

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-331-343>
УДК 614.841



Оригинальная статья

А. И. Кицак

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ГЕТЕРОГЕННОГО И ГОМОГЕННОГО ИНГИБИРОВАНИЯ ЧАСТИЦАМИ ОГNETУШАЩЕГО ПОРОШКА АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ ПЛАМЕНИ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Аннотация. Для совершенствования технологии тушения пожара огнетушащим порошком проведен анализ механизмов тушения пожара данным веществом, основанных на физико-химических процессах прерывания цепных реакций горения. Выполнена оценка эффективности механизмов гетерогенного и гомогенного ингибирования частицами порошка активных частиц пламени с учетом скорости их образования, а также сопоставление их вкладов в результат тушения пожара. Проведено математическое моделирование механизмов гетерогенного и гомогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени с учетом скорости их образования. Получены теоретические зависимости скоростей реакций гетерогенного и гомогенного ингибирования активных частиц пламени от дисперсных характеристик частиц порошка, времени пребывания их в зоне горения и характерных длительностей реакций. Установлено, что условием эффективного восстановления активных частиц пламени рассматриваемыми механизмами является превышение времени взаимодействия частиц порошка с активными частицами пламени над длительностями реакций ингибирования, а также превышение скоростей данных реакций скорости их образования. Скорость восстановления активных частиц пламени зависит от размеров частиц огнетушащего порошка: чем меньше размер частиц порошка, тем больше скорость восстановления. Такая зависимость наблюдается в явном виде для механизма гетерогенного ингибирования активных частиц пламени и в неявном виде для механизма гомогенного ингибирования через зависимость скорости термообразования радикалов оксидов металлов огнетушащего порошка, участвующих в данном процессе, от размеров частиц порошка. Наличие двух стадий в реализации механизма гомогенного ингибирования активных частиц пламени (термообразования радикалов оксидов металлов применяемых порошковых веществ и собственно самого процесса ингибирования) позволяет считать данный механизм восстановления активных частиц более длительным, чем механизм гетерогенного ингибирования, а следовательно, не вносящим существенного вклада в химический процесс тушения пожара. Результаты работы могут быть применены при разработке составов огнетушащих порошков, а также в пожаротушении для выбора оптимальной скорости подачи огнетушащего порошка в очаг пожара.

Ключевые слова: огнетушащий порошок, активные центры пламени, гетерогенное ингибирование пламени, гомогенное ингибирование, скорость генерации активных частиц пламени

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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. E-mail: kitsak48@mail.ru

Для цитирования: Кицак, А. И. Оценка эффективности механизмов гетерогенного и гомогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени с учетом скорости их образования / А. И. Кицак // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 331–343. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-331-343>

Поступила в редакцию: 10.05.2023

Доработанный вариант: 22.08.2023

Утверждена к публикации: 30.11.2023

Подписана в печать: 15.12.2023

Original article

Anatoli I. Kitsak

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

THE EFFECTIVENESS OF MECHANISMS OF HETEROGENEOUS AND HOMOGENEOUS INHIBITION OF FLAME PARTICLES TAKING BY EXTINGUISHING POWDER PARTICLES, INTO ACCOUNT THE RATE OF THEIR FORMATION

Abstract. The relevance of the work is due to the need to improve the technology of extinguishing fire with extinguishing powders based on the study of the laws of the physicochemical processes of interrupting chain combustion reactions, in particular, heterogeneous and homogeneous mechanisms of inhibition of active flame centers by powder particles. The aim of the work is to evaluate the effectiveness of non-stationary mechanisms of heterogeneous and homogeneous inhibition of active flame particles by fire extinguishing powder particles taking into account the rate of their birth, as well as to compare the contributions of each of the mechanisms to the result of fire extinguishing. Mathematical modeling of the mechanisms of heterogeneous and homogeneous inhibition of active flame particles by fire extinguishing powder particles is carried out, taking into account the rate of birth of active particles of in flame. The theoretical dependences of the rates of reactions of heterogeneous and homogeneous inhibition of active flame particles on the dispersed characteristics of powder particles, their residence time in the zone of flame and the characteristic durations of inhibition reactions are obtained. It is established that the condition for the effective recovery inhibition of active particles of flame by the mechanisms under consideration is exceeding the time of interaction of powder particles with active flame particles over the duration of inhibition processes, as well as an excess of the rate of inhibition of active flame particles over the rate of their birth. The rate of inhibition of active particles of flame depends on the particle size of the extinguishing powder, namely, the smaller the particle size of the powder, the greater the rate of inhibition. This dependence is observed explicitly for the mechanism of heterogeneous inhibition of active particles of flame and implicitly for the mechanism of homogeneous inhibition through the dependence of the rate of thermal production of metal oxide radicals of the extinguishing powder involved in this process on the size of the powder particles. The presence of two stages in the implementation of the mechanism of homogeneous inhibition of active flame particles (thermal production of metal oxide radicals of the powder substances used and the inhibition process itself) allows us to consider this mechanism of extraction of active particles longer than the mechanism of heterogeneous reduction, and, therefore, it does not significantly contribute to the chemical process of extinguishing a fire.

Keywords: extinguishing powder, active particles of flame, heterogeneous inhibition, homogeneous inhibition, inhibition time, the speed of birth active particles of flame

Conflict of interest: the author declare that there is no conflict of interest.

Information about the author: *Anatoli I. Kitsak* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Research Department of Automatic Means of Detection and Elimination of Emergencies at Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. E-mail: kitsak48@mail.ru

For citation: Kitsak A. I. The effectiveness of mechanisms of heterogeneous and homogeneous inhibition of flame particles taking by extinguishing powder particles, into account the rate of their formation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 331–343 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-331-343>

Received: 10.05.2023

Modified version: 22.08.2023

Approved for publication: 30.11.2023

Signed to the press: 15.12.2023

Введение. Одними из основных механизмов тушения пожара огнетушащим порошком являются гетерогенный и гомогенный процессы ингибирования активных частиц пламени – атомарных водорода и кислорода, а также гидроксильных радикалов газифицированного горючего вещества.

Гетерогенное ингибирование заключается в адсорбции в зоне реакции окисления поверхностью частиц порошка (на центрах адсорбции – поверхностных ионах бездефектной кристаллической решетки частиц порошка либо самих ее дефектах) активных частиц пламени, рекомбинации их с другими активными частицами пламени, достигшими этой поверхности, восстановлению (формированию) неактивных частиц (молекул) из родственных/неродственных атомов либо радикалов газифицированных компонентом горючего вещества или материала [1].

Процесс гомогенного ингибирования активных центров пламени заключается в связывании их продуктами в виде атомов или радикалов, образующихся при терморазложении солей огнетушащего порошка [1]. Важным условием реализации данных процессов является отдача

избыточной энергии рекомбинации активных частиц пламени либо кристаллической решетке частиц порошка (в случае гетерогенного ингибирования), либо одной из участвующих в рекомбинации активных частиц продуктов терморазложения частиц порошка, которая обладает достаточно широкой полосой поглощения тепловой энергии (при гомогенном ингибировании). Процессы гетерогенного и гомогенного ингибирования активных частиц пламени приводят к обрыву цепей горения и в итоге – к снижению тепловыделения.

Изучению эффективности механизмов ингибирования активных частиц пламени посвящено множество работ [2–12], где в основном рассматриваются стационарные режимы реализации данных процессов, то есть схемы ингибирования, при которых время взаимодействия ингибитора с активными частицами пламени значительно больше времени протекания реакции ингибирования. На практике при тушении пожаров, например, модулями порошкового пожаротушения (далее – МПП) импульсного и кратковременного действия время пребывания частиц порошка в зоне реакции окисления продуктов горения может равняться или быть примерно равным времени восстановления активных частиц пламени [13]. В этих условиях механизмы ингибирования протекают в нестационарном режиме.

Изучение данного режима ингибирования пламени частицами огнетушащего порошка имеет большой научный и практический интерес. Научный интерес состоит в установлении закономерностей влияния динамики частиц порошка и их дисперсных характеристик на эффективность реализации механизмов ингибирования активных частиц пламени частицами огнетушащего порошка. В свою очередь, практический интерес заключается в возможности применения полученных результатов для повышения огнетушащей способности порошков при их разработке, а также совершенствовании технологии тушения пожаров различных классов с использованием МПП. Кроме того, результаты могут быть использованы для повышения эффективности тушения пожаров другими огнетушащими средами, в частности огнетушащими аэрозолями и газами, где данные механизмы также проявляются [14].

В [15] проведен анализ эффективности тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процесса гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Оценка эффективности механизма данного процесса проводилась при конечной средней концентрации активных частиц в зоне реакции окисления, без учета образования новых частиц. Высказано предположение, что более близким к реальной картине ингибирования активных частиц пламени является процесс, в котором наряду с восстановлением частиц происходит образование новых.

Цель работы – оценка эффективности нестационарных механизмов гетерогенного и гомогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени с учетом скорости их генерации, а также сопоставление вкладов данных механизмов в результат тушения пожара.

Модель механизма гетерогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени в условиях их непрерывного образования. Упрощенная модель химического процесса тушения пламени горючего вещества огнетушащим порошком предполагает подачу порошка в зону реакции окисления газифицированных компонентов горючего вещества или материала, формирование в данной зоне слоя огнетушащего порошка, протекание в каналах слоя, а также микрополостях реакций гетерогенного и гомогенного ингибирования активных частиц пламени за время нахождения частиц порошка в указанной зоне $t_{\text{int}} = l_{\text{int}}/v$ (l_{int} – эффективная толщина зоны реакции окисления; v – скорость частиц порошка в реакционной зоне, м/с).

Будем считать, что реакция гетерогенного ингибирования активных частиц пламени происходит в отдельном канале слоя частиц порошка. Предположим, что канал имеет форму полого неограниченного в масштабе размеров активных частиц пламени цилиндра с эквивалентным радиусом (R_{eq} , м). Внутри такого условного реактора равномерно по его объему происходит генерация активных частиц пламени с постоянной удельной плотностью (C_r , кг/(м³·с)). Рассмотрим динамику изменения концентрации ($C = C(t, r)$, кг/м³) активных частиц пламени в данном реакторе в результате реакции восстановления их на его поверхности.

Запишем уравнение диффузии активных частиц пламени внутри реактора при указанных условиях:

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

где t – текущее время, с; r – радиальная координата, отсчитываемая от оси канала; D – коэффициент молекулярной диффузии частиц, м²/с.

Уравнение (1) записано в предположении малости продольной молекулярной диффузии активных частиц пламени.

Дополним уравнение (1) граничными и начальными условиями [16]:

$$\left(D \frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R_{\text{eq}}} = - \left(\frac{\gamma u}{4} C \right)_{r=R_{\text{eq}}}; \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=0} = 0; \quad (3)$$

$$C(r, t=0) = C_0; \quad (4)$$

$$C(r=0, t) \neq \infty. \quad (5)$$

Здесь γ – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью частицы порошка; u – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с; C_0 – исходная концентрация активных частиц пламени, кг/м³.

Условие (2) описывает поток активных частиц на стенку реакционного канала. Условие (3) обозначает симметрию профиля концентрации активных частиц пламени относительно оси канала. Условие (5) указывает на то, что решение (1) должно быть затухающим при больших значениях t .

Для решения уравнения (1) при заданных условиях воспользуемся операционным методом. В частности, применим к уравнениям (1)–(5) интегральное преобразование Лапласа для перехода от уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Преобразование Лапласа $L[f(r, t)] = f_L(r, s)$ (изображение) функции $f(r, t)$ выражается уравнением

$$f_L(r, s) = \int_0^{\infty} f(r, t) \exp(-st) dt, \quad (6)$$

где s – параметр Лапласа.

Применяя (6) к выражениям (1)–(5), где $f(r, t) = C(r, t)$, получим следующие уравнения для изображений $C_L(r, s)$ оригинала функции $C(r, t)$:

$$rC_L''(r, s) + C_L'(r, s) - \frac{rs}{D} \left(C_L(r, s) - \frac{C_r}{s^2} - \frac{C_0}{s} \right) = 0; \quad (7)$$

$$C_L'(r, s) = -\frac{\gamma u}{4D} C_L(r, s); \quad (8)$$

$$C_L'(r, s) = 0; \quad (9)$$

$$C_L(0, 0) = \frac{C_0}{s}; \quad (10)$$

$$C_L(0, s) \neq \infty, \quad (11)$$

где $C_L'(r, s) = \frac{dC_L(r, s)}{dr}$.

Общее решение уравнения (7) будем искать в виде [17]

$$C_L(r, s) - \frac{C_r}{s^2} - \frac{C_0}{s} = AI_0\left(\sqrt{\frac{s}{D}}r\right) + BK_0\left(\sqrt{\frac{s}{D}}r\right), \quad (12)$$

где A и B – коэффициенты, определяемые из граничных условий (8)–(11); I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка от чисто мнимого аргумента; K_0 – функция Бесселя второго рода нулевого порядка от чисто мнимого аргумента.

Так как, согласно (11), $C_L(0, s) \neq \infty$, а $K_0\left(\frac{s}{D} \cdot 0\right) \rightarrow -\infty$, то коэффициент $B = 0$. Тогда

$$C_L(r, s) - \frac{C_r}{s^2} - \frac{C_0}{s} = AI_0\left(\sqrt{\frac{s}{D}}r\right). \quad (13)$$

Коэффициент A найдем из граничного условия (8). Продифференцировав уравнение (13) по переменной r и подставив в полученное выражение значение $C'_L(r, s)$ из (8), а затем, решая полученное уравнение относительно A , определим

$$A = -\frac{\frac{\gamma u}{4D}\left(\frac{C_r}{s^2} + \frac{C_0}{s}\right)}{\sqrt{\frac{s}{D}}I_1\left(\sqrt{\frac{s}{D}}R_{\text{eq}}\right) + \frac{\gamma u}{4D}I_0\left(\sqrt{\frac{s}{D}}R_{\text{eq}}\right)}, \quad (14)$$

где $I_1(r) = I'_0(r)$.

С учетом (14) общее решение (13) запишется в виде

$$C_L(r, s) - \frac{C_r}{s^2} - \frac{C_0}{s} = -\frac{\frac{\gamma u}{4D}\left(\frac{C_r}{s^2} + \frac{C_0}{s}\right) \cdot I_0\left(\sqrt{\frac{s}{D}}r\right)}{\sqrt{\frac{s}{D}}I_1\left(\sqrt{\frac{s}{D}}R_{\text{eq}}\right) + \frac{\gamma u}{4D}I_0\left(\sqrt{\frac{s}{D}}R_{\text{eq}}\right)}. \quad (15)$$

В уравнении (15) перейдем от решения задачи для изображения $C_L(r, s)$ непосредственно к решению для оригинала $C(r, t)$. Для этого применим к (15) обратное преобразование Лапласа [17]. В результате получим для $C(r, t)$ следующее соотношение:

$$C(r, t) = \frac{C_r R_{\text{eq}}}{4} \left(\frac{R_{\text{eq}}}{D} + \frac{8}{u\gamma}\right) - \frac{C_r r^2}{4D} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R_{\text{eq}}^2}{D\mu_n^2} \left(C_r - \frac{\mu_n^2 D}{R_{\text{eq}}^2} C_0\right) J_0\left(\mu_n \frac{r}{R_{\text{eq}}}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2 D}{R_{\text{eq}}^2} t\right); \quad (16)$$

$$A_n = \frac{2\text{Bi}_D}{\left[(1 + \text{Bi}_D)\text{Bi}_D - \frac{2D}{R_{\text{eq}}^2} \mu_n^2 (\mu_n^2 - \text{Bi}_D)\right] J_0(\mu_n)}. \quad (17)$$

Здесь $\text{Bi}_D = 2\text{Nu}_D \frac{k}{\beta} = \frac{\gamma u R_{\text{eq}}}{4D}$ – диффузионное число Био, параметр, пропорциональный отношению константы скорости рекомбинации активных частиц пламени ($k = \frac{\gamma u}{4}$ [18]) к коэффициенту массообмена ($\beta = \frac{2\text{Nu}_D D}{R_{\text{eq}}}$ [19]); μ_n – корни характеристического уравнения

$$\frac{J_1(\mu)}{J_0(\mu)} = \frac{B}{\mu}, \quad (18)$$

где $\mu = i\sqrt{\frac{s}{D}}R$; $J_0(\mu)$, $J_1(\mu)$ – функции Бесселя первого рода и соответственно нулевого и первого порядков.

Рассмотрим процесс изменения концентрации $C(r, t)$ активных частиц пламени в результате реакции гетерогенного ингибирования их частицами огнетушащего порошка для двух предельных случаев протекания данной реакции: 1) когда параметр $Bi_D \rightarrow 0$, то есть $k \ll \beta$, и 2) когда $Bi_D \rightarrow \infty$, что соответствует неравенству $\beta \ll k$.

Режим реакции ингибирования активных частиц пламени, соответствующей условию $k \ll \beta$, реализуется, когда вероятность адсорбирования γ атома или радикала поверхностью ингибитора при соударении с ней много меньше единицы, то есть $\gamma \ll 1$. В [18, 19] отмечено, что реакция ингибирования в данном случае протекает в кинетической области. Скорость реакции при этом определяется в основном кинетическими процессами на поверхности ингибитора.

Другой режим реакции ингибирования активных частиц пламени может реализоваться в случае, когда вероятность адсорбирования $\gamma \sim 1$, то есть когда активная частица гибнет при первом же столкновении с поверхностью ингибитора. В данных условиях коэффициент массоотдачи $\beta \ll k$ и эффективность ингибирования ограничивается скоростью диффузии активных частиц к поверхности ингибитора. Область реакции ингибирования, процессы в которой протекают в указанных условиях, называют диффузионной.

Найдем закон изменения концентрации $C_k(r, t)$ активных частиц пламени в кинетической области реакции их ингибирования, то есть когда $Bi_D \rightarrow 0$. При данном условии, как следует из (18), к нулю стремится также функция $J_1(\mu)$ и сам параметр μ . Следовательно, в уравнениях (16) и (17) можно ограничиться первым корнем μ_1 характеристического уравнения (18).

Разложив в ряд по μ функции Бесселя $J_1(\mu)$ и $J_0(\mu)$ в соотношении (18) и ограничившись первыми членами разложения, найдем для μ_1 значение

$$\mu_1 = \sqrt{2Bi_D}. \quad (19)$$

Подставив (19) в (16) и (17), получим следующее соотношение для $C_k(r, t)$ при условии $\mu_1 \rightarrow 0$:

$$C_k(r, t) = C_r \left(\frac{R_{eq}^2}{4D} + \frac{2R_{eq}}{\gamma u} \right) - \frac{C_r r^2}{4D} + \tau_k \left(\frac{C_0}{\tau_k} - C_r \right) J_0 \left(\mu_1 \frac{r}{R_{eq}} \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau_k} \right), \quad (20)$$

где $\tau_k = \frac{d_{eq}}{\gamma u}$ – время реакции ингибирования [15], величина, обратно пропорциональная константе скорости обрыва цепи реакции окисления продуктов горения, с; $d_{eq} = 2R_{eq}$ – эквивалентный диаметр канала слоя, в котором происходит гетерогенная реакция, м.

Величину d_{eq} можно выразить через характеристики дисперсного слоя огнетушащих частиц. Согласно [20] имеем

$$d_{eq} = \frac{2F\varepsilon d_p}{3(1-\varepsilon)}, \quad (21)$$

где F – фактор формы частиц (для шарообразных частиц $F = 1$); $\varepsilon = (V - V_0)/V = 1 - \rho_n/\rho_p$ – порозность слоя (V – общий объем, занимаемый слоем частиц порошка, м³; V_0 – объем, занимаемый частицами порошка в слое, м³; ρ_n – насыпная плотность частиц порошка, кг/м³; ρ_p – истинная плотность частиц порошка, кг/м³); d_p – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м.

Оценим величину уменьшения концентрации активных частиц в результате ингибирования их, определив среднее по координате r значение $\overline{C_k(r, t)}$ по формуле

$$\overline{C_k(r, t)} = \frac{2}{R_{eq}^2} \int_0^{R_{eq}} r C_k(r, t) dr. \quad (22)$$

Подставив в (20) выражение (21), с учетом $\mu_1 \rightarrow 0$ получим

$$\overline{C_k(r,t)} = C_r \tau_k + \tau_k \left(\frac{C_0}{\tau_k} - C_r \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right). \quad (23)$$

Скорость реакции ингибирования (масса активных частиц, восстанавливаемых в единицу времени, dm_k/dt), равна

$$\frac{dm_k}{dt} = k S_{ch} (C_0 - \overline{C_k}), \quad (24)$$

где $S_{ch} = \frac{6V(1-\varepsilon)}{Fd_p}$ – эффективная площадь поверхности каналов, образованных частицами слоя, m^2 [20].

За время взаимодействия t_{int} масса m_k ингибированных частиц будет равна

$$m_k = V \varepsilon (C_0 - C_r \tau_k) \left[\frac{t_{int}}{\tau_k} - \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{int}}{\tau_k}\right) \right) \right], \quad (25)$$

где $\tau_k = \frac{2F\varepsilon d_p}{3(1-\varepsilon)\gamma u}$.

Проведем оценку концентрации $C_d(r, t)$ активных частиц пламени в диффузионной области реакции их ингибирования, то есть когда $Bi_D \rightarrow \infty$.

В данном случае, как следует из (18), корни μ_n уравнения (16) будут определяться из характеристического уравнения

$$J_0(\mu) = 0. \quad (26)$$

Для первого корня уравнения (26) $\mu_1 = 2,4$ соотношение (16) переписывается в виде

$$C_d(r,t) = C_r \frac{R_{eq}^2}{4D} - \frac{C_r r^2}{4D} + \frac{2}{2,4 J_1(2,4)} \tau_d \left(\frac{C_0}{\tau_d} - C_r \right) J_0\left(2,4 \frac{r}{R_{eq}}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right), \quad (27)$$

где $\tau_d = \frac{d_{eq}^2}{23,04D}$ – время реакции ингибирования активных частиц пламени в диффузионной области ее протекания, с.

Среднее по пространству значение концентрации $\overline{C_d(r,t)}$ активных частиц пламени, участвующих в реакции ингибирования их в диффузионной области ее реализации, определяется по формуле

$$\overline{C_d(r,t)} = 0,7 C_r \tau_d + 0,7 \tau_d \left(\frac{C_0}{\tau_d} - C_r \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right), \quad (28)$$

где $\tau_d = \frac{F^2 \varepsilon^2 d_p^2}{52(1-\varepsilon)^2 D}$.

Скорость реакции ингибирования dm_d/dt активных частиц пламени в диффузионной области ее реализации равна

$$\frac{dm_d}{dt} = \beta S_{ch} (C_0 - \overline{C_d}). \quad (29)$$

Соответственно масса m_d активных частиц пламени, ингибированных частицами огнетушащего порошка за время пребывания их в зоне реакции окисления продуктов горения t_{int} , будет составлять

$$m_d = 0,7Nu_D V \varepsilon (1 - \varepsilon) \left[(C_0 - 0,7C_r \tau_d) \frac{t_{int}}{\tau_d} - 0,7(C_0 - C_r \tau_d) \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{int}}{\tau_d}\right) \right) \right]. \quad (30)$$

Анализ эффективности гетерогенного механизма тушения активных частиц пламени огнетушащим порошком. В начале анализа следует отметить, что соотношения для масс ингибированных частиц пламени, полученные в настоящей работе, совпадают при отсутствии процесса непрерывной генерации активных частиц с результатами оценки данных масс, приведенными ранее в работе [15], выполненной на основе феноменологического подхода к процессу гетерогенного ингибирования.

Из выражений (25) и (30) для масс ингибированных активных частиц в кинетическом и диффузионном режимах протекания реакции ингибирования следует, что эффективность гетерогенного ингибирования определяется как физико-химическими и дисперсными характеристиками огнетушащего порошка, так и условиями тушения. В частности, процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше время их взаимодействия t_{int} с активными центрами пламени и чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования τ_k и τ_d . В предельном случае, когда $t_{int} \gg \tau_k, \tau_d$, масса ингибированных активных частиц пламени будет приближаться к максимуму. Формулы (25) и (30) при этом примут вид:

$$m_k = m_0 \left(1 - \frac{C_r}{C_0} \tau_k \right) \frac{t_{int}}{\tau_k}; \quad (31)$$

$$m_d = 0,7Nu_D m_0 (1 - \varepsilon) \left(\left(1 - 0,7 \frac{C_r}{C_0} \tau_d \right) \frac{t_{int}}{\tau_d} \right), \quad (32)$$

где $m_0 = \varepsilon V C_0$ – начальная масса активных центров пламени, кг.

Из полученных соотношений следует, что при значительном превышении времени взаимодействия t_{int} длительностей реакции ингибирования τ_k и τ_d масса ингибированных активных частиц пламени при одновременном образовании их определяется в основном соотношением удельных плотностей ингибирования ($C_0/\tau_k, C_0/\tau_d$) и генерации (C_r) активных частиц. Если C_r активных частиц больше удельной плотности их ингибирования, реакция окисления газифицированных компонентов горючего вещества (горение) будет продолжаться.

Временные периоды ингибирования τ_k и τ_d , как следует из их определений, отличаются функциональной зависимостью от химико-кинетических параметров процесса ингибирования активных частиц и дисперсных характеристик частиц огнетушащего порошка. Существенное отличие τ_k и τ_d наблюдается от размера частиц огнетушащего порошка. Если τ_k линейно зависит от эффективного диаметра частиц порошка, то для τ_d наблюдается квадратичная зависимость от данного параметра.

Оценка величины τ_d для атома водорода с молярной массой $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и диаметром $1 \cdot 10^{-10}$ м показала, что $\tau_d = 1,7 \cdot 10^{-7}$ с при атмосферном давлении $P = 10^5$ Па, температуре в зоне горения $T = 973$ К, коэффициенте диффузии $D = 4,6 \cdot 10^{-3}$ м²/с, диаметре частиц огнетушащего порошка $d_p = 50$ мкм и их порозности $\varepsilon = 0,8$. Для этого же атома при его средней тепловой скорости $u = 4,5 \cdot 10^3$ м/с, $\gamma = 10^{-3}$ [1] и тех же дисперсных параметрах огнетушащего порошка $\tau_k = 3 \cdot 10^{-5}$ с. Результат сопоставления значений τ_k и τ_d свидетельствует о более быстром процессе ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени в диффузионной области реакции ингибирования.

Диффузионный режим реакции ингибирования активных частиц пламени может реализоваться при применении для тушения пожара огнетушащих веществ с относительно большим значением $\gamma \sim 10^{-2}$, например порошков на основе карбонатов натрия при высоких температурах в зоне реакции окисления [1].

Скорости ингибирования активных частиц пламени зависят также от порозности ($\varepsilon = 1 - \rho_n/\rho_p$) частиц огнетушащего порошка в зоне реакции окисления продуктов горения, определяемой

величиной насыпной плотности ρ_n частиц порошка в данной зоне. Чем больше ρ_n , тем меньше ε и тем быстрее происходит процесс обрыва цепей горения.

Для приведенных значений τ_k и τ_d процесс эффективного ингибирования атома водорода в зоне реакции горения, толщиной, равной, например, $l = 100$ мкм, будет происходить, как следует из формул (25) и (30), при скорости частиц огнетушащего порошка v , не превышающих значений 3,3 и 58 м/с для кинетической и диффузионной областей реакции гетерогенного ингибирования соответственно.

Модель механизма гомогенного ингибирования активных частиц пламени при непрерывном их образовании. При тушении пламени частицами огнетушащего порошка наряду с гетерогенным механизмом ингибирования активных частиц пламени проявляется и гомогенный. Физика данного механизма ингибирования в нестационарном режиме реализации его и при непрерывной генерации активных частиц пламени в настоящее время недостаточно изучена. Отсутствует также оценка вклада его в результат тушения пожара. В связи с этим актуален анализ закономерностей реализации данного механизма ингибирования активных частиц пламени и его эффективности.

Будем считать, что реакция гомогенного ингибирования активных частиц пламени происходит в отдельном канале слоя огнетушащих частиц, сформировавшегося в зоне реакции окисления продуктов горения. Для данного канала сохраняются все формализованные ранее параметры. Рассмотрим динамику изменения концентрации $C = C(t, r)$, кг/м³, активных частиц пламени в данном канале (реакторе) в результате реакции их гомогенного ингибирования, когда одновременно по объему канала происходит генерация данных частиц с удельной плотностью $C_r(t, r)$, кг/(м³·с), зависящей в общем случае от параметров t и r .

Запишем уравнение диффузии активных частиц пламени внутри канала при указанных условиях:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) - k_0 C + C_r(r, t), \quad (33)$$

где $k_0 = k_0^g \exp(-E_g / RT_g)$ – константа скорости реакции гомогенного ингибирования, $1/c$ (k_0^g – предэкспонент реакции, $1/c$; E_g – энергия активации реакции ингибирования, ккал/моль; T_g – температура горящего газа, К; R – универсальная газовая постоянная).

Уравнение (33) записано в предположении малости коэффициента продольной молекулярной диффузии активных частиц пламени.

Дополним это уравнение граничными и начальными условиями [21]:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R_{\text{eq}}} = 0; \quad (34)$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=0} = 0; \quad (35)$$

$$C(r, t = 0) = C_0; \quad (36)$$

$$C(0, t) \neq \infty. \quad (37)$$

Условие (34) отражает отсутствие потока активных частиц к стенке реактора. Условия (35)–(37) такие же, как условия (3)–(5).

Для решения уравнения (33) воспользуемся конечным интегральным преобразованием Ханкеля [17]:

$$f_H(p, t) = \int_0^R r f(r, t) J_0(pr) dr, \quad (38)$$

где p – корень характеристического уравнения $J_0'(pR) = J_1(pR) = 0$.

Применив данное преобразование к (33), с учетом условий (34)–(37) получим уравнение переноса активных частиц для изображения $C_H(p, t)$ оригинала функции $C(r, t)$:

$$\frac{dC_H(p, t)}{dt} + (Dp^2 + k_0)C_H(p, t) - C_{rH}(p, t) = 0. \quad (39)$$

Общее решение данного уравнения можно представить в виде:

$$C_H(p, t) = \left(C_H(p, 0) + \int_0^t C_{rH}(p, \theta) \exp[-(Dp^2 + k_0)\theta] d\theta \right) \exp[-(Dp^2 + k_0)t]. \quad (40)$$

Осуществим переход от изображения функции $C_H(p, t)$ к оригиналу $C(r, t)$, используя соотношение [17]:

$$C(r, t) = \frac{2}{R_{\text{eq}}^2} C_H(0, t) + \frac{2}{R_{\text{eq}}^2} \sum_{n=1}^{\infty} C_H(p_n, t) \frac{J_0(p_n r)}{J_0^2(p_n R_{\text{eq}})}, \quad (41)$$

где $C_H(0, t)$ равно

$$C_H(0, t) = \left(C_H(0, 0) + \int_0^t C_{rH}(0, \theta) \exp[-k_0\theta] d\theta \right) \exp[-k_0t]. \quad (42)$$

Осуществляя преобразование (40) с учетом (38), (41) и введя обозначение $\mu_n = p_n R_{\text{eq}}$, получим для $C(r, t)$ следующее соотношение:

$$C(r, t) = \frac{2}{R_{\text{eq}}^2} \left(C_H(0, 0) + \int_0^t C_{rH}(0, \theta) \exp[-k_0\theta] d\theta \right) \exp[-k_0t] + \frac{2}{R_{\text{eq}}^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n - r}{R_{\text{eq}}}\right)}{J_0^2(\mu_n)} \left(C_H(p_n, 0) + \int_0^t C_{rH}(p_n, \theta) \exp[-(Dp_n^2 + k_0)\theta] d\theta \right) \exp[-(Dp_n^2 + k_0)t]. \quad (43)$$

Среднее по пространству значение концентрации $\overline{C(r, t)}$ активных частиц пламени, участвующих в реакции гомогенного ингибирования, составит

$$\overline{C(r, t)} = \frac{2}{R_{\text{eq}}^2} \left(C_H(0, 0) + \int_0^t C_{rH}(0, \theta) \exp[-k_0\theta] d\theta \right) \exp[-k_0t]. \quad (44)$$

Рассмотрим случай гомогенного ингибирования активных частиц пламени, когда удельная скорость генерации их постоянная величина, то есть $C_r(t, r) = \text{const} = C_r$, кг/м³с. После проведения преобразований в (44) с учетом данного условия получим следующее соотношение для $\overline{C(r, t)}$:

$$\overline{C(r, t)} = (C_0 - \tau_g C_r) \exp\left(-\frac{t}{\tau_g}\right) + \tau_g C_r, \quad (45)$$

где $\tau_g = 1/k_0$ – время гомогенного ингибирования активных центров пламени.

Скорость реакции ингибирования dm/dt равна

$$\frac{dm}{dt} = k_0 V \varepsilon (C_0 - \overline{C(r, t)}). \quad (46)$$

За время взаимодействия t_{int} в зоне реакции окисления продуктов горения частиц огнетушащего порошка с активными частицами пламени масса m_g ингибированных частиц составит

$$m_g = V\varepsilon(C_0 - C_r\tau_g) \left[\frac{t_{\text{int}}}{\tau_g} - \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{int}}}{\tau_g}\right) \right) \right]. \quad (47)$$

Максимальное значение массы ингибированных частиц пламени за время взаимодействия t_{int} достигается при $t_{\text{int}} \gg \tau_g$ и равно

$$m_g = m_0 \left(1 - \frac{C_r}{C_0} \tau_g \right) \frac{t_{\text{int}}}{\tau_g}. \quad (48)$$

Отличительной особенностью гомогенного механизма ингибирования активных частиц пламени является то, что определяющее его эффективность время τ_g не зависит в явном виде от размеров частиц огнетушащего порошка. Однако такая зависимость существует в опосредованном виде через зависимость скорости термообразования радикалов солей огнетушащего порошка, участвующих в процессе гомогенного ингибирования, от размеров частиц порошка. Данная скорость пропорциональна величине, обратной характерному времени нагрева материала частиц порошка $\tau_{\text{rel}} = d_p^2/\alpha$, где α – коэффициент температуропроводности материала части порошка, м²/с [15]. Соответственно, чем меньше размер частиц порошка, тем больше скорость образования данных радикалов.

Из соотношения (48) следует, что изменение массы ингибированных активных частиц пламени в процессе гомогенного ингибирования происходит по закону, аналогичному полученному при моделировании механизма гетерогенного ингибирования. Эффективность механизма гомогенного ингибирования активных частиц пламени определяется, как и в случае механизма гетерогенного ингибирования, скоростью протекания данного процесса, в частности значением константы скорости гомогенного ингибирования k_0 . Чем больше k_0 , то есть чем меньше время ингибирования τ_g , тем большая масса m_g активных частиц может быть ингибирована.

Проведенная оценка значения константы скорости k_0 реакции гомогенного ингибирования активных частиц горячей смеси метана и воздуха для значений $k_0^g = 5,4 \cdot 10^{10}$ 1/с; $E_g = 57$ ккал/моль; $T_g = 1790$ К; $R = 2 \cdot 10^{-3}$ ккал/(моль · К), приведенных в [3], показала, что $k_0 = 4,3 \cdot 10^3$ 1/с, то есть время протекания данной реакции τ_g примерно на один и три порядка больше времени длительности реакции гетерогенного ингибирования активных частиц водорода соответственно для кинетического и диффузионного режимов протекания данной реакции.

Полученный результат вкуче с дополнительным временем, требуемым на формирование активных радикалов солей огнетушащего порошка в результате терморазложения, дает основание полагать, что общая скорость восстановления активных частиц пламени в процессе их гомогенного ингибирования меньше скорости данного процесса при гетерогенном ингибировании. Отсюда следует, что вклад механизма гомогенного ингибирования активных частиц пламени в процесс тушения пожара, очевидно, меньше вклада механизма гетерогенного ингибирования данных частиц.

Заключение. Проведено математическое моделирование механизмов гетерогенного и гомогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени с учетом скорости их генерации.

Получены теоретические зависимости скоростей реакций гетерогенного и гомогенного ингибирования активных частиц пламени от дисперсных характеристик частиц порошка, времени пребывания их в зоне горения и характерных длительностей реакций ингибирования.

Анализ данных зависимостей позволил выявить, что концентрация активных части пламени уменьшается в процессе их восстановления по одинаковому экспоненциальному закону для обоих механизмов ингибирования. При этом скорость уменьшения активных частиц определяется соотношением времени пребывания частиц порошка в зоне реакции окисления продуктов горения и характерных длительностей прерывания цепных реакций горения. Условием эффективного

восстановления активных частиц пламени рассматриваемыми механизмами ингибирования является превышение времени взаимодействия частиц порошка с активными частицами пламени над длительностью процессов ингибирования, а также превышение скорости ингибирования активных частиц пламени над скоростью их генерации.

Отличительной особенностью рассматриваемых механизмов ингибирования активных частиц пламени является зависимость времени прерывания цепей горения механизма гетерогенного ингибирования от размеров частиц огнетушащего порошка и отсутствие такой зависимости в явном виде для механизма гомогенного ингибирования активных частиц. Очевидно, такая зависимость для процесса гомогенного ингибирования существует в опосредованном виде через зависимость скорости термообразования радикалов оксидов металлов огнетушащего порошка, участвующих в данном процессе, от размеров частиц порошка.

Наличие двух стадий в реализации механизма гомогенного ингибирования активных частиц пламени (термообразования радикалов солей огнетушащего порошка веществ и собственно процесса ингибирования), приводящих к увеличению времени ингибирования активных частиц, позволяет считать данный механизм восстановления активных частиц более длительным, чем механизм гетерогенного восстановления, а следовательно, не вносящим существенного вклада в химический процесс тушения пожара.

Результаты работы могут быть применены при разработке составов огнетушащих порошков, а также в пожаротушении для выбора оптимальной скорости подачи огнетушащего порошка в очаг пожара.

Список использованных источников

1. Краснянский, М. Е. Порошковая пожаровзрывозащита / М. Е. Краснянский. – Донецк: О-во книголюбов, 1994. – 152 с.
2. Анцупов, Е. В. Оценка вклада в ингибирование пламени гомогенного и гетерогенного механизма / Е. В. Анцупов // Горение и плазмохимия. – 2012. – Т. 10, № 4. – С. 262–267.
3. 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.
4. Крайнов, А. Ю. О пределах распространении пламени по запыленному газу / А. Ю. Крайнов, В. А. Шаурман // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, № 4. – С. 14–20.
5. Dexu, D. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder / D. Dexu, P. Xuhai, H. Min // Procedia Eng. – 2018. – Vol. 211. – P. 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.126>
6. Fire-extinguishing efficiency of superfine powders under different injection pressures / Z. Guomin [et al.] // Int. J. Chem. Eng. – 2019. – № 4. – P. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/2474370>
7. Huang, X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder / X. Huang, L. Liu, X. Zhou // Fire Saf. Sci. – 2011. – Vol. 20, № 4. – P. 200–205.
8. The assessment of fire suppression capability for the ammonium dihydrogen phosphate dry powder of commercial fire extinguishers / S. Chung-Hwei [et al.] // Procedia Eng. – 2014. – Vol. 84. – P. 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.459>
9. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent / Y. Ye [et al.] // Fire and Materials. – 2018. – Vol. 42. – P. 336–344. <https://doi.org/10.1002/fam.2500>
10. Experimental Study on the Optimum Concentration of Ferrocene in Composite Ultrafine Dry Powder / Hangchen Li [et al.] // Fire Technology. – 2020. – Vol. 56. – P. 913–936. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00912-x>
11. Gurchumelia, L. Thermal Inhibition of Flame Propagation / L. Gurchumelia, G. Bezarashvili, R. Tsanova // Bull. Georg. Natl. Acad. Sci. Physical Chemistry. – 2019. – Vol. 13, № 3. – P. 50–53.
12. Ye Y. A novel hot aerosol extinguishing agent with high efficiency for Class B fires / Y. Ye, D. Zhiming, H. Zhivue // Fire and Materials. – 2019. – Vol. 43. – P. 84–91. <https://doi.org/10.1002/fam.2671>
13. Баратов, А. Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность / А. Н. Баратов. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.
14. Пожаротушение в наноразмерах / А. В. Казаков [и др.] // Материалы XXXIV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности». – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – С. 206–211.
15. Кицак, А. И. Эффективность тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при нестационарном взаимодействии его частиц с горящим веществом / А. И. Кицак // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 476–486. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-476-486>
16. Гершензон, Ю. М. Реакции гибели активных частиц на стенке в струевых условиях / Ю. М. Гершензон [и др.] // Доклады Акад. наук СССР. Физ. химия. – 1972. – Т. 205, № 4. – С. 871–874.
17. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 592 с.
18. Семенов, Н. Н. Цепные реакции / Н. Н. Семенов. – М.: Наука, 1986. – 535 с.

19. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
20. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Аль-янс», 2004. – 753 с.
21. Гомогенные реакции первого порядка в условиях ламинарного течения / Ю. М. Гершензон [и др.] // Доклады Акад. наук СССР. Физ. химия. – 1972. – Т. 205, № 3. – С. 624–627.

References

1. Krasnyanskii M. E. *Powder Fire and Explosion Protection*. Doneck, Society of Book Lovers, 1994. 152 p. (in Russian).
2. Antsupov E. V. Assessment of the contribution of homogeneous and heterogeneous mechanism to flame inhibition. *Gorenie i plazmokhimiya = Combustion and Plasmochimistry*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 262–267 (in Russian).
3. Gubin E. I., Dik I. G., Krainov A. Yu. 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).
4. Krainov A. Yu., Shaurman 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).
5. Dexu D., Xuhai P., Min H. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. *Procedia Engineering*, 2018, vol. 211, pp. 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.126>
6. 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. <https://doi.org/10.1155/2019/2474370>
7. Huang X., Liu L., Zhou X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder. *Fire Safety Science*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 200–205.
8. 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. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.459>
9. 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, no. 3, pp. 336–344. <https://doi.org/10.1002/fam.2500>
10. Li H., Du D., Guo X., Hua M., Pan X. Experimental Study on the Optimum Concentration of Ferrocene in Composite Ultrafine Dry Powder. *Fire Technology*, 2020, vol. 56, pp. 913–936. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00912-x>
11. 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.
12. 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, no. 1, pp. 84–91. <https://doi.org/10.1002/fam.2671>
13. Baratov A. N. *Combustion – Fire – Explosion – Safety*. Moscow, All-Russian Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2003. 364 p. (in Russian).
14. Kozakov A. B., Popov A. B., Khatuntseva C. Yu., Bukhtoyarov D. V. Fire fighting in nanoscale. *Materialy 34 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Aktualnie problemy pozharnoi bezopasnosti”* [Proceedings of the 34th International Scientific and Practical Conference “Actual Problems of Fire Safety”]. Moscow, All-Russian Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022, pp. 206–211 (in Russian).
15. 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. *Vesti Natsyonal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh 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>
16. Gershenzon Yu. M., Rozenshtein A. H., Spasskii A. N., Kogan A. N. Reactions of death of active particles on the wall under jet conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR. Fizicheskaya khimiya = Reports of the USSR Academy of Sciences. Physical Chemistry*, 1972, vol. 205, no. 4, pp. 871–874 (in Russian).
17. Luikov A. V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 592 p. (in Russian).
18. Semenov H. H. *Chain Reactions*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 535 p. (in Russian).
19. Frank-Kamenetskii D. A. *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*. New Jersey: Princeton University Press, 1955. ix, 364 p. <https://doi.org/10.1515/9781400877195>
20. Kasatkin A. G. *Basic Processes and Devices of Chemical Technology*. Moscow, LLC Trading and Publishing House “Alliance”, 2004. 753 p. (in Russian).
21. Gershenzon Yu. M., Rozenshtein A. H., Spasskii A. N., Kogan A. N. Homogeneous first-order reactions under laminar flow conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR. Fizicheskaya khimiya = Reports of the USSR Academy of Sciences. Physical Chemistry*, 1972, vol. 205, no. 3, pp. 624–627 (in Russian).