

УДК 614.841

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКР ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ КАК ИСТОЧНИКА ЗАЖИГАНИЯ ГОРЮЧЕЙ СРЕДЫ

Трояк Евгений Юрьевич, Чернушевич Елена Валерьевна,
Пожаркова Ирина Николаевна

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

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема воспламенения горючего материала от одиночных горячих частиц металла, образующихся при проведении электросварочных работ. Для исследования искр электродуговой сварки как возможного источника зажигания горючей среды, а также для выявления зависимости времени зажигания горючего материала от диаметра одиночной горячей частицы (капли металла) и высоты её падения проведено экспериментальное исследование с применением разработанной авторами лабораторной установки. Для проведения эксперимента подобран горючий материал, который может находиться в местах проведения электросварочных работ, а именно линолеум поливинилхлоридный (ПВХ) марки Tarkett. В статье также представлено описание установки, её принцип действия и методика проведения натурного эксперимента. Результатами исследования являются значения времени зажигания образцов горючего материала от одиночной частицы расплавленного металла, значения ее конечной температуры, а также значения количества тепла, отдаваемого горячей частицей горючему материалу при контакте. Установлена зависимость времени зажигания горючей среды от диаметра одиночной горячей частицы расплавленного металла и высоты её падения. Экспериментально подтверждено, что электрические искры могут послужить источником зажигания исследуемого горючего материала. Полученные результаты могут быть использованы для определения возможности воспламенения различных горючих веществ от искр электродуговой сварки.

Ключевые слова: источник зажигания, электродуговая сварка, одиночная горячая частица, горючая среда, время зажигания

STUDY ARC WELDING SPARKS AS A SOURCE OF IGNITION OF A COMBUSTIBLE MEDIUM

Evgeniy Yu. Troyak, Elena V. Chernushevich, Irina N. Pozharkova

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

ABSTRACT

The article deals with the problem of ignition of combustible material from single hot metal particles formed during electric welding operations. To study electric arc welding sparks as a possible source of ignition of a combustible medium, as well as to identify the dependence of the ignition time of a combustible material on the diameter

of a single hot particle (metal droplet) and the height of its fall, an experimental study was conducted using a laboratory setup developed by the authors. For the experiment, a combustible material was selected, which can be located in the places of electric welding, namely polyvinyl chloride linoleum of the Tarkett brand. The article also provides a description of the installation, its principle of operation and the methodology of conducting a full-scale experiment. The results of the study are the values of the ignition time of samples of combustible material from a single particle of molten metal, the values of its final temperature, as well as the values of the amount of heat given by the hot particle to the combustible material upon contact. The dependence of the ignition time of the combustible medium on the diameter of a single hot particle of molten metal and the height of its fall is established. It has been experimentally confirmed that electric sparks can serve as a source of ignition of the investigated combustible material. The results can be used to determine the possibility of ignition of various combustible substances from electric arc welding sparks.

Keywords: the source of ignition, arc welding, single hot particle, combustible medium, ignition time

Введение

Количество пожаров, связанных с нарушением правил пожарной безопасности при проведении электрогазосварочных работ, ежегодно составляет порядка

1300 случаев (рис. 1), при этом максимальный ущерб в рассматриваемом периоде составил свыше 252 миллионов рублей [1].

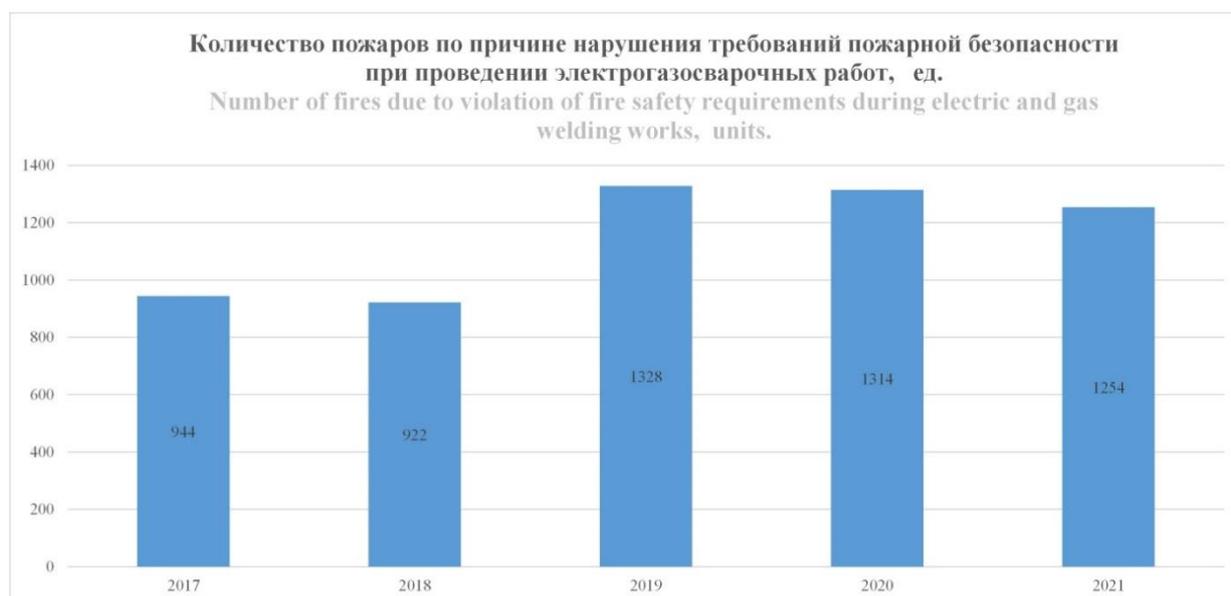


Рис. 1. Количество пожаров по причине нарушения требований пожарной безопасности при проведении электрогазосварочных работ

Fig. 1. Number of fires due to violation of fire safety requirements during electric and gas welding

В Правилах противопожарного режима в Российской Федерации [2] обозначены требования к радиусу очистки территории от горючих материалов в месте проведения огневых работ, однако этот пункт правил зачастую не выполняется. В связи с этим непосредственной причиной пожара при проведении электросварочных работ становится воспламенение горючих материалов, расположенных вблизи места их проведения [3, 4].

Для того чтобы одиночная горячая частица (капля металла) послужила источником зажигания горючей среды необходимо одновременное выполнение следующих условий:

$$t_{\text{кон}} \geq t_{\text{св}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{кон}}$ – конечная температура одиночной горячей частицы, °С;

$t_{\text{св}}$ – температура самовоспламенения горючей среды, °С;

$$W \geq W_{\text{min}}, \quad (2)$$

где W – количество тепла, отдаваемого одиночной горячей частицей при охлаждении от начальной температуры до температуры самовоспламенения, Дж;

W_{min} – минимальная энергия зажигания горючей смеси, Дж;

$$\tau \geq \tau_{\text{инд}} + \tau_{\text{наг}}, \quad (3)$$

где τ – длительность действия одиночной горячей частицы, с;

$\tau_{\text{инд}}$ – период индукции горючей смеси, с;

$\tau_{\text{наг}}$ – время нагрева горючей смеси до температуры самовоспламенения, с.

Целью исследования является выявление зависимости времени зажигания горючего материала от диаметра одиночной горячей частицы (капли металла) и высоты её падения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

– разработка лабораторной установки для исследования одиночной горячей частицы (капли металла) как источника зажигания;

– исследование времени зажигания образцов горючего материала одиночной горячей частицей, падающей с высоты 0,04 м и 1 м;

– обработка и интерпретация результатов.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для проведения исследования подобраны образцы горючего материала, который может находиться в местах проведения огневых (электросварочных) работ, – линолеум поливинилхлоридный (ПВХ) марки Tarkett. Согласно сопроводительной документации образец имеет следующие показатели пожарной опасности: группа воспламеняемости В3 (легковоспламеняемые), группа распространения пламени РП2 (слабораспространяющие), группа дымообразующей способности ДЗ (с высокой дымообразующей способностью), группа по токсичности продуктов горения Т2 (умеренно-опасные).

В ходе исследования применялись теоретические (анализ, обобщение, сравнение, дедукция) и эмпирические (наблюдение, эксперимент) методы. Для обработки экспериментальных данных применялись методы математической статистики.

Основная часть

Для исследования одиночной горячей частицы (капли металла) как источника зажигания разработана и сконструирована лабораторная установка, общая и принципиальная схемы которой представлены на рис. 2. Проведение экспериментов на данной установке возможно в двух положениях: при расстоянии от электродов до чаши с исследуемым горючим материалом 0,04 м и 1 м.

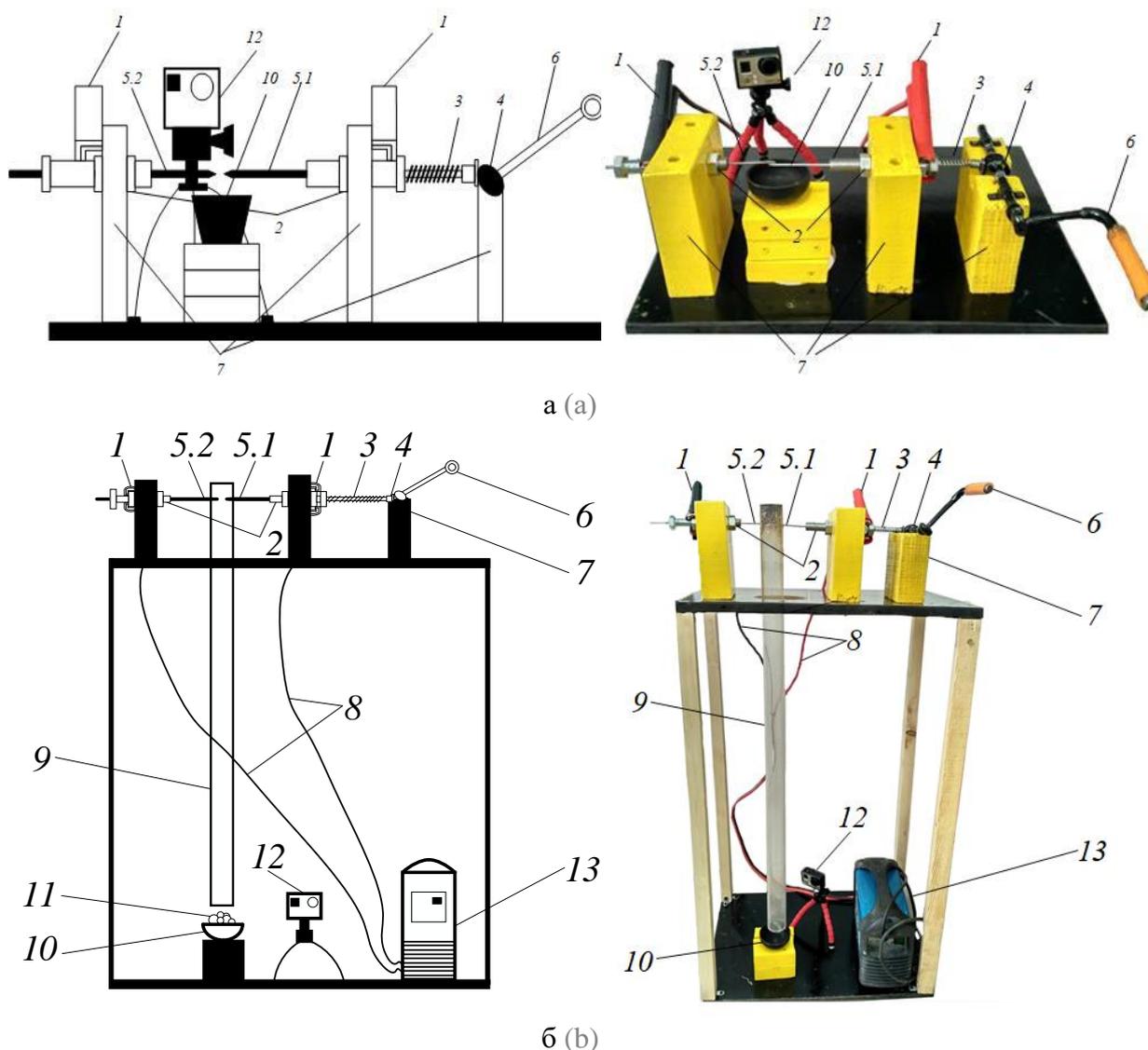


Рис. 2. Схема лабораторной установки в «положении 1» – 0,04 м (а), в «положении 2» – 1 м (б): 1 – зажимы; 2 – болты; 3 – пружина; 4 – эксцентрик; 5.1, 5.2 – электроды; 6 – металлическая стальная ручка с диэлектрической пластмассовой насадкой; 7 – элементы крепления; 8 – провода; 9 – кварцевая жаростойкая труба; 10 – чугунная чаша; 11 – горючий материал; 12 – экшен-камера «GoPro Hero 3»; 13 – сварочный аппарат «Blueweld Prestige 164»

Fig. 2. Scheme of the laboratory installation in «position 1» - 0.04 m (a), in «position 2» - 1 m (b): 1 - clamps; 2 - bolts; 3 - spring; 4 - eccentric; 5.1, 5.2 - electrodes; 6 - metal steel handle with a dielectric plastic nozzle; 7 - fastening elements; 8 - wires; 9 - quartz heat-resistant pipe; 10 - cast iron bowl; 11 - combustible material; 12 - action camera «GoPro Hero 3»; 13 - welding machine «Blueweld Prestige 164»

Лабораторная установка включает электроды фирмы «Esab» 5.1 и 5.2 (диаметр электродов 3 мм, длина электрода 5.1 – 30 см, длина электрода 5.2 – 25 см, концы электродов заточены под углом

30°), закрепленные на элементах 7 при помощи зажимов 1 и болтов 2. Для создания электрической дуги электроды 5.1 и 5.2 через провода 8 подсоединяются к сварочному аппарату 13 («Blueweld Prestige 164»),

служащему источником питания сварочного тока.

При вращении оператором металлической ручки 6 лабораторной установки через эксцентрик 4 создается поступательное движение электрода 5.1 в сторону электрода 5.2. При касании электродов 5.1 и 5.2 образуется электрическая дуга, которая плавит оба электрода. В результате нескольких касаний за короткий промежуток времени на электродах начинает образовываться капля расплавленного металла. Под действием силы тяжести капля отделяется от электродов и падает во внутреннем пространстве кварцевой жаростойкой трубы 9 в чугунную чашу 10, заполненную горючим материалом 11. В результате теплопередачи от капли металла происходит воспламенение горючего материала 11. Экшен-камера 12 «GoPro Hero 3» фиксирует процесс от момента

попадания капли металла на горючий материал 11 до момента воспламенения. Кварцевая жаростойкая труба применяется при проведении испытаний в «положении 2».

Для исследования искр электродуговой сварки как возможного источника зажигания был проведен эксперимент, в ходе которого фиксировались диаметр одиночной горячей частицы (капли металла) и время зажигания горючего материала. В табл. 1 представлены средние значения диаметра одиночной горячей частицы и времени зажигания образцов горючего материала в двух положениях установки. На рис. 3 изображен внешний вид образцов линолеума до и после зажигания. На рис. 4 графически представлено время зажигания горючего материала в зависимости от диаметра одиночной горячей частицы.

Таблица 1
Результаты эксперимента
Table 1
Experiment results

Диаметр одиночной горячей частицы d , м Diameter of a single hot particle d , m	Время зажигания τ_3 , с Ignition time τ_i , sec	
	0,04 м 0,04 m	1 м 1 m
0,0015	0,39	0,41
0,0020	0,35	0,43
0,0031	0,36	0,40
0,0034	0,33	0,40
0,0043	0,30	0,32
0,0048	0,31	0,33
0,0057	0,24	0,34
0,0068	0,22	0,26
0,0079	0,15	0,25
0,0088	0,16	0,19
0,0100	0,14	0,20



Рис. 3. Внешний вид образцов линолеума до и после зажигания
Fig. 3. The appearance of linoleum samples before and after ignition



Рис. 4. Время зажигания образцов горючего материала в зависимости от диаметра одиночной горячей частицы
Fig. 4. Ignition time of combustible material samples depending on the diameter of a single hot particle

По результатам испытаний установлено, что высота падения одиночной горячей частицы оказывает незначительное влияние на время зажигания горючего материала. Время зажигания горючего материала в большей степени зависит от диаметра одиночной горячей частицы. При этом зависимость времени зажигания образцов горючего материала от диаметра одиночной горячей частицы описывается линейной функцией и выглядит следующим образом:

– «положение 1» (0,04 м):

$$\tau_3 = -29,552 \cdot d + 0,4775, \quad (4)$$

– «положение 2» (1 м):

$$\tau_3 = -31,538 \cdot d + 0,4353, \quad (5)$$

где d – диаметр одиночной горячей частицы, м.

Конечная температура одиночной горячей частицы, а также количество тепла, отдаваемое одиночной горячей частицей при охлаждении от начальной температуры до температуры самовоспламенения, определялись в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 12.1.004 [5]. В соответствии с указанной методикой конечная температура одиночной горячей частицы находится по следующей формуле:

$$T_{\text{кон}} = T_0 + (T_{\text{н}} - T_0) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot S_k}{C_p \cdot m_k} \cdot \tau\right), \quad (6)$$

где T_0 – температура воздуха в помещении, К;

$T_{\text{н}}$ – начальная температура одиночной горячей частицы, К (принимается равной 2373 К);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

S_k – площадь поверхности одиночной горячей частицы, м²;

C_p – удельная теплоемкость расплава металла, Дж/(кг·К);

m_k – масса одиночной горячей частицы, кг;

τ – время полета одиночной горячей частицы, с.

Количество тепла, отдаваемое каплей металла горючей среде, определяется по следующей формуле:

$$W = V_k \rho_k C_k (T_{\text{кон}} - T_{\text{св}}) \cdot K \quad (7)$$

где V_k – объем одиночной горячей частицы, м³;

ρ_k – плотность одиночной горячей частицы, кг/м³;

C_k – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К);

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

$T_{\text{св}}$ – температура самовоспламенения горючей среды, К;

K – коэффициент, равный 1.

Результаты расчетов конечной температуры одиночной горячей частицы, а также отдаваемого одиночной горячей частицей количества тепла представлены в таблице 2.

Исходя из результатов расчёта (табл. 2), следует, что значение конечной температуры одиночной горячей частицы и количество тепла, отдаваемое ею горючему материалу, пропорционально диаметру частицы. При этом в условиях проведения эксперимента высота падения частицы металла не оказывает существенного влияния на конечную температуру и количество тепла, отдаваемого частицей, и, как следствие, на исход опыта – факт и время зажигания горючего материала. Полученные результаты не противоречат теоретическим моделям зажигания горючей среды от одиночной горячей частицы [6, 7].

Таблица 2
 Результаты расчетов
Table 2
 Calculation results

Диаметр одиночной горячей частицы d , м Diameter of a single hot particle d , m	Конечная температура одиночной горячей частицы $T_{\text{кон}}$, К Final temperature of a single hot particle T_{fin} , K		Количество тепла, отдаваемое одиночной горячей частицей W , Дж The amount of heat given off by a single hot particle W , J	
	Высота падения частицы Particle drop height			
	0,04 м 0,04 m	1 м 1 m	0,04 м 0,04 m	1 м 1 m
0,0015	2097,88	2076,39	10,79	10,66
0,0020	2098,62	2084,64	25,61	25,39
0,0031	2099,29	2092,02	95,39	94,98
0,0034	2099,38	2093,05	125,86	125,39
0,0043	2099,56	2095,11	254,63	253,96
0,0048	2099,63	2095,86	354,19	353,41
0,0057	2099,71	2096,80	593,16	592,13
0,0068	2099,78	2097,54	1007,14	1005,80
0,0079	2099,82	2098,04	1579,26	1577,59
0,0088	2099,85	2098,33	2182,87	2180,91
0,0100	2099,88	2098,62	3203,22	3200,84

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные данные по определению времени зажигания горючей среды от одиночной горячей частицы металла, образующейся при электродуговой сварке, позволили выявить зависимость между диаметром частицы, высотой ее падения и временем зажигания исследуемого горючего материала на основе ПВХ. В результате исследования с использованием разработанной авторами лабораторной установки

установлено, что на конечную температуру и количество тепла частицы металла (в условиях испытаний) в большей степени оказывает влияние диаметр частицы, а не высота ее падения. Данная методика может быть использована для определения возможности воспламенения различных горючих веществ от искр электродуговой сварки, в т. ч. строительных и отделочных материалов, горючих жидкостей, а также для обоснования безопасных расстояний при выполнении огневых работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гончаренко В. С., Четчина Т. А., Сибирско В. И. Пожары и пожарная безопасность в 2021 г.: стат. сб. Балашиха, 2022. 114 с.
2. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации».
3. Мухаметьянова А. Р. Требования пожарной безопасности при выполнении сварочных работ // Мавлютовские чтения: мат. XV Всероссийской молодежной научной конференции в 7 т., Уфа, 26–28 ноября 2021 г. – Уфа, 2021. – Т. 5. – С. 184–186. – URL: <https://www.elibrary.ru/vafbmf> (дата обращения: 19.05.2023).

4. Рот Т. В. Пожарная безопасность при проведении сварочных работ в строительстве // Техносферная безопасность: мат. III Межвузовской научно-технической конференции, Омск, 28 апреля 2016 г. – Омск, 2016. – С. 246–249. – URL: <https://www.elibrary.ru/wovyan> (дата обращения: 19.05.2023).

5. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

6. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Воспламенение пожароопасной жидкости одиночной «горячей» частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16, № 6. С. 13–20. URL: <https://www.elibrary.ru/knvkuf> (дата обращения: 19.05.2023).

7. Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle / D. O. Glushkov, A. G. Kosintsev, G. V. Kuznetsov, V. S. Vysokomorny // Fuel. – 2021. – Vol. 291. – P. 120172. – DOI 10.1016/j.fuel.2021.120172.

REFERENCES

1. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I. Fires and fire safety in 2021: statist. Sat. Balashikha: P 46 FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2022; 114. (rus).

2. Decree of the Government of the Russian Federation №1479 of 09/16/2020. On approval of the Rules for the fire regime in the Russian Federation. (rus).

3. Mukhametyanova, A. R. Fire safety requirements when performing welding work. Mavlyutov readings: materials of the XV All-Russian Youth Scientific Conference: in 7 volumes, Ufa, November 26–28, 2021 / Ufa State Aviation Technical University. Volume 5. Ufa, Ufa State Aviation Technical University, 2021; 184–186. <https://www.elibrary.ru/vafbfm>. (rus).

4. Root T. V. Fire safety during welding in construction. Technospheric safety: materials of the third inter-university scientific and technical conference, Omsk, April 28, 2016. Omsk, Omsk State Technical University, 2016; 246–249. <https://www.elibrary.ru/wovyan>. (rus).

5. GOST 12.1.004-91. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements. (rus).

6. Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Ignition of a fire hazardous liquid by a single "hot" particle. Fire and explosion safety, 2007; 16 (6): 13–20. – <https://www.elibrary.ru/knvkuf>. (rus).

7. Glushkov D. O., Kosintsev A. G., Kuznetsov G. V., Vysokomorny V. S. Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle. Fuel, 2021; 291: 120172. – DOI 10.1016/j.fuel.2021.120172. (rus).

Информация об авторах

Трояк Евгений Юрьевич, кандидат педагогических наук, заместитель начальника кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1; РИНЦ ID: 822160; Scopus Author ID: 57218577533; ORCID: 0000-0002-9446-9226
e-mail: trev191186@gmail.com

Чернушевич Елена Валерьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС

Information about the authors

Evgeniy Yu. Troyak, candidate of pedagogical sciences, Deputy Head of the Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Severnaya St., 1, Zheleznogorsk, 662972 Russian Federation; ID RINC: 822160; Scopus Author ID: 57218577533; ORCID: 0000-0002-9446-9226;
e-mail: trev191186@gmail.com

Elena V. Chernushevich, candidate of technical sciences, Senior Lecturer of the Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Severnaya St., 1, Zheleznogorsk,

МЧС России, Россия, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1; РИНЦ ID: 1002014; ORCID: 0000-0001-7502-1082;

e-mail: e.v.chernushevich@gmail.com

Пожаркова Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1; РИНЦ ID: 501137; Scopus Author ID: 55990913900; ResearcherID: A-7628-2015; ORCID: 0000-0003-1153-350X; e-mail: pozharikova@mail.ru

662972 Russian Federation; ID RINC: 1002014; ORCID: 0000-0001-7502-1082; e-mail: e.v.chernushevich@gmail.com

Irina N. Pozharkova, candidate of technical sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Severnaya St., 1, Zheleznogorsk, 662972 Russian Federation; ID RINC: 501137; Scopus Author ID: 55990913900; ResearcherID: A-7628-2015; ORCID: 0000-0003-1153-350X; e-mail: pozharikova@mail.ru