

Пожарная безопасность (2.10.1. технические науки)

Научная статья
УДК 662.612.16
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2024.14.59.011

Исследование воспламеняющей способности фрикционных искр

Евгений Юрьевич Трояк

Ирина Николаевна Пожаркова

Александр Александрович Богданов

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор ответственный за переписку: Евгений Юрьевич Трояк, troyakeu@sibpsa.24.mchs.gov.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные теоретические положения в области воспламеняющей способности фрикционных искр, выявлена и обобщена информация по результатам исследований, ученных в вышеуказанной области. Рассмотрена конструкция лабораторной установки для исследования воспламеняющей способности фрикционных искр, дана характеристика ее основных узлов. Описана методика проведения натурального эксперимента по определению воспламеняющей способности искр, а также указаны основные свойства горючих материалов, использующихся в эксперименте. Приведены результаты экспериментов по исследованию воспламеняющей способности фрикционных искр. Проведены расчеты конечной температуры и количества тепла, отдаваемой искрой. Выявлена зависимость времени зажигания горючих веществ и материалов от расстояния до источника образования фрикционных искр. Доказано, что, исходя из полученных данных, зависимость времени воспламенения исследуемых веществ и материалов от расстояния до источника образования фрикционных искр (в условиях эксперимента) носит линейный характер. Определено, что большее влияние на результаты воспламенения легко воспламеняющихся жидкостей оказывает не температура вспышки, а температура кипения жидкости, что приводит к более интенсивному его испарению и образованию концентрации паров над поверхностью, превышающей нижний концентрационный предел распространения пламени.

Ключевые слова: фрикционные искры, воспламеняющая способность, конечная температура искры, минимальная энергия зажигания

Для цитирования: Трояк Е.Ю., Пожаркова И.Н., Богданов А.А. Исследование воспламеняющей способности фрикционных искр // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 3 (34). С. 133-141. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.14.59.011>.

Original article

Investigation of the igniting ability of friction sparks

Evgeniy Yu. Troyak

Irina N. Pozharkova

Alexander A. Bogdanov

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: *Evgeniy Yu. Troyak, troyakeu@sibpsa.24.mchs.gov.ru*

Abstract. The article discusses the main theoretical principles in the field of the igniting ability of friction sparks, identifies and summarizes information based on the results of research by scientists in the above area. The design of a laboratory installation for studying the flammable ability of friction sparks is considered, and the characteristics of its main components are given. The technique of conducting a full-scale experiment to determine the flammable ability of sparks is described, and the main properties of combustible materials used in the experiment are indicated. The results of experiments on the study of the flammable ability of friction sparks are presented. Calculations of the final temperature and the amount of heat given off by the spark are carried out. The dependence of the ignition time of combustible substances and materials on the distance to the source of the formation of friction sparks has been revealed. It is proved that, based on the data obtained, the dependence of the ignition time of the studied substances and materials on the distance to the source of the formation of friction sparks (under experimental conditions) is linear. It is determined that the greater influence on the results of ignition of flammable liquids is exerted not by the flash point, but by the boiling point of the liquid, which leads to its more intense evaporation and the formation of a vapor concentration above the surface exceeding the lower concentration limit of flame propagation.

Keywords: friction sparks, flammability, final spark temperature, minimum ignition energy

For citation: Troyak E.Y., Pozharkova N.P., Bogdanov A.A. Investigation of the igniting ability of friction sparks // Siberian Fire and Rescue Bulletin.2024. № 3 (34). С. 133-141. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.14.59.011>.

Актуальность исследования фрикционных искр как источника зажигания обусловлена растущим числом случаев пожаров и взрывов, связанных с этим явлением. Согласно статистическим данным, пожары, обусловленные нарушением производства огневых и других пожароопасных работ, ежегодно приводят к гибели людей и значительному материальному ущербу [1]. При этом, как указано в [2], до 25 % подобных пожаров составляют, вызванные фрикционными искрами.

Изучение фрикционных искр и разработка способов предотвращения загорания от них является актуальной задачей с точки зрения обеспечения безопасности технологических процессов [3]. Теоретические положения искрового зажигания изложены в трудах Зельдовича Я.Б., Симонова Н. Н., Вилунова В.Н. и др. Результаты экспериментальных исследований воспламеняющей способности искр описаны в работах Моисеевой К.Н., Щебеко А.Ю., Голов Н. и др. [4-10].

Целью исследования, результаты которого представлены в данном материале, является определение воспламеняющей способности фрикционных искр при варьировании вида горючей нагрузки и расстояния от источника. Для проведения соответствующих натуральных экспериментов была разработана лабораторная установка, общий вид которой и принцип работы описаны ниже.

Фрикционные искры возникают в результате трения или ударов по металлическим предметам. Эти искры представляют собой металлические частицы, имеющие форму опилок с рваной поверхностью и острыми гранями.

Исследования [7] показали, что размеры фрикционных искр варьируются от 0,1 до 0,6 мм, в зависимости от твердости и структурного строения взаимодействующих материалов. При этом размер частиц прямо пропорционален твёрдости искрообразующего материала.

В случае соударения металлов и сплавов максимальный размер частиц значительно превышает размеры, получаемые при трении. В некоторых случаях они могут достигать 0,9 мм [7].

Температура фрикционных искр чаще не превышает температуры плавления материала. Так, механическая искра с поверхности медно-никелевого сплава может иметь максимальную температуру 300°C и оставаться не раскалённой, в то время как фрикционная искра от инструментальной стали может достигать температуры 1500°C, то есть превышающей температуру плавления [7].

Воспламеняющая способность фрикционных искр представляет собой ключевую характеристику, которая определяет их потенциал инициировать горение различных веществ. Эта способность обусловлена рядом факторов, включая плотность теплового потока от искры, длительность контакта, химический состав окружающей среды, температуру и свойства воспламеняемого материала.

Особенно опасным считается сочетание удара и трения, поскольку такая комбинация может значительно увеличивать количество фрикционных искр и их температуру [7,9].

Наибольшей воспламеняющей способностью обладают механические искры, возникающие от удара и трения, при попадании в среду смесей с воздухом водорода, ацетилена, этилена, сероуглерода и др. Однако, соударение медных сплавов со сталью не вызывает образования искр, способных поджечь газо- и паровоздушные смеси [7,9].

Установка, использованная для исследования фрикционных искр, включает подвижный абразивный диск и стационарно закрепленную металлическую пластину, которые образуют пару трения (Рис.1).



Рис.1. Общий вид лабораторной установки для исследования фрикционных искр где: 1 - основание, 2 - выключатель, 3 - рулетка, 4 - штанга с держателем образца, 5 - провод для подключения к электрической сети, 6 - пружина для натяжения штанги, 8 - абразивный диск, 9 - заменяемая металлическая пластина, 10 - фиксатор пластины, 11 - электродвигатель

В качестве горючих нагрузок при проведении экспериментов были использованы: поролон, хлопковая вата, древесные опилки (сосна), бензин АИ-95, газ (пропан-бутан), ацетон (Рис.2), пожароопасные свойства, которых принимаемые при расчетах, определялись по справочнику [11].



а



б



в



г



д



е

Рис.2. Горючие вещества и материалы для проведения эксперимента

В качестве подвижной части пары трения применялся диск шлифовальный марки А24RBF (Рис.3а). Диск имеет покрытие из стекловолокна, обладающего высокой прочностью благодаря использованию оксида алюминия, скрепленного искусственной смолой [12]. Металлическая пластина (Рис.3б) выполнена из стали марки 08ПС (08 – содержание углерода в стали 0,8 %; ПС – средняя степень раскисления сплава) (Табл.1).



а



б

Рис.3. Элементы пары трения: а – диск шлифовальный марки А24RBF; б – сталь марки 08ПС

Табл.1. Свойства стали

Плотность	7800 кг · м ⁻³
Удельная теплоемкость при 20°С	460 Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹
Удельная теплоемкость расплава	678 Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹
Коэффициент теплопроводности	45,4 Вт · кг ⁻¹ · К ⁻¹
Температура плавления	1450°С

Эксперименты проводились при следующих параметрах среды: температура окружающей среды 22°С, влажность 55 %, атмосферное давление 735 мм.рт.ст. Образцы находились в данных условиях 72 часа перед началом экспериментов. Расстояние от источника образования искр до условного центра материала составляли 10, 20 и 30 см.

Методикой выполнения эксперимента предусматривалось размещение материала на негорючей подложке (для ЛВЖ – металлический тигель), установка на заданном расстоянии от источника образования искр. В эксперименте с пропан-бутановой смесью использовалась горелка Теклю, размещаемая таким образом, как показано на Рис.4, г. После включения установки, оператор дожидался набора электродвигателем (11) номинальных оборотов, затем обеспечивал контакт пластины (8) и абразивного диска (9). Степень нажатия регулировалась усилием на штангу (4) таким образом, чтобы не допустить падение оборотов электродвигателя. Образцы материала подвергались испытанию трижды при заданных условиях. Условием прекращения эксперимента являлось визуальное подтверждение воспламенения горючей нагрузки, либо его отсутствие в течении 60 с. Значения среднего времени зажигания, определенного по результатам трех экспериментов для каждого вида горючей нагрузки и расстояния до источника образования искр, приведены в Табл.2.



Рис.4. Иллюстрация процесса проведения эксперимента

Для теоретического обоснования полученных экспериментальных данных были выполнены расчеты количества тепла, отдаваемого частицей горючему веществу, а также конечной температуры искры в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [14].

Время нахождения искры в расплавленном состоянии значительно больше времени полета искры, поэтому конечная температура искры определена по формуле:

$$T_{\text{кон}} = T_0 + (T_{\text{Н}} - T_0) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot S_{\text{к}}}{C_{\text{р}} \cdot m_{\text{к}}} \cdot \tau\right)$$

где $T_{\text{кон}}$ – конечная температура частицы, К;

$T_{\text{Н}}$ – начальная температура частицы, К;

T_0 – температура окружающей среды, К;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт, $\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1}$;

$S_{\text{к}}$ – площадь поверхности частицы, м^2 ;

$C_{\text{р}}$ – удельная теплоемкость расплава металла, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$m_{\text{к}}$ – масса частицы, кг;

τ – время с момента образования искры до попадания на поверхность материала.

Количество тепла, отдаваемое искрой твердому или жидкому горючему материалу, на который она попала, вычисляются следующим образом:

$$W = V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}} \cdot C_{\text{к}} \cdot (T_{\text{кон}} - T_{\text{св}}) \cdot K$$

где W – количество тепла, отдаваемое искрой твердому или жидкому горючему материалу, Дж;

$V_{\text{к}}$ – объем частицы, м^3 ;

$C_{\text{к}}$ – удельная теплоемкость металла, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$T_{\text{св}}$ – температура самовоспламенения горючего материала, К [11];

$T_{\text{кон}}$ – конечная температура частицы, К;

K – коэффициент, равный отношению тепла, отданного горючему веществу, к энергии, запасенной в капле; в случае невозможности определения принимается равным единице.

Аналогично определены значения $T_{\text{кон}}$ и W для остальных исследованных веществ и материалов (Табл.2).

Табл.2 – Результаты вычислений

№ эксперимента	Расстояние, см	Конечная температура искры, К	Количество тепла, отдаваемое искрой, Дж	Время зажигания, с
1-Поролон	10	1820,5	0,2508	-
	20	1818	0,2503	-
	30	1815,6	0,2497	-
2- Вата	10	1820,5	0,2680	5
	20	1818	0,2675	14
	30	1815,6	0,2668	37
3-Опилки (сосна)	10	1820,5	0,2931	23
	20	1818	0,2926	40
	30	1815,6	0,2920	59
4-Бензин (АИ-95)	10	1820,5	0,3033	-
	20	1818	0,3027	-
	30	1815,6	0,3021	-
5- Газ (пропан-бутан)	10	1820,5	0,2763	-
	20	1818	0,2757	-
	30	1815,6	0,2751	-
6-Ацетон	10	1820,5	0,2544	19
	20	1818	0,2538	27
	30	1815,6	0,2532	35

На Рис.5 представлена графическая зависимость экспериментально полученного времени зажигания от расстояния до источника искр.

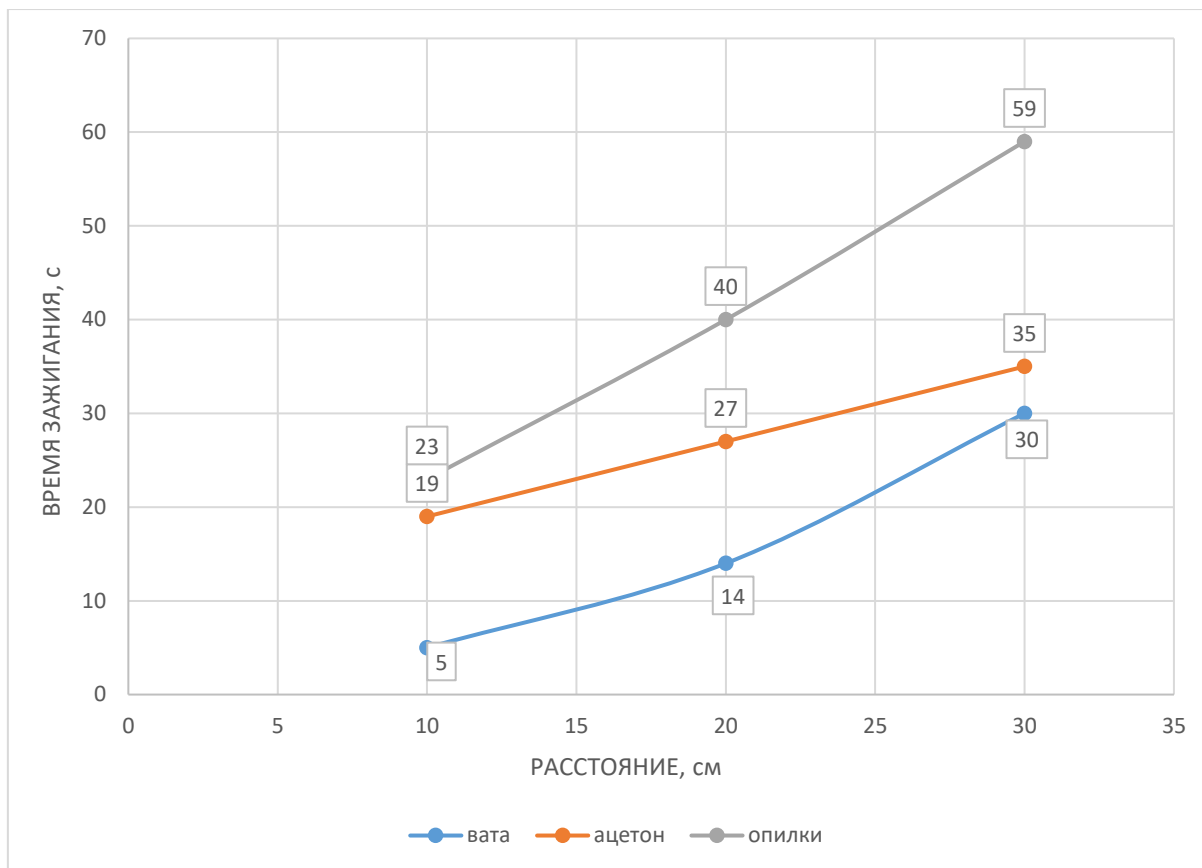


Рис.5. Зависимость времени зажигания от расстояния до источника искр

Исходя из полученных в результате экспериментов и расчетов данных, можно сделать ряд выводов:

Структура пористых и мелкодисперсных горючих материалов позволяет эффективнее поглощать тепло, выделяемое остывающей металлической частицей, так как искра может попасть не только на поверхность, но и вглубь материала. В проведенном эксперименте все три вида твердых горючих материалов относятся к тлеющим. Однако, как известно [15], в настоящее время мягкие пенополиуретаны выпускаются с добавлением составов, препятствующих тлению, что и объясняет недостаточность воспламеняющей способности искр для данного материала.

Выявлено, что энергии зажигания фрикционной искры в условиях эксперимента достаточно для воспламенения паров ацетона. Следует отметить, что, хотя температура вспышки второй исследуемой жидкости (бензина АИ-95) гораздо ниже, чем у ацетона (-39°C – бензин, -18°C – ацетон [11]), воспламенения паров бензина не происходит. Наблюдаемый эффект может объясняться тем, что в условиях эксперимента – при температуре среды 22°C большее влияние на результаты оказывает не температура вспышки, а температура кипения жидкости, которая ниже у ацетона, что приводит к более интенсивному его испарению и образованию концентрации паров над поверхностью, превышающей нижний концентрационный предел распространения пламени;

В целом, исходя из данных, отображенных на Рис.5, зависимость времени воспламенения исследуемых веществ и материалов от расстояния до источника образования фрикционных искр (в условиях эксперимента) носит линейный характер;

Отсутствие воспламенения остальных использованных в эксперименте горючих веществ и материалов может быть связано с различными причинами, выявление которых требует дополнительных исследований.

Список источников

1. Гончаренко В.С., Четина Т.А., Сибирко В.И. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: Информационно-аналитический сборник / [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – 80 с. – EDN IKFNVG.
2. Иванов Ю.С., Яновский С.Б. Пожароопасные параметры фрикционных искр. Методы исследований. Основные проблемы // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2006. – Т.1, №1 – С. 43-47.
3. Пожаркова И.Н. Пожарная безопасность технологических процессов. Лабораторный практикум [Текст]: учебное пособие / Пожаркова И.Н., Трояк Е.Ю., Антонов А.В. – Железногорск: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – 114 с.: ил.
4. Зельдович Я.Б., Симонов Н.Н. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей // ЖФХ. – 1949. – Т. 23. – С. 1362–1374.
5. Вилунов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. – Новосибирск: Наука, 1984. – 190 с.
6. Вилунов В. Н., Некрасов Е. А., Тимохин А. М. и др. О закономерностях искрового воспламенения и выхода на стационарный режим горения // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т.12, № 3. – С. 362–365.
7. Моисеева К.М. Искровое зажигание горючих газов и газозвесей / Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2020. – 124 с. – ISBN 978-5-93629-645-1. – EDN MGWUMN.
8. Трояк Е.Ю. Исследование искр электродуговой сварки как источника зажигания горючей среды / Трояк Е.Ю., Чернушевич Е.В., Пожаркова И.Н. // Техносферная безопасность. – 2023. – № 3(40). – С. 56-65. – EDN CBCEGC.
9. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Голов Н.В. Экспериментальное исследование зажигания горючих газовых смесей фрикционными искрами // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 13-24. – DOI 10.15372/FGV20180302. – EDN XQOPFJ.
10. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Голов Н.В. Экспериментальное исследование зажигания парогазовых смесей искрами от удара и трения // XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Материалы конференции: В 2-х частях, Балашиха, 05 июля 2017 года. Том Часть 2. – Балашиха: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2017. – С. 127-130. – EDN ZFGEFT.
11. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов, и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. – 2-е изд., перераб. И до. – М.: Асс. «Пожнаука», 2004. – Ч.1. – 713 с; Ч.2. – 774 с.
12. ГОСТ Р 52588-2011. Инструмент абразивный. Требования безопасности. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4680862> (дата обращения 10.08.2024).
13. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4134456> (дата обращения 10.08.2024).
14. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования – URL: <https://06.mchs.gov.ru/deyatelnost/edinyu-reestr-normativnyh-pravovyh-aktov-i-normativnyh-dokumentov-po-pozharnoy-bezopasnosti/normativnye-dokumenty-posle-vstupleniya-v-silu-fz-123/gost-12-1-004-91-ssbt-pozharnaya-bezopasnost-obshchie-trebovaniya-s-izmeneniyem> (дата обращения 10.08.2024).
15. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. Кн.1. Санкт-Петербург, СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010-705с.

References

1. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I. Fires and fire safety in 2022: An information and analytical collection / [et al.]. – Balashikha: Federal State Budgetary Institution VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. – 80 p. – EDN IKFNVG.

2. Ivanov Yu.S., Yanovsky S.B. Fire-hazardous parameters of friction sparks. Research methods. The main problems // Emergencies: education and science. - 2006. – Т1, №. 1 – pp. 43-47.
3. Pozharkova I.N. Fire safety of technological processes. Laboratory workshop [Text]: textbook / Pozharkova I.N., Troyak E.Y., Antonov A.V. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. 114 p.: ill.
4. Zeldovich Ya.B., Simonov N.N. On the theory of spark ignition of gas explosive mixtures // ZHFH. – 1949. – Vol. 23. – pp. 1362-1374.
5. Vilyunov V.N. Theory of ignition of condensed substances. Novosibirsk: Nauka, 1984. 190 p.
6. Vilyunov V.N., Nekrasov E.A., Timokhin A.M. et al. Gorenje i gorenje [On the laws of spark ignition and steady-state combustion]. Physics of Combustion and explosion. – 1976. – Vol. 12, №. 3. – pp. 362-365.
7. Moiseeva K.M. Spark ignition of combustible gases and gas mixtures / Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. – Tomsk: Limited Liability Company "STT", 2020. – 124 p. – ISBN 978-5-93629-645-1. – EDN MGWUMN.
8. Troyak E.Y. Investigation of electric arc welding sparks as a source of ignition of a combustible medium / Troyak E.Y., Chernushevich E.V., Pozharkova I.N. // Technosphere safety. – 2023. – № 3(40). – Pp. 56-65. – EDN CBCEGC.
9. Shebeko A.Y., Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Golov N.V. Experimental investigation of ignition of combustible gas mixtures by friction sparks // Physics of gorenje i explosion. - 2018. – Vol. 54, №. 3. – pp. 13-24. – DOI 10.15372/FGV20180302. – EDN XQOPFJ.
10. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Golov N.V. Experimental study of ignition of steam-gas mixtures by sparks from impact and friction // XXIX International Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Federal State Budgetary Institution VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia: Conference materials: In 2 parts, Balashikha, 05 July 2017. Volume Part 2. – Balashikha: All-Russian Order of the Badge of Honor Scientific Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2017. – pp. 127-130. – EDN ZFGEFT.
11. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them. Reference book: in 2 hours – 2nd ed., reprint. And before. – M.: Acc. "Pozhnauka", 2004. – Part I. – 713 p.; Part 2. – 774 p.
12. GOST 380-2005. Carbon steel of ordinary quality. Stamps. [electronic resource]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=41344> (accessed on 10.08.2024).
13. GOST R 52588-2011. The tool is abrasive. Safety requirements. [electronic resource]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4680862> (accessed on 10.08.2024).
14. GOST 12.1.004-91 System of occupational safety standards. Fire safety. General requirements // URL: <https://06.mchs.gov.ru/deyatelnost/edinyy-reestr-normativnyh-pravovyh-aktov-i-normativnyh-dokumentov-po-pozharnoy-bezopasnosti/normativnye-dokumenty-posle-vstupleniya-v-silu-fz-123/gost-12-1-004-91-ssbt-pozharnaya-bezopasnost-obshchie-trebovaniya-s-izmeneniyem> (accessed 10.08.2024).
15. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. Analysis of expert versions of fire occurrence. Book 1. St. Petersburg, SPbF Federal State University VNIPO EMERCOM of Russia, 2010.-705с.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.07.2024, одобрена после рецензирования 26.08.2024, принята к публикации 06.09.2024.

The article was submitted 30.07.2024, approved after reviewing 26.08.2024, accepted for publication 06.09.2024.