

А. И. Кицак

НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ОГНЕТУШАЩИМ ПОРОШКОМ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЕГО ЧАСТИЦ С ГОРЯЩИМ ВЕЩЕСТВОМ

Аннотация. Определена эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Исследование осуществлялось методом теоретического моделирования механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка. Установлено, что тушение пламени огнетушащим порошком в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерные длительности передачи тепла частицам порошка и реакции ингибирования центров пламени. Сопоставление проведенных оценок характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожара, что сильно снижает его эффективность при больших скоростях частиц порошка в зоне горения.

Ключевые слова: огнетушащий порошок, тепловое тушение, гетерогенное ингибирование, тепловая релаксация, длительность ингибирования

Для цитирования: Кицак, А. И. Эффективность тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при нестационарном взаимодействии его частиц с горящим веществом / А. И. Кицак // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 476–486. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-476-486>

Anatoli I. Kitsak

Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING WITH GENERAL PURPOSE FIRE EXTINGUISHING POWDER IN CASE OF NON-STATIONARY INTERACTION OF ITS PARTICLES WITH BURNING MATERIAL

Abstract. Evaluation of the effectiveness of fire extinguishing by jet systems of powder fire extinguishing in conditions of non-stationary heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centers by powder particles was the aim of the work. The theoretical dependence of the amount of heat, absorbed by the particles of fire extinguishing powder, and the reaction rate of heterogeneous active centers of flame, inhibiting them, in non-stationary conditions of heat transfer, as well as inhibition reaction for fire extinguishing ink jet systems were obtained. The extinguishing of a flame with a fire extinguishing powder under non-stationary conditions is more effective, the smaller is the effective size of the powder particles, the longer is their stay in the combustion zone, and the shorter are the characteristic times of heat transfer and inhibition reaction. Comparison of the estimates of the characteristic duration of heat transfer and inhibition reaction for widely used fire extinguishing powders has shown a large inertia of the thermal mechanism of fire extinguishing, which greatly reduces its effectiveness at high speeds of powder particles in the combustion zone.

Keywords: fire extinguishing powder, thermal extinguishing, heterogeneous inhibition, thermal relaxation, duration of inhibition

For citation: Kitsak A.I. Efficiency of fire extinguishing with general purpose fire extinguishing powder in case of non-stationary interaction of its particles with burning material. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 476–486 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-476-486>

Введение. Порошковое пожаротушение целенаправленно применяется на практике уже более полувека. Большая востребованность порошков как огнетушащего материала обусловлена рядом существенных преимуществ их над другими огнетушащими средствами [1–4].

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).

Исследованию огнетушащей способности порошков посвящено множество экспериментальных и теоретических работ [5–9]. На их основе разработан ряд эффективных порошковых составов, способных потушить любой из известных классов пожаров.

Несмотря на большие успехи в технологии производства порошковых огнетушащих сред и внедрения их в практику, существует ряд факторов порошкового пожаротушения, требующих дальнейшего изучения физики и технологии тушения пожаров порошками. Одним из таких факторов является отсутствие единого представления о вкладе в результат тушения пожара каждого из огнетушащих механизмов порошка. Однозначное понимание роли этих механизмов позволило бы в конкретных случаях тушения пожара создать наиболее благоприятные условия его тушения. В настоящее время предполагается, что доминирующим механизмом огнетушащего действия порошков является способность их ингибировать пламя пожара, в частности гетерогенное ингибирование, заключающееся в восстановлении на поверхности частиц порошка активных центров пламени, которыми являются свободные атомы и радикалы горючего вещества.

Одним из доказательств преобладания гетерогенного механизма ингибирования пламени является зависимость эффективности тушения пожара от дисперсности частиц порошка. Отмечается, например, что если бы доминировал тепловой механизм тушения пожара, то порошки с разной дисперсностью частиц мало бы отличались друг от друга по огнетушащей способности, хотя на практике различие между ними весьма заметное [1].

Другим фактором порошкового пожаротушения, требующим критического (с точки зрения особенностей взаимодействия частиц порошка с горючим материалом) анализа, является сильная зависимость результатов тушения пожара от условий применения порошка и режимов подачи его в зону пожара.

На зависимость результата тушения пожара порошком от условий подачи его в зону горения неоднократно обращалось внимание во многих работах [1–4]. Однако, как следует из литературных данных, попыток выяснения причин происходящего не предпринималось.

Анализ схем тушения пожара порошками показывает, что подача порошка в зону горения производится в основном пневматическим способом. Он реализуется различными схемами в модулях порошкового пожаротушения (МПП), ручных и переносных огнетушителях, а также лафетных установках порошкового пожаротушения.

Скорость частиц порошка, выбрасываемого из таких устройств, в газообразном горящем слое может достигать нескольких метров в секунду [2, 10]. При толщине слоя $\sim 0,1\div 0,2$ мм длительность t_{int} взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени в этой зоне составляет $\sim 10^{-4}\div 10^{-5}$ с [2]. В то же время нагрев частиц порошка и гетерогенный обрыв цепей горения не происходят мгновенно. По оценкам, приведенным в работе [1], длительность прерывания цепи (промежуток времени от момента появления активной частицы продукта горения до момента восстановления на поверхности частицы порошка) τ составляет порядка $\sim 10^{-4}$ с. Время нагрева частиц составляет примерно такую же величину [10].

Из сопоставления времени пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени и времени протекания основных механизмов тушения пожара следует, что они примерно одного порядка. Поэтому можно предположить, что процесс тушения пожара огнетушащим порошком с применением установок пожаротушения со струйной подачей порошка во фронт пламени часто происходит в нестационарных условиях.

Целью настоящей работы является оценка эффективности тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени.

Физическая модель тушения пожара струйными устройствами подачи огнетушащего порошка в зону горения. Рассмотрим схему тушения пожара струей огнетушащего порошка, подаваемой в зону горения по направлению к фронту пламени.

В некоторый момент времени в этой зоне [11], которая состоит из областей подогрева горючей среды, реакции горения и собственно пламени (светящейся зоны), сформируется дисперсный слой частиц порошка. Частицы огнетушащего порошка, попавшие в область реакции горения, покидают ее за промежуток времени t_{int} , зависящий от скорости частиц порошка и эффективной толщины зоны реакции. Они покидают реакционную область безвозвратно, если горючим веществом является горючий газ (ГГ) или легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ). Когда осуществляется тушение твердого горючего материала (ТГМ), часть частиц порошка может осесть в обуглившимся зазорах материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, – отразиться от материала, снова попасть в реакционную область горения или покинуть ее.

За время пребывания частиц порошка в реакционной области они нагреваются до определенной температуры в соответствии с их теплофизическими и дисперсными характеристиками и адсорбируют на своей поверхности с некоторой вероятностью, зависящей от физико-химических характеристик материала и состояния их поверхности, активные центры пламени, состоящие из свободных атомов и радикалов горючего вещества.

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.

Адсорбированные поверхностью частиц порошка активные центры пламени рекомбинируют с другими активными частицами пламени, достигшими этой поверхности. В результате формируются неактивные частицы (молекулы) из родственных или неродственных атомов либо радикалов продуктов горения. Процесс гетерогенного ингибирования приводит к обрыву цепей горения и в результате к снижению тепловыделения.

Реакция гетерогенного ингибирования активных центров пламени осуществляется в каналах слоя, образованных частицами огнетушащего порошка в зоне горения.

Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени t_{int} больше, чем характерные временные промежутки протекания реакции ингибирования активных центров пламени τ_{ing} и нагрева частиц порошка τ_{rel} , то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибирование активных центров пламени, равно как и нагрев частиц порошка, происходит наиболее эффективно, то есть частицы успевают ингибировать максимальное число центров пламени и нагреться до максимальных температур. В итоге тушение пожара происходит в благоприятных условиях.

Если же частицы порошка находятся в зоне реакции ограниченное время, такое, что $t_{\text{int}} \leq \tau_{\text{ing}}$ и $t_{\text{int}} \leq \tau_{\text{rel}}$, то эффективность ингибирования и нагрева частиц, очевидно, будет зависеть от соотношения времени t_{int} и τ_{ing} , а также t_{int} и τ_{rel} .

Модель теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена. Определим количество теплоты Q , аккумулированной частицами порошка за время пребывания их в зоне реакции горения t_{int} . Для этого вначале найдем закон изменения температуры частицы порошка во времени t при попадании ее во фронт пламени.

Воспользуемся для этого одним из упрощенных подходов к решению задач теплопроводности, который относится к случаю, когда поле температур в твердом теле изменяется во времени, но в любой момент времени не изменяется по пространству. При передаче тепла к телу от нагретого слоя горящего газа конвекцией данный случай реализуется, если сопротивление теплопроводности в теле намного меньше сопротивления конвекции на его поверхности [12].

Математически это условие выражается в том, что число Био Bi , которое равно отношению кондуктивного термического сопротивления к конвективному термическому сопротивлению, должно быть намного меньше единицы [12], то есть

$$Bi = \frac{h_c d_p}{\lambda_p} \ll 1, 0, \quad (1)$$

где h_c – средний коэффициент конвективной теплопередачи на поверхности раздела теплового слоя и твердого тела, Вт/(м²·К); d_p – характерный размер тела, м; λ_p – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К).

Параметр h_c можно оценить из соотношения для числа Нуссельта Nu при теплопередаче от нагретого слоя газа к частице порошка [2]. Имеем

$$Nu = \frac{h_c d_p}{\lambda_g}, \quad (2)$$

где λ_g – коэффициент теплопроводности горючего газа.

Число Нуссельта для тел очень малого размера равно ~ 2 [2].

Проведенные оценки чисел Био для двух сортов огнетушащих порошков с преобладанием частиц бикарбоната натрия ($\lambda_p = 4$ Вт/(м·К) [4]) и моноаммонийфосфата ($\lambda_p = 0,25$ Вт/(м·К) [4]) показали, что при $d_p = 50$ мкм и средней теплопроводности нагретого (~ 700 °С) газа (воздуха) $\lambda_g = 6,71 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К) они равны 0,033 и 0,530 соответственно. Видно, что условие (1) выполняется для частиц бикарбоната натрия с более высокой точностью, чем для частиц моноаммонийфосфата. Будем считать, что неравенство (1) выполняется условно для частиц обоих рассматриваемых сортов огнетушащих порошков.

В этом случае для определения зависимости изменения температуры частицы во времени при нахождении ее в зоне горения можно воспользоваться законом баланса энергии, аккумулированной частицей, и энергии, подводимой к поверхности частицы из зоны горения. Математически этот закон представляется в виде [12]

$$\rho V c_p \frac{dT(t)}{dt} = q(t), \quad (3)$$

где ρ – плотность материала частицы, кг/м³; V – объем частицы порошка, м³; c_p – удельная теплоемкость частиц порошка, Дж/(кг·К); $T(t)$ – мгновенное значение температуры частицы, К; $q(t) = h_c A_s (T_g - T(t))$ – мгновенный тепловой поток, передаваемый частице порошка от горючего газа с температурой T_g , К; A_s – площадь поверхности частицы, м².

Решая уравнение (3) относительно $T(t)$ при условии, что в начальный момент времени $t = 0$ температура частицы равна T_p , получим следующее соотношение для мгновенного значения температуры частицы:

$$T(t) = T_g + (T_p - T_g) \exp \left[-\frac{h_c}{\rho d_p c_p} t \right], \quad (4)$$

где $d_p = \frac{V}{A_s}$ – характерный геометрический размер частиц порошка, м.

Определим количество тепла Q , аккумулированное частицами порошка за время пребывания их в зоне реакции горения t_{int} . Для этого проинтегрируем выражение $q(t)$ в пределах от 0 до t_{int} с учетом (4) и просуммируем полученный результат по числу частиц, находящихся в зоне реакции за промежуток времени t_{int} .

В итоге получим

$$Q = m c_p (T_g - T_p) \left(1 - \exp \left[-Bi \frac{t_{int}}{\tau_{rel}} \right] \right), \quad (5)$$

где m – масса частиц порошка, находящихся в зоне горения в течение t_{int} , $\text{Bi} = \frac{h_c d_p}{\lambda_p}$ (λ_p – коэффициент теплопроводности материала частиц, Вт/(м·К)), $t_{\text{int}} = \frac{l_{\text{int}}}{v}$ (l_{int} – эффективная длина взаимодействия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м; v – скорость частиц в реакционной зоне, м/с); $\tau_{\text{rel}} = \frac{d_p^2}{\alpha}$ – характерное время нагрева (охлаждения) материала частиц порошка, с; $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Количество тепла Q_{ext} , поглощенное частицами порошка за время подачи порошка τ_{ext} в зону горения, равно

$$Q_{\text{ext}} = J c_p (T_g - T_p) \left(1 - \exp\left[-\text{Bi} \frac{t_{\text{int}}}{\tau_{\text{rel}}}\right] \right) S_{\text{ext}} \tau_{\text{ext}}, \quad (6)$$

где $J = G/S_{\text{ext}}$ – интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/(м²с); G – массовый расход порошка, кг/с; S_{ext} – площадь тушения пожара, м².

Проведем анализ эффективности отбора тепла частицами огнетушащего порошка из зоны горения.

Из выражения (6) 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. Зависимость эффективности теплового механизма тушения пожара от характерных размеров частиц огнетушащего порошка проявляется через зависимость от данных размеров параметра τ_{rel} , который характеризует скорость нагрева (охлаждения) материала частиц порошка. Из его определения следует, что скорость нагрева частиц порошка тем больше, чем меньше их характерные размеры, теплоемкость и плотность вещества, из которого они состоят, и чем больше теплопроводность.

Для эффективного охлаждения зоны горения необходимо, как следует из (6), чтобы время нахождения частиц в этой зоне t_{int} было больше времени τ_{rel} .

Определим время τ_{rel} для упомянутых выше типов огнетушащих порошков: бикарбоната натрия ($c_p = 1030$ Дж/кг·К; $\rho = 2020$ кг/м³; $\lambda_p = 0,4$ Вт/(м·К) [4]) и моноаммонийфосфата ($c_p = 1234$ Дж/кг·К; $\rho = 1803$ кг/м³; $\lambda_p = 0,025$ Вт/(м·К) [4]).

Для частиц с $d_p \sim 50$ мкм значения τ_{rel} равны 1,3 мс и 22,0 мс соответственно. С учетом числа Био, входящего в экспоненциальный множитель (6), значение t_{int} для эффективной передачи тепла должно быть больше 39 мс для частиц бикарбоната натрия и больше 44 мс для частиц моноаммонийфосфата. Как видно из полученных значений t_{int} , они практически равны для рассматриваемых типов огнетушащих порошков.

Что касается скорости v частиц порошков в зоне горения, при которой обеспечивается эффективный отбор тепла, то, согласно приведенным оценкам t_{int} , она не должна превышать 0,005 м/с для частиц с $d_p \sim 50$ мкм и 0,120 м/с для частиц с $d_p \sim 10$ мкм при толщине слоя горящего газа ~ 200 мкм. При подаче струи порошка в зону горения под углом 60° к фронту горения эти скорости могут быть выше, но не более 0,01 и 0,24 м/с соответственно.

Модель механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка при нестационарном взаимодействии. Определим концентрацию C активных частиц реакции горения, адсорбированных поверхностью частиц слоя огнетушащего порошка.

Для этого воспользуемся приближенным методом решения задач диффузионной кинетики, получившим название метода равноступенной поверхности [13].

Следуя данному методу, запишем уравнение равенства потока $m(C)$ активных частиц пламени, адсорбированных поверхностью частицы порошка, потоку активных частиц, доставляемых к этой поверхности в результате образовавшейся разности концентраций частиц возле поверхности ингибитора и внутри горючего газа, с учетом нестационарности процесса ингибирования.

Получим

$$m(C) = \beta \cdot (C - C_0) - \tau \frac{\partial m(C)}{\partial t}, \quad (7)$$

где $C_0 = \frac{m_0}{V}$ – концентрация активных частиц, кг/м³; m_0 – начальная масса активных частиц в слое горючего газа, кг; V – объем горючего слоя газа, м³; β – коэффициент массоотдачи, м/с; τ – время протекания реакции ингибирования активных центров пламени, с.

Предположим, что реакция ингибирования на поверхности является реакцией первого порядка

$$m(C) = kC, \quad (8)$$

где k – кинетическая константа скорости реакции, м/с.

Проинтегрировав (7) с учетом (8) при условии, что в начальный момент времени $t = 0$ концентрация ингибированных центров пламени $C = 0$, получим следующее уравнение для концентрации центров пламени, восстановленных на поверхности частицы порошка в заданный момент времени t :

$$C = \frac{\beta}{\beta + k} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right) C_0, \quad (9)$$

где $\Delta\tau = \tau k / (k + \beta)$ – эффективное время обрыва цепи горения, с.

Для скорости реакции ингибирования (массы активных частиц, восстанавливаемых в единицу времени) получим следующее уравнение:

$$\frac{dm}{dt} = kS_{ch}C = K^*S_{ch}C_0, \quad (10)$$

где S_{ch} – эффективная площадь поверхности каналов, образованных частицами огнетушащего порошка, в слое объемом V , м²; K^* – эффективная константа скорости реакции, равная

$$K^* = \frac{k\beta}{\beta + k} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right). \quad (11)$$

За время взаимодействия t_{int} масса m активных центров пламени, ингибированных поверхностью слоя частиц площадью S_{ch} , будет равна

$$m = \frac{k\beta}{\beta + k} S_{ch} C_0 \Delta\tau \left(\frac{t_{int}}{\Delta\tau} - \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{int}}{\Delta\tau}\right) \right) \right). \quad (12)$$

Проведем анализ полученной зависимости массы ингибированных центров пламени от условий тушения пожара.

Из (12) видно, что при стационарном взаимодействии активных центров пламени с поверхностью частицы, то есть когда $t_{int} \gg \Delta\tau$, масса ингибированных центров пламени стремится к максимально возможному значению за интервал времени t_{int} .

Если время взаимодействия $t_{int} < \Delta\tau$, то масса ингибированных центров пламени будет зависеть от соотношения $t_{int} / \Delta\tau$. При $t_{int} \ll \Delta\tau$ она будет стремиться к нулю.

Выразим соотношение для m через кинетические параметры реакции ингибирования, дисперсные характеристики частиц огнетушащего порошка и параметров подачи его в зону пламени. Известно [14], что кинетическая константа скорости k равна

$$k = \frac{1}{4} \gamma u, \quad (13)$$

где γ – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью дисперсной частицы; u – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с.

Коэффициент массоотдачи β к поверхности частицы ингибирования определяется выражением [13]

$$\beta = \frac{Nu_d D}{d_{eq}}, \quad (14)$$

где Nu_d – критерий Нуссельта для процесса диффузии; D – коэффициент диффузии, m^2/c ; d_{eq} – эквивалентный диаметр каналов слоя, в которых происходит гетерогенная реакция, м.

Величину d_{eq} можно выразить через характеристики дисперсного слоя огнетушащих частиц. Согласно [15] имеем

$$d_{eq} = \frac{2F\varepsilon d_p}{3(1-\varepsilon)}, \quad (15)$$

где F – фактор формы частиц (для шарообразных частиц $F=1$); $\varepsilon = (V - V_0)/V = 1 - \rho_n/\rho$ – порозность слоя; V – общий объем, занимаемый слоем частиц порошка, m^3 ; V_0 – объем, занимаемый частицами порошка в слое, m^3 ; ρ_n – насыпная плотность частиц порошка, kg/m^3 ; ρ – истинная плотность частиц порошка, kg/m^3 ; d_p – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м.

Эффективная площадь S_{ch} поверхности каналов, образованных частицами слоя равна [15]

$$S_{ch} = SH \frac{6(1-\varepsilon)}{Fd_p}, \quad (16)$$

где S – площадь основания слоя дисперсных частиц в толще горючего газа, m^2 ; H – высота слоя, м.

Известно [14, 15], что при протекании гетерогенной реакции наблюдаемая скорость реакции определяется, с одной стороны, истинной химической кинетикой на поверхности, а с другой – скоростью транспорта реагирующих веществ к этой поверхности молекулярной или конвективной диффузией. Если скорость реакции определяется в основном кинетическими процессами на поверхности ингибитора, отмечают, что реакция происходит в кинетической области. Другой предельной областью протекания гетерогенной реакции является диффузионная область. В этой области скорость реакции лимитируется процессом диффузии активных частиц к поверхности ингибитора.

Определим скорости гетерогенной реакции ингибирования активных частиц в указанных областях ее протекания.

Кинетическая область. Реакция в этой области протекает, когда вероятность адсорбирования γ атома или радикала поверхностью ингибитора при соударении с ней много меньше единицы, то есть $\gamma \ll 1$ [14]. При этом активная частица до ее гибели может успеть много раз побывать как у поверхности, так и в середине канала слоя частиц, где происходит реакция. В этом случае концентрацию активных центров пламени можно считать приближенно постоянной во всем объеме горючего газа, и скорость обрыва цепей горения не будет зависеть от скорости диффузии активных центров к поверхности ингибитора.

В данном режиме реакции кинетическая константа скорости $k \ll \beta$, а время реакции ингибирования τ будет определяться величиной, обратной константе скорости обрыва цепи [14], то есть

$$\tau = \frac{d_{eq}}{\gamma u}. \quad (17)$$

Используя определения (13)–(16), получим из (12) следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени в кинетической области протекания реакции ингибирования за время t_{int} :

$$\frac{m}{m_0} = \frac{3(1-\varepsilon)}{2Fd_p} \gamma u \Delta\tau \left(\frac{t_{int}}{\Delta\tau} - \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{int}}{\Delta\tau} \right) \right) \right), \quad (18)$$

где $\Delta\tau = \tau k/\beta$ – эффективное время длительности реакции, которое равно

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{Nu_d D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (19)$$

В случае диффузии активных частиц в неподвижной среде $Nu_d \sim 1$ [14].

Диффузионная область. В этой области реакция протекает, когда $\gamma \approx 1$, то есть когда активная частица гибнет при первом же столкновении с поверхностью ингибитора. Скорость обрыва

цепи лимитируется диффузией атома или радикала к поверхности ингибитора. Концентрация атомов или радикалов на поверхности частиц порошка близка к нулю и максимальна в центре канала реакции. В данных условиях коэффициент массоотдачи $\beta \ll k$, а время длительности ингибирования будет определяться временем диффузии активных центров к поверхности ингибитора.

Время диффузии можно оценить из соотношения Эйнштейна $4D\tau = d_{\text{eq}}^2$ [14]. Из него следует

$$\tau = \frac{d_{\text{eq}}^2}{4D}. \quad (20)$$

Учитывая особенности протекания реакции ингибирования в диффузионной области, получим следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени:

$$\frac{m}{m_0} = 9 \frac{Nu_d D (1-\varepsilon)^2}{F^2 \varepsilon d_p^2} \Delta\tau \left(\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau} - \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau}\right) \right) \right), \quad (21)$$

где $\Delta\tau = \tau$ и с учетом (20) равно

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (22)$$

Из полученных выражений для относительных масс ингибированных активных частиц в кинетической и диффузионной области протекания реакции ингибирования следует, что эффективность ингибирования определяется не только дисперсными характеристиками огнетушащего порошка и кинетическими параметрами активных центров, 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 $\Delta\tau$.

Длительности реакции ингибирования $\Delta\tau$ в различных областях протекания ее, как следует из формул (19) и (22), практически совпадают. Причем эффективное время реакции ингибирования тем меньше, чем меньше диаметр частиц порошка, чем больше скорость диффузии активных центров пламени к поверхности ингибитора и чем меньше порозность частиц огнетушащего порошка в зоне горения.

Оценки величины $\Delta\tau$ 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 $\Delta\tau = 3,8 \cdot 10^{-5}$ 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 $\varepsilon = 0,5$: $\Delta\tau = 4,7 \cdot 10^{-7}$ с. В случае использования для тушения пожара порошка с диаметром частиц $d_p = 10$ мкм и порозности его $\varepsilon = 0,9$ величина $\Delta\tau = 1,52 \cdot 10^{-6}$ с, а при $\varepsilon = 0,5$ длительность реакции ингибирования равна $\Delta\tau = 1,88 \cdot 10^{-8}$ с.

Из полученных оценок $\Delta\tau$ следует, что для эффективного гетерогенного ингибирования атомов кислорода частицами порошка скорость v их при диаметре $d_p = 50$ мкм, порозности в зоне реакции $\varepsilon = 0,9$ и $l_{\text{int}} = 200$ мкм должна быть меньше 5 м/с, а при $\varepsilon = 0,5$: $v < 420$ м/с. При диаметре частиц огнетушащего порошка $d_p = 10$ мкм и $\varepsilon = 0,5$ процесс гетерогенного ингибирования атомов кислорода происходит фактически в стационарном режиме при любых достижимых скоростях частиц порошка в зоне реакции горения.

Анализ основных закономерностей тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Проведенные оценки эффективности основных механизмов тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени позволили выяснить вклад этих механизмов в процесс тушения пожара и зависимость результата тушения от условий подачи порошка в зону горения.

Выявлено, что эффективность механизма теплового тушения пожара, как и механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени, зависит от характерных размеров частиц

порошка d_p . Эта зависимость проявляется, прежде всего, через зависимость характеристик инерционности этих процессов τ_{rel} и Δt от d_p .

Как видно из определения τ_{rel} и формул (19) и (22), параметры τ_{rel} и Δt тем меньше (т. е. меньше инерционность механизмов), чем меньше характерный размер d_p частиц порошка.

Для струйных систем порошкового тушения пожара чем меньше инерционность механизмов тушения пожара, то есть чем ближе процесс тушения пожара к стационарному режиму, тем с большей скоростью можно подавать частицы порошка в зону горения и тем эффективнее (быстрее и надежнее) происходит ликвидация пожара.

Характерной особенностью является то, что в стационарном режиме тушения пожара ($t_{int} \gg \Delta t$) эффективность теплового механизма тушения, как следует из формулы (6), не зависит от размера частиц порошка. В то же время эффективность механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени определяется размерами частиц как в нестационарном, так и в стационарном режиме тушения. Причем чем меньше размер частиц порошка, тем выше эффективность тушения.

Сопоставление приведенных оценок τ_{rel} для частиц двух приведенных выше типов огнетушащих порошков и Δt , рассчитанных при тех же значениях характерных размеров частиц ($d_p = 50 \div 10$ мкм), показывает, что при скоростях частиц порошка в зоне горения больше 0,24 м/с и толщине горючего слоя $l_{int} = 200$ мкм механизм теплового тушения пожара может вообще не проявляться. В этом случае соответственно не осуществляется эффективный отбор тепла из зоны горения, не происходит гомогенное ингибирование активных центров пламени и не образуется пленка расплава порошка при тушении пожара подкласса А1. Процесс тушения пожара будет происходить преимущественно благодаря протеканию процесса гетерогенного ингибирования активных частиц пламени вследствие его меньшей инерционности.

Установленная зависимость эффективности механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных частиц пламени от скорости частиц огнетушащего порошка в зоне реакции позволяет объяснить более низкую эффективность тушения пожара МПП импульсного типа (время выброса порошка $t_{dis} < 1$ с) по сравнению с МПП кратковременного действия ($t_{dis} = 1 \div 10$ с) при одинаковой высоте расположения их над очагом пожара и одинаковым направлением струй во фронт пламени.

Сравнительно низкая эффективность установок порошкового пожаротушения импульсного типа обусловлена малым временем пребывания частиц порошка в реакционной зоне вследствие их большой скорости, которая может достигать десятков метров в секунду. Несмотря на то что скорости частиц порошка, подаваемого в зону пожара МПП кратковременного действия, могут быть примерно такой же величины, эффективный удельный расход ими порошка на тушение пожара больше эффективного удельного расхода порошка МПП импульсного типа благодаря большому на порядок времени выпуска (времени тушения) порошка в зону пожара.

Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) МПП подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени больше, чем характерные временные промежутки протекания реакции ингибирования активных центров пламени и нагрева частиц порошка, то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибирование активных центров пламени, равно как и нагрев частиц порошка, происходит наиболее эффективно, то есть частицы порошка успевают ингибировать максимальное число центров пламени и нагреваться до максимальных температур. Тушение пожара происходит в благоприятных условиях.

Полученные результаты дают также более естественное объяснение известного в пожаротушении парадокса, который заключается в увеличении удельного расхода огнетушащего порошка при повышении интенсивности подачи порошка в зону горения. Этот эффект можно объяснить возрастанием скорости частиц порошка при интенсификации подачи его в зону горения и, следовательно, уменьшением эффективности тушения пожара по причине сокращения времени теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Снижение эффективности тушения пожара ведет к росту времени тушения и, соответственно, возрастанию удельного расхода огнетушащего порошка.

Зависимость эффективности тушения пламени от длины взаимодействия (времени взаимодействия t_{int}) активных центров пламени с частицами огнетушащего порошка подтверждается результатами экспериментальной работы [16], в которой наблюдалось более быстрое тушение пламени горючей жидкости огнетушащим порошком, когда струя порошка направлялась в зону горения под углом к нормали поверхности горения.

Заключение. Получены теоретические зависимости количества тепла, поглощаемого частицами огнетушащего порошка, и скорости реакции гетерогенного ингибирования ими (частицами) активных центров пламени в нестационарных условиях теплопередачи и протекания реакции ингибирования для струйных систем порошкового пожаротушения.

Проведена оценка эффективности механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в данных условиях.

Установлено, что эффективность как теплового механизма тушения пожара, так и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в нестационарном режиме их реализации зависит от дисперсных характеристик частиц порошка, соотношения времени пребывания их в зоне горения и характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования.

Тушение пламени огнетушащим порошком в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерные длительности теплопередачи и реакции ингибирования.

Сопоставление проведенных оценок характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожара, что сильно снижает его эффективность при больших скоростях частиц порошка в зоне горения.

Список использованных источников

1. Баратов, А. Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.
2. Абдурагимов, И. М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения / И. М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, №4. – С. 60–82.
3. Баратов, А. Н., Огнетушащие порошковые составы / А. Н. Баратов, Л. П. Вогман. – М.: Стройиздат, 1982. – 72 с.
4. Краснянский, М. Е. Порошковая пожаровзрывозащита / М. Е. Краснянский. – Донецк: Общество книголюбов, 1994. – 152 с.
5. Ингибирование пламени метана взвесями солей / А. Н. Баратов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12, №1. – С. 72–75.
6. Губин, Е. И. Ингибирование газовых пламен порошковыми составами / Е. И. Губин, И. Г. Дик, А. Ю. Крайнов // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25, №2. – С. 57–62.
7. Крайнов, А. Ю. О пределах распространения пламени по запыленному газу / А. Ю. Крайнов, В. А. Шаурман // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, №4. – С. 14–20.
8. Корольченко, Д. А. Тушение пламени огнетушащим порошком и аэрозольными составами / Д. А. Корольченко, А. Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, №8. – С. 63–68.
9. Сабинин, О. Ю. Экспериментальное изучение влияния технологических свойств порошковых составов на их огнетушащую способность при импульсном способе пожаротушения / О. Ю. Сабинин // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, №6. – С. 64–73.
10. 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. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401>
11. Баратов, А. Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтехимической промышленности / А. Н. Баратов, Е. Н. Иванов. – 2-е изд. перераб. – М.: Химия, 1979. – 368 с.
12. Kreith, F. Basic Heat Transfer / F. Kreith, W. Z. Blac. – Harper and Row, 1980. – 512 p.
13. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
14. Семенов, Н. Н. Цепные реакции / Н. Н. Семенов. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
15. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
16. Баланюк, В. М. Определение эффективности тушения огнетушащим аэрозолем горючей жидкости на открытом пространстве / В. М. Баланюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, №10. – С. 4–10.

References

1. Baratov A. N. *Combustion – Fire – Explosion – Safety*. Moscow, Federal State-Financed Establishment “All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”, 2003. 364 p. (in Russian).
2. Abduragimov I. M. About the mechanism of fire extinguishing action of fire extinguishing means. *Pozharovzryvobezopasnost’ = Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 60–82 (in Russian).
3. Baratov A. N., Vogman L. P. *Fire Extinguishing Powder Formulations*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 72 p. (in Russian).
4. Krasnyanskii M. E. *Powder Fire and Explosion Protection*. Doneck, Society of Book Lovers, 1994. 152 p. (in Russian).
5. Baratov A. N., Vogman L. P., Kobzar’ V. N., Azatyan V. V., Museridze M. D., Dzoceniidze Z. G., Petviashvili D. I., Namoradze M. A. Inhibition of methane flame by salt suspensions. *Fizika goreniya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*, 1976, vol. 12, no. 1, pp. 72–75 (in Russian).
6. Gubin E. I., Dik I. G., Krainov A. Y. Inhibition of gas flames by powder formulations. *Fizika goreniya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 57–62 (in Russian).
7. Krainov A. Y., Sheurman V. A. On the extent of flame propagation through dusty gas. *Fizika goreniya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*, 1997, vol. 33, no. 4, pp. 14–20 (in Russian).
8. 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).
9. Sabinin O. Y. The experimental study of the effect of technological properties of powder compositions on their fire extinguishing ability in the pulse method of fire extinguishing. *Pozharovzryvobezopasnost’ = Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 6, pp. 64–73 (in Russian).
10. Kitsak A. I. Model of a thermal mechanism for extinguishing a fire of subclass A1 with general purpose fire extinguishing powder under conditions of non stationary heat exchange. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 391–401 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401>
11. Baratov A. N., Ivanov E. N. *Fire Fighting in the Chemical and Petrochemical Industry*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 368 p. (in Russian).
12. Kreith F., Blac W. Z. *Basic Heat Transfer*. Harper and Row, 1980. 512 p.
13. Frank-Kameneckii D. A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 502 p. (in Russian).
14. Semenov N. N. *Chain Reaction*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 535 p. (in Russian).
15. Kasatkin A. G. *Basic Processes and Devices of Chemical Technology*. Moscow, Publ. House “Alliance” Ltd., 2004. 753 p. (in Russian).
16. Balanyk V. M. Determination of the effectiveness of extinguishing a flammable liquid with a fire extinguishing aerosol in an open space. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2015, vol. 5, no. 10, pp. 4–10 (in Russian).

Информация об авторе

Кицак Анатолий Ильич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследований автоматических средств обнаружения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (ул. Солтыса, 183а, 220046, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-7116-8156>. E-mail: kitsak48@yandex.ru.

Information about the author

Anatoli I. Kitsak – Ph. D. (Physic and Mathematic), Leading Researcher of the Research Department of Automatic Means of Detection and Elimination of Emergencies, Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (183a, Soltys Str., 220046, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-7116-8156>. E-mail: kitsak48@yandex.ru