

УДК 533.95

### ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ УРОТРОПИНА

*И. А. ЗУР<sup>1)</sup>, А. С. ФЕДОТОВ<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*

Исследуется воздействие электрического поля на горение уротропина. Установлена оптимальная для тушения пламени пространственная конфигурация электродов; изучена динамика воздушных потоков, вызванных ионным ветром; определено пороговое значение напряженности электрического поля, приводящее к затуханию уротропинового образца. Разработана экспериментальная установка для изучения взаимодействия электрического поля с низкотемпературным пламенем. Предложено выражение, основанное на уравнении движения, связывающее скорость движения частиц частично ионизированного газа, вязкость, степень ионизации газа и напряженность внешнего электрического поля. Показано, что приводящая к прекращению горения уротропинового образца напряженность внешнего электрического поля возрастает с уменьшением межэлектродного пространства и составляет от 80 до 135 кВ/м при межэлектродном расстоянии 0,4 и 0,1 м соответственно. Полученные результаты могут быть использованы для эффективного тушения возгораний в компактных устройствах, работающих на сухом горючем.

**Ключевые слова:** уротропин; горение; ионный ветер; затухание.

**Благодарность.** Авторы выражают глубокую признательность заведующему кафедрой физики Лицея БГУ Л. Г. Марковичу и учителю физики высшей квалификационной категории Лицея БНТУ С. И. Глуценко за плодотворные научные дискуссии и помощь при постановке и проведении эксперимента.

---

#### Образец цитирования:

Зур ИА, Федотов АС. Влияние внешнего электростатического поля на горение уротропина. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020;2:42–49. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-42-49>

#### For citation:

Zur IA, Fedotov AS. The influence of external electrostatic field on the combustion of hexamine. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;2:42–49. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-42-49>

---

#### Авторы:

**Илья Александрович Зур** – студент физического факультета. Научный руководитель – А. С. Федотов.

**Александр Сергеевич Федотов** – кандидат физико-математических наук; старший преподаватель кафедры компьютерного моделирования физического факультета.

#### Authors:

**Ilya A. Zur**, student at the faculty of physics.

[zur.ilya@mail.ru](mailto:zur.ilya@mail.ru)

**Alexander S. Fedotov**, PhD (physics and mathematics); senior lecturer at the department of computer simulations, faculty of physics.

[fedotov.alexandro@gmail.com](mailto:fedotov.alexandro@gmail.com)

## THE INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTROSTATIC FIELD ON THE COMBUSTION OF HEXAMINE

I. A. ZUR<sup>a</sup>, A. S. FEDOTOV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: I. A. Zur (zur.ilya@mail.ru)

In scientific work investigates the impact of electric fields on combustion of hexamine. The experimental setup has been developed to study the interaction of an electric field with a low-temperature flame. The optimal spatial configuration of the electrodes for extinguishing the flame was established; the dynamics of airflows caused by the ion wind was studied; the threshold value of the electric field leading to flame extinguishing was determined. An expression is proposed based on the equation of motion that connects the speed of motion of partially ionized gas particles, the viscosity and degree of ionization of the gas, and the intensity of the external electric field. It is shown that the strength of the external electric field, leading to extinguishing of hexamine combustion, increases with decreasing inter-electrode space. The values of corresponding electric field strength lied in range from 80 to 135 kV/m at interelectrode distances of 0.4 and 0.1 m, respectively. The results of the study can be used for effective fire extinguishing in compact devices running on dry fuel.

**Keywords:** hexamine; combustion; ionic wind; attenuation.

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to L. G. Markovich, head of the Physics Department of Belarusian State University Lyceum, and S. I. Glushchenko, physics teacher of the highest qualification category of Belarusian National Technical University Lyceum, for fruitful scientific discussions and support during experimenting and interpreting the results.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется поискам новых способов бесконтактного тушения возгораний. Существующие контактные методы тушения заключаются в предотвращении доступа кислорода к пламени с помощью специальных порошковых смесей или путем заливания водой. Наносится урон горючим телам и окружающим предметам, которые не были повреждены огнем. Наиболее распространено тушение водой (например, крупных пожаров). При этом КПД не превышает 2 %, что связано с неравномерностью сброса и рассеяния воды. Для повышения КПД в воду добавляют различные присадки, повышающие эффективность такого метода борьбы с огнем до 7 %.

Бесконтактные способы минимизируют косвенные повреждения горящего тела и окружения, что делает их полезными при нейтрализации возгорания вблизи ценных объектов. Существует два основных подхода к тушению бесконтактными способами: с использованием акустического [1] и электрического [2] полей. При этом для тушения с помощью акустических волн требуются акустические зеркала, высокочастотные источники звука с большой амплитудой волн (около 200 дБ [2]) в непосредственной близости от возгорания и т. д. Для тушения с применением электрического поля (ЭП) используются доступные генераторы, позволяющие создавать напряженности ЭП, близкие к напряженности пробоя воздуха при нормальных условиях.

На сегодняшний день достаточно подробно исследовано влияние ЭП на затухание изопропанола [2], изоляции проводов [3], метана [4] и других горючих веществ. Однако до сих пор отсутствуют исследования для легкого топлива – уротропина, широко применяющегося в малогабаритных двигателях и иных устройствах [5]. При этом бесконтактные методы тушения проявляют себя наилучшим образом на небольших масштабах, поскольку при малом расстоянии между электродами легче поддерживать высокую напряженность ЭП. Таким образом, изучение влияния ЭП на горение уротропина может способствовать разработке бесконтактных (не повреждающих) систем пожаротушения компактных устройств.

Цель работы – исследование воздействия ЭП на пламя уротропинового горючего тела. Для этого решались следующие задачи: установить оптимальную для тушения пламени пространственную конфигурацию электродов; изучить динамику воздушных потоков, вызванных ионным ветром; определить пороговое значение напряженности ЭП, приводящее к затуханию уротропинового образца.

### Материалы и методы

**Описание установки.** Представленная на рис. 1 установка включает высоковольтный источник постоянного напряжения, электроды и гранитную площадку для размещения горючего тела. Диапазон создаваемой источником разности потенциалов составляет (1–30) кВ/см  $\pm$  0,1 кВ/см при допустимой силе тока до 0,35 А.

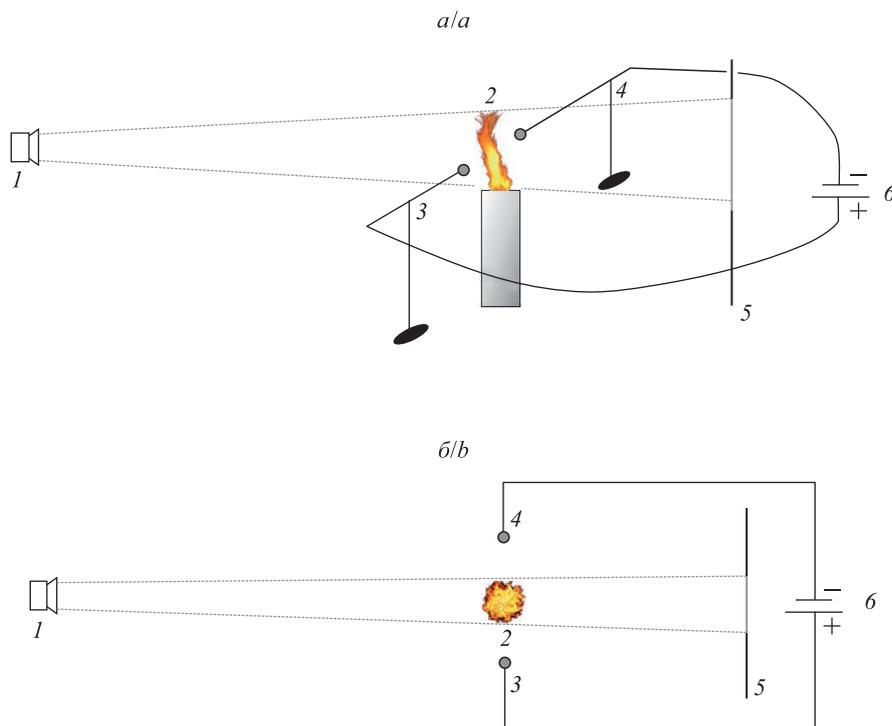


Рис. 1. Схема используемой установки: *а* – вид сбоку, *б* – вид сверху;  
1 – камера, 2 – горючее тело, 3 – анод, 4 – катод, 5 – экран, 6 – источник напряжения  
Fig. 1. Scheme of the installation used: *a* – side view, *b* – view from above;  
1 – camera, 2 – fuel, 3 – anode, 4 – cathode, 5 – screen, 6 – voltage source

Видеосъемку проводили с помощью модели камеры Sony IMX260 (Япония) разрешением 12,2 Мпк, светосилой  $f/1,7$ , размером пикселя 1,4 мкм, с максимальной частотой съемки 60 кадров в секунду.

В качестве горючего тела в основной группе экспериментов использовались таблетки прессованного сухого горючего (ООО «Смарт», Россия), состоящие из уротропина (97 %) с добавкой стабилизатора горения (3 %). Диаметр образца 5 см, толщина 1 см. В процессе горения таблетки не растекаются, не коптят и не оставляют золы. Удельная теплота сгорания образцов составляла  $31,3 \cdot 10^9$  Дж/кг [3], максимальная температура пламени не превышала  $10 \cdot 10^2$  К, высота факела достигала 17 см. Для дополнительной серии экспериментов, направленной на визуализацию эффекта ионного ветра, применялись стеариновые свечи с температурой горения до  $9 \cdot 10^2$  К.

**Конфигурация электродов.** Для определения оптимального расположения электродов относительно пламени были опробованы различные конфигурации: парная, крестовая и восьмиконечная (рис. 2). Наименьшее время от включения ЭП до затухания пламени достигалось при использовании парной конфигурации катод – анод, которая и была выбрана для дальнейшего исследования.

Для нахождения оптимальной формы электродов были опробованы электроды различных видов: металлические стержни с острым наконечником, плоские пластины воздушного конденсатора, металлические сетки с разной площадью ячеек. Наибольшую эффективность показали стержневые электроды

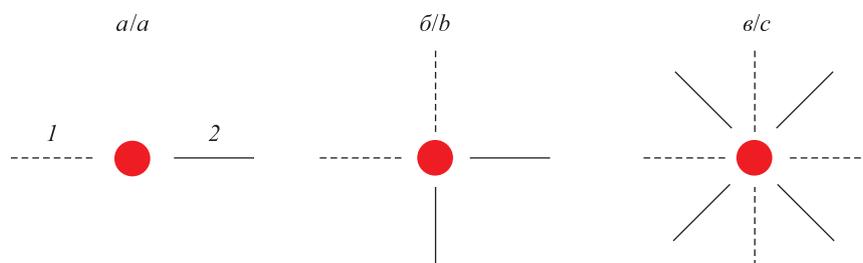


Рис. 2. Схемы пространственных конфигураций электродов:  
*а* – парная, *б* – крестовая, *в* – восьмиконечная; 1 – катод; 2 – анод  
Fig. 2. The schema of spatial configuration of the electrodes:  
*a* – pair, *b* – cross, *c* – eight-point; 1 – cathode; 2 – anode

с острыми наконечниками, выполненные из антикоррозийной стали марки 12Х18Н10Т, которые и использовались в дальнейшем. У таких электродов достигалась наивысшая плотность поверхностного заряда  $\sigma$  за счет малой площади наконечника  $\Delta S$ :

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S},$$

где  $\Delta q$  – заряд на наконечнике электрода.

### Результаты и их обсуждение

**Визуализация эффекта Бифельда – Брауна.** Визуализацию эффекта ионного ветра удобнее проводить с помощью дыма от стеариновой свечи, более заметного при фотосъемке. Продукты горения и температуры в факеле пламени свечи и уротропинового образца различаются мало ( $9 \cdot 10^2$  К [6] и  $10 \cdot 10^2$  К [7] соответственно), а значит, степени ионизации газов в обоих экспериментах близки. Таким образом, закономерности, установленные для процесса горения пламени свечи, могут быть использованы при исследовании горения уротропина.

При включении внешнего ЭП струя дыма начинала отклоняться к аноду (рис. 3).

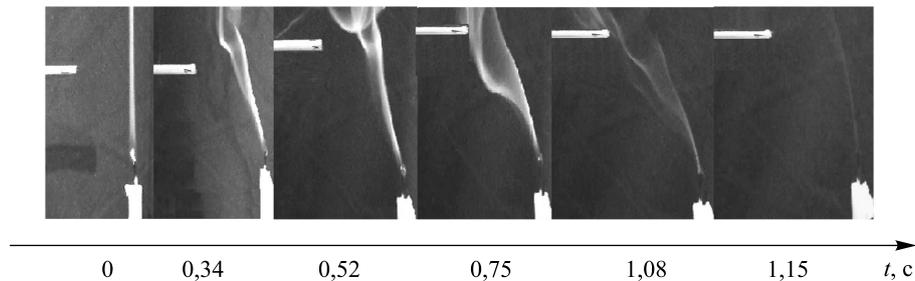


Рис. 3. Фотографии струи дыма в ЭП в различные моменты времени

Fig. 3. Photos of the smoke jet in the electric field at various times

В табл. 1 приведена скорость струи дыма на высоте анода в различные моменты времени. Оценка скорости проводилась по фотографиям при частоте съемки 60 кадров в секунду.

Таблица 1

Зависимость составляющих скорости  $v_x$  и  $v_y$  от времени  $t$

Table 1

Dependence of the velocity components  $v_x$  and  $v_y$  on time  $t$

$t, c$	0,34	0,52	0,75	1,08	1,15
$v_x, m/c$	0,25	0,33	0,41	0,39	0,36
$v_y, m/c$	0,29	0,18	0,16	0,19	0,21

Из полученных экспериментальных данных следует, что горизонтальная составляющая скорости  $v_x$  возрастает при приближении к электроду, а вертикальная (конвекционная) составляющая скорости  $v_y$  с течением времени уменьшается (рис. 4).

**Влияние ионного ветра.** Течение газов в факеле пламени является ламинарным. Число Рейнольдса  $Re$ , показывающее отношение действующих в потоке сил инерции к силам вязкости, составило  $3,4 \cdot 10^2$  при температуре  $10 \cdot 10^2$  К и оценивалось из следующего выражения:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu},$$

где  $\rho$  – плотность вещества;  $v$  – скорость потока;  $D$  – гидравлический диаметр;  $\mu$  – динамическая вязкость среды.

До включения ЭП частицы в факеле пламени обладают только вертикальной составляющей скорости, что соответствует конвективному теплопереносу в отсутствие внешних факторов (стефановский поток [4]). В некоторый момент времени на электродную пару подавалось напряжение, вследствие

чего в области пространства между электродами возникало электростатическое поле напряженностью  $\vec{E}$ , по величине равной отношению разности потенциалов  $\Phi$  к расстоянию между электродами  $d$ :

$$\vec{E} = -\frac{\Phi}{d}\vec{n}.$$

Здесь  $\vec{n}$  – вектор нормали к обкладкам электродов.

В зависимости от интенсивности реакции горения факел пламени можно разделить на 3 области. В области пламени 1 (рис. 5), находящейся в непосредственной близости от горючего тела, наименьшие температура и содержание кислорода. В области 2, большая часть объема которой расположена в верхней трети факела, процесс горения протекает наиболее интенсивно вследствие избытка как горючего вещества, так и кислорода [8]. В области 3 горение менее интенсивно в силу нехватки горючего вещества. В экспериментах электроды располагались так, чтобы оказывать наибольшее воздействие на пламя в области 2. Расположение электродов относительно зон факела показано на рис. 5, 4.

При включении ЭП отрицательно заряженные частицы устремлялись к аноду, положительно заряженные – к катоду, что приводило к возникновению эффекта Бифельда – Брауна (ионного ветра). Механизм воздействия внешнего поля на перемещение ионов в воздухе схож с механизмом транспорта электронов во внешнем поле в твердых телах [9]. Движущиеся заряженные частицы испытывали тормозящую силу, создаваемую нейтральной компонентой плазмы. Ионы (электроны), врезаюсь в нейтральные атомы, выбивали из них электроны, в результате ударной ионизации создавая вторичное ЭП.

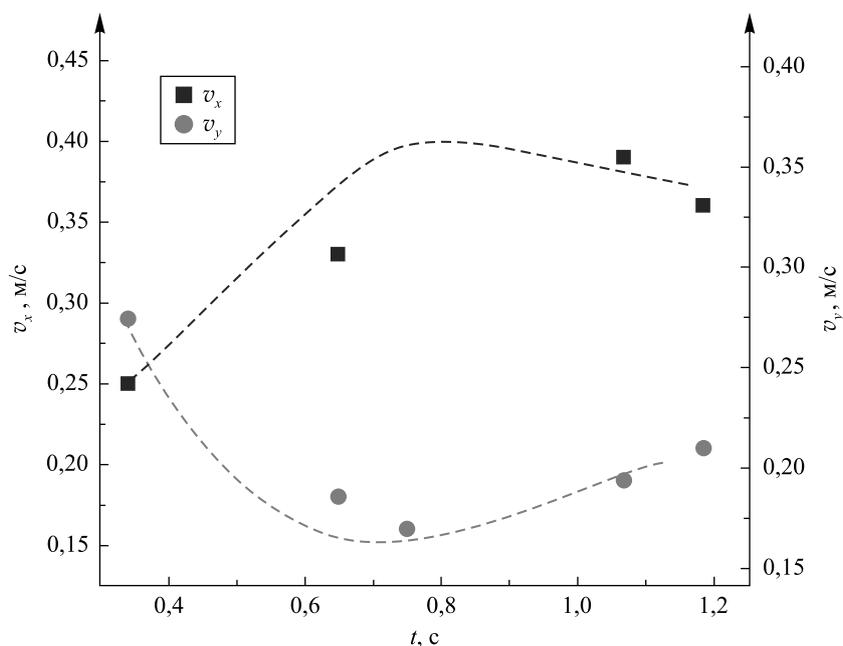


Рис. 4. Зависимость горизонтальной  $v_x$  и вертикальной  $v_y$  составляющих скорости потока от времени  $t$

Fig. 4. Dependence of the horizontal  $v_x$  and vertical  $v_y$  components of the flow rate on time  $t$



Рис. 5. Схема разделения факела пламени на зоны в зависимости от интенсивности горения и положение электрода:

- 1 – зона с недостатком кислорода; 2 – зона наибольшей интенсивности горения; 3 – зона полного сгорания;
- 4 – высота расположения электрода

Fig. 5. Scheme of dividing the flame torch into zones depending on the intensity of combustion and height of electrode:

- 1 – zone with low oxygen content; 2 – zone of most intensive combustion; 3 – zone of complete combustion;
- 4 – electrode height level

Столкновения изменяли траекторию движения каждой частицы, приводя к передаче импульса ионов нейтральным атомам (эффект ионного влечения).

Силу вязкого трения, действующую со стороны нейтральных атомов на направленно движущийся малый объем воздуха, можно оценить по формуле Стокса:

$$F_n = -6\pi\mu rv,$$

где  $\mu$  – вязкость нейтрального газа;  $r$  – линейный размер иона (радиус);  $v$  – скорость движения частицы.

Горизонтальную составляющую скорости движения заряженной частицы (однократно ионизованного атома или электрона) можно оценить из второго закона Ньютона:

$$\begin{aligned} m\vec{a} &= \vec{F}_{ЭП} + \vec{F}_n, \\ m\frac{d\vec{v}}{dt} &= q\vec{E} + 6\pi\mu r\vec{v}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$v_x = \frac{\left(-1 + e^{-\frac{6\pi\mu r t}{m}}\right) q \nabla_x \phi}{6\pi\mu r} - v_{0x} e^{-\frac{6\pi\mu r t}{m}}, \quad (2)$$

где  $q$  и  $m$  – заряд и масса частицы соответственно;  $v_x$  – горизонтальная составляющая скорости движения;  $v_{0x}$  – начальная скорость в горизонтальном направлении.

Проведем сравнение значений скорости, определенных экспериментально и полученных из выражения (1). Согласно опытным данным, через некоторое время с момента включения ЭП установившаяся горизонтальная скорость воздушного потока составила 0,4 м/с. Теоретические оценки из (1) для полностью ионизованного объема газа предсказывают скорость около 4,5 м/с. По литературным данным [10], в пламени и дыме ионизованы не все молекулы, а только их доля  $\xi$ , равная 8%. Таким образом, в выделенном контрольном объеме ионизованного дыма  $\xi$  молекул подвергались непосредственному действию ЭП, а остальные  $(1 - \xi)$  молекул увлекались вследствие серии соударений. Следовательно, для (1) справедливо введение дополнительного множителя  $\xi$  при  $q$ , отражающего уменьшение плотности заряда на единицу объема из-за неполной ионизации газа. Тогда выражение для горизонтальной компоненты скорости примет вид

$$v_x = \frac{\left(-1 + e^{-\frac{6\pi\mu r t}{m}}\right) (\xi q) \nabla_x \phi}{6\pi\mu r} - v_{0x} e^{-\frac{6\pi\mu r t}{m}}.$$

Горизонтальная скорость потока, оцененная из (2), совпадает с экспериментально определенной скоростью при степени ионизации  $\xi = 8,9\%$ . Типичные значения степени ионизации в низкотемпературном пламени, известные из литературы [11], находятся в диапазоне  $10^{-1}$ – $10^1\%$ . Следовательно, выражение (2) позволяет из физически непротиворечивых соображений связать скорость потока газа с заряженными частицами и среднюю степень ионизации. Таким образом, собранная установка дает возможность экспериментально исследовать динамику пламени при наличии эффекта Бифельда – Брауна, что подтверждается согласованием реально наблюдаемых и теоретически оцененных значений.

**Влияние электрического поля на затухание пламени.** Основной фактор, влияющий на процесс изменения траектории движения частиц факела пламени, – разность потенциалов в межэлектродном пространстве. В табл. 2 представлена зависимость минимальной разности потенциалов  $U_{ex}$ , необходимой для тушения пламени, от расстояния между электродами  $d$ . Погрешность измерения расстояния между электродами и разности потенциалов составила  $\pm 0,005$  м и  $\pm 0,150$  кВ соответственно.

Таблица 2

Зависимость минимальной разности потенциалов  $U_{ex}$ , вызывающей затухание пламени, от расстояния между электродами  $d$

Table 2

Dependence of the minimum potential difference  $U_{ex}$ , which causes flame attenuation, on the distance between the electrodes  $d$

$d$ , м	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08
$U_{ex}$ , кВ	31,7	28,2	27,1	25,3	22,9	19,7	14,8	13,6	11,9	10,5

Из полученных экспериментальных данных следует, что  $U_{\text{ex}}$  увеличивается по мере роста межэлектродного пространства вследствие возрастания сопротивления воздушного канала между электродами (рис. 6).

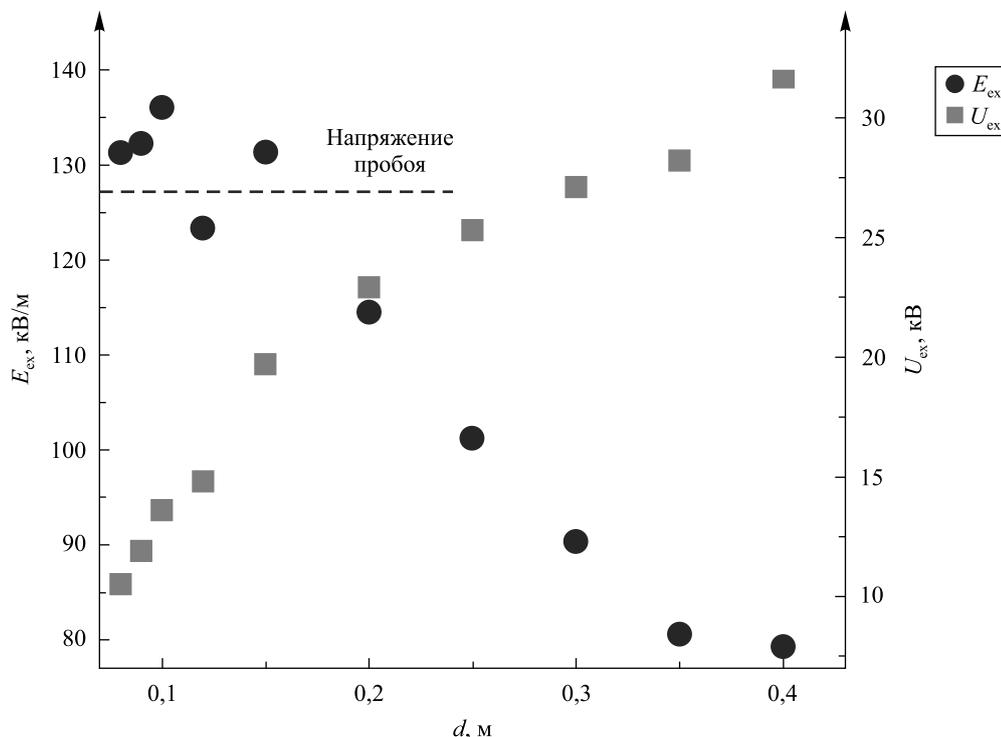


Рис. 6. Зависимость минимального напряжения  $U_{\text{ex}}$  и напряженности  $E_{\text{ex}}$  ЭП, приводящих к затуханию пламени, от расстояния между электродами  $d$   
Fig. 6. Dependence of the minimum voltage  $U_{\text{ex}}$  and the intensity of the electric field  $E_{\text{ex}}$ , which leads to flame attenuation, on the distance between the electrodes  $d$

При величине  $d$ , равной примерно 0,4 м и выше, эффекта затухания не наблюдалось, так как влияние ЭП «ослабевало» в том числе из-за усиления экранирования поля ионами продуктов горения. При непосредственной близости электродов ( $d$  составляет от 2 до 4 см) происходил искровой разряд без формирования устойчивого ионного ветра. Наиболее быстро тушение осуществлялось при расстоянии между концами электродов 0,10–0,15 м.

### Заключение

Разработана экспериментальная установка для изучения взаимодействия электростатического поля с ламинарным низкотемпературным пламенем, горящим на воздухе. Источник напряжения позволял задавать разность потенциалов до 30 кВ при силе тока, достигающей 0,35 А. В качестве топлива использовались таблетки уротропина, которые помещались между электродами. Установлено, что наиболее эффективно затухание пламени происходило в парной пространственной конфигурации электродов катод – анод.

Предложена простая модель, основанная на уравнении движения, которая связывает скорость частично ионизованного газа, степень ионизации, вязкость и напряженность внешнего ЭП. Экспериментально и теоретически оцененные горизонтальные составляющие скорости потока газа согласуются при степени ионизации дыма  $\xi = 8,9\%$ , что коррелирует с литературными данными.

Исследовано затухание уротропинового образца при напряженности ЭП, близкой к напряженности пробоя. С уменьшением межэлектродного пространства напряженность ЭП, приводящая к прекращению горения, возрастает и составляет от 80 кВ/м ( $d = 0,4$  м) до 135 кВ/м ( $d = 0,1$  м).

Таким образом, разработан и исследован эффективный метод тушения возгораний в малогабаритных системах с использованием стандартного высоковольтного источника постоянного напряжения. Способ может найти применение в пожаротушении компактных устройств, работающих на сухом горючем.

## Библиографические ссылки

1. Friedman AN, Stoliarov SI. Acoustic extinction of laminar line-flames. *Fire Safety Journal*. 2017;93:102–113. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.09.002.
2. Sher E, Pinhasi G, Pokryvailo A, Bar-On R. Extinction of pool flames by means of a DC electric field. *Combustion and Flame*. 1993;94(3):244–252.
3. Kim MK, Chung SH, Fujita O. Effect of AC electric fields on flame spread over electrical wire. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011;33(1):1145–1151.
4. Канторович БВ. *Основы теории горения и газификации твердого топлива*. Москва: Издательство Академии наук СССР; 1958. 601 с.
5. Stan Bray SB. *Making simple model steam engines hardcover*. Ramsbury: Crowood Press; 2005. 192 p.
6. Гольдфельд МГ, редактор. *Химия и общество*. Гололобов МЮ, переводчик. Москва: Мир; 1995. 559 с.
7. Merritt JR, Herington L, Jones SB, Sayed Y. Analysis of hexamine combustion. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1991;52(1):30–33. DOI: 10.1080/15298669191364271.
8. Тидеман БГ, Сциборский ДБ. *Химия горения*. Ленинград: ОГИЗ; 1935. 356 с.
9. Бокун ГС, Ди Каприо Д. Распределения потенциала и концентрации носителей заряда в твердотельном электролите между плоскими электродами. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;2:71–80.
10. Степанов ЕМ, Дьячков БГ. *Ионизация в пламени и электрическое поле*. Москва: Metallurgiya; 1968. 311 с.
11. Instant Flame Suppression. Phase II. Final Report. Cambridge: Defense Advanced Research Projects Agency, Harvard University; 2008. Report No.: 13-F-1078.

## References

1. Friedman AN, Stoliarov SI. Acoustic extinction of laminar line-flames. *Fire Safety Journal*. 2017;93:102–113. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.09.002.
2. Sher E, Pinhasi G, Pokryvailo A, Bar-On R. Extinction of pool flames by means of a DC electric field. *Combustion and Flame*. 1993;94(3):244–252.
3. Kim MK, Chung SH, Fujita O. Effect of AC electric fields on flame spread over electrical wire. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011;33(1):1145–1151.
4. Kantorovich BV. *Osnovy teorii gorennya i gazifikatsii tverdogo topliva* [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuel]. Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR; 1958. 601 p. Russian.
5. Stan Bray SB. *Making simple model steam engines hardcover*. Ramsbury: Crowood Press; 2005. 192 p.
6. Goldfeld MG, editor. *Khimiya i obshchestvo* [Chemistry and society]. Gololobov MYu, translator. Moscow: Mir; 1995. 559 p. Russian.
7. Merritt JR, Herington L, Jones SB, Sayed Y. Analysis of hexamine combustion. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1991;52(1):30–33. DOI: 10.1080/15298669191364271.
8. Tideman BG, Sciborsky DB. *Khimiya gorennya* [Combustion chemistry]. Leningrad: OGIZ; 1935. 356 p. Russian.
9. Bokun HS, Di Caprio D. Potential and charge-carrier concentration distributions in solid electrolyte between flat electrodes. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;2:71–80. Russian.
10. Stepanov EM, D'yachkov BG. *Ionizatsiya v plameni i elektricheskoe pole* [Ionization in a flame and electric field]. Moscow: Metallurgiya; 1968. 311 p. Russian.
11. Instant Flame Suppression. Phase II. Final Report. Cambridge: Defense Advanced Research Projects Agency, Harvard University; 2008. Report No.: 13-F-1078.

Статья поступила в редакцию 19.03.2020.  
Received by editorial board 19.03.2020.