

## Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени

© А.И. Кицак ✉

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь (Республика Беларусь, 220046, Минск, ул. Солтыса, 183а)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время в области порошкового пожаротушения существует ряд проблем, требующих углубленного изучения физики и технологии процесса тушения пожаров данными средами. Одним из путей поиска решения данных проблем является проведение анализа (теоретического, экспериментального) эффективности часто реализуемых на практике режимов тушения пожаров струйными системами порошкового пожаротушения, когда время взаимодействия огнетушащего порошка с горящим материалом близко к характерному времени протекания основных механизмов тушения — теплового и гетерогенного ингибирования активных центров пламени.

**Цель и задачи.** Целью работы являлась оценка эффективности основных механизмов тушения пожара (теплового и гетерогенного ингибирования активных центров пламени) в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных частиц продуктов горения.

**Методы.** Достижение поставленной цели осуществлялось методом теоретического моделирования механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка.

**Результаты.** Установлено, что тушение пламени огнетушащим порошком общего назначения в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерная длительность как передачи тепла частицам порошка, так и реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени. Сопоставление выполненных оценок характерного времени протекания реакций теплообмена и ингибирования широко распространенных в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожаров, что значительно снижает его вклад в результат тушения пожара при малых временах пребывания частиц порошка в зоне горения.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют оптимизировать условия и режимы подачи огнетушащего порошка в зону горения с целью достижения максимального эффекта тушения, а также вести целенаправленный поиск новых огнетушащих порошковых сред с требуемыми теплофизическими характеристиками.

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

**Для цитирования:** Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 89–99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99

✉ Кицак Анатолий Ильич, e-mail: kitsak48@yandex.ru

## Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centres by powder particles

© Anatoly I. Kitsak ✉

Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (Soltysa St., 183a, Minsk, 220046, Republic of Belarus)

**ABSTRACT**

**Introduction.** Presently, there are several problems in the field of dry powder fire suppression that require the in-depth study of the physics and technology of fire suppression processes using these substances. One of the ways to find the solution to these problems is the efficiency analysis (theoretical and experimental) of frequently implemented fire extinguishing patterns involving fire suppression systems spraying dry powder, when the term of interaction between the dry fire extinguishing powder and the burning material is close to the duration of principal fire extinguishing patterns, or thermal and heterogeneous inhibition of active flame centres.

**Purpose and objectives.** The purpose of the work was to assess the efficiency of principal fire extinguishing patterns (thermal and heterogeneous inhibition of active flame centres) amid non-stable heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active combustion product particles by powder particles.

**Methods.** The pre-set objective was achieved through theoretical modeling of patterns of thermal fire extinguishing and heterogeneous inhibition of active flame centres by dry chemical powder particles.

**Results.** It was established that fire suppression with the help of general purpose dry chemical powder under non-steady conditions is the more effective, the smaller the effective size of powder particles, the longer the time of their stay in the combustion area and the shorter the characteristic period of heat transfer to powder particles and heterogeneous inhibition of active flame centres.

**Conclusions.** The results optimize conditions and patterns of dry fire extinguishing powder application to a combustion area to achieve the highest extinguishing effect and to conduct a targeted search for new dry chemical powders having pre-set thermal and physical specifications.

**Keywords:** dry chemical powder; thermal extinguishing; heterogeneous inhibition; thermal relaxation; inhibition time

**For citation:** Kitsak A.I. Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centres by powder particles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):89-99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99 (rus.).

✉ Anatoly Il'ich Kitsak, e-mail: kitsak48@yandex.ru

**Введение**

Порошковое пожаротушение целенаправленно применяется на практике уже более полувека. Большая востребованность порошков как огнетушащего материала обусловлена рядом их существенных преимуществ по сравнению с другими огнетушащими средствами [1–2].

Тушение пожара огнетушащим порошком обеспечивается синергетическим действием ряда реализуемых в процессе тушения физических и химических механизмов тушения. Основными из них являются тепловой механизм тушения, обусловленный нагревом частиц порошка, и химический процесс ингибирования активных 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 большое число экспериментальных и теоретических работ [3–10]. На основе данных исследований 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 резуль-

тат тушения пожара каждого из огнетушащих механизмов порошка. Однозначное понимание роли этих механизмов позволило бы в конкретных случаях тушения пожара заданного класса создать наиболее благоприятные условия его тушения.

В настоящее время предполагается, что доминирующим механизмом огнетушащего действия порошков является их способность 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 над тепловым 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 обращалось внимание в ряде работ [2, 11]. Однако, как

следует из литературных данных, попыток выяснения причин происходящего не предпринималось.

Анализ основных схем тушения пожара порошками показывает, что подача порошка в зону горения производится в большинстве случаев пневматическим способом. Он реализуется различными способами 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, 12]. При толщине слоя  $\sim 0,1 \dots 0,2$  мм длительность  $t_{int}$  взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени в этой зоне составляет  $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$  с [2]. В то же время нагрев частиц порошка и гетерогенный обрыв цепей горения не происходят мгновенно. По оценкам, приведенным в работе [1], длительность  $\tau$  прерывания цепи (промежуток времени от момента появления активной частицы продукта горения до момента восстановления на поверхности частицы порошка) составляет  $\sim 10^{-4}$  с.

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 основных механизмов тушения пожара — теплового и гетерогенного ингибирования активных центров пламени в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных частиц продуктов горения.

#### **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, которая состоит из областей подогрева горючей среды, реакции горения и собственно пламени (светящейся зоны), сформируется дисперсный слой частиц порошка. Этот слой за промежуток времени  $t_{int}$ , зависящий от скорости частиц порошка и эффективной толщины зоны реакции, покинет ее. Частицы слоя безвозвратно покидают реакционную область, если горючим веществом является горючий газ (ГГ) или легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ). При ту-

шении ЛВЖ частицы порошка проходят через зону реакции и могут проникнуть внутрь жидкости, а затем всплыть на поверхность горения. В этом состоянии их огнетушащая способность будет проявляться в экранировании поверхности ЛВЖ от воздействия тепла пламени, способствуя ее охлаждению.

Когда осуществляется тушение твердого горючего материала (ТГМ), часть частиц порошка может осесть в обуглившихся зазорах материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, может 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 за счет увеличения теплоотвода от горючего вещества и уменьшению теплоотдачи от него. Первая из этих форм реализуется при расходе тепла, поглощенного частицами порошка, на их расплав и отдачу тепла путем теплопередачи 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 или радикалов продуктов горения. Процесс гетерогенного ингибирования приводит к обрыву цепей горения и в конечном результате к снижению тепловыделения.

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

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 времена протекания реакции ингибирования активных центров пламени  $\tau_{ing}$  и нагрева частиц порошка  $\tau_{rel}$ , то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибиро-

ние активных центров пламени равно, как и нагрев частиц порошка, происходит наиболее эффективно, т.е. частицы успевают ингибировать максимальное число центров пламени и нагреться до максимальных температур. Тушение пожара происходит в благоприятных условиях.

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

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

Определим количество теплоты  $Q$ , аккумулированной частицами порошка за время их пребывания в зоне горения  $t_{int}$ . Для этого вначале найдем закон изменения температуры частицы порошка во времени  $t$  при ее попадании во фронт пламени.

Воспользуемся для этого одним из упрощенных подходов к решению задач теплопроводности, относящимся к случаю, когда поле температур в твердом теле изменяется во времени, но в любой момент времени не изменяется в пространстве. Данный случай реализуется при передаче тепла телу от нагретого слоя горящего газа путем конвекции, если сопротивление теплопроводности в теле намного меньше сопротивления конвекции на его поверхности [13].

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 [13], т.е.

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

где  $h_c$  — средний коэффициент конвективной теплопередачи на поверхности раздела теплового слоя и твердого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d_p$  — характерный размер тела, м;

$\lambda_p$  — коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К).

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

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

где  $\lambda_g$  — коэффициент теплопроводности горящего газа.

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

Проведенные оценки чисел Био для двух сортов огнетушащих порошков с преобладанием частиц бикарбоната натрия ( $\lambda_p = 4$  Вт/(м·К) [11]) и моноаммо-

нияфосфата ( $\lambda_p = 0,25$  Вт/(м·К) [11]) показали, что при  $d_p = 50$  мкм и средней теплопроводности нагретого ( $\sim 700$  °С) газа (воздуха)  $\lambda_g = 6,71 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К) они равны 0,033 и 0,53 соответственно. Видно, что условие (1) выполняется для частиц бикарбоната натрия с более высокой точностью, чем для частиц моноаммонияфосфата. 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 между аккумулированной частицей и энергией, подводимой к поверхности частицы из зоны горения. Математически этот закон представляется в виде [13]:

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

где  $\rho$  — плотность материала частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  — объем частицы порошка, м<sup>3</sup>;

$c_p$  — 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 горячим газом температурой  $T_g$ , К;

$A_s$  — площадь поверхности частицы, м<sup>2</sup>.

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  $d_p = V/A_s$  — характерный геометрический размер частиц порошка, м.

Определим количество тепла  $Q$ , аккумулированное частицами порошка за время пребывания их в зоне горения  $t_{int}$ . Для этого проинтегрируем выражение  $q(t)$  в пределах от 0 до  $t_{int}$  с учетом (4).

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 времени взаимодействия, кг;  $Bi = h_c d_p / \lambda_p$  ( $\lambda_p$  — коэффициент теплопроводности материала частиц, Вт/(м·К));

$t_{int} = \frac{l_{int}}{v}$  ( $l_{int}$  — эффективная длина взаимо-

действия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м);



$v$  — скорость частиц в реакционной зоне, м/с;  
 $\tau_{rel} = d_p^2/\alpha$  — характерное время нагрева (остывания) материала частиц порошка, с;  
 $\alpha = \lambda/c_p\rho$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Количество тепла  $Q_{ext}$ , поглощенное частицами порошка за время выпуска порошка  $\tau_{ext}$  (время тушения), равно:

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

где  $J = G/S_{ext}$  — интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/(м<sup>2</sup>с);

$G$  — массовый расход порошка, кг/с;

$S_{ext}$  — площадь тушения пожара, м<sup>2</sup>.

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 порошка в зону горения. Зависимость эффективности теплового механизма тушения пожара от характерных размеров частиц огнетушащего порошка проявляется через зависимость от них параметра  $\tau_{rel}$ . Параметр  $\tau_{rel}$  характеризует скорость нагрева (остывания) 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.

Как следует из (6), для эффективного охлаждения зоны горения необходимо, чтобы время нахождения частиц в этой зоне  $t_{int}$  было больше времени  $\tau_{rel}$ .

Определим время  $\tau_{rel}$  для упомянутых выше типов огнетушащих порошков: бикарбоната натрия ( $c_p = 1030$  Дж/кг·К;  $\rho = 2020$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,4$  Вт/(м·К) [11]) и моноаммонияфосфата ( $c_p = 1234$  Дж/кг·К;  $\rho = 1803$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,025$  Вт/(м·К) [11]).

Для частиц размером  $d_p \sim 50$  мкм значения  $\tau_{rel}$  равны 1,3 и 22 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 42 мс для частиц моноаммонияфосфата.

#### 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 равнодоступной поверхности [14].

Следуя данному методу, запишем уравнение равенства потока  $j(C)$  активных частиц пламени, восстанавливаемых на поверхности частицы порошка, потоку активных частиц, доставляемых к этой поверхности в результате образовавшейся разности концентраций частиц возле поверхности ингибитора и внутри горючего газа, с учетом конечности времени ингибирования активных центров  $\tau_{ing}$ .

Получим:

$$j(C) = \beta(C - C_0) - \tau_{ing} \frac{dj(C)}{dt}, \quad (7)$$

где  $C_0 = m_0/V$  — концентрация активных частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$m_0$  — начальная масса активных частиц в слое горючего газа, кг;

$V$  — объем горячего слоя газа, м<sup>3</sup>;

$\beta$  — коэффициент массоотдачи, м/с.

Предположим, что реакция ингибирования на поверхности является реакцией первого порядка:

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

где  $k$  — кинетическая константа скорости реакции, м/с.

Проинтегрировав (7) с учетом (8) при условии постоянства коэффициентов  $\beta$  и  $k$  (квазистационарный режим реакции) и того, 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  $\Delta\tau = \tau_{ing} k/(k + \beta)$  — эффективное время обрыва цепи горения, с.

Для скорости реакции ингибирования  $dm/dt$  (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  $V$ , м<sup>2</sup>;

$K^*$  — 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  $\tau_{ing}$  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, т.е., когда  $t_{int} \gg \Delta\tau$ , масса ингибированных центров пламени стремится к максимально возможному значению за интервал времени  $t_{int}$  [1].

Если время взаимодействия  $t_{int} \ll \Delta\tau$ , то масса ингибированных центров пламени будет стремиться к минимально возможному значению, при том же значении  $\Delta\tau$ .

Выразим соотношение для  $m$  через кинетические параметры реакции ингибирования, дисперсные характеристики частиц огнетушащего порошка и параметры подачи его в зону пламени.

Из фундаментальной работы [15] известно, что кинетическая константа скорости  $k$  равна:

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

где  $\gamma$  — вероятность адсорбции активных частиц поверхностью дисперсной частицы;

$u$  — средняя тепловая скорость активной частицы, м/с.

Коэффициент массоотдачи  $\beta$  к поверхности частицы ингибирования определяется выражением [14]:

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

где  $Nu_d$  — критерий Нуссельта для процесса диффузии;

$D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$d_{eq}$  — эквивалентный диаметр каналов слоя, в которых происходит гетерогенная реакция, м.

Величину  $d_{eq}$  можно выразить через характеристики дисперсного слоя огнетушащих частиц. Согласно [16] имеем:

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

где  $F$  — фактор формы частиц (для шарообразных частиц  $F = 1$ );

$\epsilon = (V - V_0)/V = 1 - \rho_n/\rho_p$  — порозность слоя;

$V$  — общий объем, занимаемый слоем частиц порошка, м<sup>3</sup>;

$V_0$  — объем, занимаемый частицами порошка в слое, м<sup>3</sup>;

$\rho_n$  — насыпная плотность частиц порошка, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_p$  — истинная плотность частиц порошка, кг/м<sup>3</sup>;

$d_p$  — диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м.

Эффективная площадь  $S_{ch}$  поверхности каналов, образованных частицами слоя [16]:

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

где  $S$  — площадь основания слоя дисперсных частиц в толще горючего газа, м<sup>2</sup>;

$H$  — 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 посредством молекулярной или конвективной диффузии. 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 относительные массы ингибированных центров пламени в указанных областях протекания реакции ингибирования.

**Кинетическая область.** Реакция в этой области протекает, когда вероятность адсорбирования  $\gamma$  атома или радикала поверхностью ингибитора при соударении с ней много меньше единицы, т.е.  $\gamma \ll 1$  [15]. При этом активная частица до своего уничтожения 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  $\tau_{ing}$  будет определяться величиной, обратной константе скорости обрыва цепи [15], т.е.

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

Используя определения (13)–(17), получим из (12) следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени в кинетической области протекания реакции ингибирования за время подачи порошка в зону горения  $\tau_{ext}$ :

$$\frac{m}{m_0} = \frac{3}{2} J \gamma u \frac{1}{F d_p v \rho_p} \times \Delta \tau \left( \frac{t_{int}}{\Delta \tau} - \left( 1 - \exp \left( - \frac{t_{int}}{\Delta \tau} \right) \right) \right) \frac{t_q}{t_{int}}, \quad (18)$$

где  $J = G/S_q$  — интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/м<sup>2</sup>с;

$G = m/t$  — массовый расход частиц порошка, кг/с;

$S_q$  — площадь тушения пожара, м<sup>2</sup>;

$v$  — скорость частиц порошка в зоне пожара, м/с;

$\Delta \tau = \tau_{ing} k/\beta$  — эффективное время длительности реакции ингибирования, равное:

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

В случае диффузии активных частиц в неподвижной среде  $Nu_d \sim 1$  [15].

**Диффузионная область.** В этой области реакция протекает, когда  $\gamma \approx 1$ , т.е., 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  $\tau$  активных центров к поверхности ингибитора.

Время диффузии можно оценить из соотношения Эйнштейна  $4D\tau = d_{eq}^2$  [15].

Из чего следует:

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

Учитывая особенности протекания реакции ингибирования в диффузионной области, получим следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени за время  $\tau_{ext}$ :

$$\frac{m}{m_0} = 9J \frac{Nu_d D}{F^2 d_p^2 v \rho_p} \left( \frac{\rho_n}{\rho_p - \rho_n} \right) \times \Delta \tau \left( \frac{t_{int}}{\Delta \tau} - \left( 1 - \exp \left( - \frac{t_{int}}{\Delta \tau} \right) \right) \right) \frac{t_q}{t_{int}}, \quad (21)$$

где  $\Delta \tau = \tau_{ing}$  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  $\Delta \tau$ .

Длительность реакций ингибирования  $\Delta \tau$  в различных областях их протекания, как следует из формул (19) и (22), практически одинакова. 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  $\varepsilon = 0,9$  величина  $\Delta \tau = 1,52 \cdot 10^{-6}$  с, а при  $\varepsilon = 0,5$  длительность реакции ингибирования составляет  $\Delta \tau = 1,88 \cdot 10^{-8}$  с.

Из полученных оценок  $\Delta \tau$  следует, что для эффективного гетерогенного ингибирования атомов кислорода частицами порошка их скорость  $v$  при диаметре  $d_p = 50$  мкм, порозности в зоне реакции  $\varepsilon = 0,9$  и  $l_{int} = 200$  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.

#### 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 результат тушения пожара и зависимость этого результата 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 зависи-

мость характеристик инерционности этих процессов  $\tau_{rel}$  и  $\Delta t$  от  $d_p$ .

Как следует из соотношений для параметров  $\tau_{rel}$  и  $\Delta t$  инерционность рассматриваемых механизмов тушения тем меньше, чем меньше характерный размер  $d_p$  частиц порошка.

Для струйных систем порошкового тушения пожара чем меньше инерционность механизмов тушения пожара, т.е. 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.

Сопоставление приведенных оценок  $\tau_{rel}$  для частиц двух приведенных выше типов огнетушащих порошков и  $\Delta t$ , рассчитанных при тех же значениях характерных размеров частиц ( $d_p = 50 \dots 10$  мкм), показывают, 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 скорости реакции гетерогенного ингибирования активных частиц пламени от скорости частиц огнетушащего порошка в зоне реакции позволяет объяснить иногда проявляющуюся низкую эффективность МПП импульсного типа (время выброса порошка  $t_{dis} \leq 1$  с), применяемых, например, при тушении пожара подкласса А1 по сравнению с МПП кратковременного действия ( $t_{dis} = 1 \dots 10$  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. При таких скоростях, как правило, успевает произойти тушение пламенного горения (осуществляется в основном при протекании реакции гетерогенного ингибирования), однако гетерогенное горение материала не удается потушить из-за большей инерционности теплового механизма тушения, ответственного за образование изолирующей пленки на поверхности горючего материала.

Несмотря на то что скорости частиц порошка, выбрасываемых в зону пожара МПП кратковременного действия, могут быть примерно такой же величины, эффективный удельный расход порошка такими модулями на тушение пожара больше эффективного удельного расхода порошка МПП импульсного типа благодаря большему на порядок времени выброса (времени тушения) порошка в зону пожара. За это время может образоваться (нараститься) пленка, препятствующая образованию горючей смеси.

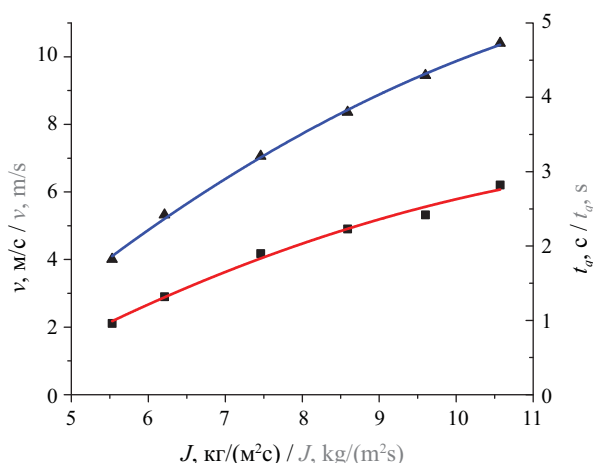
Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) МПП подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени больше, чем характерное время протекания реакции ингибирования активных центров пламени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

Полученные результаты дают также более естественное объяснение известного в пожаротушении парадокса, заключающегося в увеличении удельного расхода огнетушащего порошка при повышении интенсивности подачи порошка в зону горения [17–19]. Этот эффект можно объяснить увеличением скорости частиц порошка при увеличении интенсивности подачи его в зону горения и, следовательно, уменьшением эффективности тушения пожара вследствие сокращения времени теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Уменьшение эффективности тушения пожара ведет к росту времени тушения и, соответственно, увеличению удельного расхода огнетушащего порошка.

Данный вывод хорошо иллюстрируется приведенными на рисунке расчетными зависимостями средней скорости  $v$  частиц порошка в зоне горения и времени  $t_q$  тушения пожара класса В ранга 8В (согласно СТБ 11.13.04-2009) от интенсивности подачи порошка в зону горения.

Кривые построены в предположении, что основной вклад в результат тушения пожара вносит механизм гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка. Расчет времени тушения в зависимости от интенсивности подачи порошка в зону горения производился для кинетической области протекания реакции ингибирования частиц атома кислорода, исходя из соотношения (18) и условия, что критерием тушения пожара является равенство  $m/m_0 = 1$ .





**Рис. 1.** Зависимости средней скорости частиц огнетушащего порошка  $v$  (▲) в зоне горения и времени  $t_q$  (■) тушения пожара от средней интенсивности  $J$  подачи порошка в зону горения

**Fig. 1.** Dependences between average dry chemical powder particle velocity  $v$  (▲) in the combustion area and fire suppression time  $t_q$  (■) on average intensity  $J$  of the dry chemical powder application to a combustion area

Расчетные параметры принимались следующими:  $d_p = 50$  мкм;  $\gamma = 10^{-3}$ ;  $\varepsilon = 0,9$ ;  $\Delta\tau = 3,8 \cdot 10^{-5}$  с;  $u = 1,13 \cdot 10^3$  м/с;  $l_{int} = 200$  мкм;  $\rho_p = 1920$  кг/м<sup>3</sup>;  $F = 1$ . Условное тушение пожара осуществлялось модульной установкой порошкового пожаротушения с модулем, расположенным на высоте 2,4 м от поверхности горючей жидкости и имеющим диаметр выходного отверстия, равный 24 мм. Изменение интенсивности подачи порошка в зону пожара осуществлялось подачей в зону горения различных навесок порошка (0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 кг) сжатым воздухом под постоянным давлением, равным 0,7 МПа. При расчете средней скорости частиц  $v$  использовались соотношения работы [12].

Из рис. 1 видно, что с увеличением интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения растет скорость частиц порошка в этой зоне. Увеличение скорости частиц порошка приводит к уменьшению времени взаимодействия частиц порошка с активными частицами пламени. Вследствие этого и конечности времени протекания реакции ингибирования происходит уменьшение числа ингибированных центров пламени частицами порошка за время пребывания их в зоне реакции. В результа-

те растет время тушения пожара  $t_q$  и соответственно удельный расход порошка на тушение пожара.

Зависимость эффективности тушения пламени от эффективной длительности взаимодействия (времени взаимодействия  $t_{int}$ ) их с частицами огнетушащего порошка подтверждается результатами экспериментальной работы [20], в которой наблюдалось более быстрое тушение пламени горючей жидкости огнетушащим порошком, когда струя порошка направлялась в зону горения под углом к нормали поверхности горения.

## Выводы

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

Проведены оценки 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 и соотношения времени пребывания их в зоне горения и характерной длительности 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 вклад в результат тушения пожара при малом времени пребывания частиц порошка в зоне горения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 363 с.
2. Абдурагимов И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2012. Т. 21. № 4. С. 60–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17821706>

3. Dexu D., Xuhai P., Min H. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. Pp. 142–148. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.126
4. Guomin Z., Guangji X., Shuang J., Qingsong Z., Zhongxian L. Fire-extinguishing efficiency of superfine powders under different injection pressures // *International Journal of Chemical Engineering*. 2019. No. 4. Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2019/2474370
5. Huang X., Liu L., Zhou X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder // *Fire Science*. 2011. Vol. 20. No. 4. Pp. 200–205. URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-HZKX201104005.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-HZKX201104005.htm)
6. Chung-Hwei S., Chan-Cheng C., Horng-Jang L., Shiuan-Cheng W. The assessment of fire suppression capability for the ammonium dihydrogen phosphate dry powder of commercial fire extinguishers // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 84. Pp. 485–490. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.459.
7. Ye Y., Zhivue H., Lingshuang Z., Zhiming D., Xiaomin C. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K–powder fire extinguishing agent // *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42. Pp. 336–344. DOI: 10.1002/fam.2500.
8. Hangchen L., Dexu D., Xinxin G., Min H., Xuhai P. Experimental study on the optimum concentration of ferrocene in composite ultrafine dry powder // *Fire Technology*. 2020. Vol. 56. Pp. 913–936. DOI: 10.1007/s10694-019-00912-x
9. Gurchumelia L., Bezarashvili G., Tsanova R. Thermal inhibition of flame propagation // *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 13. No. 3. Pp. 50–53. URL: [http://science.org.ge/bnas/t13-n3/08\\_Gurchumelia.pdf](http://science.org.ge/bnas/t13-n3/08_Gurchumelia.pdf)
10. Ye Y., Zhiming D., Zhivue H. A novel hot aerosol extinguishing agent with high efficiency for Class B fires // *Fire and Materials*. 2019. Vol. 43. Pp. 84–91. DOI: 10.1002/fam.2671
11. Краснянский М.Е. Порошковая пожаровзрывозащита. Донецк : Общество книголюбых, 1994. 152 с.
12. Кицак А.И. Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения // *БіТр. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza/Safety & Fire Technique*. 2018. Vol. 49 (1). Pp. 76–85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7
13. Kreith F., William Z. Blac. Basic Heat Transfer. New York : Harper & Row, 1980. 512 p.
14. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М. : Наука, 1987. 502 с.
15. Семенов Н.Н. Цепные реакции. М. : Наука, 1986. 535 с.
16. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.
17. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф., Власов Н.А. Эффект огнепреграждения при оценке огнетушащей способности порошковых составов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2015. Т. 24. № 10. С. 67–72. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.67-74
18. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2014. Т. 23. № 11. С. 84–87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23377994>
19. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2016. Т. 25. № 3. С. 67–73. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76
20. Баланюк В.М. Определение эффективности тушения огнетушащими аэрозолями горючих жидкостей на открытом пространстве // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 5. № 10 (77). С. 4–10. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399

## REFERENCES

1. Baratov A.N. *Combustion – Fire – Explosion – Safety*. Moscow, FGU VNIPO MCHS ROSSII, 2003; 364. (rus.).
2. Abduragimov I.M. About mechanisms of fire extinguishing action of fire extinguishing means. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(2):52-56. (rus.).
3. Dexu D., Xuhai P., Min H. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. *Procedia Engineering*. 2018; 211:142-148. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.126
4. Guomin Z., Guangji X., Shuang J., Qingsong Z., Zhongxian L. Fire-extinguishing efficiency of superfine powders under different injection pressures. *International Journal of Chemical Engineering*. 2019; 4:1-7. DOI: 10.1155/2019/2474370

5. Huang X., Liu L., Zhou X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder. *Fire Science*. 2011; 20(4):200-205. URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotat-HZKX201104005.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-HZKX201104005.htm)
6. Chung-Hwei S., Chan-Cheng C., Horng-Jang L., Shiu-Cheng W. The assessment of fire suppression capability for the ammonium dihydrogen phosphate dry powder of commercial fire extinguishers. *Procedia Engineering*. 2014; 84:485-490. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.459
7. Ye Y., Zhivue H., Lingshuang Z., Zhiming D., Xiaomin C. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent. *Fire and Materials*. 2018; 42:336-344. DOI: 10.1002/fam.2500
8. Hangchen L., Dexu D., Xinxin G., Min H., Xuhai P. Experimental study on the optimum concentration of ferrocene in composite ultrafine dry powder. *Fire Technology*. 2020; 56:913-936. DOI: 10.1007/s10694-019-00912-x/
9. Gurchumelia L., Bezarashvili G., Tsanova R. Thermal inhibition of flame propagation. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2019; 13(3):50-53. URL: [http://science.org.ge/bnas/t13-n3/08\\_Gurchumelia.pdf](http://science.org.ge/bnas/t13-n3/08_Gurchumelia.pdf)
10. Ye Y., Zhiming D., Zhivue H. A novel hot aerosol extinguishing agent with high efficiency for Class B fires. *Fire and Materials*. 2019; 43:84-91. DOI: 10.1002/fam.2671
11. Krasnyansky M.E. *The Powder fire and explosion protection*. Donetsk, Society of book lovers, 1994; 152. (rus.).
12. Kitsak A.I. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into combustion zone. *BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza/Safety & Fire Technique*. 2018; 49(1):76-75. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7 (rus.).
13. Kreith F., William Z. Blac. *Basic Heat Transfer*. New York, Harper & Row, 1980; 512.
14. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow, Nauka Publ., 1987; 502. (rus.).
15. Semenov N.N. *Chain reaction*. Moscow, Nauka, 1986; 535. (rus.).
16. Kasatkin A.G. *Basic processes and devices of chemical technology*. Moscow, LLC TID "Alliance", 2004; 753. (rus.).
17. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F., Vlasov N.A. Effect of fire obstruct for assessment of fire extinguishing ability of powder structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(10):67-72. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.67-74 (rus.).
18. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(11):84-87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23377994> (rus.).
19. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Analysis of a typical relation used for description of dependence of the extinguishing time of flammable liquids and the specific consumption of various extinguishing agents on their flow rate. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(3):67-73. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76 (rus.).
20. Balanyk V.M. The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols. *Vostochno-Evropejski jurnal peredovih tehnologiy/Eastern European journal of advanced technologies*. 2015; 10(77):4-10. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399 (rus.).

Поступила 24.08.2020, после доработки 23.09.2020;

принята к публикации 05.10.2020

Received August 24, 2020; Received in revised form September 23, 2020;

Accepted October 5, 2020

### Информация об авторе

**КИЦАК Анатолий Ильич**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела исследований автоматических средств обнаружения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 343265, ORCID: 0000-0002-7116-8156; e-mail: kitsak48@yandex.ru

### Information about the author

**Anatoly I. KITSACK**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of 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, Minsk, Republic of Belarus; ID RISC: 343265, ORCID: 0000-0002-7116-8156; e-mail: kitsak48@yandex.ru