

Научная статья

УДК 544.45; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-21-29

ОЦЕНКА ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

✉ Гапеев Артем Александрович;

Гудков Максим Андреевич;

Сулименко Владимир Анатольевич;

Козлова Ирина Викторовна.

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

✉ kratos_1987@mail.ru

Аннотация. В средствах массовой информации часто встречаются заметки и статьи о многочисленных возгораниях, пожарах и, как следствие, случаях гибели и травматизма (особенно среди детей), вызванных нарушениями правил пожарной безопасности при обращении с пиротехническими изделиями. Риски поражения и гибели людей при обращении с пиротехническими изделиями весьма высоки, многие вопросы, связанные с обеспечением пожаровзрывобезопасности при транспортировании, хранении, применении данных изделий, не решены. В статье рассматриваются существующие методы оценки пожаровзрывоопасных свойств пиротехнических изделий. В ходе проверочного эксперимента установлено, что эти подходы не позволяют провести корректную оценку безопасной зоны по действию ударной волны для пиротехнических изделий малой мощности (до 0,05 кг в тротиловом эквиваленте). Предлагается за счет полученных экспериментальных данных внести поправочный коэффициент для зарядов малой мощности.

Ключевые слова: пиротехнические изделия, тротильный эквивалент, ударная волна, безопасное расстояние

Для цитирования: Оценка пожаровзрывоопасных свойств пиротехнических изделий малой мощности / А.А. Гапеев [и др.] // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 21–29. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-21-29.

Scientific article

ASSESSMENT OF FIRE AND EXPLOSIVE PROPERTIES OF LOW-POWER PYROTECHNIC PRODUCTS

✉ Gapeev Artem A.;

Gudkov Maksim A.;

Sulimenko Vladimir A.;

Kozlova Irina V.

Academy of State fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

✉ kratos_1987@mail.ru

Abstract. There are often notes and articles in the media about numerous fires, fires, and, as a result, deaths and injuries (especially among children), caused by violations of fire safety regulations when handling pyrotechnic products. The risks of injury and death of people during the handling of pyrotechnic products very high, many issues related to ensuring fire and explosion safety during transportation, storage, and use of pyrotechnic products have not been resolved. The article discusses the existing methods for assessing the fire and explosive properties of pyrotechnic products. During the verification experiment, it was found that the existing approaches

do not allow for a correct assessment of the safe zone by the impact of a shock wave for low-power pyrotechnic devices (up to 0,05 kg in TNT equivalent). It is proposed, based on the experimental data obtained, to introduce a correction factor for low-power charges.

Keywords: pyrotechnic products, TNT equivalent, shock wave, safe distance

For citation: Assessment of fire and explosive properties of low-power pyrotechnic products / A.A. Gapeev [et al.] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 21–29. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-21-29.

Введение

Ежегодно в период новогодних праздников МЧС России активно информирует население через средства массовой информации о росте числа пожаров. Согласно заявлению директора департамента надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России в обычные дни на территории Российской Федерации пожары происходят каждые 10 мин, в новогодние праздники – каждые 2 мин. Основной причиной возникновения пожаров является неисправность электрооборудования, а также нарушения в использовании печей и каминов. Использование петард, по данным МЧС России, не так часто приводит к возникновению пожаров, а в основном вызывает травмы. При этом количество происшествий по вине нетрезвых граждан увеличивается в 2,5 раза [1]. Основная группа риска – это несовершеннолетние лица.

Согласно источнику [2] пиротехническое изделие (ПИ) представляет собой устройство, предназначенное для достижения определенного эффекта посредством горения (или взрыва) пиротехнического состава. Пиротехнический состав определяется как смесь компонентов, способная к самостоятельному горению или горению с участием окружающей среды. В процессе горения он производит газообразные и конденсированные продукты, а также выделяет тепловую, световую и механическую энергию, создавая различные оптические, электрические, барические и другие специальные эффекты.

В зависимости от назначения и конструктивных особенностей ПИ их использование может сопровождаться возникновением одного или нескольких опасных факторов (табл. 1), которые характеризуются определенными уровнями опасности.

Таблица 1

Опасные факторы и опасные зоны ПИ

Опасный фактор	Определяющий параметр, единица величины	Уровень опасности (размер зоны)
Пламя или высокотемпературная струя продуктов сгорания	Размеры пламени, м	Все пламя
Разбрасываемые пожароопасные элементы (ПЭ) конструкции (горящие таблетки, раскаленные шлаки, искры и пр.)	Радиус разлета, м	Вся площадь, ограниченная радиусом разлета
Тепловое (инфракрасное) излучение	Поверхностная плотность, Вт/м	540
Ударная волна при взрыве	Давление, Па	35·10
Разлетающиеся поражающие осколки	Радиус разлета, м	Вся площадь, ограниченная радиусом разлета
Движущиеся за счет начальной скорости выброса или под действием реактивной силы ПИ или ПЭ	Кинетическая энергия, Дж	20
Акустическое излучение	Уровень звука, дБА:	
	– импульсный	140
	– длительный	120

Опасный фактор	Определяющий параметр, единица величины	Уровень опасности (размер зоны)
Оптическое излучение	Плотность потока, Дж/м	1·10
Продукты сгорания или диспергирования в аэрозольном состоянии	Определяют по нормативной и технической документации на ПИ	
Специфическое воздействие продуктов сгорания на человека и окружающую среду		

Методы оценки пожаровзрывоопасности ПИ включают следующие подходы:

1. Метод определения размеров пламени. Используется для измерения размеров пламени и/или радиуса разлета горящих элементов при срабатывании малогабаритных ПИ. Суть метода заключается в видеозаписи пламени работающего изделия и последующем сравнении его размеров с эталонным изображением на экране монитора или телевизора. Погрешность измерений не превышает 10 % [2].

2. Метод измерения размеров пламени и температуры поверхностей ПИ [2]. В рамках этого метода проводятся измерения и расчеты, позволяющие определить распределение яркостных температур на поверхности излучающего объекта, который фиксируется инфракрасной камерой. Объектами исследования являются тепловые зоны, возникающие при горении пиротехнического состава: пламя и корпус ПИ. Метод основывается на зависимости интенсивности теплового излучения объекта от температуры его поверхности. Диапазон измеряемых яркостных температур составляет от 20 °С до 2 400 °С.

3. Метод определения размера опасной зоны для ПИ. Позволяет оценить размеры опасной зоны для ПИ, предназначенных для использования в помещениях или в руках, если их единственными опасными факторами являются пламя и разлетающиеся искры. Метод заключается в органолептической фиксации воспламенения индикаторного вещества (например, ваты), размещенного в ячейках на координатной площади. Погрешность метода не превышает 20 % [2].

4. Метод костровой пробы. Основан на оценке способности ПИ (в упаковке или без нее) воспламениться или взрываться под воздействием открытого огня.

Основываясь на указанных методах, производители указывают безопасные расстояния в инструкции к использованию, но зачастую они не поддаются логике: для одних – могут быть занижены, для других, наоборот, завышены. Так, на одном из рассматриваемых образцов малой мощности безопасное расстояние было указано равным 30 м. Подобные характеристики «усыпляют» бдительность потребителей и приводят к пренебрежению инструкцией. Таким образом, определение зависимости безопасного расстояния от мощности взрыва для зарядов малой мощности не только вызывает научный интерес, но и имеет практическую ценность.

Предварительное сравнение экспериментальных и теоретических результатов для ПИ малой мощности (до 0,05 кг в тротиловом эквиваленте) показало, что традиционные подходы к определению безопасного расстояния от эпицентра взрыва неэффективны.

Методика проведения эксперимента и расчетов

Проводится сравнение значений, рассчитанных теоретически для определения безопасного расстояния от взрыва, с данными, полученными экспериментальным путем.

Для расчета безопасного расстояния, учитывающего воздействие воздушной ударной волны, применяется формула (1):

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{без}}$ – безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны взрыва, м;
 $M_{\text{ТНТ}}$ – масса условно взорвавшегося тротила.

Для определения тротилового эквивалента взрыва требуется информация о низшей теплоте сгорания вещества, участвующего во взрыве, а также о его массе:

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}} \cdot m \cdot \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{н}}$ ($\approx Q_{\text{взр}}$) – теплота сгорания вещества, кДж/кг; $Q_{\text{ТНТ}}$ – теплота взрыва тротила ($4,187 \cdot 10^3$ кДж/кг); m – масса взорвавшегося горючего или взрывчатого вещества, кг; γ – доля потенциальной энергии взрывчатой системы, перешедшая в механическую энергию взрыва: при взрыве пожароопасных парогазовых смесей в ограниченном объеме (помещении, оборудовании) $\gamma = 1$; при взрыве паров и газов в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси) $\gamma = 0,4$ [3].

В качестве критерия безопасности от действия ударной волны выбрана целостность барабанной перепонки человека. Известно, что ее целостность нарушается при повышении давления до 80–100 мм рт. ст. или 1,36 м водяного столба.

При испытании на полигоне для имитации человеческого уха будет использоваться пластиковая труба, заклеенная с двух сторон материалом, рассчитанная на резкое повышение давления на 1,36 м водяного столба (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид заменителей барабанной перепонки

Выбор материала, имитирующего барабанную перепонку человека, проводился с помощью компрессорной установки (рис. 2). К питающему шлангу закреплялась конусообразная полая внутри емкость, с другой стороны которой фиксировался материал. Критерием выбора подходящего материала являлась способность выдерживать давление, эквивалентное 1,36 м водяного столба. По результату проведенного исследования была выбрана фольга, которая разрывалась при резком повышении давления на 1,36 м водяного столба в 50 % случаев [4–6].

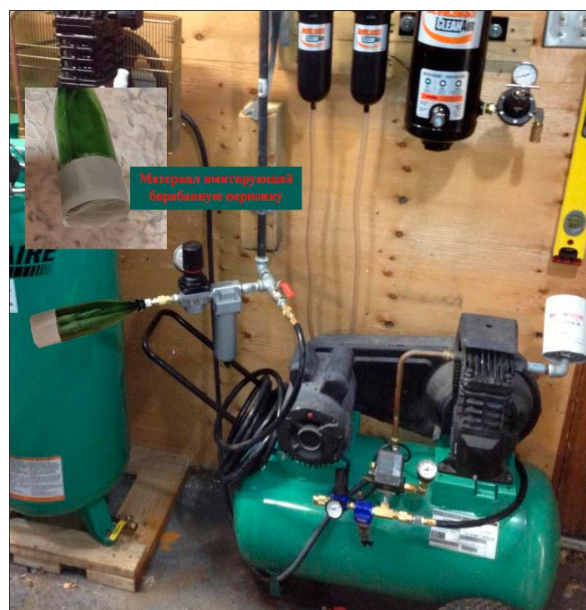


Рис. 2. Проверка материала, имитирующего барабанную перепонку

Для экспериментальной оценки численной величины безопасного расстояния от действия ударной волны полученные имитаторы барабанной перепонки укладывались по спирали на различном удалении от взрыва согласно рис. 3 [7].

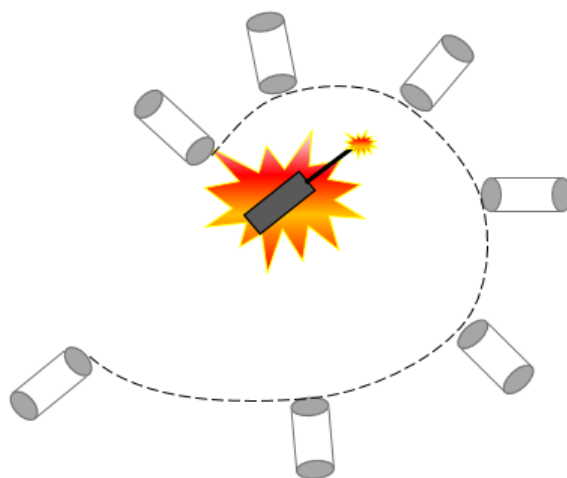


Рис. 3. Схема расположения имитаторов

Для исследования были отобраны следующие петарды, представленные на российском рынке (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика петард для эксперимента

Название	«Корсар 1»	«Корсар 3»	«Корсар 5»	«Черная мамба»
Вес петарды	0,569	1,715	10,608	110
Вес флеш-наполнителя	0,223	0,498	0,321	55

Состав флеш-наполнителя (в частях):

- нитрат бария: 68;
- алюминий пиродарк: 23 (содержание углерода в диапазоне от 12 % до 22 %, тонкоизмельченный алюминий со средним диаметром частиц от 2 до 8 мкм);
- сера: 9.

Теплота сгорания флеш-состава – 7,8 кДж/г.

Результаты эксперимента представлены в табл. 3–6.

Таблица 3

Результаты эксперимента с «Корсар 1»

Имитатор	1	2	3	4
Расстояние, см	2	5	11	15
Результат	+	+	–	–

Таблица 4

Результаты эксперимента с «Корсар 3»

Имитатор	1	2	3	4
Расстояние, см	5	11	13	15
Результат	+	+	+	–

Таблица 5

Результаты эксперимента с «Корсар 5»

Имитатор	1	2	3	4	5
Расстояние, см	5	11	15	17	25
Результат	+	+	+	–	–

Таблица 5

Результаты эксперимента с «Черная мамба»

Имитатор	1	2	3	4	5	6	7
Расстояние, см	100	150	170	200	220	250	300
Результат	+	+	+	+	–	–	–

Результаты и их обсуждение

В табл. 6 представлены результаты расчета безопасного расстояния по действию воздушной ударной волны и тротилового эквивалента.

Таблица 6

Результаты расчета безопасного расстояния по действию воздушной ударной волны и тротилового эквивалента по формулам (1), (2)

ПИ	$M_{ТНТ}$, кг	$R_{без}$, см
«Корсар 1»	166×10^{-6}	84
«Корсар 3»	371×10^{-6}	110
«Корсар 5»	239×10^{-6}	96
«Черная мамба»	$40\,920 \times 10^{-6}$	522

Для удобства восприятия на рис. 4 представлена зависимость безопасного расстояния от массы флеш-наполнителя при теоретическом расчете (1) и эксперименте (2).

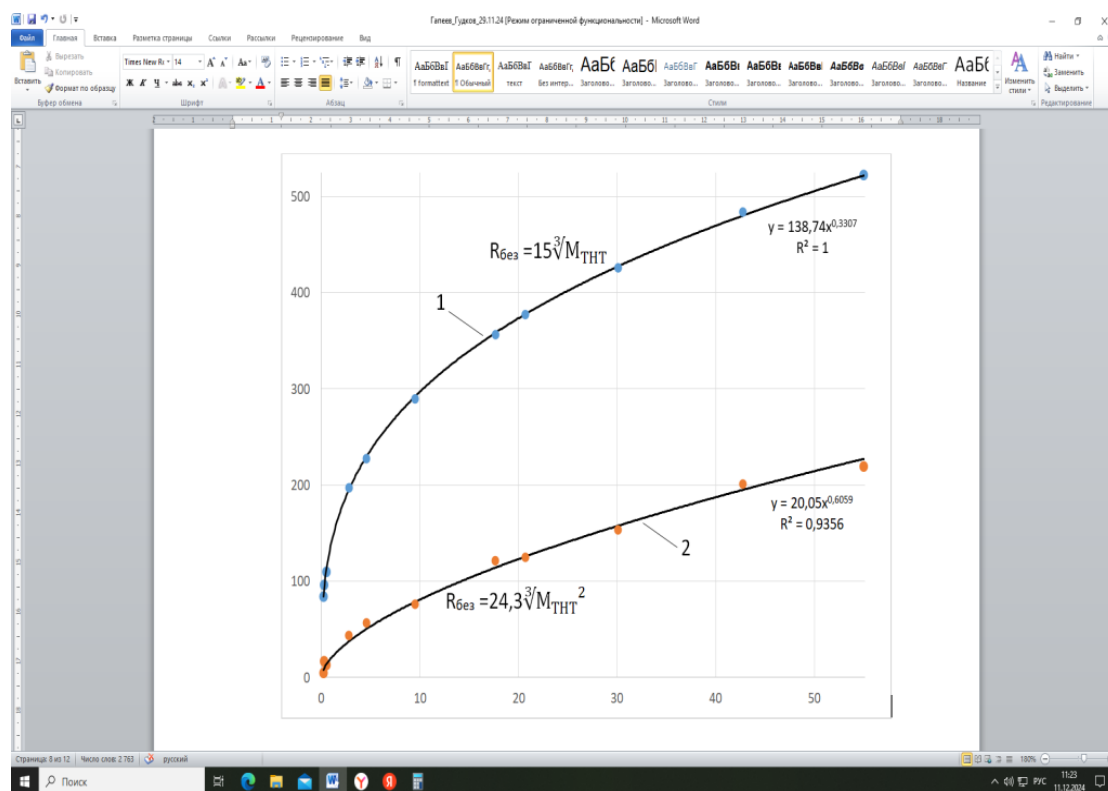


Рис. 4. Зависимость безопасного расстояния от массы флеш-наполнителя при теоретическом расчете (1) и эксперименте (2)

Используя стандартный пакет программы обработки данных, определена функция для описания зависимости безопасного расстояния от массы флеш-наполнителя [8]. Изначально предполагалось ввести численные коэффициенты для корректировки формулы, однако выяснилось, что зависимость стала квадратной при сохранении кубического корня, то есть степень решено было изменить на 2/3.

Заключение

В результате исследования получена зависимость $R_{\text{без}} = 24,3 \sqrt[3]{M_{\text{THT}}}$ для расчета безопасных расстояний при взрыве зарядов малой мощности (ПИ).

Данная зависимость может применяться в качестве экспресс-оценки безопасного расстояния при взрыве зарядов малой мощности (ПИ).

Таким образом, на основании проведенных экспериментов, установлено, что уравнение $R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{THT}}}$, традиционно используемое для определения зависимости безопасного расстояния от мощности взрыва, не подходит для зарядов малой мощности (ПИ мощностью взрыва в тротильном эквиваленте до 0,05 кг). Для теоретической оценки [9–10] безопасного расстояния при взрыве зарядов малой мощности рекомендуется использовать зависимость следующего вида: $R_{\text{без}} = 24,3 \sqrt[3]{M_{\text{THT}}}$. Меры предосторожности при использовании ПИ рекомендуется разрабатывать после проведения натурных испытаний с учетом коэффициентов запаса.

Список источников

1. МЧС предупредило о росте числа пожаров в новогодние праздники. URL: <https://tass.ru/obschestvo/19660819?ysclid=m3wrk1e8x6478359055> (дата обращения: 18.01.2025).
2. ГОСТ 33732–2016. Изделия пиротехнические. Общие требования безопасности: Межгосударственный стандарт. Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. 22 с.
3. Андросов А.С., Салеев Е.П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва»: учеб. пособие. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2008. 80 с.
4. Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. Теория горения и взрыва: учеб. пособие. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2007.
5. Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции: обзорно-аналит. материал / Г.Н. Кириллов [и др.]. М.: ВНИИПО и ДНА МЧС России, 2010. С. 79.
6. Харламенков А.С. Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 12. С. 59–62.
7. Вогман Л.П., Сотников О.В. Нормирование пожарной опасности фейерверочных пиротехнических изделий бытового назначения // Пожаровзрывобезопасность. 1998. Т. 7. № 2. С. 3–11.
8. NFPA 1124. Code for the Manufacture, Transportation, Storage, and Retail Sales of Fireworks and Pyrotechnic Articles. Edition 2013. URL: <http://www.nfpa.org/aboutthecodes/?mode=code&code=1124> (дата обращения: 12.12.2024).
9. NFPA 1126. Standard for the Use of Pyrotechnics before a Proximate Audience. Edition 2011. URL: <http://www.techstreet.com/products/1724006> (дата обращения: 12.12.2024).
10. G. 1.2.1976–87. Sprengstoffe. Pirotechnische Gegenstände / Feuerwerk.

References

1. MCHS predupredilo o roste chisla pozharov v novogodnie prazdniki. URL: <https://tass.ru/obschestvo/19660819?ysclid=m3wrk1e8x6478359055> (data obrashcheniya: 18.01.2025).
2. GOST 33732–2016. Izdeliya pirotekhnicheskie. Obshchie trebovaniya bezopasnosti: Mezhgosudarstvennyj standart. Minsk: Evrazijskij sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, 2016. 22 s.
3. Androsov A.S., Saleev E.P. Primery i zadachi po kursu «Teoriya goreniya i vzryva»: ucheb. posobie. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2008. 80 s.
4. Androsov A.S., Begishev I.R., Saleev E.P. Teoriya goreniya i vzryva: ucheb. posobie. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2007.
5. Trebovaniya pozharnej bezopasnosti pri obrashchenii pirotekhnicheskoy produkcii: obzorno-analit. material / G.N. Kirillov [i dr.]. M.: VNIIPO i DNA MCHS Rossii, 2010. S. 79.
6. Harlamenkov A.S. Trebovaniya pozharnej bezopasnosti k pirotekhnicheskim izdeliyam // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. № 12. S. 59–62.
7. Vogman L.P., Sotnikov O.V. Normirovanie pozharnej opasnosti feyerverochnyh pirotekhnicheskikh izdelij bytovogo naznacheniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 1998. T. 7. № 2. S. 3–11.
8. NFPA 1124. Code for the Manufacture, Transportation, Storage, and Retail Sales of Fireworks and Pyrotechnic Articles. Edition 2013. URL: <http://www.nfpa.org/aboutthecodes/?mode=code&code=1124> (data obrashcheniya: 12.12.2024).
9. NFPA 1126. Standard for the Use of Pyrotechnics before a Proximate Audience. Edition 2011. URL: <http://www.techstreet.com/products/1724006> (data obrashcheniya: 12.12.2024).
10. G. 1.2.1976–87. Sprengstoffe. Pirotechnische Gegenstände / Feuerwerk.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 24.10.2024; одобрена после рецензирования: 27.12.2024;
принята к публикации: 12.02.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 24.10.2024; approved after review: 27.12.2024;
accepted for publication: 12.02.2025

Информация об авторах:

Гапеев Артем Александрович, заместитель начальника кафедры процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности) Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: kratos_1987@mail.ru, SPIN-код: 2697-7130

Гудков Максим Андреевич, доцент кафедры процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности) Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: M.Gudkov@academygps.ru, SPIN-код: 5971-6544

Сулименко Владимир Анатольевич, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности) Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: V.Sulimenko@academygps.ru, SPIN-код: 2350-8022

Козлова Ирина Викторовна, доцент кафедры процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности) Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: lisenoklll@mail.ru, SPIN-код: 6661-7728

Information about the authors:

Gapeev Artem A., deputy head of the department of combustion processes and environmental safety (as part of the educational and scientific complex of combustion processes and environmental safety) Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: kratos_1987@mail.ru, SPIN: 2697-7130

Gudkov Maxim A., associate professor of the department of combustion processes and environmental safety (as part of the educational and scientific complex of combustion processes and environmental safety) of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: M.Gudkov@academygps.ru, SPIN: 5971-6544

Sulimenko Vladimir A., professor of the department of combustion processes and environmental safety (as part of the educational and scientific complex of combustion processes and environmental safety) of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: V.Sulimenko@academygps.ru, SPIN: 2350-8022

Kozlova Irina V., associate professor of the department of combustion processes and environmental safety (as part of the educational and scientific complex of combustion processes and environmental safety) of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: lisenoklll@mail.ru, SPIN: 6661-7728