul. 15. 2001.

7. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.

8. Абдурагимов И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность / Fire and explosion safety – 2012. – Т. 21, № 4. – С. 60–82.

9. A Chattawayw, R Gail, D J Spring Dry Chemical Extinguishing Systems.

10. Пивоваров В.В., Цариченко С.Г. и др. Средства пожарной автоматики. Область применения. Выбор типа: Рекомендации. – М.: ВНИИПО, 2004. – 96 с.

11. 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.

12. Кицак А.И. Эффективность тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при нестационарном взаимодействии частиц порошка с горящим веществом / А.И. Кицак // Вести НАН Беларуси, Сер. физико-технических наук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 476–487.

13. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

14. Гершензон Ю.М., Гомогенные реакции первого порядка в условиях ламинарного течения / Ю.М. Гершензон, В.Б. Розенштейн, А.И. Спасский, А.М. Коган // ДАН – 1972. –Т. 205, № 4. – С. 871–874.

15. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная техника. Огнетушители переносные. Общие технические условия: СТБ 11.13.04-2009 – Введ. 06.04.2009 – Минск: Учреждение «Научно-исследовательский ин-т пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, 2009. – 38 с.

REFERENCE

1. Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems NFPA 17, National Fire Protection Association, 2013.

2. Standard for Safety UL 300: Fire Extinguishing Systems for Protection of Restaurant Cooking Areas, Fire Testing OL Underwriters Laboratories Inc. Jan 18, 2017

3. Standard for Safety UL1254: Pre-Engineered Dry Chemical Extinguishing System Units, Underwriters Laboratories Inc. Apr 03, 2019.

4. Sistema standartov pojarnoi bezopasnosti. Ustanovki poroshkovogo pojarotusheniya avtomaticheskie. Moduli. Obshie tekhnicheskie usloviya. Metodi ispitanii: STB 11.13.19-2010 – Vved. 20.08.2010 – Minsk: Uchrejdenie “Nauchno-issledovatel’skii institute pojarnoi bezopasnosti i chrezvichainikh situacii” MCHS Respubliki Belarus, 2010. – 18 s.

5. Ustanovki pojarotusheniya avtomaticheskie. Ognetushachie veschestvo. Chast’ 4. Poroshki ognetushachie obchego naznacheniya. Obshie tekhnicheskie trebovaniya. Metodi ispitanii. GOST R 53280.4-2009 – Vved. 18.02.2009 – Moskva: Federal’noe gosudarstvennoe uchrejdenie “Vserosiiskii ordena” Znak Pocheta” nauchno-issledovatel’skii institute protivopojarnoi oboroni 2010. – 17 s.

6. EN 12416-1:2001 Fixed firefighting systems. Powder systems. Part 1: Requirements tests methods for components. Jul. 15. 2001.

7. Baratov A. N. Gorenie – Pojar – Vzriv – Bezopasnost’ / A. N. Baratov – Moskow, FGU VNIIPO MCHS ROSSII, 2003, 364 s.

8. Abduragimov I. M. Oh mehanizme ognetushashego deistviya sredstv pojarotusheniya / I.M. Abduragimov // Pozharovzryvobezopasnost'. –2016. – T.25, № 2. – S. 52 - 56 .

9. A Chattawayw, R Gail, D J Spring Dry Chemical Extinguishing Systems.

10. Pivovarov V.V., Carichenko S.G., et all. Sredstva pojarnoi avtomatiki. Oblast’ primeneniya. Vibor tipa.: Rekomendacii. – M.: VNIIPO, 2004. – 96 s.

11. Kitsak A.I. Model’ teplovogo mekhanizma tusheniya pojara podklassa A1 ognetushachim poroshkom obchego naznacheniya v usloviyakh nestacionarnogo teploobmena / A.I. Kitsak // Pribori I metodi izmerenii. – 2019. – T. 10, № 4 – S. 391–401.

12. Kitsak A.I. Effektivnost’ tusheniya pojara ognetushachim poroshkom obchego naznacheniya pri nestacionarnom vzaimodeistvii chastic poroshka s goryachem veschestvom / A.I. Kitsak //Vesti NAN Belarusi, Ser.

fiziko-matemat. nauk. – 2020. – T. 65, № 4. – S. 476–487.

13. Frank-Kamenetski D.A. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetiki. – M.: Nauka, 1987. – 502 s.

14. Gershenzon Y.M. Gomogennie reakcii pervogo poryadka v usloviyakh laminarnogo techeniya / Y.M. Gershenzon, V.B.Rozenshtein, A.P. Spasskii, A.M. Kogan // Dokladi Akademii nauk SSSR. – 1972. – T.205, №4. – S. 871–874.

15. Sistema standartov pojarnoi bezopasnosti. Pojarnaya tekhnika. Ognetushiteli perenosnie. Obshie tekhnicheskie usloviya: STB 11.13.04-2009 – Vved.06.04.2009. – Minsk: Uchrejdenie "Nauchno-issledovatel'skii institute pojarnoi bezopasnosti i chrezvichainikh situacii" MCHS Respubliki Belarus, 2009. – 38 s.