

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ Веществ и Материалов Статическим Электрическим Полем

Д. В. Столяров¹, М. В. Алешков², Н. Г. Топольский³,
А. В. Мокшанцев⁴, К. А. Михайлов⁵

¹ Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления имени К. Г. Разумовского, Пенза, Россия

^{2, 3, 4, 5} Академия Государственной противопожарной службы Министерства

Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Москва, Россия

¹ sdv-270401@mail.ru, ² aleshkov.m@mail.ru, ³ N.Topolskiy@academygps.ru,

⁴ mok-av@yandex.ru, ⁵ mihkir.94@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема оценки показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем при режимах пожара, регулируемого нагрузкой (ПРН), и пожара, регулируемого вентиляцией (ПРВ). *Материалы и методы.* Для оценки показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем разработана математическая модель на основе уравнений вынужденной диффузии электронной и ионной компонент факела пламени при приложении внешнего статического электрического поля с учетом собственных электрических свойств факела пламени. *Результаты.* В работе получены аналитические зависимости показателей вынужденной диффузии носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени при воздействии однородным и неоднородным статическим электрическим полем, показана зависимость величины времени тушения очага пожара от конфигурации и напряженности внешнего электрического поля. *Выводы.* Разработанная математическая модель позволяет получить значения величины времени тушения очага пожара статическим электрическим полем при различных термодинамических параметрах внутреннего пожара и схемах наложения внешнего статического электрического поля. Модель может быть применена при разработке и экспериментальных исследованиях систем пожаротушения с применением статического электрического поля.

Ключевые слова: статическое электрическое поле, ПРН, ПРВ, эффективность тушения, уравнение диффузии

Финансирование: работа поддержана грантом ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программе «УМНИК» (Договор 15409ГУ/2020 от 21.06.2020).

Для цитирования: 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

ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF EXTINGUISHING FIRES OF SOLID FUELS SUBSTANCES AND MATERIALS BY STATIC ELECTRIC FIELD

D.V. Stolyarov¹, M.V. Aleshkov², N.G. Topolsky³,
A.V. Mokshantsev⁴, K.A. Mikhaylov⁵

¹ Penza Cossack Institute of Technology (branch) Moscow State University
of Technology and Management named after K.G. Razumovsky, Penza, Russia

^{2, 3, 4, 5} Academy of the State Fire Service Ministry of the Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russia

¹sdv-270401@mail.ru, ²aleshkov.m@mail.ru, ³N.Topolskiy@academygps.ru,

⁴mok-av@yandex.ru, ⁵mihkir.94@mail.ru

Abstract. *Background.* The work is devoted to the problem of evaluating the efficiency of extinguishing fires of solid combustible substances and materials by a static electric field in the modes of fire controlled by load and fire controlled by ventilation. *Materials and methods.* To assess the efficiency of extinguishing fires of solid combustible substances and materials with a static electric field, a mathematical model has been developed based on the equations of forced diffusion of the electronic and ionic components of the flame torch when an external static electric field is applied, taking into account the intrinsic electrical properties of the flame torch. *Results.* Analytical dependences of the parameters of forced diffusion of electric charge carriers in the area of the primary reaction zone of the flame torch under the influence of a homogeneous and inhomogeneous static electric field are obtained, the dependence of the extinguishing time of the fire on the configuration and intensity of the external electric field is shown. *Conclusions.* The developed mathematical model makes it possible to obtain the values of the fire extinguishing time by a static electric field for various thermodynamic parameters of an internal fire and schemes for applying an external static electric field. The model can be applied in the development and experimental studies of fire extinguishing systems using a static electric field.

Keywords: static electric field, fire regulated by load, fire regulated by ventilation, extinguishing efficiency, diffusion equation

Acknowledgements: the work was supported by a grant from the Federal State Budgetary Institution "Fund for Assistance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere" under the program "UMNIK" (Agreement 15409GU/2020 dated 21.06.2020).

For citation: Stolyarov D.V., Aleshkov M.V., Topolsky N.G. [et al.]. Analytical assessment of the effectiveness of extinguishing fires of solid fuels substances and materials by static electric field. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):126–138. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-2-9

Введение

Факел пламени является электрически нейтральной системой, однако в структуре его областей (зон) носители электрических зарядов распределены неравномерно: в случае рассмотрения диффузионного факела пламени при ламинарном течении горючей смеси удастся установить, что в первичной и вторичной рекреационной зонах преобладают преимущественно носители положительного электрического заряда, распределенные с объемной плотностью ρ^+ , в зоне внутреннего конуса факела пламени преобладают преимуще-

ственно носители отрицательного электрического заряда, распределенные с объемной плотность ρ^- , кроме того, в области зоны внутреннего конуса осуществляется разделение носителей электрического заряда, обусловленное различной их подвижностью вследствие неравенства масс [1]:

$$m_e \ll m_i, \quad (1)$$

где m_e – масса электрона, кг; m_i – масса иона, кг.

В работе рассматриваются два варианта воздействия энергии электрического поля на факел пламени. В первом варианте наблюдается диссипация энергии электрического поля, в результате чего возможно регистрировать возрастание как среднеобъемной, так и локальных температур (в структуре зон факела пламени), увеличение скорости распространения горения [2].

Во втором варианте воздействия наблюдается отклонение факела пламени от вертикальной оси конвективной колонки, убывание скорости распространения горения, и, в результате, срыв факела пламени с поверхности горючего вещества. При этом наблюдается также возрастание разности абсолютных температур как среднеобъемных, так и локальных, регистрируемых в различных точках областей (зон) факела пламени. В основе наблюдаемого явления лежит эффект Бифельда – Брауна (движение частично ионизированного газообразного диэлектрика под действием сил, возникающих в сильных электрических полях, так называемый «ионный ветер») [3].

Физические явления, описанные для второго варианта воздействия энергии электрического поля на факел пламени, были зарегистрированы в результате выполненных экспериментальных исследований, описанных в работах [4–7], а также в работах зарубежных исследователей [8, 9].

Теоретические модели, описывающие механизмы воздействия энергии электрического поля на факел пламени при таком варианте воздействия, в котором наблюдается срыв факела пламени с поверхности горючего вещества, могут быть применены при разработке устройств и систем электростатического пожаротушения.

Для определения эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов с применением устройств и систем электростатического пожаротушения необходимо выполнить моделирование процессов, протекающих при наложении внешнего статического электрического поля на факел пламени.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка аналитической модели оценки эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов с применением статического электрического поля в режимах пожара, регулируемого нагрузкой (ПРН), и пожара, регулируемого вентиляцией (ПРВ).

Научная новизна работы заключается в применении математической модели на основе уравнений вынужденной диффузии электронной и ионной компонент факела пламени при приложении внешнего статического электрического поля для определения значений величин времени тушения очага пожара статическим электрическим полем при различных термодинамических параметрах внутреннего пожара и схемах наложения внешнего статического электрического поля.

Материалы и методы

Ионно-электронный состав факела пламени определяет наличие у него собственных электрических свойств.

Носителями отрицательного электрического заряда являются электроны и анионы, носителями положительного электрического заряда – катионы [7].

В работе [10] установлено, что в пламенах с высокой степенью ионизации величины напряженности собственных (согласованных) электрических полей составляют $E_c = 10...50$ (В/см), а в пламенах с низкой степенью ионизации – $E_c \leq 5$ (В/см).

Количественно состояние ионизации характеризуется степенью ионизации:

$$\alpha_u = \frac{n_u}{n_0}, \quad (2)$$

где α_u – степень ионизации; n_u – концентрация ионизированных атомов, м^{-3} ; n_0 – общее количество атомов, м^{-3} .

Условие возникновения диффузионного движения носителей электрических зарядов в пламени следует из структуры их неравномерного распределения в объеме факела пламени: по мере развития горения неизбежно наличие перепадов концентраций заряженных частиц в макрообъемах областей (зон) факела пламени. Тогда выражение плотностей диффузионного потока электронов и ионов будут иметь вид [9]

$$\vec{J}_i = n_i(\vec{v}_i - \vec{v}_0), \quad (3)$$

$$\vec{J}_e = n_e(\vec{v}_e - \vec{v}_0), \quad (4)$$

где $\vec{J}_i$ – плотность диффузионного потока ионов, $1/\text{м}^2\text{с}$; $\vec{J}_e$ – плотность диффузионного потока электронов, $1/\text{м}^2\text{с}$; n_i – концентрация ионов, м^{-3} ; n_e – концентрация электронов, м^{-3} ; $\vec{v}_i$ – скорость диффузионного движения ионов, м/с ; $\vec{v}_e$ – скорость диффузионного движения электронов, м/с ; $\vec{v}_0$ – скорость диффузионного движения нейтральной компоненты, м/с .

Предположение в первом приближении об изменении концентраций n_i и n_e относительно оси Ox , связанное с увеличением площади проекции зоны горения на горизонтальную плоскость, позволяет выразить величины плотностей диффузионных потоков носителей электрического заряда в случае, если к пространственной области, в которой имеется факел пламени или хотя бы одна из его областей (зон), приложено внешнее статическое электрическое поле:

$$J_i = -\frac{\mu_i}{Z_i q_i} K_b T_i \frac{dn_i}{dx} + Z_i \mu_i n_i \vec{E}_x; \quad (5)$$

$$J_e = -\frac{\mu_e}{Z_e q_e} K_b T_e \frac{dn_e}{dx} + Z_e \mu_e n_e \vec{E}_x, \quad (6)$$

где $\vec{E}_x$ – напряженность электрического поля вдоль оси Ox , В/м.

Для построения теоретической зависимости $J_i(E_x)$ и $J_e(E_x)$, а также численного решения уравнений (5) и (6), данные уравнения дополняются следующими начальными и граничными условиями:

$$\text{при } x \rightarrow 0: n_i = n_i^0, T_i = T_i^0, E_x = 0; \\ n_e = n_e^0, T_e = T_e^0, E_x = 0;$$

$$\text{при } x \rightarrow +\infty: \frac{dn_i}{dx} = 0, \frac{dT_i}{dx} = 0.$$

Также из свойства квазинейтральности факела пламени следует дополнительное условие: $\frac{dn_i}{dx} = \frac{dn_e}{dx}$.

Источником, формирующим внешнее статическое электрическое поле, является электродная система, представляющая собой плоский конденсатор.

В работе [6] показана эффективность тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов при воздействии статическим электрическим полем на пространственную область, ограниченную первичной реакционной зоной факела пламени, в связи с чем в настоящей работе будет дана количественная оценка параметров электрического поля, формируемого в первичной реакционной зоне факела пламени.

Расчет напряженности электрического поля и потенциала электродной системы может быть произведен с применением математической модели электрического поля плоского конденсатора.

Приложение внешнего статического электрического поля только к области первичной реакционной зоны факела пламени не вызывает образование объемного электрического заряда [10], следовательно, потенциал поля в рассматриваемом случае выражается из уравнения Лапласа:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = 0, \quad (7)$$

Для случая плоского электростатического поля (рис. 1), после выражения потенциала с помощью дифференциального оператора Лапласа, уравнение (7) приобретет вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) имеет вид

$$\varphi = C_1 x + C_2, \quad (9)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Определив значения постоянных интегрирования из граничных условий уравнения (8), окончательно получим

$$\text{при } x \rightarrow 0: E_x \Big|_{x=0} = \frac{U_0}{d}; \\ \text{при } x \rightarrow d: E_x \Big|_{x=d} = -\frac{U_0 x}{d} + \frac{U_0}{d}.$$

В ходе выполнения серии экспериментальных исследований в работах [4–6] было зарегистрировано увеличение угла отклонения факела пламени от оси конвективной колонки, а также его пространственная деформация, при воздействии статическим электрическим полем в точках, расположенных на периферии обкладок плоского конденсатора. Связано это с неоднородностью электрического поля, обусловленной краевым эффектом, и локальным возрастанием напряженности электрического поля в данных точках.

Преобразование электрического поля на краю плоского конденсатора в однородное функцией Максвелла $z = \frac{\alpha}{\pi}(\omega + 1 + e^{\omega})$ позволяет определить величину максимального значения напряженности электрического поля плоского конденсатора:

$$E_{x \max} = \frac{U_0}{\frac{1}{2}d\sqrt{2(1 + \cos \nu)}}, \quad (10)$$

где $E_{x \max}$ – максимальное значение напряженности электрического поля плоского конденсатора, В/м; ν – угол между первой эквипотенциальной поверхностью (обкладкой конденсатора) и направлением силовых линий поля в граничной области, рад.

На рис. 1 представлены результаты моделирования картины распределения электрического поля электродной системы с применением ПО Elcut 6.4.

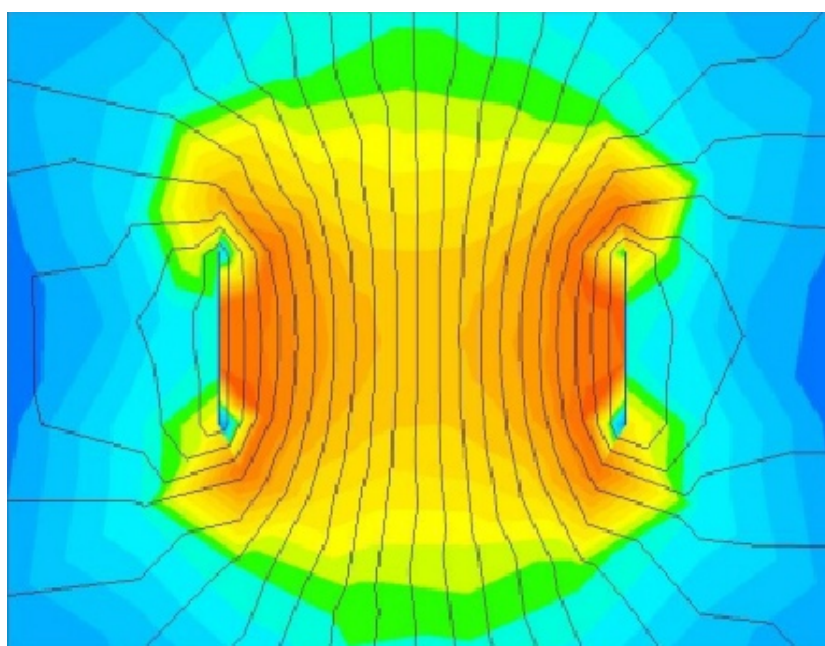


Рис. 1. Картина распределения силовых линий электрического поля электродной системы, применяемой в экспериментальном исследовании

Подставив соотношения, выражающие напряженность внешнего электрического поля в уравнения (5) и (6), получим

$$J_i = \frac{\mu_i}{z_i q_i} K_B T_i \frac{dn_i}{dx} + z_i \mu_i n_i \left(\frac{U_0 x}{d} + \frac{U_0}{d} \right), \quad (11)$$

$$J_e = \frac{\mu_e}{z_e q_e} K_B T_e \frac{dn_e}{dx} + z_e \mu_e n_e \left(\frac{U_0 x}{d} + \frac{U_0}{d} \right), \quad (12)$$

$$J_i = -\frac{\mu_i}{z_i q_i} K_B T_i \frac{dn_i}{dx} + \frac{2z_i \mu_i n_i U_0}{d \sqrt{2(1 + \cos v)}}, \quad (13)$$

$$J_e = -\frac{\mu_e}{z_e q_e} K_B T_e \frac{dn_e}{dx} + \frac{2z_e \mu_e n_e U_0}{d \sqrt{2(1 + \cos v)}}. \quad (14)$$

На основе уравнений (11)–(14) могут быть получены уравнения, описывающие изменение концентрации диффундирующих ионных и электронных компонент при приложении внешнего электростатического поля во времени и плоскости для рассматриваемого одномерного случая.

Результаты

Учитывая то, что в рассматриваемой системе носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени действует сила, обусловленная приложением внешнего электростатического поля и равная $F_\phi = \text{grad}\phi$, получаем

$$J_k = J_{kD} + J_{k\Phi}, \quad (15)$$

где J_k – полный поток переноса соответствующей k -ой компоненты (электронной, ионной), $1/\text{м}^2\text{с}$; J_{kD} – плотность диффузионного потока соответствующей k -ой компоненты (электронной, ионной), $1/\text{м}^2\text{с}$; $J_{k\Phi}$ – плотность конвекционного потока, обусловленного однородным перемещением соответствующей k -ой компоненты (электронной, ионной), возникающего под действием силы F_ϕ , $1/\text{м}^2\text{с}$;

Комбинируя равенство (15) с первым законом Фика и уравнением неразрывности [11], получим уравнения (11)–(14) в компактной форме для одномерного случая:

$$\frac{\partial n_i(x, \tau)}{\partial \tau} = D_i \frac{\partial^2 n_i(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{D_i}{K_B T_i} \left(\frac{\partial n_i(x, \tau)}{\partial x} |E_x| \right), \quad (16)$$

$$\frac{\partial n_e(x, \tau)}{\partial \tau} = D_e \frac{\partial^2 n_e(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{D_e}{K_B T_e} \left(\frac{\partial n_e(x, \tau)}{\partial x} |E_x| \right), \quad (17)$$

$$\frac{\partial n_i(x, \tau)}{\partial \tau} = D_i \frac{\partial^2 n_i(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{D_i}{K_B T_i} \left(\frac{\partial n_i(x, \tau)}{\partial x} |E_{x\max}| \right), \quad (18)$$

$$\frac{\partial n_e(x, \tau)}{\partial \tau} = D_e \frac{\partial^2 n_e(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{D_e}{K_B T_e} \left(\frac{\partial n_e(x, \tau)}{\partial x} |E_{x\max}| \right). \quad (19)$$

Начальные и граничные условия уравнений (16), (17) аналогичны начальным и граничным условиям уравнений (5), (6). На рис. 2 представлены аналитические зависимости распределения концентраций электронной и ионной компонент по координате и во времени для одномерного случая при приложении внешнего однородного статического электрического поля.

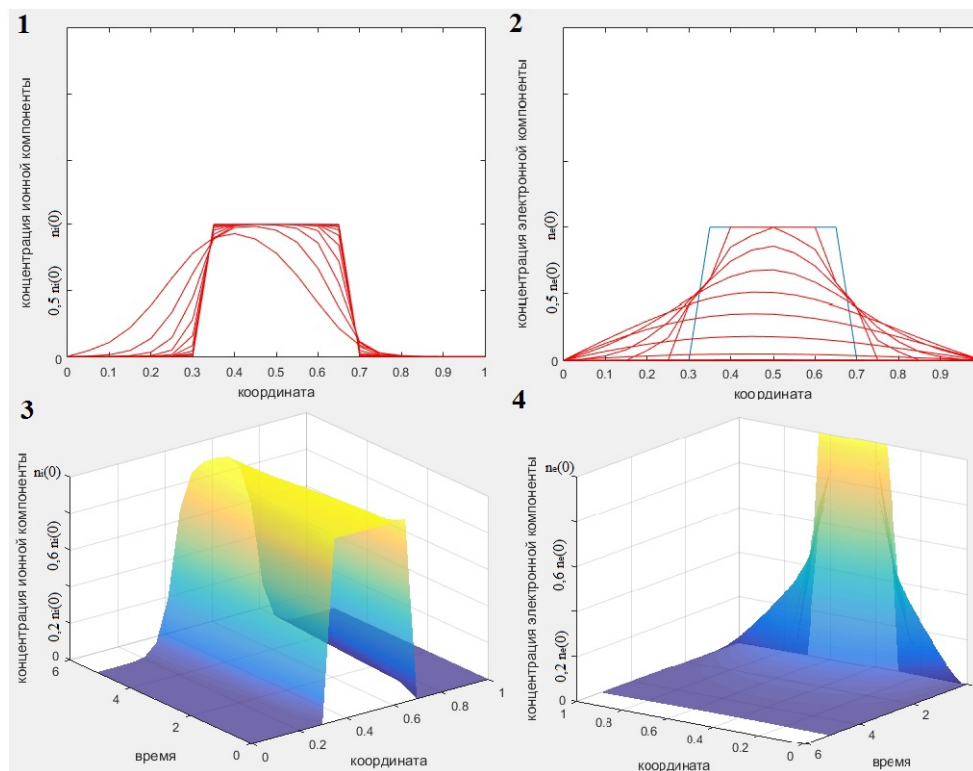


Рис. 2. Аналитическая зависимость показателей вынужденной диффузии носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени при воздействии однородным электростатическим полем:

1 – зависимость $n_i(x)$ при кратности шага по времени $t = 0,06$; 2 – зависимость $n_e(x)$ при кратности шага по времени $t = 0,06$; 3 – зависимость $n_i(x, t)$;

4 – зависимость $n_e(x, t)$; $U_0 = 90$ кВ; $d = 1$ м; $T_0 = 298,15$ К; $z_i = 1$; $z_e = 1$;

$n_e^0 = n(H_3O^+)^0 = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$; $\mu_i = 0,001 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$; $\mu_e = 0,1 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ [12]

Уравнения (18), (19) выражают изменение концентраций диффундирующих под действием силы внешнего неоднородного электростатического поля ионной и электронной компонент соответственно во времени и плоскости для рассматриваемого одномерного случая вынужденной диффузии носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени. Начальные и граничные условия уравнений (18), (19) аналогичны начальным и граничным условиям уравнений (5), (6). На рис. 3 представлены аналитические зависимости распределения концентраций электронной и ионной компонент по координате и во времени для одномерного случая при приложении внешнего однородного статического электрического поля.

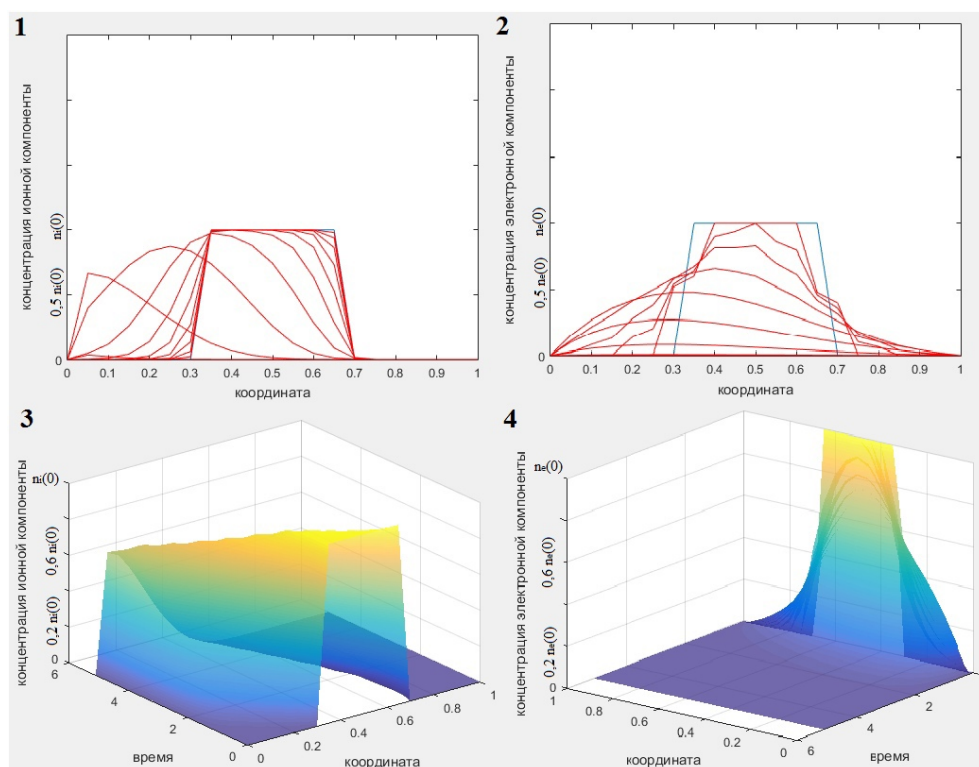


Рис. 3. Аналитическая зависимость показателей вынужденной диффузии носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени при воздействии неоднородным электростатическим полем: 1 – зависимость $n_i(x)$ при кратности шага по времени $t = 0,06$; 2 – зависимость $n_e(x)$ при кратности шага по времени $t = 0,06$; 3 – зависимость $n_i(x, t)$; 4 – зависимость $n_e(x, t)$; $U_0 = 90$ кВ; $d = 1$ м; $T_0 = 298,15$ К; $z_i = 1$; $z_e = 1$; $n_e^0 = n(H_3O^+)^0 = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$; $\mu_i = 0,001 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$; $\mu_e = 0,1 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ [12]

Обсуждение

Как следует из графиков аналитических зависимостей, убывание концентрации электронной компоненты в расчетной области первичной реакционной зоны факела пламени вследствие вынужденной диффузии протекает за меньший диапазон времени, чем концентрации ионной компоненты, как в случае приложения внешнего однородного статического электрического поля, так и в случае приложения внешнего неоднородного статического электрического поля, что согласуется с описанием механизма воздействия энергии электрических полей высокой напряженности на факел пламени, приведенным в источнике [12]. Кроме того, в случае сравнения аналитических зависимостей показателей вынужденной диффузии носителей электрического заряда в области первичной реакционной зоны факела пламени при воздействии однородным и неоднородным статическим электрическим полем удастся установить, что скорость убывания концентрации как электронной, так и ионной компоненты возрастает при воздействии неоднородным статическим электрическим полем: при $t = 360$ (с), $n_i = 0,9 n_i(0)$; $n_e = 0,1 n_e(0)$ – в случае воздействия однородным статическим электрическим полем; при

$t = 360$ (с), $n_i = 0,7 n_i(0)$; $n_e = 0$ – в случае воздействия неоднородным статическим электрическим полем. Полученные результаты численного моделирования соответствуют частному случаю начального распределения концентраций электронной и ионной компонент в области первичной реакционной зоны факела пламени, рассмотренному при постановке вычислительного эксперимента в данной работе.

Заключение

В результате выполнения теоретического исследования по оценке показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем в режимах ПРВ и ПРН, на основе анализа данных аналитических зависимостей и поставленных в соответствие им работ, выполненных ранее, получены основные выводы работы:

1. Необходимым и достаточным условием тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов является убывание концентрации носителей электрического заряда (преимущественно электронной компоненты) в области первичной реакционной зоны факела пламени вследствие вынужденной диффузии носителей электрического заряда, при этом протекание процесса осуществляется в диапазоне времени, не превышающем время критической продолжительности пожара как в I, так и во II фазах развития горения. Если значение концентрации электронной компоненты $n_e \approx 0$, то наблюдается срыв факела пламени с поверхности горючего вещества.

2. Показана сравнительно большая эффективность тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов при воздействии на область первичной реакционной зоны факела пламени неоднородным статическим электрическим полем как в режиме ПРВ, так и в режиме ПРН, что следует из аналитической зависимости (см. рис. 3) и подтверждается экспериментально [9].

3. Разработанная математическая модель оценки показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем требует определения достоверности и степени валидности полученных результатов с экспериментальными данными. Тем самым данная работа предопределяет необходимость разработки метода экспериментально-эмпирической оценки показателей эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов статическим электрическим полем.

Список литературы

1. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения : пер. с англ. М. : Энергия, 1976. 294 с.
2. Суворов Д. В., Кочева М. А. Механизмы воздействия электромагнитной энергии на пламя // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 182–184.
3. Решетников С. М., Зырянов И. А., Лаптев А. С. Ингибирование процесса горения декана внешним электрическим полем // ВНКСФ. 2010. Т. 1. С. 462–463.
4. Дудышев В. Д. Способ тушения пламени (А.с. СССР № 1621234. 12 марта 1988 г.) // Независимый науч.-техн. портал. URL: <http://www.ntpo.com> (дата обращения: 14.05.2021).
5. Столяров Д. В., Королева Т. И., Бодров М. А. Тушение модельных очагов пожаров класса А, В, С электромагнитным полем // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2019. № 6. С. 133–141.

6. Столяров Д. В., Михайлов К. А., Шапошник Д. С., Мокшанцев А. В. Обоснование возможности применения статического электрического поля для тушения пожаров твердых горючих веществ и материалов // Проблемы техносферной безопасности – 2021 : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. С. 113–119.
7. Фиалков А. Б., Фиалков Б. С. Ионный состав пламен пропан-бутан-воздушной смеси при пониженном давлении // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 32–42.
8. Jones F. L., Becker P. M., Heinson R. J. Mathematical Model of the Opposed-Jet Diffusion Flame: Effect of an Electric Field on Concentration and Temperature Profiles // Combustion and flame. 1972. Vol. 19, № 3. P. 351–362.
9. Hardersty D. R., Weinberg F. G. Electrical control of particulate pollutants from flames // 14th Symp. (International) on combustion. Pittsburg : The combustion institute, 1973. P. 907–918.
10. Кидин Н. К., Махвшадзе Г. М. Электрическое поле ламинарного пламени с большой степенью ионизации // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 6. С. 865–871.
11. Осипова Л. Э., Низамов И. И. Исследование диффузии в многокомпонентных газовых смесях // Известия КазГАСУ. 2012. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-diffuzii-v-mnogokomponentnyh-gazovyh-smesyah> (дата обращения: 04.06.2021).
12. Улыбышев К. Е. Влияние постоянного электрического поля на структуру и эмиссионные свойства ламинарных диффузионных пламен : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1998. 102 с.

References

1. Lauton Dzh., Vaynberg F. *Elektricheskie aspekty gorenija: per. s angl. = Electrical aspects of gorenje : per. from Engl.* Moscow: Energiya, 1976:294. (In Russ.)
2. Suvorov D.V., Kocheva M.A. Mechanisms of influence of electromagnetic energy on flame. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high-tech technologies.* 2014;(5-1):182–184. (In Russ.)
3. Reshetnikov S.M., Zyryanov I.A., Laptev A.S. Inhibition of the gorenje process by an external electric field. *VNKSF.* 2010;1:462–463. (In Russ.)
4. Dudyshev V.D. The method of extinguishing the flame (A.S. USSR No. 1621234. March 12, 1988). *Nezavisimyy nauch.-tekhn. portal = Independent scientific-technical portal.* (In Russ.). Available at: <http://www.ntpo.com> (accessed 14.05.2021).
5. Stolyarov D.V., Koroleva T.I., Bodrov M.A. Extinguishing model fires of class A, B, With an electromagnetic field. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovatsii = Education and science in the modern world. Innovation.* 2019;(6):133–141. (In Russ.)
6. Stolyarov D.V., Mikhaylov K.A., Shaposhnik D.S., Mokshantsev A.V. Substantiation of the possibility of using a static electric field to extinguish fires of solid combustible substances and materials. *Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti – 2021: materialy X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov = Problems of technosphere safety – 2021 : materials of the X International Scientific and Practical Conference. young scientists and specialists.* Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 2021:113–119. (In Russ.)
7. Fialkov A.B., Fialkov B.S. Ionic composition of propane-butane-air mixture flames at reduced pressure. *Fizika gorenija i vzryva = Physics of gorenje i explosion.* 1985;21(3):32–42. (In Russ.)
8. Jones F.L., Becker P.M., Heinson R.J. Mathematical Model of the Opposed-Jet Diffusion Flame: Effect of an Electric Field on Concentration and Temperature Profiles. *Combustion and flame.* 1972;19(3):351–362.

9. Hardersty D.R., Weinberg F.G. Electrical control of particulate pollutants from flames. *14th Symp. (International) on combustion*. Pittsburg: The combustion institute, 1973:907–918.
10. Kidin N.K., Makhvshadze G.M. Electric field of laminar flame with a high degree of ionization. *Fizika gorennya i vzryva = Physics of gorenje i explosion*. 1976;12(6):865–871. (In Russ.)
11. Osipova L.E., Nizamov I.I. Investigation of diffusion in multicomponent gas mixtures. *Izvestiya KazGASU = Izvestia KazGASU*. 2012;(4). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-diffuzii-v-mnogokomponentnyh-gazovyh-smesyah> (accessed 04.06.2021).
12. 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.)

Информация об авторах / Information about the authors

Даниил Владимирович Столяр

студент,
Пензенский казачий институт технологий
(филиал) Московского государственного
университета технологий и управления
имени К. Г. Разумовского
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: sdv-270401@mail.ru

Daniil V. Stolyarov

Student,
Penza Cossack Institute of Technology
(branch) Moscow State University
of Technology and Management
named after K.G. Razumovsky
(6 Volodarsky street, Penza, Russia)

Михаил Владимирович Алешков

доктор технических наук, профессор,
заместитель начальника Академии
по научной работе,
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: aleshkov.m@mail.ru

Mikhail V. Aleshkov

Doctor of technical sciences, professor,
deputy head of the Academy
for scientific work,
Academy of the State Fire Service Ministry
of the Russian Federation for Civil De-
fense, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters
(4 Boris Galushkin street, Moscow, Russia)

Николай Григорьевич Топольский

доктор технических наук, профессор,
профессор 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: N.Topolskiy@academygps.ru

Nikolay G. Topolsky

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information technologies,
Academy of the State Fire Service Ministry
of the Russian Federation for Civil De-
fense, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters
(4 Boris Galushkin street, Moscow, Russia)

Александр Владимирович Мокшанцев

кандидат технических наук,
заместитель начальника 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: mok-av@yandex.ru

Alexander V. Mokshantsev

Candidate of technical sciences,
deputy head of the sub-department
of information technologies,
Academy of the State Fire Service Ministry
of the Russian Federation for Civil De-
fense, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters
(4 Boris Galushkin 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 technologies,
Academy of the State Fire Service Ministry
of the Russian Federation for Civil De-
fense, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters
(4 Boris Galushkin street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 12.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 03.03.2022

Принята к публикации/Accepted 20.04.2022