

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ СПЕЦИАЛЬНЫМИ ГАЗОВЫМИ ОГНЕТУШАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Д. В. Столяров<sup>1</sup>, К. А. Михайлов<sup>2</sup>,  
В. А. Морозов<sup>3</sup>, В. В. Тараканова<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Московский государственный университет технологий и управления  
имени К. Г. Разумовского, Москва, Россия

<sup>2</sup> Академия Государственной противопожарной службы Министерства  
Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий, Москва, Россия

<sup>3</sup> Главное управление Министерства Российской Федерации по делам  
гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий  
стихийных бедствий по Пензенской области, Пенза, Россия

<sup>1</sup> sdv-270401@mail.ru, <sup>2</sup> mihkir.94@mail.ru, <sup>3</sup> 6otr.pnz@mail.ru, <sup>4</sup> v.tarakanova@mgut.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема оценки показателей эффективности тушения открытых пожаров твердых горючих веществ и материалов, а также внутренних (закрытых) пожаров (при невозможности обеспечения герметизации защищаемого объема) установками газового пожаротушения при применении газовых огнетушащих веществ, обладающих специальными физико-химическими свойствами. Цель – разработка аналитической модели оценки эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов газовыми огнетушащими веществами, обладающими специальными физико-химическими свойствами с учетом динамики внутренних (закрытых) и наружных (открытых) пожаров и собственных электрофизических свойств пламени. *Материалы и методы.* Используются математические модели поляризации электронного смещения, а также ионизации электронным ударом газообразных диэлектриков для определения значений скорости и сечения диссоциативной рекомбинации и, как следствие, оценки времени тушения очага пожара. *Результаты.* Обоснован физический механизм огнетушащего действия газовых огнетушащих веществ и их смесей, даны сравнительные количественные оценки величин времени срыва факела пламени с поверхности горючего вещества, величины времени тушения очага пожара на основе сопоставления значений концентраций и энергий электронной компоненты при течении процесса диссоциативной рекомбинации, сопровождаемого распадом промежуточного комплекса, в потоке огнетушащего вещества и факеле пламени при стационарном режиме горения. *Выводы.* Необходимым и достаточным условием тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов газовыми огнетушащими веществами, обладающими специальными физико-химическими свойствами, является интенсификация скорости диссоциативной рекомбинации, протекающая в структуре зон факела пламени при введении в очаг пожара электронной компоненты газового огнетушащего вещества, поляризованного и ионизированного во внешнем статическом электрическом поле. Показана сравнительно более высокая эффективность наложения на поток огнетушащего вещества внешнего продольного статического электрического поля, что обусловлено более высокими значениями концентраций электронной компоненты в электронном промежутке.

**Ключевые слова:** газовое пожаротушение, открытый (наружный) пожар, газовое огнетушащее вещество, внешнее статическое электрическое поле, ионизация электронным ударом, поляризация электронного смещения, электродные системы, диссоциативная рекомбинация, время тушения очага пожара

**Благодарности:** коллектив авторов работы выражает благодарность кандидату технических наук, доценту, заместителю заведующего кафедрой «Радиотехника и радиоэлектронные системы» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по научной работе Кулапину Валерию Ильичу, а также доктору экономических наук, профессору кафедры «Физика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» Суровицкой Галине Владимировне за обсуждение результатов теоретического исследования.

**Для цитирования:** Столяров Д. В., Михайлов К. А., Морозов В. А., Тараканова В. В. Аналитическая оценка эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов специальными газовыми огнетушащими веществами // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 1. С. 107–125. doi: 10.21685/2227-8486-2024-1-8

## ANALYTICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF EXTINGUISHING FIRES OF SOLID COMBUSTIBLE SUBSTANCES AND MATERIALS WITH SPECIAL GAS EXTINGUISHING AGENTS

D.V. Stolyarov<sup>1</sup>, K.A. Mikhailov<sup>2</sup>,  
V.A. Morozov<sup>3</sup>, V.V. Tarakanova<sup>4</sup>

<sup>1, 4</sup> K.G. Razumovsky Moscow State University  
of Technology and Management, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Academy of the State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Main Directorate of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Penza, Russia

<sup>1</sup>sdv-270401@mail.ru, <sup>2</sup> mihkir.94@mail.ru, <sup>3</sup> 6otr.pnz@mail.ru, <sup>4</sup> v.tarakanova@mgutm.ru

**Abstract. Background.** The work is devoted to the problem of evaluating the effectiveness of extinguishing open fires of solid combustible substances and materials, as well as internal (closed) fires (if it is impossible to ensure the sealing of the protected volume) by gas fire extinguishing installations when using gas extinguishing agents with special physico-chemical properties. The aim of the work is to develop an analytical model for evaluating the effectiveness of extinguishing fires of solid combustible substances and materials with gas extinguishing agents having special physico-chemical properties, taking into account the dynamics of internal (closed) and external (open) fires and the intrinsic electrophysical properties of the flame. *Materials and methods.* Mathematical models of polarization of electron displacement, as well as ionization by electron impact of gas dielectrics are used in the work to determine the values of the velocity and cross-section of dissociative recombination, and as a consequence, estimation of the time of extinguishing the fire. *Results.* The physical mechanism of the extinguishing effect of gas extinguishing agents and their mixtures is substantiated, comparative quantitative estimates of the values of the time of the flame flare from the surface of the combustible substance are given, the values of the fire extinguishing time based on the comparison of the values of concentrations and energies of the electronic component during the process of dissociative recombination, accompanied by the decay of the intermediate complex, in the flow of extinguishing agent and flame torch in a stationary combustion mode. *Conclusions.* A necessary and sufficient condition for extinguishing fires of

solid combustible substances and materials with gas extinguishing agents having special physico-chemical properties is the intensification of the rate of dissociative recombination occurring in the structure of flame flare zones when an electronic component of a gas extinguishing agent, polarized and ionized in an external static electric field, is introduced into the fire source. Also, the work shows a relatively higher efficiency of applying an external longitudinal static electric field to the flow of the extinguishing agent, which is due to higher concentrations of the electronic component in the electrode gap.

**Keywords:** gas fire extinguishing, open (outdoor) fire, gas extinguishing agent, external static electric field, ionization by electronic shock, polarization of electronic displacement, electrode systems, dissociative recombination, fire extinguishing time

**Acknowledgments:** the team of authors of the work expresses gratitude to Valery Kulapin, candidate of technical sciences, associate professor, deputy head of the sub-department of radio engineering and radioelectronic systems, Penza State University, as well as to Galina Surovitskaya, doctor of economics, professor of the sub-department of physics, Penza State University, for discussing the results of a theoretical study.

**For citation:** Stolyarov D.V., Mikhailov K.A., Morozov V.A., Tarakanova V.V. Analytical evaluation of the effectiveness of extinguishing fires of solid combustible substances and materials with special gas extinguishing agents. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(1):107–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-1-8

### **Введение**

Газовое пожаротушение – один из методов тушения пожаров, сущность которого основана на создании условий для прекращения горения в защищаемом объеме посредством выпуска газового огнетушащего вещества (ГОТВ) или газового огнетушащего состава (ГОТС) [1].

Газовое пожаротушение может быть применено для ликвидации пожаров классов А, В, С, Е [2]. В связи с этим перечень объектов защиты, которые могут быть оснащены установками газового пожаротушения, включает здания, сооружения, помещения и пожарные отсеки классов Ф1-Ф5 функциональной пожарной опасности [2].

Автоматические установки газового пожаротушения (АУГП) имеют следующие основные преимущества относительно автоматических установок водяного, пенного, порошкового и аэрозольного пожаротушения:

1. Отсутствие материального ущерба, возникающего вследствие повреждения предметов, оборудования и прочих материальных ценностей огнетушащими веществами (ОТВ), при ликвидации очага пожара АУГП в защищаемом объеме.
2. Относительно высокое значение показателя эффективности тушения  $P_{э.т.}$  и относительно низкое значение полного времени тушения  $\tau_{т.}$  очага пожара.
3. Реализация методов объемного и локально-объемного тушения очага пожара [1].

Недостатки АУГП обусловлены физическими и химическими свойствами ГОТВ (ГОТС), а также эксплуатационными ограничениями и недостатками традиционных способов подачи ГОТВ (ГОТС) в защищаемый объем. Основными недостатками АУГП являются:

1. Необходимость обеспечения герметизации защищаемого объема.

2. Убывание показателя эффективности тушения  $P_{э.т.}$  при возрастании объема защищаемого объекта.

3. Невозможность локализации и ликвидации очага наружного (открытого) пожара при горении твердых горючих веществ и материалов [3].

Последний из указанных недостатков определяет проблему тушения наружных (открытых) пожаров и внутренних (закрытых) пожаров (при невозможности обеспечения герметизации защищаемого объема) класса А установками газового пожаротушения.

Исследованию данной проблемы, а также анализу методов и способов ее решения посвящены работы российских исследователей, представленные в источниках [4, 5], и работы зарубежных исследователей, представленные в источниках [6, 7].

В настоящей работе предполагается, что изменение физико-химических свойств инертных (нейтральных) ГОТВ (ГОТС) способно обеспечить возрастание параметров эффективности тушения твердых горючих веществ и материалов в условиях открытых (наружных) пожаров, а также в условиях внутренних (закрытых) пожаров при невозможности обеспечения герметизации защищаемого объема.

Изменение физико-химических свойств ГОТВ (ГОТС) предполагается осуществлять посредством воздействия статическим электрическим полем на поток ГОТВ (ГОТС). При этом будут протекать процессы электростатической поляризации газа (смеси газов), что вызовет изменение вектора электрической поляризации единицы объема газа (смеси газов) и в случае, если энергия системы заряженных проводников, формирующих внешнее статическое электрическое поле, примет значение, равное или большее, чем величина энергии ионизации атома (для одноатомных) и/или молекулы (для многоатомных) инертных (нейтральных) газов, то от свободного атома и/или молекулы в основном энергетическом состоянии будет удален электрон, что вызовет процесс ионизации газа во внешнем статическом электрическом поле.

Справедливость данной гипотезы частично обоснована результатами теоретических и экспериментальных исследований электрических свойств и параметров процессов факельного гетерогенного и гомогенного горения, а также результатами исследования метода тушения пожаров с применением статического электрического поля [8–10]. Так, в работе [8] приведены результаты теоретического и экспериментального исследований механизмов образования и концентрации носителей электрических зарядов в пламени, а также распределения носителей электрических зарядов и нейтральной компоненты в структуре областей (зон) факела пламени в режиме диффузионного горения. В работах [9, 10] приведены результаты теоретического и экспериментального исследований метода тушения пожаров с применением статического электрического поля. В работе [10], в частности, получены аналитические зависимости показателей вынужденной диффузии носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени при воздействии электростатическим полем (как однородным, так и неоднородным). Из полученных аналитических зависимостей следует, что необходимым и достаточным условием тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов является убывание концентрации преимущественно электронной компоненты в области первичной реакционной зоны факела пламени в диапазоне значений времени, не превышающем время критической продолжительности пожара как в I, так

и во II фазах развития горения. Данное следствие подтверждается экспериментально [9].

В случае подачи в очаг пожара ГОТВ (ГОТС) после воздействия на его поток статическим электрическим полем, помимо основного механизма огнетушащего действия ГОТВ [3], необходимо учесть процессы девозбуждения и рекомбинации носителей электрического заряда в структуре областей (зон) факела пламени, а также кулоновское взаимодействие электрически заряженной компоненты ГОТВ и носителей электрического заряда в структуре областей (зон) факела пламени.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка аналитической модели оценки эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов газовыми огнетушащими веществами, обладающими специальными физико-химическими свойствами с учетом динамики внутренних (закрытых) и наружных (открытых) пожаров и собственных электрофизических свойств процесса сгорания твердых топлив.

Отличительной особенностью работы, характеризующей ее научную новизну, является применение математической модели электростатической поляризации, а также математической модели ионизации электронным ударом газообразных диэлектриков для определения значений скорости и сечения диссоциативной рекомбинации и, как следствие, оценки времени тушения очага пожара при различных схемах наложения внешнего статического электрического поля на поток ГОТВ и способе подачи огнетушащего вещества в очаг пожара, заключающемся в применении внешнего конического насадка, что обеспечивает выпуск ГОТВ в режиме дросселирования.

### *Материалы и методы*

В основе огнетушащего действия нейтральных газов лежат несколько физических механизмов. При этом основополагающими могут быть приняты по меньшей мере два механизма.

Сущность первого физического механизма заключается в следующем: добавление в смесь горючего вещества и окислителя третьего компонента, не способного вступать в экзотермические химические реакции ни с окислителем, ни с горючим веществом, уменьшает концентрацию молекул обоих (т.е.  $\varphi_{\text{г}}$  и  $\varphi_{\text{ок}}$ ) в единице объема. В результате этого сокращается число эффективных соударений молекул горючего вещества и окислителя, что приводит к уменьшению интенсивности тепловыделения  $q_+$  внутри смеси [3].

Сущность второго физического механизма заключается в явлении охлаждения газа при его адиабатическом расширении. При этом подача нейтрального газа в очаг пожара осуществляется в режиме дросселирования, что обеспечивает существенное охлаждающее действие ГОТВ на зону горения и горючее вещество [3].

Сущность предполагаемого физического механизма заключается, как было указано ранее, в изменении физико-химических свойств ГОТВ посредством электростатической поляризации и ионизации газа во внешнем статическом электрическом поле.

Рассмотрим процессы, протекающие в газообразном диэлектрике при наложении на его поток внешнего статического электрического поля.

Формирование внешнего статического электрического поля осуществляется посредством приложения постоянного электрического напряжения (потенциала) к электропроводным поверхностям электродных систем.

В приложении к рассматриваемым процессам необходимо выделить следующие возможные схемы наложения внешнего статического электрического поля: наложение на поток ГОТВ продольного поля; наложение на поток ГОТВ поперечного поля.

Внешнее статическое электрическое поле следует считать продольным, если выполняется условие

$$\vec{E} \parallel \vec{v}_{\text{ГОТВ}}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности внешнего электрического поля, В·м<sup>-1</sup>;  $\vec{v}_{\text{ГОТВ}}$  – вектор скорости потока ГОТВ через участок поперечного сечения раструба, м·с<sup>-1</sup>.

Внешнее статическое электрическое поле следует считать поперечным, если выполняется условие

$$\vec{E} \perp \vec{v}_{\text{ГОТВ}}. \quad (2)$$

При этом воздействие на поток ГОТВ предполагается осуществлять однородным статическим электрическим полем (т.е. при значении коэффициента неоднородности электрического поля  $K_n \approx 1$ ). На рис. 1 изображены эскизы электродных систем, формирующих продольное и поперечное внешние статические электрические поля.

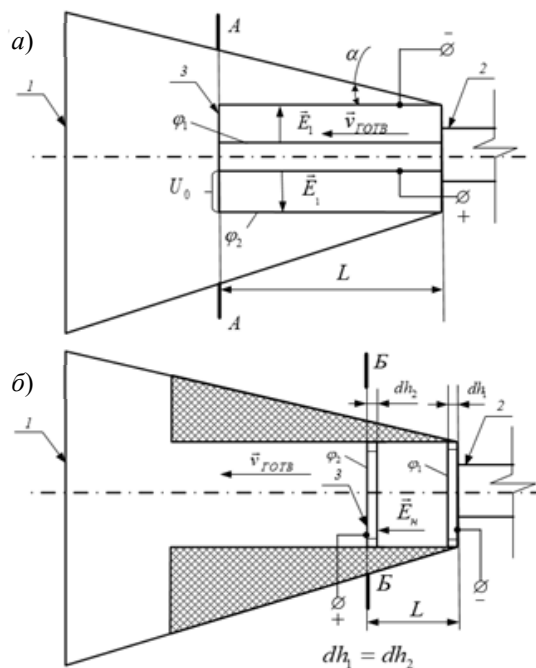


Рис. 1. Эскизы электродных систем, формирующих внешние статические электрические поля:

*a* – эскиз электродной системы, формирующей поперечное электрическое поле (коаксиальной электродной системы); *б* – эскиз электродной системы, формирующей продольное электрическое поле (цилиндрической электродной системы):

1 – корпус раструба прибора подачи ГОТВ в очаг пожара;  
2 – трубопровод ГОТВ; 3 – электродная система

Как следует из рис. 1,а, расчет напряженности электрического поля и потенциала коаксиальной электродной системы может быть выполнен на основе математической модели цилиндрического конденсатора. Согласно исследованию [11] потенциал коаксиальной электродной системы при  $R_1 \leq R \leq R_2$  и заданных потенциалах  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  каждого электрода определим как функцию  $R$ :

$$\varphi_k(R) = \varphi_1 + \frac{U_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \ln \frac{R_1}{R}, \quad (3)$$

где  $\varphi_k(R)$  – потенциал электронной системы, В;  $\varphi_1$  – потенциал внутреннего электрода, В;  $U_0$  – напряжение между электродами, В;  $R_1$  – радиус внутреннего электрода, м;  $R_2$  – радиус внешнего электрода, м;  $R$  – расстояние от поверхности внутреннего электрода до точки, в которой определяется значение потенциала, м.

Выразим также значение напряженности электрического поля через значение напряжения  $U_0$  как функцию  $R$ :

$$E_k(R) = \frac{U_0}{R \ln \frac{R_1}{R_2}}, \quad (4)$$

где  $E_k(R)$  – напряженность электрического поля коаксиальной электродной системы, В·м<sup>-1</sup>;  $R$  – расстояние от поверхности внутреннего электрода до точки, в которой определяется значение напряженности поля, м.

Как следует из рис. 1,б, расчет напряженности электрического поля и потенциала цилиндрической электродной системы может быть выполнен на основе математической модели электрического поля двух заряженных кольцевых электродов, расположенных на одной оси.

Согласно принципу суперпозиции потенциалов [12] потенциал электрического поля цилиндрической электродной системы с учетом дополнительных условий:  $L < r_0$ ;  $\partial h_1 = \partial h_2 = \partial h$ ;  $\partial h \rightarrow 0$ , определим как функцию  $r_0$  и  $x$ :

$$\varphi_{\text{ц}} = \frac{qL}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{x}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{\text{ц}}$  – потенциал электронной системы, В;  $q$  – электрический заряд электронной системы, Кл;  $x$  – расстояние от центра симметрии электродной системы до точки, лежащей на оси симметрии  $Ox$ , в которой определяется значение потенциала ( $x \perp r_0$ ), м;  $r_0$  – радиус кольцевого электрода, м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость газовой среды, заполняющей межэлектродное пространство;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф·м<sup>-1</sup>;  $L$  – расстояние между электродами, м.

Напряженность статического электрического поля цилиндрической электродной системы определим, используя связь потенциала и напряженности электрического поля [12] для рассматриваемого одномерного поля (направленного параллельно оси симметрии  $Ox$ ):

$$E_{\text{ц}} = -\text{grad}\varphi = -\frac{\partial\varphi_{\text{ц}}}{\partial x}, \quad (6)$$

где  $E_{\text{ц}}$  – напряженность электрического поля цилиндрической электронной системы,  $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Дифференцируя  $\varphi_{\text{ц}}$  по  $x$ , получим

$$E_{\text{ц}} = \frac{qL}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{r_0^2 - 2x^2}{(r_0^2 + x^2)^3}. \quad (7)$$

Выразим также значения потенциала 1-го электрода  $\varphi_{1\text{э}}$  и потенциала 2-го электрода  $\varphi_{2\text{э}}$  через электрический заряд  $q$ :

$$|\varphi_{1\text{э}}| = |\varphi_{2\text{э}}| = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + r_0^2}} \right). \quad (8)$$

На рис. 2 изображены картины силовых линий напряженности электрического поля и изолиний электрического потенциала рассматриваемых электродных систем.

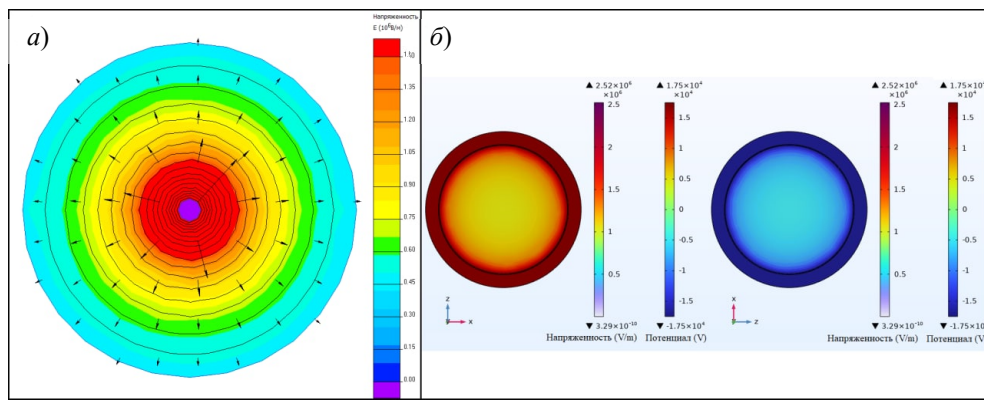


Рис. 2. Изображение картины силовых линий электрического поля и изолиний электрического потенциала электродных систем:  
 а – коаксиальная электродная система; б – цилиндрическая электродная система.  
 $R_1 = 0,00179$  (м);  $R_2 = 0,06$  (м);  $r_0 = 0,06$  (м);  $L = 0,035$  (м);  
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-18}$  ( $\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ );  $\epsilon = 1$ ;  $U_0 = 35$  (кВ)

Кроме того, необходимо отметить следующее: геометрическая конфигурация электродных систем, формирующих внешние статические электрические поля, выбрана не только из условий оптимальных значений параметров электрического поля в межэлектродном пространстве и его сравнительно высокой степени однородности, но и оптимальных аэродинамических характеристик электродных систем.

Так, согласно экспериментальным данным [13] значение коэффициента аэродинамического сопротивления полого цилиндра при обтекании горизонтальным потоком составляет  $C_x = 0,2$ .

В настоящей работе в качестве ГОТВ рассматривается смесь нейтральных газов  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$  в следующих объемных концентрациях:  $\omega_v(\text{N}_2) = 60$  % об.;  $\omega_v(\text{CO}_2) = 40$  % об.

Азот и оксид углерода (IV) являются неполярными диэлектриками, следовательно, при наложении внешнего статического электрического поля на

поток данных газов их поляризация будет являться поляризацией электронного смещения.

Вследствие больших расстояний между молекулами газа напряженность электрического поля в среде (деполяризующего поля) оказывается величиной, имеющей достаточно малое значение, следовательно, электрическое поле, действующее на молекулу газа, совпадает с внешним электростатическим полем:

$$\vec{E}_{\text{вн}} = \vec{E}_{\text{ср}}.$$

Тогда вектор поляризации (поляризованность) диэлектрика будет равен [14]

$$\vec{P} = n\alpha\vec{E}_{\text{вн}}, \quad (9)$$

где  $\vec{P}$  – вектор поляризации газообразного диэлектрика, Кл·м<sup>-2</sup>;  $n$  – концентрация молекул, участвующих в поляризации, м<sup>-3</sup>;  $\alpha$  – поляризуемость диэлектрика, м<sup>3</sup>.

Материальные уравнения для N<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> во внешнем электростатическом поле получим, комбинируя уравнение Клаузиуса – Моссотти [14] с основным уравнением молекулярно-кинетической теории [15] и выражениями (4), (7):

$$P_{N_2\perp} = \frac{p_r}{K_6 T_r} \cdot \frac{3M_{N_2}(\epsilon_{N_2} - 1)}{\rho_{N_2}(\epsilon_{N_2} + 2)N_A} \cdot \frac{U_0}{R \ln \frac{R_1}{R_2}}; \quad (10)$$

$$P_{CO_2\perp} = \frac{p_r}{K_6 T_r} \cdot \frac{3M_{CO_2}(\epsilon_{CO_2} - 1)}{\rho_{CO_2}(\epsilon_{CO_2} + 2)N_A} \cdot \frac{U_0}{R \ln \frac{R_1}{R_2}}; \quad (11)$$

$$P_{N_2\parallel} = \frac{p_r}{K_6 T_r} \cdot \frac{3M_{N_2}(\epsilon_{N_2} - 1)}{\rho_{N_2}(\epsilon_{N_2} + 2)N_A} \cdot \frac{qL}{4\pi\epsilon_{N_2}\epsilon_0} \cdot \frac{r_0^2 - 2x^2}{(r_0^2 + x^2)^3}; \quad (12)$$

$$P_{CO_2\parallel} = \frac{p_r}{K_6 T_r} \cdot \frac{3M_{CO_2}(\epsilon_{CO_2} - 1)}{\rho_{CO_2}(\epsilon_{CO_2} + 2)N_A} \cdot \frac{qL}{4\pi\epsilon_{CO_2}\epsilon_0} \cdot \frac{r_0^2 - 2x^2}{(r_0^2 + x^2)^3},$$

где  $p_r$  – давление газа, Па;  $K_6$  – постоянная Больцмана, Дж·К<sup>-1</sup>;  $T_r$  – абсолютная температура газа;  $M$  – молярная масса азота и оксида углерода (IV) соответственно, кг·моль<sup>-1</sup>;  $\rho$  – плотность азота и оксида углерода (IV) соответственно, кг·м<sup>-3</sup>;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость азота и оксида углерода (IV) соответственно;  $N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>.

На рис. 3 представлены аналитические зависимости поляризованности от термодинамических параметров ГОТВ при значении постоянного электрического напряжения, приложенного к электродным системам,  $U_0 = 35$  (кВ).

При наложении внешнего статического поля на поток ГОТВ протекает процесс ионизации газа. В достаточно общем виде условие начала протекания процесса ионизации определяется неравенством

$$W_E \geq E_{li}, \quad (13)$$

где  $W_E$  – энергия внешнего статического электрического поля, Дж;  $E_{li}$  – первый ионизационный потенциал атома, Дж·моль<sup>-1</sup>.

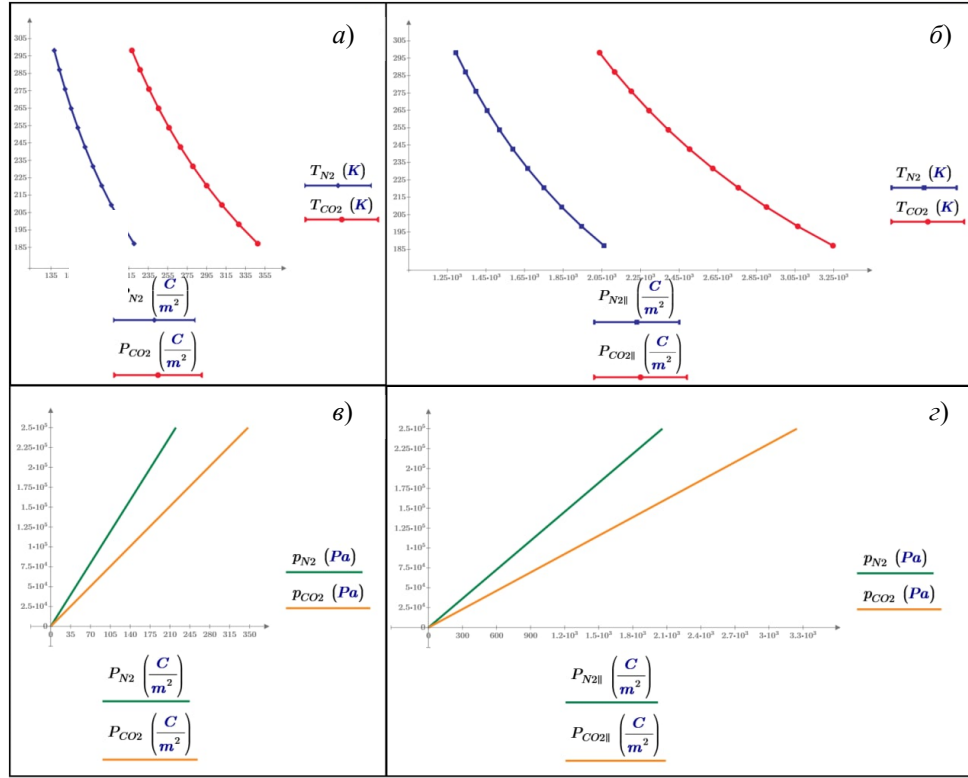


Рис. 3. Аналитические зависимости поляризованности от термодинамических параметров ГОТВ:

$a$  – зависимости  $P_{N_2\perp}(T_{N_2})$ ,  $P_{CO_2\perp}(T_{CO_2})$ ;  $б$  – зависимости  $P_{N_2\parallel}(T_{N_2})$ ,  $P_{CO_2\parallel}(T_{CO_2})$ ;

$в$  – зависимости  $P_{N_2\perp}(p_{N_2})$ ,  $P_{CO_2\perp}(p_{CO_2})$ ;  $г$  – зависимости  $P_{N_2\parallel}(p_{N_2})$ ,  $P_{CO_2\parallel}(p_{CO_2})$ .

$\varepsilon_{N_2} = 1,00061$ ;  $\varepsilon_{CO_2} = 1,00097$ ;  $M_{N_2} = 2,8 \cdot 10^{-2}$  (кг·моль<sup>-1</sup>);  $M_{CO_2} = 4,4 \cdot 10^{-2}$  (кг·моль<sup>-1</sup>);  
 $q = 5,95 \cdot 10^{-8}$  (Кл);  $\rho_{N_2} = 1,25$  (кг·м<sup>-3</sup>);  $\rho_{CO_2} = 1,98$  (кг·м<sup>-3</sup>);  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  (моль<sup>-1</sup>);  
 $K_6 = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (Дж·К<sup>-1</sup>);  $T_r \in [187,15 \text{ (K)}; 298,15 \text{ (K)}]$ ;  $p_r \in [0; 2,5 \cdot 10^5 \text{ (Па)}]$ ;  $U_0 = 35$  (кВ)

При ионизации газа во внешнем электростатическом поле основным механизмом ионизации нейтрального атома/молекулы является ионизация электронным ударом; условие начала протекания процесса определяется неравенством

$$\frac{m_e v_e^2}{2} \geq E_{li}, \quad (14)$$

где  $m_e$  – эффективная масса электрона, кг;  $v_e$  – эффективная поступательная скорость движения электрона между соударениями, м·с<sup>-1</sup>.

При этом предполагается осуществлять ионизацию во внешнем электростатическом поле только одного компонента ГОТВ – азота, что связано с условием обеспечения нормативной огнетушащей способности ГОТВ и обусловлено возникающими реакциями разложения оксида углерода (IV) во внешнем статическом электрическом поле при его ионизации:



где  $\varepsilon_{\text{cp}}$  – энергия сродства к электрону молекулы  $\text{CO}_2$ , эВ.

Реакция однократной ионизации азота во внешнем статическом электрическом поле протекает в соответствии со следующим уравнением:



где  $\bar{e}_s$  – рассеянный электрон;  $\bar{e}_{ij}$  – испущенный электрон.

Количественная оценка распределения концентраций генерируемых электронной и ионной компонент при ионизации азота во внешнем электростатическом поле во времени и на плоскости может быть дана на основе одномерной модели неравновесного газового разряда. Разрядный процесс описывается одномерной системой дифференциальных уравнений, включающей в себя уравнения неразрывности для электронов и ионов и уравнение Пуассона [16]:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_e}{\partial t} = \alpha_T |\Phi_e| - \beta n_e n_i \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} = \alpha_T |\Phi_e| - \beta n_e n_i, \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 4\pi q_e (n_i - n_e) \end{cases} \quad (18)$$

где  $n_e$ ,  $n_i$  – концентрация электронов ионов,  $\text{м}^3$ ;  $\Phi_e$ ,  $\Phi_i$  – электронный и ионный потоки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\alpha_T$  – первый коэффициент Таунсенда;  $\beta$  – коэффициент электрон-ионной рекомбинации,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $q_e$  – электрический заряд электрона, Кл.

Выразим также электронные и ионные потоки с учетом подвижности носителей электрического заряда во внешнем электрическом поле:

$$\Phi_e = -n_e \mu_e E_{\text{вн}}, \quad (19)$$

$$\Phi_i = -n_i \mu_i E_{\text{вн}}, \quad (20)$$

где  $\mu_e$ ,  $\mu_i$  – подвижность электронов и ионов,  $\text{м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ .

Для решения системы (18) и построения аналитических зависимостей параметров ионизации азота во внешнем статическом электрическом поле воспользуемся методом конечных разностей. Введем в расчетной пространственно-временной области  $0 \leq x \leq d = jh$ ;  $0 \leq e \leq \tau N_{\text{к}}$  сетку:

$$\omega_{ht} = \{x_j = jh, j = 0 \dots N_{\text{к}}; t^k = K\tau, K = 0 \dots N_{\text{к}}\}. \quad (21)$$

Аппроксимация уравнений системы (18) конечно-разностными соотношениями производилась посредством замены непрерывных функций сеточными с использованием правых разностей по времени и центральных по координате. В результате аппроксимации получена система алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{n_{ej}^{k+1} - n_{ej}^k}{\tau} + \frac{\Phi_{ej+1}^k - \Phi_{ej-1}^k}{2h} = \alpha_{Tj}^k |\Phi_{ej}^k| - \beta n_{ej}^k n_{ij}^k \\ \frac{n_{ij}^{k+1} - n_{ij}^k}{\tau} + \frac{\Phi_{ij+1}^k - \Phi_{ij-1}^k}{2h} = \alpha_{Tj}^k |\Phi_{ej}^k| - \beta n_{ej}^k n_{ij}^k, \\ \frac{\Phi_{j+1}^k - 2\Phi_j^k + \Phi_{j-1}^k}{h^2} = 4\pi q_e (n_{ij}^k - n_{ej}^k) \end{cases} \quad (22)$$

где  $\tau$  – шаг сетки по времени, с;  $h$  – шаг сетки по координате, м.

Частное решение системы (22), соответствующее условиям течения рассматриваемого в задаче процесса, может быть получено при дополнении системы (22) начальными и граничными условиями, выражающими начальное распределение фоновой концентрации заряженных частиц в газовой среде и распределение потенциала электрического поля на всем разрядном промежутке:

$$n_{ej}^0 \big|_{t=0}^{0 \leq x \leq jh} = n_{e0}, n_{ij}^0 \big|_{t=0}^{0 \leq x \leq jh} = n_{i0}, \Phi_j^0 \big|_{0 \leq x \leq jh} = \frac{jU}{N_j}, j = 0 \dots N_j. \quad (23)$$

### Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены аналитические зависимости параметров ионизации азота во внешнем статическом электрическом поле.

Из представленных на рис. 4 четырех графиков аналитических зависимостей следует: в случае наложения на поток азота внешнего продольного статического электрического поля концентрации носителей электрического заряда в разрядном промежутке  $n_e$ ,  $n_i^+$ ,  $n_i^-$  имеют большие значения при равном значении постоянного электрического напряжения, приложенного к электродам, в сравнении со случаем наложения на поток азота внешнего поперечного статического электрического поля, что обусловлено более высоким значением напряженности электрического поля цилиндрической электродной системы (см. рис. 2), а также меньшим значением эффективного сечения неупругих соударений заряженных частиц в объеме газа.

Оценка эффективности тушения твердых горючих веществ и материалов смесью нейтральных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ) может быть дана на основе физического механизма огнетушащего действия ГОТВ, обладающих специальными физико-химическими свойствами. В этом случае определяющее значение имеет процесс диссоциативной рекомбинации, протекающий в режиме стационарного гомогенного горения (принимается равенство удельной скорости газификации горючего материала и нормальной скорости распространения пламени по поверхности горючего материала:  $\Psi_{г.у.} = v_{нсп}$ ) углеводородсодержащего твердого горючего вещества по следующей схеме:



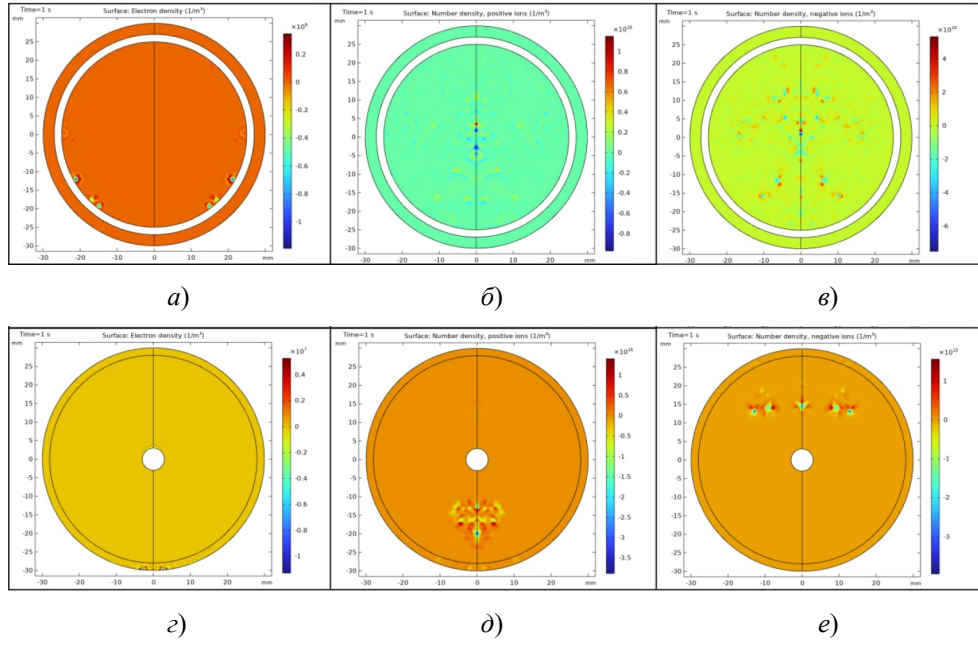


Рис. 4. Аналитические зависимости параметров ионизации азота во внешнем статическом электрическом поле:

$a$  – зависимость  $n_e(x)$  при ионизации в продольном электростатическом поле и кратности шага сетки по времени  $\tau = 1(c)$ ;  $b$  – зависимость  $n_i^+(x)$  при ионизации в продольном электростатическом поле и кратности шага сетки по времени  $\tau = 1(c)$ ;  $v$  – зависимость  $n_i^-(x)$  при ионизации в продольном электростатическом поле и кратности шага сетки по времени  $\tau = 1(c)$ ;  $z$  – зависимость  $n_e(x)$  при ионизации в поперечном электростатическом поле и кратности шага сетки по времени  $\tau = 1(c)$ ;  $d$  – зависимость  $n_i^+(x)$  при ионизации в поперечном электростатическом поле и кратности шага сетки по времени  $\tau = 1(c)$ ;  $e$  – зависимость  $n_i^-(x)$  при ионизации в поперечном электростатическом поле и кратности шага сетки по времени  $\tau = 1(c)$ ;  
 $\beta = 2 \cdot 10^7 (m^3 \cdot c^{-1})$ ;  $\mu_e = 4,4 \cdot 10^5 (m^2 \cdot (B \cdot c)^{-1})$ ;  $\mu_i = 1,45 \cdot 10^3 (m^2 \cdot (B \cdot c)^{-1})$ ;

$$\alpha_T = \frac{12}{\langle p \rangle} \exp\left(\frac{342}{E_{\text{вн}} \cdot \langle p \rangle^{-1}}\right); n_{e0} = n_{i0} = 10^6 (m^{-3}) [16]$$

Данный процесс протекает в пламени при стационарном режиме горения, однако введение в факел извне электронов концентрации нарушает условия квазинейтральности пламени ( $n_e \approx zn_i$ ) и вызывает интенсификацию скорости диссоциативной рекомбинации [6]. В этом случае сечение процесса диссоциативной рекомбинации описывается формулой Брейта – Вигнера [17]. Усредняя произведение сечения рекомбинации и скорости рекомбинирующих электронов  $\delta v_e$  по распределению Максвелла по скоростям и принимая случай малой скорости автоионизации, что связано с относительно малыми величинами напряженности самосогласованных электрических полей в зонах пламени ( $E_c = 10 \dots 50 B \cdot cm^{-1}$ ), скорость диссоциативной рекомбинации определим по формуле [17]

$$\beta_{d2} = \left( \frac{2\pi\hbar^2}{m_e T_c} \right)^{\frac{3}{2}} \omega_{a0} \exp\left(-\frac{E_p}{T_c}\right), \quad (25)$$

где  $\beta_{d2}$  – скорость диссоциативной рекомбинации,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} (\text{Дж} \cdot \text{с})$ ;  $m_e$  – масса электрона,  $\text{кг}$ ;  $T_c$  – средняя объемная температура пламени,  $\text{К}$ ;  $\omega_{a0}$  – частота перехода молекулы из автоионизационного в репульсивное состояние,  $\text{Гц}$ ;  $E_p$  – энергия рекомбинирующего электрона,  $\text{эВ}$ .

Как следует из графиков аналитических зависимостей, а также из оценки эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов смесью  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ , наибольшее значение параметра  $\beta_{d2}$ , определяющего скорость диссоциативной рекомбинации носителей зарядов в пламени, будет достигнуто при концентрации электронной компоненты в смеси  $n_e = n_{e\text{max}}$  и ионной компоненты в смеси  $n_i^+ = n_{i\text{min}}^+$ , а также при значении энергии рекомбинирующих электронов равной энергии автоионизационного уровня:  $E_p = E_a$ . На основе результатов экспериментальных исследований [6, 19] предполагается: при значениях  $n_e \geq n_{e\text{пл}}$ ;  $n_i^+ = 0$  (здесь принято следующее обозначение:  $n_{e\text{пл}}$  – концентрация электронной компоненты пламени) будет наблюдаться срыв факела пламени с поверхности горючего материала и тушение очага пожара. Действительно, в данном случае будет протекать процесс распада нестабильного промежуточного комплекса  $\text{H}_3\text{O}^+$ , сопровождаемый девозбуждением, по следующей схеме:



что исключает дальнейшее течение цепных химических реакций (в частности, реакции хемоионизации) вследствие образования в горючей смеси электронейтральных продуктов реакции диссоциативной рекомбинации. Предложенный механизм согласуется с результатами теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в источнике [6].

### Заключение

В результате выполнения теоретического исследования по оценке показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов ГОТВ, обладающими специальными физико-химическими свойствами, на основе анализа данных аналитических зависимостей, предложенного физического механизма огнетушащего действия ГОТВ и поставленных им в соответствие работ, выполненных ранее, получены следующие основные выводы:

1. Необходимым и достаточным условием тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов ГОТВ, обладающими специальными физико-химическими свойствами, является интенсификация скорости диссоциативной рекомбинации  $\beta_{d2}$ , протекающая в структуре зон факела пламени при введении в очаг пожара электронной компоненты ГОТВ, поляризованного и ионизированного во внешнем статическом электрическом поле. При этом значение

$\beta_{a2}$  оказывается большим, чем при стационарном горении горючего вещества (без введения электронной компоненты ГОТВ), что вызывает нарушение условия квазинейтральности пламени и приводит к тушению очага пожара. Предельным случаем является процесс диссоциативной рекомбинации, протекающий при следующих условиях:  $n_e \geq n_{\text{епл}}$ ;  $n_i^+ = 0$ ;  $E_p = E_a$ . Предполагается, что при достижении данных условий будет наблюдаться срыв факела пламени с поверхности горючего вещества.

2. Как следует из рис. 4,а, в случае наложения на поток ГОТВ внешнего продольного статического электрического поля концентрации носителей электрического заряда в разрядном промежутке  $n_e$ ,  $n_i^+$ ,  $n_i^-$  имеют большие значения при равном значении постоянного электрического напряжения, приложенного к электродам, в сравнении со случаем наложения на поток азота внешнего поперечного статического электрического поля. Так, для цилиндрической электродной системы при значении постоянного электрического напряжения  $U_0 = 35$  (кВ) и заполнении разрядного промежутка азотом в окрестности точек с координатами  $x_1 = 20$  (мм),  $y_1 = 12,5$  (мм);  $x_2 = -20$  (мм),  $y_2 = -12,5$  (мм) концентрация электронной компоненты имеет максимальное значение и составляет  $n_e = 3 \times 10^8$  (1/м<sup>3</sup>). Следовательно, сравнительно более эффективным будет являться применение цилиндрической электродной системы для ионизации ГОТВ во внешнем статическом электрическом поле и введения электронной компоненты ГОТВ в очаг пожара при горении твердых горючих веществ и материалов.

3. Разработанная математическая модель оценки показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов ГОТВ, обладающими специальными физико-химическими свойствами, требует определения достоверности и степени валидности полученных результатов с экспериментальными данными. Тем самым данная работа предопределяет необходимость разработки методов экспериментально-аналитической и эмпирической оценки эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов ГОТВ, обладающими специальными физико-химическими свойствами.

### Список литературы

1. Волкова С. Н., Маркова Л. Ю. Газовое пожаротушение как один из видов систем противопожарной защиты // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazovoe-pozharotushenie-kak-odin-iz-vidov-sistem-protivopozharnoy-zaschity> (дата обращения: 12.10.2023).
2. Корольченко А. Я., Шилина Е. Н. Газовое пожаротушение // Пожаровзрывобезопасность. 2016. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazovoe-pozharotushenie> (дата обращения: 12.10.2023).
3. Бобков С. А., Бабуринов А. В., Комраков П. В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. 210 с.
4. Киздермишов А. А., Киздермишова С. Х. Проблемы применения автоматических систем (установок) газового пожаротушения // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2019. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-primeneniya-avtomaticheskikh-sistem-ustanovok-gazovogo-pozharotusheniya> (дата обращения: 12.10.2023).
5. Алешков М. В., Кузьменко К. П., Инчиков В. П. Перспектива применения установок газового пожаротушения на основе диоксида углерода для тушения пожаров на объектах электроэнергетики // Пожаровзрывобезопасность. 2013.

- № 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektiva-primeneniya-ustanovok-gazovogo-pozharotusheniya-na-osnove-dioksida-ugleroda-dlya-tusheniya-pozharov-na-obektah> (дата обращения: 12.10.2023).
6. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения : пер. с англ. М. : Энергия, 1976. 294 с.
7. Ku J. H. A study on personal safety improvement of gaseous fire extinguishing system // Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation. Vol. 14, № 3. P. 193–199.
8. Улыбышев К. Е. Влияние постоянного электрического поля на структуру и эмиссионные свойства ламинарных диффузионных пламен : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1998. 102 с.
9. Столяров Д. В., Михайлов К. А., Шапошник Д. С. Метод экспериментальной оценки эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. (Москва, 17–18 марта 2022 г.). М. : Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 205–211.
10. Столяров Д. В., Алешков М. В., Топольский Н. Г. [и др.] Аналитическая оценка эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 126–138. doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-9
11. Слышалов В. К., Слышалов А. В., Кандалов Ю. В., Полкошников Д. А. Расчет электрического поля и параметров системы цилиндрических электродов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-elektricheskogo-polya-i-parametrov-sistemy-tsilindricheskih-elektrodov> (дата обращения: 12.10.2023).
12. Усачев А. Е. Методы расчета электрических полей : учеб. пособие. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 111 с.
13. Соболев А. А., Пяташов С. В., Неволин А. М., Седунин В. А. Расчетное и экспериментальное исследование обтекания цилиндра в аэродинамической трубе // Евразийский Союз Ученых. 2015. № 2-3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschyotnoe-i-eksperimentalnoe-issledovanie-obtekaniya-tsilindra-v-aerodinamicheskoy-trube> (дата обращения: 12.10.2023).
14. Mossotti O. F. Sull'influenza che l'azione di un mezzo dielettrico ha sulla distribuzione dell'elettricità alla superficie di più corpi elettrici disseminati in esso // Memorie di matematica e di fisica della Società italiana delle scienze. 1850. Т. 2, pt. 2. P. 49–74.
15. Гиршфельд Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., 1961.
16. Сухов А. К. Моделирование импульсного разряда в азоте // Вестник Костромского государственного университета. 2013. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-impulsnogo-razryada-v-azote> (дата обращения: 12.10.2023).
17. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме / под ред. Л. С. Полака. М. : Наука, 1974. С. 68.

### References

1. Volkova S.N., Markova L.Yu. Gas fire extinguishing as one of the types of fire protection systems. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy* = *Fire safety: problems and prospects*. 2018;(9). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazovoe-pozharotushenie-kak-odin-iz-vidov-sistem-protivopozharnoy-zaschity> (accessed 12.10.2023).
2. Korol'chenko A.Ya., Shilina E.N. Gas fire extinguishing. *Pozharovzryvbezopasnost'* = *Fire and explosion safety*. 2016;(5). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazovoe-pozharotushenie> (accessed 12.10.2023).

3. Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov: ucheb. posobie = Physico-chemical foundations of fire development and extinguishing : textbook*. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 2014:210. (In Russ.)
4. Kizdermishov A.A., Kizdermishova S.Kh. Problems of application of automatic systems (installations) of gas fire extinguishing. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and Technical sciences*. 2019;(1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-primeneniya-avtomaticheskikh-sistem-ustanovok-gazovogo-pozharotusheniya> (accessed 12.10.2023).
5. Aleshkov M.V., Kuz'menko K.P., Inchikov V.P. The prospect of using carbon dioxide-based gas fire extinguishing systems to extinguish fires at electric power facilities. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and explosion safety*. 2013;(11). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektiva-primeneniya-ustanovok-gazovogo-pozharotusheniya-na-osnove-dioksida-ugleroda-dlya-tusheniya-pozharov-na-obektah> (accessed 12.10.2023).
6. Lauton Dzh., Vaynberg F. *Elektricheskie aspekty goreniya: per. s angl. = Electrical aspects of combustion : trans. from english*. Moscow: Energiya, 1976:294. (In Russ.)
7. Ku J.H. A study on personal safety improvement of gaseous fire extinguishing system. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*. 2014;14(3):193–199.
8. Ulybyshev K.E. *The influence of a constant electric field on the structure and emission properties of laminar diffusion flames*. PhD dissertation. Moscow, 1998:102. (In Russ.)
9. Stolyarov D.V., Mikhaylov K.A., Shaposhnik D.S. Method of experimental evaluation of the effectiveness of extinguishing fires of solid combustible substances and materials by static electric field. *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch. (Moskva, 17–18 marta 2022 g.) = Fire-fighting: problems, technologies, innovations : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference : at 2 a.m. (Moscow, March 17–18, 2022)*. Moscow: Akademiya Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy, 2022:205–211. (In Russ.)
10. Stolyarov D.V., Aleshkov M.V., Topol'skiy N.G. et al. Analytical assessment of the effectiveness of extinguishing fires of solid combustible substances and materials by a static electric field. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2022;(2):126–138. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-9
11. Slyshalov V.K., Slyshalov A.V., Kandalov Yu.V., Polkoshnikov D.A. Polkoshnikov D. A. Calculation of the electric field and parameters of the cylindrical electrode system. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2009;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-elektricheskogo-polya-i-parametrov-sistemy-tsilindricheskikh-elektrodov> (accessed 12.10.2023).
12. Usachev A.E. *Metody rascheta elektricheskikh poley: ucheb. posobie = Methods of calculating electric fields : a textbook*. Kazan': Kazan. gos. energ. un-t, 2013:111. (In Russ.)
13. Sobolev A.A., Pyatashov S.V., Nevolin A.M., Sedunin V.A. Computational and experimental study of cylinder flow in a wind tunnel. *Evrasiyskiy Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2015;(2-3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschyotnoe-i-eksperimentalnoe-issledovanie-obtekaniya-tsilindra-v-aerodinamicheskoy-trube> (accessed 12.10.2023).
14. Mossotti O.F. Sull'influenza che l'azione di un mezzo dielettrico ha sulla distribuzione dell'elettricità alla superficie di più corpi elettrici disseminati in esso. *Memorie di matematica e di fisica della Società italiana delle scienze*. 1850;2(2):49–74.

15. Hirschfelder J.O., Curtiss C.F., Bird R.B. *Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey* = *Molecular theory of gases and liquids*. Moscow, 1961. (In Russ.)
16. Sukhov A.K. Modeling of pulsed discharge in nitrogen. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta* = *Bulletin of Kostroma State University*. 2013;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-impulsnogo-razryada-v-azote> (accessed 12.10.2023).
17. Eletskiy A.V., Smirnov B.M. *Modelirovanie i metody rascheta fiziko-khimicheskikh protsessov v nizkoterperaturnoy plazme* = *Modeling and calculation methods of physico-chemical processes in low-temperature plasma*. Moscow: Nauka, 1974:68. (In Russ.)

### **Информация об авторах / Information about the authors**

#### **Даниил Владимирович Столяров**

студент кафедры пожарной безопасности  
и низкотемпературных систем,  
Московский государственный  
университет технологий и управления  
имени К. Г. Разумовского  
(Россия, г. Москва, ул. Земляной Вал, 73)  
E-mail: sdv-270401@mail.ru

#### **Daniil V. Stolyarov**

Student of the sub-department of fire safety  
and low-temperature systems,  
K.G. Razumovsky Moscow State University  
of Technology and Management  
(73 Zemlyanoi Val street, Moscow, Russia)

#### **Кирилл Андреевич Михайлов**

преподаватель кафедры  
информационных технологий,  
Академия Государственной  
противопожарной службы  
Министерства Российской Федерации  
по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации  
последствий стихийных бедствий  
(Россия, г. Москва,  
ул. Бориса Галушкина, 4)  
E-mail: mihkir.94@mail.ru

#### **Kirill A. Mikhailov**

Lecturer of the sub-department  
of information technology,  
Academy of the State Fire Service  
of the Ministry of Russian Federation  
for Civil Defense, Emergencies  
and Elimination of Consequences  
of Natural Disasters  
(4 Boris Galushkin street, Moscow, Russia)

#### **Вячеслав Алексеевич Морозов**

заместитель начальника,  
Главное управление Министерства  
Российской Федерации по делам  
гражданской обороны, чрезвычайным  
ситуациям и ликвидации  
последствий стихийных бедствий  
по Пензенской области  
(Россия, г. Пенза, ул. Держинского, 5)  
E-mail: 6otr.pnz@mail.ru

#### **Vyacheslav A. Morozov**

Deputy head,  
Main Directorate of the Ministry of Russian  
Federation of Civil Defense, Emergencies  
and Elimination of Consequences  
of Natural Disasters in the Penza region  
(5 Dzerzhinskiy street, Penza, Russia)

#### **Валентина Викторовна Тараканова**

кандидат педагогических наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
пожарной безопасности  
и низкотемпературных систем,  
Московский государственный  
университет технологий и управления  
имени К. Г. Разумовского  
(Россия, г. Москва, ул. Земляной Вал, 73)  
E-mail: v.tarakanova@mgut.ru

#### **Valentina V. Tarakanova**

Candidate of pedagogical sciences,  
associate professor,  
head of the sub-department of fire safety  
and low-temperature systems,  
K.G. Razumovsky Moscow State University  
of Technology and Management  
(73 Zemlyanoi Val street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 10.07.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 31.08.2023**

**Принята к публикации/Accepted 04.03.2024**