

## ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ПОЖАРОВ И АВАРИЙ

DOI: <https://doi.org/10.54422/1994-439X.2023.2-54.51-68>

УДК 614.841

канд. физ.-мат. наук Кицак А.И., Лобач Д.С.\*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕТЕРОГЕННОГО И ГОМОГЕННОГО ИНГИБИРОВАНИЯ ЧАСТИЦАМИ ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ ПЛАМЕНИ В УСЛОВИЯХ ИХ НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

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

*\*Филиал «Институт переподготовки и повышения квалификации»  
государственного учреждения образования  
«Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным  
ситуациям Республики Беларусь», д. Светлая Роща*

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования технологии тушения пожара огнетушащими порошками на основе изучения закономерностей физико-химических процессов прерывания цепных реакций горения, в частности, гетерогенного и гомогенного механизмов ингибирования частицами порошка активных центров пламени.

Целью работы является оценка эффективности нестационарных механизмов гетерогенного и гомогенного ингибирования частицами огнетушащего 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 их пребывания в зоне горения и характерных длительностей реакций ингибирования.

Установлено, что условием эффективного ингибирования активных частиц пламени рассматриваемыми механизмами является превышение времени взаимодействия частиц порошка с активными частицами пламени длительностей процессов ингибирования, а также превышение скорости ингибирования активных частиц пламени скорости их образования. Скорость ингибирования активных частиц пламени зависит от размеров частиц огнетушащего порошка. Причем, чем меньше размер частиц порошка, тем больше скорость ингибирования. 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 процесса ингибирования) позволяет считать данный механизм восстановления активных частиц более длительным, чем механизм гетерогенного восстановления, а, следовательно, не вносящим существенного вклада в химический процесс тушения пожара.

*Ключевые слова:* огнетушащий порошок, активные центры пламени, гетерогенное ингибирование пламени, гомогенное ингибирование, скорость образования активных частиц пламени.

**Ph.D. in Physics and Mathematics Kitsak A.I., Lobach D.S.\***

## **MODELING OF MECHANISMS OF HETEROGENEOUS AND HOMOGENEOUS INHIBITION OF ACTIVE FLAME PARTICLES BY FIRE EXTINGUISHING POWDER PARTICLES UNDER CONDITIONS OF THEIR CONTINUOUS GENERATION**

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

*\* The branch "Institute of Retraining and Professional Development" of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Svetlaya Roshcha*

The relevance of the work is the need to improve the technology of extinguishing fire with extinguishing powders based on the study of the regularity of the physicochemical processes of interrupting chain reactions of oxidation of combustion products, 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, taking into account the rate of birth of active particles of flame, is carried out.

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 inhibition of active flame particles is an excess of the interaction time of powder particles with active flame particles, as well as an excess of the rate of inhibition of active flame particles of the rate of their birth. The rate of inhibition of active flame particles depends on the size of the extinguishing powder particle. Moreover, the smaller the size of the powder particles, the greater the rate of inhibition. This dependence is observed explicitly for the mechanism of heterogeneous inhibition of active flame particles and implicitly for the mechanism of homogeneous inhibition through

the dependence of the rate of thermal formation 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 formation of metal oxide radicals of the used powder substances and the inhibition process itself) allows us to consider this mechanism of extraction of active particles longer than the mechanism of heterogeneous extraction, and, therefore, it does not significantly contribute to the chemical process of extinguishing a fire.

*Keywords:* extinguishing powder, active flame particles, heterogeneous inhibition, homogeneous inhibition, inhibition time, the rate of birth active flame particles.

## Введение

Одними из основных механизмов тушения пожара огнетушащим порошком являются гетерогенный и гомогенный процессы ингибирования активных частиц пламени, которыми являются атомарный водород, кислород, а также гидроксильные радикалы газифицированного горючего вещества.

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

Процесс гомогенного ингибирования активных центров пламени происходит в объеме зоны горения (реакции окисления) и 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 или кристаллической решетке частиц порошка, как в случае гетерогенного ингибирования, или одной из участвующих в рекомбинации активных частиц, обладающей достаточно широкой полосой поглощения тепловой энергии, при гомогенном ингибировании.

Процессы гетерогенного и гомогенного ингибирования активных частиц пламени приводят к обрыву цепей горения и в конечном результате к снижению тепловыделения.

Изучению эффективности механизмов ингибирования активных частиц пламени посвящено большое число работ [2–12]. В них рассматриваются в основном стационарные режимы реализации данных процессов, т.е. 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]. Механизмы ингибирования в данном случае 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 свойств на эффективность реализации механизмов ингибирования активных частиц пламени частицами огнетушащего порошка. Практический интерес заключается в возможности применения полученных закономерностей для совершенствования техники и технологии тушения пожаров различных классов МПП, а также улучшения методики контроля их огнетушащей способности. Кроме того, они могут быть использованы для интерпретации результатов тушения пожаров другими огнетушащими средами, в частности, огнетушащими аэрозолями и газами, где данные механизмы также проявляются [14].

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

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

### **Модель механизма гетерогенного ингибирования частицами огнетушащего порошка активных частиц пламени в условиях их непрерывного рождения**

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  $t_{\text{int}} = l_{\text{in}} / v$  ( $l_{\text{int}}$  – эффективная длина области взаимодействия частиц порошка с активными частицами пламени, м;  $v$  – 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  $R_{\text{eq}}$ , м. Внутри тако-

го условного реактора равномерно по его объему происходит генерация активных частиц пламени с постоянной удельной плотностью  $C_b$ , кг/м<sup>3</sup>с. Рассмотрим динамику изменения концентрации  $C = C(t, r)$ , кг/м<sup>3</sup>, 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:

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

где  $t$  – текущее время, с;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии частиц, м<sup>2</sup>/с;  $r$  – радиальная координата, отсчитываемая от центра канала.

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  $\gamma$  – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью частицы порошка;  $u$  – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с;  $C_0$  – исходная концентрация активных частиц пламени, кг/м<sup>3</sup>.

Условие (2) описывает поток активных частиц на стенку реакционного канала. Условие (3) свидетельствует о конечном значении концентрации активных частиц на оси канала (условие симметрии задачи). 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 следующим уравнением:

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

где  $s$  – параметр Лапласа.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где  $A$  и  $B$  – постоянные, 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 (9),  $C_L(0,s) \neq \infty$ , а  $K_0 \left( \frac{s}{D} \cdot 0 \right) \rightarrow -\infty$ , то коэффициент  $B = 0$ , тогда

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

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

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

где  $I_1(r) = I_1'(r)$ .

Учитывая (14), общее решение (13) запишется в следующем виде:

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

Перейдем в уравнении (15) 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. Воспользовавшись стандартным приемом

обратного преобразования Лапласа, приведенным, например, в [17], получим для  $C(r,t)$  следующее соотношение:

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

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

где  $Bi_D = 2Nu_D \frac{k}{\beta} = \frac{\gamma u R_{eq}}{4D}$  – диффузионное число Био, параметр, пропорциональный отношению константы скорости рекомбинации активных частиц пламени  $k = \gamma u / 4$  [18] к коэффициенту массообмена  $\beta = \frac{2Nu_D D}{R_{eq}}$  [19];  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения

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

где  $\mu = i\sqrt{\frac{s}{D}}R$ , а  $J_0(\mu)$ ,  $J_1(\mu)$  – 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. Для случая, когда параметр  $Bi_D \rightarrow 0$ , т.е. когда  $k \ll \beta$  и когда  $Bi_D \rightarrow \infty$ , что соответствует неравенству  $\beta \ll k$ .

Режим реакции ингибирования активных частиц пламени, соответствующий условию  $k \ll \beta$ , реализуется, когда вероятность адсорбирования  $\gamma$  атома или радикала поверхностью ингибитора при соударении с ней много меньше единицы, т.е.  $\gamma \ll 1$ . Отмечают [18, 19], 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  $\gamma \sim 1$ , т.е., 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  $C(r,t)$  активных частиц пламени в кинетической области реакции их ингибирования, т.е. когда  $Bi_D \rightarrow 0$ .

При  $Bi_D \rightarrow 0$ , как следует из (18), к нулю стремится также функция  $J_1(\mu)$

и сам параметр  $\mu$ .

Следовательно, в уравнениях (16) и (17) можно ограничиться первым корнем  $\mu_1$  характеристического уравнения (18). Разложив в ряд по  $\mu$  функции Бесселя  $J_1(\mu)$  и  $J_0(\mu)$  в соотношении (18) и ограничившись первыми членами разложения, найдем значение для  $\mu_1$ :

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

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

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

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, 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.

Оценим величину уменьшения концентрации активных частиц в результате ингибирования их, определив среднее по координате  $r$  значение  $C_k(r,t)$  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), получим с учетом  $\mu_1 \rightarrow 0$

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

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



$$\frac{dm}{dt} = kS_{ch} (C_o - \bar{C}_k), \quad (24)$$

где  $S_{ch} = 6V(1-\varepsilon) / Fd_p$  – эффективная площадь поверхности каналов, образованных частицами слоя, м<sup>2</sup> [20].

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

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

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, т.е. когда  $Bi_D \rightarrow \infty$ .

В данном случае, как следует из (18), корни  $\mu_n$  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 следующем виде:

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

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, равно

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

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

Скорость реакции ингибирования  $\frac{dm_d}{dt}$  активных частиц пламени в диффузионной области ее реализации равна

$$\frac{dm_d}{dt} = \beta S_{ch} (C_o - \bar{C}_d). \quad (29)$$

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

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

### 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)–(30) для масс ингибированных активных частиц в кинетической и диффузионной 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  $t_{int}$  их взаимодействия с активными центрами пламени и чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования  $\tau_k$  и  $\tau_d$ . 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 следующий вид:

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

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

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  $\tau_k$  и  $\tau_d$  масса ингибированных активных частиц пламени при одновременном их рождении определяется в основном соотношением удельных плотностей ингибирования ( $C_0/\tau_k$ ,  $C_0/\tau_d$ ) и рождения ( $C_b$ ) активных частиц. Если удельная плотность рождения активных частиц больше удельной плотности их ингибирования, то реакция окисления газифицированных компонентов горючего вещества (горение) будет продолжаться.

Время ингибирования  $\tau_k$  и  $\tau_d$ , как следует из их определений, отличается функциональной зависимостью от химико-кинетических параметров процесса ингибирования активных частиц и дисперсных характеристик частиц огнетушащего порошка. Особенно существенно их отличие от размера частиц огнетуша-

шего порошка. Если  $\tau_k$  линейно зависит от эффективного диаметра частиц порошка, то для  $\tau_d$  наблюдается квадратичная зависимость от данного параметра.

Оценка величины  $\tau_d$  для атома водорода с молярной массой  $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$  кг/моль и диаметром  $1 \cdot 10^{-10}$  м показала, что она составляет  $\tau_d = 1,7 \cdot 10^{-7}$  с при атмосферном давлении  $P = 105$  Па, температуре в зоне горения  $T = 973$  К, коэффициенте диффузии  $D = 4,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/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 значение  $\tau_k = 3 \cdot 10^{-5}$  с. Сопоставление величин  $\tau_k$  и  $\tau_d$  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  $\rho_n$  частиц порошка в данной зоне. Чем больше  $\rho_n$ , тем меньше  $\varepsilon$  и тем быстрее происходит процесс обрыва цепей горения.

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

### **Модель механизма гомогенного ингибирования активных частиц пламени при непрерывном их рождении**

При тушении пламени частицами огнетушащего порошка наряду с гетерогенным механизмом ингибирования активных частиц пламени проявляется и гомогенный механизм ингибирования. Физика данного механизма ингибирования в нестационарном режиме реализации его и при непрерывном рождении активных частиц пламени на настоящее время недостаточно изучена. Отсутствуют также оценки 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/м<sup>3</sup>, активных частиц пламени в данном канале (реакторе) в результате реакции их гомогенного ингибирования, когда одновременно равномерно по объему канала происходит генерация данных ча-

стиц с удельной плотностью  $\omega = \omega(r, t)$ , кг/м<sup>3</sup>с.

Запишем уравнение диффузии активных частиц пламени внутри канала при указанных условиях

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

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

Уравнение (31) записано в предположении малости коэффициента продольной молекулярной диффузии активных частиц пламени.

Дополним уравнение (31) граничными и начальными условиями [21]:

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

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

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

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

где  $C_0$  – исходная концентрация активных частиц пламени, кг/м<sup>3</sup>.

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

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

Общее решение данного уравнения можно представить в следующем виде:

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

Осуществим переход от изображения функции  $C_H(p, t)$  к оригиналу  $C(r, t)$ ,

используя соотношение [17]

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

$$\text{где } C_H(0,t) = \left( C_H(0,0) + \int_0^t \omega_H(0,\theta) \exp[-k_0 \theta] d\theta \right) \exp[-k_0 t] \quad (42)$$

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

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

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

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

Рассмотрим случай гомогенного ингибирования активных частиц пламени, когда удельная скорость рождения их постоянная величина, т.е.  $\omega = \omega(r,t) = C_b$ , кг/м<sup>3</sup>с. Проведя преобразования в (43), получим для рассматриваемого случая ингибирования следующее соотношение для  $\overline{C(r,t)}$ :

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

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

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

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

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

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

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

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

Отличительной особенностью гомогенного механизма ингибирования активных частиц пламени является то, что определяющее его эффективность время  $\tau_g$  ингибирования частиц пламени 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. Чем меньше размер частиц, 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 ингибирования, в частности, значением константы скорости гомогенного ингибирования  $k_0$ . Чем больше  $k_0$ , т.е. чем меньше время ингибирования  $\tau_g$ , 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 работе [3], показала, что  $k_0 = 4,3 \cdot 10^3$  1/с, т.е. время протекания данной реакции  $\tau_g$  примерно на 1 и 3 порядка больше времени длительности реакции гетерогенного ингибирования активных частиц водорода соответственно для кинетического и диффузионного режимов протекания данной реакции.

Полученный результат вкупе с дополнительным временем, требуемым на формирование активных радикалов солей огнетушащего порошка в результате терморазложения, дает основание полагать, что общая скорость ингибирования активных частиц пламени в процессе их гомогенного ингибирования меньше скорости ингибирования 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 рождения.

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 концентрации активных частиц пламени уменьшаются 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 длительностей процессов ингибирования, а также превышение скорости ингибирования активных частиц пламени скорости их рождения.

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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Краснянский, М.Е. Порошковая пожаровзрывозащита / М.Е. Краснянский. – Донецк: Общество 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 Engineering. – 2018. –

Vol. 211. – P. 142-148. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.126.

6. Guomin, Z. Fire-extinguishing efficiency of superfine powders under different injection pressures / Z. Guomin, X. Guangji, J. Shuang, Z. Qingsong, L. Zhongxian // *International Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – No. 4. – P. 1-7. DOI: 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 Science*. – 2011. – Vol. 20, No. 4. – P. 200–205.

8. Chung-Hwei, S. The assessment of fire suppression capability for the ammonium dihydrogen phosphate dry powder of commercial fire extinguishers / S. Chung-Hwei, C. Chan-Cheng, L. Horng-Jang, W. Shiuan-Cheng // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 84. – P. 485-490. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.459.

9. Ye, Y. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent / Y. Ye, H. Zhivue, Z. Lingshuang, D. Zhiming, C. Xiaomin // *Fire and Materials*. – 2018. – Vol. 42. – P. 336–344. DOI: 10.1002/fam.2500.

10. Hangchen, L. Experimental study on the optimum concentration of ferrocene in composite ultrafine dry powder / L. Hangchen, D. Dexu, G. Xinxin, H. Min, P. Xuhai // *Fire Technology*. – 2020. – Vol.56. – P. 913-936. DOI: 10.100/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, No 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. DOI: 10.1002/fam.2671

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

14. Козаков, А.В. Пожаротушение в наноразмерах / А.В. Козаков, А.В. Попов, С.Ю. Хатунцева, Д.В. Бухтояров // *Материалы XXXIV Международной науч.-практ. конф. «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 частиц порошка с горящим веществом / А.И. Кицак // *Вести НАН Беларуси. Сер. физико-технических наук*. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 476–487.

16. Гершензон Ю.М. Реакции гибели активных частиц на стенке в струевых условиях / Ю.М. Гершензон, В.Б. Розенштейн, А.Н. Спасский, А.Н. Коган // *Доклады Академии наук СССР. Физическая химия*. – 1972. – Т. 205, № 4. – С. 871–874.

17. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 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 «Альянс», 2004. – 753 с.

21. Гершензон Ю.М. Гомогенные реакции первого порядка в условиях ламинарного течения / Ю.М. Гершензон, В.Б. Розенштейн, А.Н. Спасский, А.Н. Коган // Доклады Академии наук СССР. Физическая химия. – 1972. – Т. 205, № 3. – С. 624–627.

## REFERENCES

1. Krasnyansky M.E. Poroshkovaya pojarovzryvozaschita [The Powder fire and explosion protection], Doneck, Society of book lovers, 1994, 152 p (in Russian).

2. Antsupov E. B. Otsenka vkladа v ingibirovanie plameni gomogenного i geterogenного mekhanizma [Assessment of the contribution of homogeneous and heterogeneous mechanism to flame inhibition]. Gorenje i plazmokhimiya = Combustion and plasmochemistry, 2012, vol.10, № 4, pp 262-267 (in Russian).

3. Gubin E.I., Dik I.G., Krainov A.Y. Ingibirovanie gazovih plamen poroshkovimi sostavami [Inhibition of gas flames by powder formulations]. Fizika gorenija i vzriva = Physics of combustion and explosion, 1989, vol. 25 № 2, pp. 57-62 (in Russian).

4. Krainov A.Y., Sheurman V.A. Oh predelah rasprostranenia plameni po zapilenomu gazu [On the extent of flame propagation through dusty gas]. Fizika gorenija i vzriva = Physics of combustion and explosion, 1997, vol. 33, № 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. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.126.

6. Guomin, 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, pp 1-7. DOI: 10.1155/2019/2474370.

7. Huang X., Liu L., Zhou X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder // Fire Science. – 2011. – Vol. 20, № 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. DOI: 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, pp 336-344. DOI: 10.1002/fam.2500.

10. 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 9130–936. DOI: 10.1007/s10694-019-00912-x.

11. Gurchumelia L., Bezarashvili G., Tsanova R. Thermal Inhibition of Flame Propagation Bull. Georg. Natl. Acad. Sci. Physical Chemistry, 2019, vol. 13, № 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, pp 84-91. DOI: 10.1002/fam.2671.

13. Baratov A.N. *Gorenie – Pojar – Vzriv – Bezopasnost'* [Combustion - Fire - Explosion - Safety]. Moscow, FGU VNIPO MCHS ROSSII, 2003, 364 p (in Russian).

14. Kozakov A.B., Popov A.B., Khatuntsev C.Y., Bukhtoyarov D.V. *Pojarotushenie v nanorazmerakh* [Fire fighting in nanoscale]. *Materiali 34 mejdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktualnie problemi pojarnoi bezopasnosti"* [Materials of the 34 International scientific and practical conference "Actual problems of fire safety"]. Moscow, FSI VNIPO Ministry of Emergency Situations, 2022, pp 206-211 (in Russian).

15. Kitsak A.I. *Effectivnost tushenya pojara ognetushashim poroshkom obshego naznacheniya pri nestatsionarnom vzaimodeistvii chastits poroshka s goryashim veshestvom* [The effectiveness of extinguishing a fire with a general-purpose extinguishing powder with non-stationary interaction of powder particles with a burning substance]. *Vesti NAN Belarusi. Seria fiziko-tehnicheskikh nauk = National Academy of Sciences of Belarus, Ser. of Physical and Technical Sciences*, 2020, vol. 65, № 4, pp 476-487 (in Russian).

16. Gershenzon Y.M., Rozenshtein A. H., Spasskii A.N., Kogan A.N. *Reaktsii gibeli chastits na stenke v struevikh usloviyakh* [Reactions of death of active particles on the wall under jet conditions]. *Dokladi akademii nauk SSSR. Fizicheskaya khimiya = Reports of the USSR Academy of Sciences. Physical chemistry*, 1972, vol. 205, № 4, pp 871-874. (in Russian).

17. Luikov A.V. *Teorya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, "Visshaya shkola", 1967. 592 p. (in Russian).

18. Semenov H.H. *Tsepnie reaktsii* [Chain reactions]. – Moscow, "Nauka", 1986. – 535 p. (in Russian).

19. Frank-Kameneckii D.A., *Diffuziya i teploperedacha v himicheskoi promishlennosti* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. – Moscow, "Nauka", 1987. – 502 p. (in Russian).

20. Kasatkin A.G. *Osnovnie processi i apparati himicheskoi tehnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. – Moscow, OOO TID "Alliance", 2004. – 753 p. (in Russian).

21. Gershenzon Y.M., Rozenshtein A.H., Spasskii A.N., Kogan A.N. *Gomodennie reaktsii pervogo poryadka v usloviyakh laminarnogo techeniya* [Homogeneous first-order reactions under laminar flow conditions]. *Dokladi akademii nauk SSSR. Fizicheskaya khimiya = Reports of the USSR Academy of Sciences. Physical chemistry*, 1972, vol. 205, no. 3, pp 624–627. (in Russian).

