

УДК 614.841

Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена

А.И. Кицак

*НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь*

Поступила 26.02.2019

Принята к печати 01.09.2019

Целью работы являлась разработка модели теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка при нестационарном теплообмене для выявления оптимальных условий тушения порошками пожаров подкласса А1.

Достижение поставленной цели осуществлялось методом экспериментального и математического моделирования процесса тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара. Получены экспериментальные зависимости времени тушения и удельного расхода огнетушащего порошка от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении пожара подкласса А1 локально по площади и локально в ограниченном объёме.

Анализ полученных закономерностей тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг возгорания показал наличие оптимальной величины интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону пожара, при которой реализуется минимальный удельный расход порошка на тушение пожара. Наличие данного оптимума связано с инерционностью теплового механизма тушения пожара подкласса А1 порошками вследствие конечности времени передачи тепла, запасённого при пожаре, частицам огнетушащего порошка и ограниченности времени взаимодействия частиц с горючим материалом.

Проведён теоретический анализ процесса тушения пожара по площади с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка при нестационарном теплообмене. Результаты анализа качественно согласуются с результатами экспериментального изучения закономерностей тушения по площади модельных очагов пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения.

Ключевые слова: пожар подкласса А1, огнетушащий порошок, нестационарная теплопередача, постоянная времени инерционности процесса, время взаимодействия.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Адрес для переписки:

А.И. Кицак
НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
МЧС Республики Беларусь,
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Address for correspondence:

A.I. Kitsak
Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltys str., 183a, Minsk 220046, Belarus
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Для цитирования:

А.И. Кицак.
Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 391–401.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

For citation:

A.I. Kitsak.
[Model of Thermal Mechanism of Subclass А1 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 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary Heat Exchange Conditions

A.I. Kitsak

Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltys str., 183a, Minsk 220046, Belarus

Received 26.02.2019

Accepted for publication 01.09.2019

Abstract

The aim of the paper was to develop a model of thermal extinguishing mechanism using dry chemical powder taking into account the inertia of heat transfer to powder particles during unsteady heat exchange to identify the optimal conditions for extinguishing of A1 class fires with powders.

The method of experimental and mathematical modelling of fire extinguishing process using dry chemical powder with short-term effect on the fire was used to achieve the goal. The experimental dependences of the extinguishing time and unit consumption of the extinguishing powder on the intensity of the powder supply to the combustion zone in extinguishing of subclass A1 fire in same area and in a limited volume were obtained. The mathematical model of a thermal extinguishing mechanism using dry chemical powder has been developed, taking into account the inertia of heat transfer to powder particles during unsteady heat exchange.

Analysis of the regularities of extinguishing the subclass A1 fire using powder with a short feeding it into the fire indicates the presence of optimum values of unity consumption of powder on the fire from the intensity of feeding it into the fire. The presence of this optimum is due to the inertia of extinguishing the subclass A1 fire using powder due to the finiteness of the heat transfer time to the particles of the extinguishing powder and the limited time of interaction of particles with the combustible material.

The theoretical analysis of the fire extinguishing process over the area taking into account the inertia of heat transfer to the powder particles at non-stationary heat exchange are carried out. The results of the analysis are in qualitative agreement with the results of the experimental study of the regularities of extinguishing of model fire foci of subclass A1 with General-purpose fire extinguishing powder.

Keywords: A1 subclass fire, dry chemical powder, non-stationary heat exchange, inertia process time constant, interaction time.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Адрес для переписки:

А.И. Кицак
НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
МЧС Республики Беларусь,
ул. Сольтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Address for correspondence:

A.I. Kitsak
Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltys str., 183a, Minsk 220046, Belarus
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Для цитирования:

А.И. Кицак.
Модель теплового механизма тушения пожара подкласса
А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях
нестационарного теплообмена.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 391–401.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

For citation:

A.I. Kitsak.
[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 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Введение

Особенностью тушения пожаров подкласса А1 огнетушащими порошками общего назначения является возможность повторного воспламенения горючего вещества после воздействия порошка. Повторное воспламенение происходит вследствие появления скрытого горения (тления) несгоревших остатков целлюлозосодержащих материалов, которое возникает благодаря большому количеству тепла, аккумулированному в них, и наличию кислорода, содержащегося в порах данных материалов.

Задачей тушения пожаров подкласса А1 является подавление как пламенного горения, так и характерного для них скрытого горения (тления). Первая часть этой задачи легко решается огнетушащими порошками благодаря наличию в них гомогенного и гетерогенного механизмов ингибирования (прерывания) цепных реакций горения вещества. Проблема состоит в подавлении скрытого горения. Данный тип горения может быть прекращён либо изолированием горючего материала от доступа кислорода, либо эффективным охлаждением его.

При тушении углеродосодержащего горючего материала порошками рекомендуется применять огнетушащие порошки на основе фосфорно-аммонийных солей, способных при нагревании образовывать на обгорелой углеродистой поверхности тонкую плёнку расплава полифосфатов, изолирующую углеводородный состав от доступа кислорода. Данный процесс сопровождается также охлаждением горючего материала вследствие траты части тепла на нагрев, плавление и испарение частиц порошка, попавших на горячий углистый слой.

Условия протекания и эффективность различных механизмов тушения пожаров огнетушащими порошками (охлаждение зоны горения уменьшением теплоотдачи от него или увеличением теплоотвода от горючего вещества) изучались в основном в задачах тушения порошками горения газов и жидкостей [1–2].

Оценки вклада теплового механизма в тушение газов, приведённые в работах [1, 3], показали, что он отбирает от пламени $\approx 15\%$ тепла. В этих же работах указывается на важность учёта при оценке эффективности теплового механизма тушения пламени времени взаимодействия частиц порошка с фронтом пламени в связи с инерционностью передачи тепла.

Анализ литературных данных по исследованию эффективности тушения порошками пожаров подкласса А1 показал, что данная проблема малоизученна. Малочисленные исследования по данной тематике касались экспериментального определения времени повторного воспламенения древесины после воздействия водных и гелеобразующих огнетушащих сред заданного удельного веса [3]. В работе [4] рассмотрена тепловая модель тушения огнетушащим порошком твёрдых горючих материалов (ТГМ) при стационарном теплообмене между нагретой поверхностью горячего материала и поверхностью частиц порошка. Практически не затрагивались вопросы поиска условий и технологии тушения пожаров класса А1 огнетушащими порошками при ограниченных временах воздействия на горючий материал, например, в случае тушения пожаров подкласса А1 широко используемыми в настоящее время модульными установками порошкового пожаротушения (УПП).

В связи с вышеизложенным и отсутствием целенаправленных исследований в области применения порошков для тушения пожаров подкласса А1 при кратковременном воздействии на очаг возгорания, актуальным является определение оптимальных режимов подачи порошка в очаг пожара для эффективного тушения пожара. Поскольку стадия охлаждения горючего материала (с образованием изолирующей плёнки расплава или без неё) является достаточным условием тушения пожаров подкласса А1, важным является также разработка модели теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка при нестационарном теплообмене с целью определения оптимальных условий подачи порошка в очаг пожара и теплофизических характеристик частиц порошка, обеспечивающих эффективное тушение пожара.

Результаты экспериментальных исследований эффективности тушения пожара подкласса А1 по площади и в объёме огнетушащим порошком общего назначения при различных режимах подачи его в зону пожара

Различают два основных способа тушения пожаров огнетушащими порошками: тушение пожара по защищаемой площади и в защищаемом объёме. Отличие данных способов состоит

в том, что в первом случае создаётся огнетушащая концентрация порошка, способная потушить пожар в любой точке защищаемой площади, а во втором – в любой точке защищаемого объёма. Под защищаемой площадью понимается вся площадь помещения, занимаемая пожарной нагрузкой, либо часть её (тушение локально по площади). Защищаемый объём – это весь объём помещения, в котором расположена пожарная нагрузка, или часть объёма, занимаемая пожарной нагрузкой (тушение локально по объёму).

Для исследования эффективности тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения была изготовлена лабораторная установка, моделирующая условия тушения пожара модулями порошкового пожаротушения кратковременного воздействия.

Установка была выполнена в виде цилиндрической ёмкости, образованной двумя металлическими кольцами, перемещающимися по вертикальным направляющим. Сверху установки крепился ресивер для накопления воздушной смеси с определённым давлением. Выход ресивера соединялся через электромагнитный клапан с узлом крепления резервуара с огнетушащим порошком. Под установкой располагался поддон для сбора выпущенного из резервуара огнетушащего порошка и размещения модельного очага пожара. Процесс выпуска порошка заданной массы из выходного отверстия резервуара регистрировался скоростной видеокамерой через смотровое окно установки.

Максимальное давление воздуха, создаваемое в ресивере установки, равнялось 1 МПа. Максимальные защищаемые площадь и объём установки равны $0,5 \text{ м}^2$ и 1 м^3 соответственно.

В ходе экспериментов исследовались зависимости времени тушения модельного очага пожара подкласса А1 и удельного расхода на тушение огнетушащего порошка от интенсивности подачи его в зону горения при тушении пожара локально по площади и локально в объёме.

Тушение пожара локально по площади осуществлялось, когда нижнее кольцо установки было приподнято вверх и струя порошка направлялась непосредственно в очаг пожара. При тушении пожара локально по объёму подвижное кольцо установки опускалось до соприкосновения с поддоном. Подача порошка в закрытый объём производилась через специальные

распылители, позволявшие быстро заполнить порошком весь объём установки.

Для проведения исследований использовался модельный очаг пожара ранга 0,1А по ГОСТ Р 51057-2001. Он располагался на подставке высотой ≈ 200 мм непосредственно под выходным отверстием резервуара УПП с огнетушащим порошком. Зажигание очага пожара осуществлялось по методике ГОСТ Р 51057-2001. Более подробная информация о методике проведённых экспериментальных исследований отражена в работе [5].

Тушение пожара осуществлялось огнетушащим порошком марки «Вексон АВС-25». В ходе экспериментов контролировалась температура деревянных брусков, расположенных в верхнем и нижнем рядах модельного очага пожара. Контроль температур осуществлялся двумя измерителями-регуляторами «Сосна-002» ТПЗ*ХА.

После подачи с заданным давлением огнетушащего порошка определённой массы в зону очага пожара фиксировалось время повторного воспламенения очага либо время его тушения. Время повторного воспламенения приравнивалось промежутку времени от момента подачи порошка в очаг пожара до появления повторного воспламенения. В отсутствие повторного воспламенения очаг пожара считался потушенным. Время тушения приравнивалось сумме времени подачи порошка в очаг пожара и времени остывания горючего материала. Время остывания горючего материала отсчитывалось от момента прекращения пламенного горения до времени, когда температура горючего материала снижалась до температуры начала его пиролиза (≈ 200 °С для древесины).

Результаты исследования эффективности тушения очагов пожара ранга 0,1А в зависимости от интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения при тушении по площади и в объёме представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Кривые 1 на рисунках отображают зависимости времени тушения пожаров τ от интенсивности подачи огнетушащего порошка J в зону горения. Видно, что время тушения пожара в начале кривых быстро уменьшается с увеличением интенсивности подачи порошка, а затем стабилизируется.

Кривые 2 характеризуют зависимости удельного расхода порошка G , затраченного на тушение пожара, от интенсивности подачи его в зону горения.

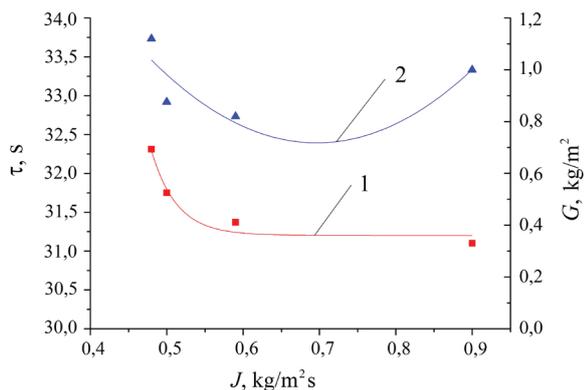


Рисунок 1 – Зависимость времени тушения (1) и удельного расхода огнетушащего порошка (2) от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении модельного очага пожара ранга 0,1А локально по площади

Figure 1 – Dependence of the extinguishing time (1) and specific flow rate of fire extinguishing powder (2) on the intensity of powder supply to the combustion zone when extinguishing the source model of 0.1A fire on the surface

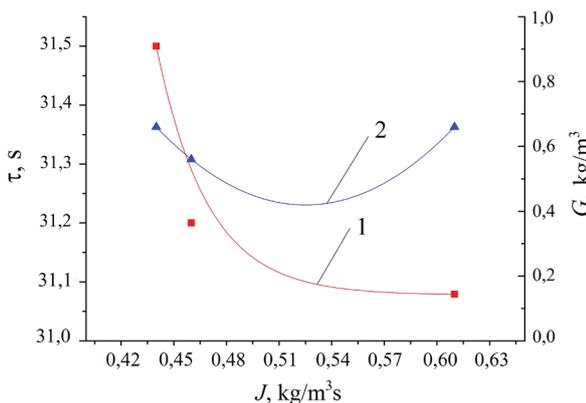


Рисунок 2 – Зависимость времени тушения (1) и удельного расхода огнетушащего порошка (2) от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении модельного очага пожара ранга 0,1А в объёме

Figure 2 – Dependence of the time of (1) and the specific consumption of fire extinguishing powder (2) from a flow rate of powder in the combustion zone under simulation of the rank of 0.1A fire extinguish in the volume

Из вида данных зависимостей следует наличие экстремального (минимального) значения удельного расхода, применяемого для тушения очага пожара 0,1А огнетушащего порошка. При тушении пожара по площади это значение равно $\approx 0,8 \text{ кг/м}^2$ при интенсивности подачи, близкой к $0,6 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$. В случае тушения очага пожара данного ранга в объёме минимальное значение удельного расхода порошка, требуемое для тушения пожара,

равно $\approx 0,45 \text{ кг/м}^3$ и реализуется при интенсивности подачи порошка в зону горения $0,52 \text{ кг/(м}^3\text{с)}$.

Полученный результат отражает проявление в схеме тушения пожара подкласса А1 порошковыми системами с ограниченным временем воздействия классической закономерности, выражающейся в наличии оптимальной интенсивности подачи огнетушащего вещества (пены, мелкодисперсной воды, огнетушащих газов) в зону очага возгорания, при которой обеспечивается минимальный удельный расход его на тушение пожара [6–8].

Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 по площади огнетушащим порошком при кратковременном воздействии его на очаг пожара

Как указывалось ранее, при тушении пожаров подкласса А1 огнетушащими порошками проявляется несколько механизмов тушения. Это гомогенное и гетерогенное ингибирование пламенного горения в результате разбавления продуктов горения элементами терморазложения частиц порошка и прерывания цепных реакций окисления вследствие восстановления активных окислителей на поверхности частиц порошка. Наряду с данными механизмами присутствует также механизм охлаждения зоны реакций вследствие поглощения тепла частицами порошка.

Длительность процесса гетерогенного ингибирования активных центров пожара очень мала. Она составляет $\approx 10^{-4} \text{ с}$ [1]. Поэтому тушение пламенного горения происходит за доли секунды при попадании частиц порошка в реакционную зону. За это время температура в зоне химических реакций падает ниже $700 \text{ }^\circ\text{C}$. При этих значениях температуры резко снижается вероятность протекания цепных реакций горения и, следовательно, практически прекращается действие гетерогенного механизма тушения пожара. Дальнейшее снижение температуры горючего материала до температуры потухания ($\approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$) происходит в основном в результате поглощения тепла частицами порошка, сопровождающегося их испарением (гомогенным ингибированием), образованием изолирующей пленки расплава порошка либо конвективным теплообменом нагретых частиц порошка с окружающей средой. Можно заключить с высокой степенью достоверности, что основные характеристики тушения пожара (время тушения, удельный расход порошка) будут определяться эффек-

тивностью поглощения тепла частицами порошка, как процесса более медленного и теплоёмкого.

Характерной особенностью протекания теплового механизма тушения пожаров подкласса А1 при использовании для тушения модульных УПП является проявление инерционности передачи тепла частицам порошка вследствие ограниченности времени пребывания их в зоне конвективного теплообмена (тепловом слое).

Учёт инерционности особенно важен в случае тушения пожаров ТГМ модульными УПП импульсного и кратковременного действия. Как известно, время подачи огнетушащего порошка в зону горения меньше 1 с для модульных УПП импульсного типа и меньше 10 с в случае применения модульных УПП кратковременного воздействия. Скорости частиц порошка, истекающие из таких установок, могут составлять при достижении зоны горения десятки метров в секунду.

При попадании частиц огнетушащего порошка в очаг пожара часть из них оседает в обугленных зазорах горючего материала, а часть упруго отражается от ТГМ и выносится из зоны пожара. Отраженные частицы не успевают аккумулировать за время взаимодействия с горючим материалом максимальное количество теплоты вследствие конечности скорости переноса тепла. Чем больше скорость частиц огнетушащего порошка, т. е. чем больше интенсивность подачи порошка в зону горения, тем быстрее частицы порошка покидают зону горения, и тем меньшее количество поглощённого тепла уносят. Данная особенность приводит к необходимости увеличения расхода порошка для тушения пожара ТГМ при больших интенсивностях воздействия на очаг пожара, и, очевидно, является одной из причин наличия наблюдаемого в экспериментах оптимального значения интенсивности подачи порошка в зону горения, при котором на тушение пожара израсходуется минимальное количество огнетушащего порошка.

Считая, что основные параметры тушения пожаров подкласса А1 огнетушащим порошком определяются эффективностью протекания теплового механизма тушения, рассмотрим закономерности процесса тушения горючего материала охлаждением с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка в способе тушения по площади.

Тепловой механизм тушения пожара порошком заключается в передаче тепла Q_{acc} , запасённого горючим материалом, частицам огнетушащего порошка. Это тепло тратится на нагрев

частиц порошка, их плавление и испарение. Математически условие тушения пожара запишется в виде:

$$Q_{acc} = Q_{abs} \quad (1)$$

где Q_{abs} – количество теплоты, поглощённой частицами порошка, Дж.

Будем считать очаг пожара потушенным, если температура его в результате поглощения тепла частицами порошка понизится до температуры пиролиза древесины T_{pyr} .

Выразим Q_{acc} через составляющие компоненты тепла очага пожара.

Будем рассматривать так называемый внешний пожар (пожар в открытом пространстве) [4]. Для него основными компонентами тепла являются:

– Q_{con} – количество теплоты, запасённое в слое ТГМ, прогревом до температуры, выше температуры выхода горючих газов;

– Q_{pyr} – количество тепла, запасённого горючим материалом в результате реакции пиролиза;

– Q_{rad} – количество тепла, аккумулированное горючим материалом в результате поглощения им отражённого в его сторону частицами огнетушащего порошка, движущимися к очагу пожара, части лучистого потока пламени очага пожара.

Для внутреннего пожара необходим также учёт тепла, передаваемого горючему материалу конвекцией и излучением от нагретых конструкций и оборудования помещения.

При сделанных уточнениях выражение (1) переписывается в виде:

$$Q_{acc} = Q_{con} + Q_{pyr} + Q_{rad} \quad (2)$$

Представим компоненты тепла в явном виде через физические величины, характеризующие процесс теплопередачи.

Среднее количество запасённого конвективного тепла Q_{acc} , исходя из линейного закона роста температуры, можно оценить по формуле:

$$Q_{acc} = \psi c_p \frac{(T_{sur} - T_{pyr})}{2} S_{sur} \tau_{acc} \quad (3)$$

где ψ – удельная массовая скорость выгорания материала, кг/(м²с); c_p – удельная теплоёмкость продуктов горения древесины ≈ 1470 Дж/(кгК); T_{sur} – температура поверхности горения $\approx (870-970)$ К (для древесины); T_{pyr} – температура пиролиза материала $\approx (470-570)$ К (для древесины); S_{sur} – площадь поверхности горения; τ_{acc} – время

аккумуляции тепла от момента достижения температуры T_{pyr} до начала тушения.

Учитывая данные из практики, что удельная экзотермическая теплота при пиролизе древесины составляет $\approx 6\%$ Q_{lhv} , где Q_{lhv} – низшая теплота сгорания древесины, можно оценить общее количество тепла Q_{pyr} из соотношения:

$$Q_{pyr} = 0,5\psi 0,06Q_{lhv}S_{sur}\tau_{acc}. \quad (4)$$

Исходя из закона Стефана-Больцмана,

$$Q_{rad} = k\varepsilon\sigma T^4 S_{sur}\tau_{exp}, \quad (5)$$

где k – приведённый коэффициент рассеяния лучистого потока слоем частиц порошка в направлении очага пожара; $\varepsilon \approx 0,85$ – степень черноты пожара; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Больцмана; T – температура факела пламени, К; τ_{exp} – время выпуска порошка из резервуара.

Определим количество теплоты Q_{abs} , поглощаемой частицами порошка.

Это тепло можно представить в виде суммы теплоты Q_{con} , переданной частицам порошка конвекцией и теплопроводностью в результате попадания на горящую поверхность, и теплоты Q_{labs} , аккумулированной частицами порошка на пути к очагу пожара при поглощении ими лучистого потока, излучаемого пламенем пожара.

Тепло Q_{con} в свою очередь можно представить в виде суммы теплоты Q_{rem} , переданной частицам порошка конвекцией и теплопроводностью при отражении их от горящего материала за пределы очага пожара, и теплоты Q_{set} , аккумулированной частью частиц порошка, осевших на горячей поверхности.

Вначале оценим величину тепла Q_{rem} , поглощённого частицами порошка за время взаимодействия τ_{in} их с горящим материалом и уносимого за пределы очага пожара в результате отражения частиц от данного материала.

Поскольку процесс взаимодействия частиц порошка с горящим материалом нестационарен вследствие конечности времени передачи тепла, запишем закон передачи тепла частицам порошка теплопроводностью и конвекцией в дифференциальной форме:

$$Q_{rem} = c_{pow}m_{rem}(T_{sur} - T_{par}) - \tau_{cons} \frac{\partial Q_{rem}}{\partial t}, \quad (6)$$

где c_{pow} – удельная теплоёмкость частиц порош-

ка, Дж/(кг·К); m_{rem} – масса частиц порошка, покидающих зону пожара, после упругого отражения от нагретого материала, кг; T_{par} – температура частиц порошка в момент взаимодействия с горящим материалом, К; τ_{const} – постоянная времени инерционности процесса (характерное время образования и рассасывания температурных неоднородностей вещества), с.

Величина τ_{const} связана с теплофизическими характеристиками вещества соотношением [9]:

$$\tau_{const} \sim \frac{c\rho l^2}{\lambda}, \quad (7)$$

где c – удельная теплоёмкость материала; ρ – плотность материала, кг/м³; l – характерный геометрический размер теплоактивной системы, м; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Интегрируя уравнение (6) в пределах времени от 0 до τ_{in} , получим, при условии, что в начале взаимодействия ($t = 0$) величина $Q_{rem} = 0$ и термическое сопротивление поверхности частиц порошка равно конвективному тепловому сопротивлению теплового слоя горящего материала, следующее выражение для Q_{rem} :

$$Q_{rem} = c_{pow}m_{rem}(T_{sur} - T_{par})(1 - \exp\left[-\frac{\tau_{in}}{\tau_{const}}\right]). \quad (8)$$

Величина $\tau_{in} \sim 2h/v$, где h – толщина теплового пограничного слоя, в котором происходит передача тепла частицам порошка; v – скорость частиц порошка в момент соприкосновения с нагретым горящим материалом.

Тепло Q_{set} , поглощаемое частицами порошка, осевшими на горящем материале, равно:

$$Q_{set} = c_{pow}m_{set}(T_{sur} - T_{par}), \quad (9)$$

где m_{set} – масса осевших частиц.

Тепло Q_{labs} в общем виде можно представить формулой:

$$Q_{labs} = \mu\varepsilon\sigma T^4 S_{sur}\tau_{exp}, \quad (10)$$

где μ – приведённый коэффициент поглощения слоя частиц порошка.

Общая масса частиц, вбрасываемых в зону горения, равна, $m_{set} + m_{rem}$.

С учетом формул (2), (5), (8)–(10) уравнение (1) теплового баланса тушения пожара запишется в виде:

$$Q_{pyr} + Q_{con} = \left[JA_{pow}(T_{sur} - T_{par})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{v\tau_{const}}\right])S_{sur} - (k - \mu)\varepsilon\sigma T^4 S_{sur} \right] \tau_{exp}, \quad (11)$$

где $eJ = \frac{m_{set} + m_{rem}}{\tau_{exp} S_{sur}}$ – интенсивность подачи

порошка в зону горения; $\delta = \frac{m_{set}}{m_{set} + m_{rem}}$.

Определим время тушения пожара τ_{ext} , как величину, равную:

$$\tau_{ext} = \tau_{exp} + \tau_{cool}, \quad (12)$$

где τ_{cool} – характерное время остывания горюче-

го материала, равное промежутку времени от момента прекращения подачи порошка до времени, когда температура материала снижается до температуры начала его пиролиза. При охлаждении древесины водой оно равно ≈ 20 с [2]. В экспериментах по тушению древесины порошком «Вексон АВС-25» оно принималось равным ≈ 30 с.

С учётом (11) и (12) получим для оценки следующее уравнение:

$$\tau_{ext} = \frac{(Q_{pyr} + Q_{con})}{Jc_{pow}(T_{sur} - T_{pat})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{\nu\tau_{cont}}\right])S_{sur} - (k - \mu)\epsilon\sigma T^4 S_{sur}} + \tau_{cool}. \quad (13)$$

Определим второй важный параметр тушения пожара – удельный расход огнетушащего по-

рошка G на тушение пожара. Для этого умножим выражение (13) на J . Имеем:

$$G = J\tau_{ext} = \frac{J(Q_{pyr} + Q_{con})}{Jc_{pow}(T_{sur} - T_{pat})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{\nu\tau_{cont}}\right])S_{sur} - (k - \mu)\epsilon\sigma T^4 S_{sur}}. \quad (14)$$

В выражении (14) слагаемое Jc_{pow} не учитывается, поскольку τ_{cool} – это время остывания горючего материала после прекращения подачи порошка в зону горения.

Соотношения (13) и (14) при стационарном теплообмене $\tau_{in} \gg \tau_{const}$ совпадают по структуре с выражениями для параметров τ_{ext} и G , приведёнными в работе [4], для данного режима тушения пожара ТГМ огнетушащим порошком общего назначения.

Анализ результатов теоретического описания теплового механизма тушения по площади пожара подкласса А1 огнетушащим порошком при кратковременном воздействии его на пожар

Проведём анализ полученных зависимостей времени тушения пожара и удельного расхода порошка на тушение пожара от его теплофизических характеристик, режимов подачи в зону горения и условий взаимодействия с горючим материалом.

Из структуры выражения (13) следует, что время тушения пожара при постоянных его тепловых характеристиках зависит от интенсивности подачи J огнетушащего порошка в зону горения и соотношения времен τ_{in} и τ_{const} , входящих в экспоненциальный множитель при J .

Рассмотрим влияние инерционности теплоактивной системы (частиц порошка) на перенос в ней тепла и соответственно на время тушения пожара.

При большой скорости переноса тепла в частицах порошка, т. е. когда $\tau_{const} \rightarrow 0$, экспоненциальный член в (13) также стремится к нулю. В отборе тепла эффективно участвуют все частицы порошка, взаимодействующие с нагретым горючим материалом, т. е. те, которые осели на горючем материале, и которые отразились от него. Реализуется стационарный режим тушения пожара. Структура выражений (13) и (14) совпадает в этом случае со структурой выражений для данных параметров, приведённых в работе [4]. С увеличением интенсивности подачи J огнетушащего порошка в зону горения знаменатель выражения (13) растёт, и время тушения стремится к минимальному значению.

В нестационарных условиях тушения пожара, когда величины τ_{in} и τ_{const} сопоставимы, параметры тушения пожара τ_{ext} и G будут определяться также соотношением значений τ_{in} и τ_{const} . Как видно из соотношения (7), время инерционности теплоактивной системы τ_{const} тем меньше, чем меньше её характерный размер, теплоёмкость и плотность тепловоспринимающего вещества, а также чем больше теплопроводность вещества.

Проведённые оценки величины τ_{const} для двух сортов огнетушащих порошков с преобладанием частиц бикарбоната натрия ($c_{pow} = 1030$ Дж/кг·К; $\rho = 2020$ кг/м³; $\lambda = 4$ Вт/(м·К)) и моноаммонияфосфата ($c_{pow} = 1234$ Дж/кг·К; $\rho = 1803$ кг/м³; $\lambda = 0,25$ Вт/(м·К)) показали, что для частиц с $l \approx 50$ мкм её значения равны соответственно

1,3 мс и 22 мс соответственно. Время взаимодействия частиц τ_{in} с горючим материалом при скорости в момент столкновения, равной ≈ 10 м/с и толщине теплового слоя ≈ 1 мм, составляет $\approx 0,2$ мс, т.е. почти на порядок меньше значения τ_{const} для частиц бикарбоната натрия и на два порядка меньше для частиц моноаммонияфосфата. В связи с этим экспоненциальный член в (12) для частиц моноаммонияфосфата практически равен 1 и в отборе тепла, сопровождающегося формированием плёнки расплава, участвуют только частицы, осевшие на горючем материале. Частицы, отразившиеся от горючего материала, будут покидать очаг пожара, не отобрав у него часть тепла. Отсюда следует, что в реальных условиях при конечности времени отклика частицы на воздействие тепла время тушения пожара будет больше, чем при мгновенной реакции частиц на него.

Увеличить эффективность отбора тепла частицами порошка, и тем самым, уменьшить время тушения пожара, можно несколькими способами: 1) уменьшить τ_{const} ; 2) увеличить τ_{in} ; 3) одновременно уменьшать τ_{const} и увеличивать τ_{in} .

Уменьшить τ_{const} , как следует из (7), можно, применяя для тушения пожара подкласса А1 огнетушащие порошки с высокой дисперсностью частиц, малыми теплоёмкостью и плотностью вещества, из которого они состоят, и большой его теплопроводностью.

Увеличить τ_{in} можно, понизив скорость частиц v , падающих на нагретый горючий материал. Эта скорость тем меньше, чем меньше скорость частиц v_0 на выходе модуля порошкового пожаротушения и чем меньше массовый расход порошка G [10].

Рассмотрим зависимость времени тушения пожара от интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара J .

Из (13) следует, что при уменьшении J время тушения пожара увеличивается. При значении J , равном:

$$J = \frac{k\varepsilon\sigma T^4}{c_{pow}(T_{sur} - T_{par})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{v\tau_{const}}\right]) + \mu\varepsilon\sigma T^4}, \quad (15)$$

(равенство нулю знаменателя уравнения (13)) $\tau_{ext} \rightarrow \infty$. Другими словами, пожар, при такой интенсивности подачи порошка в зону пожара, потушить невозможно. Данная интенсивность подачи порошка в очаг пожара называется критической. В нашем случае это интенсивность, при которой частицами порошка, попавшими на горячую поверхность, поглощается только

часть тепла, равная по величине теплу лучистого потока, отражённого этими же частицами в сторону горящего материала ранее при движении к нему, и поглощённому им.

При увеличении интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара время тушения пожара, как видно из выражения (13), должно уменьшаться и, в итоге, стремиться к постоянному значению τ_{cool} . Однако, вследствие инерционности процесса поглощения тепла частицами порошка, динамика времени тушения пожара при росте J может отличаться от динамики, реализуемой при стационарном теплообмене. На зависимость времени тушения пожара от интенсивности будут влиять скоростные режимы подачи частиц порошка в зону горения.

Как видно из данных, приведённых в таблице, существует режим подачи порошка в очаг пожара, при котором средняя скорость частиц в зоне пожара принимает минимальное значение. При такой скорости частиц в отборе тепла участвует их максимальное число. Множитель при J в этом случае принимает максимальное значение. Следовательно, можно ожидать, что при интенсивности подачи порошка, при которой реализуется данная скорость частиц, должен наблюдаться минимум времени тушения пожара. Однако, как показали оценки величины знаменателя выражения (13), этого не происходит. Данное явление можно объяснить тем, что большая интенсивность подачи порошка, хотя и ухудшает условия отбора тепла частицами порошка, способствует увеличению интенсивности его отбора. Это очень важно, поскольку, как известно, для надёжного тушения пожара необходимо обеспечить превышение интенсивности отбора тепла от горючего материала над интенсивностью тепловыделения. Расчёт значений параметров, приведённых в таблице, проводился по формулам работы [10].

Проведём анализ зависимости от интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара другой важной характеристики процесса тушения – удельного расхода порошка на тушение пожара. Как видно из структуры выражения (14), определяющего данный параметр, она сходна со структурой выражения (13) для оценки времени тушения пожара. Особенностью выражения (14) является то, что параметр J входит как в числитель, так и в знаменатель слагаемого этого выражения, выражающего соотношение тепла, накопленного ТГМ, к теплу, отбираемому частицами порошка от нагретого материала.

Таблица / Table

Результаты оценки параметров подачи огнетушащего порошка в зону горения

The results of the estimation of the parameters of the extinguishing powder in the combustion zone

Диаметр выходного отверстия модуля, мм Module outlet diameter, mm	Масса порошка, подаваемого в очаг, кг Weight of powder supplied in the combustion zone, kg	Средний массовый расход порошка, кг/с Average mass flow rate powder's, kg/s	Средняя скорость частиц на выходе модуля, м/с Average particle velocity at the output of the module, m/s	Средняя скорость частиц в зоне горения, м/с Average particle velocity in the combustion zone, m/s
13	0,87	1,34	17,47	8,64
16	0,66	1,367	11,68	7,24
24	0,6	1,74	6,62	6,12
24	0,8	2,09	7,94	6,76
24	1,0	2,406	9,14	7,38

Поэтому зависимость G от интенсивности подачи порошка в очаг пожара будет определяться, в основном, закономерностью изменения от данного параметра экспоненциального члена выражения (14). Он, как было отмечено выше, может принимать минимальное значение при определённой скорости частиц порошка, зависящей от J . Следовательно, зависимость $G(J)$ будет иметь экстремальное (минимальное) значение, т. е. на тушение пожара будет расходоваться минимальное количество порошка, приходящееся на единицу площади горящей поверхности. Интенсивность подачи порошка в очаг пожара, при которой реализуется данный минимум, называют оптимальной интенсивностью подачи.

Заключение

Получены экспериментальные зависимости времени тушения и удельного расхода огнетушащего порошка от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении модельного очага пожара подкласса А1 по площади и в ограниченном объёме. Анализ данных зависимостей показал наличие оптимального значения удельного расхода огнетушащего вещества для тушения пожара в зависимости от интенсивности подачи его в зону пожара.

Предложена модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 по площади огнетушащим порошком при кратковременном воздействии его на очаг пожара.

Модель учитывает инерционность передачи тепла частицам огнетушащего порошка от го-

рючего материала. Она позволяет оценить оптимальные условия подачи порошка в очаг пожара и подходящие параметры теплофизических характеристик частиц порошка, для эффективного тушения пожара подкласса А1 модульными установками порошкового пожаротушения импульсного и кратковременного действия.

Список использованных источников

1. Баратов, А.Н. Горение–Пожар–Взрыв–Безопасность / А.Н. Баратов. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.
2. Адамян, В.Л. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / В.Л. Адамян – М.: Лань Спб, 2018. – 176 с.
3. Киреев, А.А. Исследование повторного воспламенения древесины, обработанной гелеобразующими огнетушащими составами / А.А. Киреев, С.Н. Бондаренко // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – Вып. 25. – С. 65–72.
4. Рашоян, И.И. Физико-химические основы развития и тушения пожара / И.И. Рашоян. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 107 с.
5. Кицак, А.И. Экспериментальная оценка эффективности тушения пожара подкласса А1 локально по площади и локально по объёму огнетушащим порошком общего назначения при его кратковременном воздействии на очаг пожара / С.М. Палубец, Д.В. Дробыш // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2019. – № 1 (45) – С. 29–41.
6. Корольченко, Д.А. Тушение пламени огнетушащим порошком и аэрозольными составами / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 8. – С. 63–68.

7. Корольченко, Д.А. Особенности тушения пламени высокодисперсными газоаэрозольными системами / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 10. – С. 66–72.

8. Корольченко, Д.А. Анализ процесса тушения пламени горючих жидкостей дисперсными огнетушителями веществами и пеной низкой кратности / Д.А. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 2. – С. 52–56.

9. Якунин, М.М. Влияние процессов релаксации на перенос тепла, возникающего под действием интенсивных потоков энергии / М.М. Якунин // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 27–33.

10. Кицак, А.И. Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения / А.И. Кицак // Safety & Fire Technique – Т. 49, вып. 1. – Scientific and Research Centre for Fire Protection, Польша, 2018. – С. 76–85.

DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7

References

1. Baratov A.N. *Gorenie–Pozhar–Vzryv–Bezopasnost'* [Combustion–Fire–Explosion–Safety]. Moskva, FGU VNIPO MCHS ROSSII, 2003, 364 p.

2. Abduragimov I.M., Govorov V.Y., Makarov V.E. *Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physico-chemical basis for the development and extinguishing of fires]. Moskva, VIPSH MVD SSSR, 1980, 255 p.

3. Kireev A.A., Bondarenko S.N. [Investigation of reignition of wood treated with gelling extinguishing agents]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti* [The problem of fire safety], 2009, vol. 25, pp. 65–72 (in Russian).

4. Rashayan I.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozhara* [Physical and chemical bases of development and fire fighting]. Tolyatti, Tolyatti SU, 2013, 107 p.

5. Kitsak A.I. [Experimental evaluation of the fire extinguishing efficiency of fire of subclass A1 on the surface and in the bulk by general-purpose extinguishing powder with its short-term impact on the fire source]. *Chrezvychajnye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. [Emergency situations: prevention and liquidation], 2019, vol. 45, no. 1, pp. 29–41 (in Russian).

6. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. [Extinguishing of a flame by dry chemical powder and aerosol compositions]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2014, no. 8, pp. 63–68 (in Russian).

7. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A. F. [Features of flame extinguishing by highly dispersed gas-aerosol systems]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2014, vol. 23, no. 10, pp. 66–72 (in Russian).

8. Korol'chenko D.A. [Analysis of the process of extinguishing a flame of flammable liquids by dispersed fire extinguishing agents and low expansion foam]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2016, vol. 25, no. 2, pp. 52–56 (in Russian).

9. Yakunin M.M. [The influence of relaxation processes on the transfer of heat generated by intense energy flows]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials processing], 2010, no. 3, pp. 27–33 (in Russian).

10. Kitsak A.I. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into combustion zone. *BITP*, 2018, vol. 49, iss. 1, pp. 76–85.

DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7