

УДК 614.841.41

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

**Терентьев Дмитрий Иванович, Тикина Ирина Владимировна,
Курочкин Александр Рудольфович, Сатюков Роман Сергеевич**

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

На текущем этапе своего развития литий-ионные аккумуляторы демонстрируют впечатляющие эксплуатационные характеристики. Продолжается их дальнейшее распространение в быту, промышленности, транспорте и других сферах деятельности, появляются новые области их применения. При этом за весь период, прошедший с их появления, по причине их самовоспламенения ежегодно фиксируется множество пожаров, в том числе и приводящих к гибели людей. Не смотря на усилия, прилагаемые конструкторами и разработчиками по снижению пожарной опасности, данный тип аккумуляторов продолжает оставаться причиной многих возгораний и, соответственно, привлекать внимание специалистов в области обеспечения пожарной безопасности. Наиболее проблемными аспектами горения литий-ионных аккумуляторов могут считаться высокая скорость распространения пламени, особенно при отсутствии доступных средств тушения, а также высокая динамика опасных факторов пожара, например токсичности продуктов горения и термического разложения.

Ключевые слова: пожарная безопасность, литий-ионные аккумуляторы, опасность взрыва, свойства горючей нагрузки, самовоспламенение, оценка пожарных рисков

PRELIMINARY INVESTIGATION OF THE FIRE-HAZARDOUS PROPERTIES OF LITHIUM-ION BATTERIES

Dmitriy I. Terentiev, Irina V. Tikina, Aleksandr R. Kurochkin, Roman S. Satukov

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Modern lithium-ion batteries show good operating characteristics. This explains their widespread use in many industries and fields of activity. Over the entire period of operation, due to the spontaneous ignition of lithium-ion batteries, a large number of fires are recorded annually, leading to the death of people. Despite the efforts of designers and developers aimed at reducing fire danger, these batteries continue to be the cause of numerous fires and, accordingly, attract the attention of specialists in the

field of fire safety. The most problematic aspects of the combustion of lithium-ion batteries can be considered the high rate of flame propagation in the absence of available extinguishing agents, as well as the high dynamics of fire hazards, such as the toxicity of combustion products and thermal decomposition.

Keywords: fire safety, lithium-ion batteries, explosion hazard, properties of combustible content, self-ignition, fire risk assessment.

Введение

В настоящий момент во всем мире продолжается активное увеличение масштаба использования литий-ионных аккумуляторов в различных сферах деятельности. Наблюдаемый рост популярности во многом объясняется их продвинутой характеристиками в сравнении с другими типами аккумуляторов. Литий-ионные батареи в настоящее время используются в компьютерной технике, гаджетах, источниках света, бытовых и строительных инструментах, транспортных средствах (в том числе средствах индивидуальной мобильности), беспилотных летательных аппаратах.

С самого момента появления этого вида аккумуляторов ежегодно фиксируются многочисленные случаи самопроизвольных возгораний, достаточно часто приводившие к тяжелым последствиям. Возгорания происходили не только в процессе зарядки или эксплуатации литий-ионных батарей, но в более спокойных условиях: при их обычном хранении или транспортировке. Например, в 2010 году в аэропорту Дубая потерпел крушение Боинг 747 с грузом литий-ионных аккумуляторов. Причиной катастрофы был назван пожар, самопроизвольно возникший в грузовом отсеке [1]. В феврале 2022 года из-за пожара в трюме с электромобилями загорелось грузовое судно Felicity Ace. За несколько дней дрейфа в океане, после безуспешных попыток пожаротушения, судно было покинуто командой, в значительной степени выгорело и затем затонуло [2].

В обоих описанных выше случаях причиной происшествий было признано самовозгорание литий-ионных аккумуляторов.

На фоне катастроф столь внушительного масштаба самопроизвольные возгорания или взрывы мелких гаджетов, например смартфонов, бытовых приборов или средств индивидуальной мобильности, возможно, выглядят не столь угрожающе, если бы не тот факт, что количество жертв на этих пожарах исчисляется десятками человек.

Высокая опасность данного вида горючей нагрузки объясняется несколькими обстоятельствами:

— пожары с горением литий-ионных аккумуляторов характеризуются высокой динамикой опасных факторов пожара: повышенной температуры газовой среды, снижения видимости, токсичности продуктов горения;

— из-за интенсивного выделения горючих газов и искр, сопровождающего возгорание некоторых типов литий-ионных аккумуляторов, может происходить зажигание горючих веществ и материалов не только в непосредственной близости к очагу пожара, но и находящихся на удалении от него, что способствует быстрому увеличению площади горения;

— выделяющиеся из неисправного аккумулятора горючие газы (в фазе беспламенного горения) могут создавать взрывоопасные смеси с кислородом воздуха. Мощность взрыва скопившихся газов из литий-ионной батареи, имеющей массу, обычную для современных средств индивидуальной мобильности, может до-

стигать нескольких сотен граммов в тротиловом эквиваленте и представлять угрозу несущим и ограждающим конструкциям. Так, в результате взрыва электросамоката, прогремевшего 16 августа 2021 года в квартире одного из жилых домов в городе Пермь, была полностью разрушена межкомнатная перегородка [3];

— тушение литий-ионных аккумуляторов обычными доступными средствами (например, водой или углекислотой) неэффективно и даже опасно.

Все выше сказанное позволяет утверждать, что к текущему моменту на многих объектах защиты (например, социально-значимые и другие объекты с массовым пребыванием людей) присутствует новая специфическая горючая нагрузка, наличие которой нельзя не принимать во внимание, в том числе при определении расчетных величин пожарного риска.

Вместе с тем отсутствие достаточных данных о характеристиках обсуждаемой горючей нагрузки исключает возможность оценить степень пожарной опасности объекта путем проведения расчета рисков и, следовательно, объективно проверить выполнение условий обеспечения пожарной безопасности при выполнении оценки пожарных рисков в зданиях и сооружениях. Для обеспечения возможности таких расчетов требуется дополнительная информация, в частности, о свойствах этой горючей нагрузки, величинах теплоты сгорания, коэффициентах дымовыделения, коэффициентах выделения токсичных продуктов горения, удельной скорости выгорания, скорости распространения пламени по элементам аккумуляторной батареи. В данной работе рассмотрены некоторые аспекты определения пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов.

Исследование состава кобальт-содержащих литий-ионных аккумуляторов и оценка величины теплоты сгорания

Разнообразие типов литий-ионных аккумуляторов, применяемых в настоящее время, отражает, помимо прочего, усилия разработчиков не только по повышению эффективности их работы, но и по снижению уровня пожарной опасности. Принято считать, что степень пожарной опасности типов литий-ионных аккумуляторов существенно различается и по большей части определяется видом материалов активных электродных масс. В открытых источниках обычно указывается, что наибольшую опасность представляют литий-кобальтовые, а наименьшую — литий-железофосфатные и литий-титанатные [4]. Однако обеспечить абсолютный уровень защиты от самопроизвольного возгорания (без использования дополнительных электронных систем контроля и управления работой батареи) в настоящий момент не способен, по видимому, ни один из них.

Конструктивно литий-ионные аккумуляторы, например формата 18650, представляют собой плотно упакованный сверток из двух лент электродов (алюминиевого и медного), помещенный в стальной тонкостенный стакан, закрытый предохранительным клапаном для сброса избыточного давления. На поверхности обоих электродов нанесены электродные массы, пропитанные электролитом. В качестве сепаратора, разделяющего электроды, используется тонкая полипропиленовая пленка.

Среди применяемых типов литий-ионных аккумуляторов целесообразно отметить три разновидности, активные электродные массы которых содержат соединения кобальта: литий-кобальтовые (маркировка ICR), литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (маркировка NMC) и

литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (маркировка NCA).

Samsung ICR 3000, содержащего соединения кобальта, показан в табл. 1.

Массовый состав литий-ионного аккумулятора на примере элемента 18650

Таблица 1

Массовый состав литий-ионного аккумулятора 18650 Samsung ICR 3000

Table 1

Mass composition of the lithium-ion battery 18650 Samsung ICR 3000

№ п/п	Наименование компонента Name of the component	Масса компонента, г Weight of the component, g	Характеристика горючести материала Characteristics of the combustibility of the material	Справочная величина теплоты сгорания [5], МДж/кг Reference value of the heat of combustion, MJ/kg
1	Стальные элементы корпуса + намоточный стержень Steel body elements + winding rod	7,5	Негорючий Non-flammable	-
2	Пластиковые элементы упаковки + части клапана Plastic packaging elements + valve parts	0,6	Горючий Flammable	20
3	Медный электрод Copper electrode	5	Негорючий Non-flammable	-
4	Электродная масса на меди (углерод) Anode paste on copper (carbon)	8	Горючий Flammable	32,7
5	Алюминиевый электрод Aluminum electrode	2	Горючий Flammable	31
6	Электродная масса на алюминии (LiCoO ₂) Anode paste on aluminum (LiCoO ₂)	15	Условно негорючий (выделяет кислород и высокотоксичные продукты разложения при нагреве) Conditionally non flammable (releases oxygen and highly toxic decomposition products when heated)	-
7	Полипропиленовый сепаратор Polypropylene separator	1,5	Горючий Flammable	45,7
8	Электролит (этиленкарбонат + диметилкарбонат + винилкарбонат?) Electrolyte (ethylene carbonate + dimethyl	6	Горючий, ЛВЖ Flammable	13,3

	carbonate + vinyl carbonate?)			
9	Литий Lithium	~ 1	Горючий Flammable	43,3
10	Итого Total	~ 46,6		29

Предполагаемая величина теплоты сгорания данной горючей нагрузки, согласно выполненной оценке по данным табл. 1, по видимому, составляет около 29 МДж/кг.

Масса восстановленного лития при полном заряде литий-ионного элемента составляет примерно 2 % от общей массы. Из этого следует, что литий-ионные аккумуляторы представляют собой комплексную горючую нагрузку, характеристики горения которой лишь частично соответствуют специфике горения щелочных металлов. Использование легковоспламеняемых жидкостей в качестве электролита приводит к тому, что скорость выгорания материалов внутри корпуса может быть ограничена только скоростью поступления кислорода в зону горения (в случае отсутствия пробоя в корпусе – скоростью выделения кислорода из электродной массы). Наличие защитного стального корпуса у элементов, входящих в состав сборной аккумуляторной батареи, определенно снижает возможности распространения пламени, хоть и не исключает теплопередачу на соседние элементы батареи, что должно приводить к их перегреву.

Термодинамическое моделирование термического разложения активной электродной массы литий-кобальтового аккумулятора. Предварительные оценки токсичности продуктов пиролиза и горения

Для оценки взаимодействия компонентов литий-кобальтового аккумулятора при нагреве было выполнено термодинамическое моделирование предельного равновесного состояния в интервале температур 298–598 К при атмосферном давлении. Использовался следующий исходный массовый состав системы: LiCoO_2

– 50 %, С – 30 %, $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ – 10 %, Li – 5 %, Ar – 5 %.

Расчет предельного состава высокотемпературного равновесного состояния указанной системы был выполнен в программном комплексе Terra [6]. Данная программа при решении задачи производит численный поиск состояния, при котором достигается максимальное значение величины энтропии системы для выбранного исходного состава и интересующих значений двух дополнительных параметров (в данном случае – температуры и давления).

Предварительно в базу данных свойств индивидуальных веществ программного комплекса была добавлена информация о наборе термодинамических свойств конденсированных кобальтата лития LiCoO_2 и октакарбонила дикообальта $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ из базы данных HSC 9. Допущения о возможном образовании конденсированных ассоциированных растворов не использовались.

Согласно результатам моделирования, нагрев LiCoO_2 совместно с другими компонентами аккумулятора в рассмотренном предельном случае (т. е. без учета каких-либо кинетических ограничений при реализации взаимодействий) приводит к его полному разложению на ряд компонентов. Треть от всего количества кобальта восстанавливается до его металлической формы, а остальная часть присутствует в виде октакарбонила $\text{Co}_2(\text{CO})_8$. Количество полученного октакарбонила дикообальта полностью соответствует количеству исходно имевшегося в системе кислорода. Литий в этой высокотемпературной системе присутствует в виде гидроксида лития (54 % от его общего количества) и карбида лития (46 % соответствен-

но). Углерод присутствует в форме графита (32 %), карбида лития (20 %) и октакарбонила дикобальта $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ (48 %).

В рассмотренном температурном диапазоне доли всех указанных образовавшихся соединений практически не менялись с увеличением температуры.

Таким образом, аварийный нагрев литий-ионного аккумулятора, содержащего кобальт, должен приводить к разложению активных электродных масс. При этом следует ожидать образование большого количества продуктов взаимодействия: карбонила, гидроксида, карбида), которые обладают способностью гореть в кислороде воздуха в случае разгерметизации перегретого аккумулятора. Среди них особое внимание привлекает октакарбонил дикобальта $\text{Co}_2(\text{CO})_8$, поскольку он является чрезвычайно токсичным соединением. По величине предельно допустимой концентрации в воздухе рабочей зоны это соединение является в 2 000 раз более токсичным, чем угарный газ ($0,01 \text{ мг/м}^3$ против 20 мг/м^3) [7]. При этом, если его сгорание при разгерметизации аккумулятора будет хоть сколько-нибудь неполным, тогда токсичность газовой среды на пожаре будет стремительно увеличиваться. В этом случае время блокирования путей эвакуации опасными

факторами пожара может считаться крайне малой величиной.

Возможно, полученные предельные результаты количественной и качественной оценки продуктов пиролиза электродных масс литий-ионных аккумуляторов несколько завышены: в реальных процессах промышленный синтез октакарбонила дикобальта реализуют, как и следует ожидать, при высоких давлениях [8]. Тем не менее согласно полученной оценке, его образование в исследуемых условиях (при давлении 1 атм) оказалось термодинамически оправданным, что приводит к выводу о необходимости считать продукты горения литий-ионных аккумуляторов, содержащих кобальт, высоко токсичными. Статистика гибели людей на пожарах, вызванных самовоспламенением литий-ионных аккумуляторов, в полной мере подтверждает эту точку зрения [9].

В таб. 2 выполнено сопоставление величин ПДК в воздухе рабочей зоны [7] и предельно допустимых значений для ряда токсичных продуктов горения [10]. Предполагается, что данная информация позволит примерно оценить неизвестные величины предельно-допустимых значений некоторых газообразных продуктов горения.

Таблица 2

Сопоставление величин ПДК в воздухе рабочей зоны [7] и ПДЗ продуктов горения [9] литий-ионных аккумуляторов типов ICR, NCA, NMC

Table 2

Comparison of the values of MPC in the air of the working area [7] and MPD of combustion products [9] of lithium-ion batteries of ICR, NCA, NMC types

№ п/п	Соединение Substance	Название соединения Name of the substance	Величина ПДК в воздухе рабочей зоны (среднесуточные значения), г/м^3 The maximum permissible concentration in the air of the	Величина ПДЗ, г/м^3 The value of MPD, г/м^3

			working area (daily average values), g /m ³	
1	CO ₂	Двуокись углерода, углекислый газ Carbon dioxide, carbonic-acid gas	90	110
2	CO	Оксид углерода, угарный газ Carbon monoxide, sweepdamp	0,02	1,16
3	HCl	Хлорид водорода, соляная кислота Hydrogen chloride, hydrochloric acid	0,005	0,0023
4	Co ₂ (CO) ₈	Октакарбонил дикобальта Dicobalt octacarbonyl	0,00001	?
5	Ni(CO) ₄	Тетракарбонил никеля Nickel Tetracarbonyl	0,000003	?
6	NiO	Оксид никеля Nickel Oxide	0,00005	?
	CoO	Оксид кобальта Cobalt Oxide	0,00005	?

При горении литий-ионных аккумуляторов данного типа, даже в случае полного сгорания карбонила, концентрация токсичных продуктов горения будет угрожающе высокой, поскольку горение на воздухе любых кобальт содержащих продуктов пиролиза в конечном счете приводит к образованию оксидов кобальта. Данные табл. 2 наглядно демонстрируют существенно более высокую токсичность оксида кобальта в сравнении с угарным газом.

Уровень токсичности продуктов горения других кобальт содержащих типов литий-ионных аккумуляторов, по-видимому, в некоторой степени будет зависеть от разбавления кобальта другими элементами в составе активной электродной массы (менее опасными соединениями марганца, алюминия). Однако есть необходимость также упомянуть о соединениях никеля, применяемых в двух типах

литий-ионных аккумуляторов – NMC и NCA. В этих случаях следует ожидать, что никельсодержащие продукты горения также будут вносить свой вклад в уровень токсичности продуктов горения при пожаре. Например, судя по величине ПДК оксидов никеля в воздухе рабочей зоны (табл. 2), они тоже являются высокотоксичными соединениями.

Выводы

Согласно полученным результатам, интегральная величина теплоты сгорания литий-кадмиевого аккумуляторного элемента 18650 составляет примерно 29 МДж/кг, что сопоставимо со значениями этой величины для этилового спирта (27,5 МДж/кг) или ацетона (29 МДж/кг) [11].

Показано, что в случае присутствия на объекте защиты каких-либо технических устройств, в том числе транспортных

средств, средств индивидуальной мобильности, использующих в качестве источников питания литий-ионные аккумуляторные батареи, представляется целесообразным вводить в практику расчетов величин пожарного риска рассмотрение сценариев пожара с их участием. При этом оценку токсичности продуктов горения следует проводить не только по уровням выделения угарного и углекислого газов, но и по содержанию соединений металлов, входящих в состав активных электродных масс, прежде всего кобальта и никеля.

Применительно к определению наиболее опасного сценария, предполагающего пожар литий-ионных аккумуляторов, предлагается рассматривать случаи факельного горения механически поврежденных или перегретых кобальт содержащих аккумуляторов типов ICR, NCA, NMC.

Применительно к определению наиболее опасного сценария, предполагающего пожар литий-ионных аккумуляторов, предлагается рассматривать случаи факельного горения механически поврежденных или перегретых кобальт содержащих аккумуляторов типов ICR, NCA, NMC.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Report on UPS Jet's Crash Highlights Batteries // WSJ : website. URL: <https://www.wsj.com/articles/SB10001424052748703806304576241563707603894> (date of application: 25.05.2024).
2. Шаронов, А. Ролкер с 4 тысячами сгоревших авто «отмучился» — затонул // Дрон : сайт. URL: <https://news.drom.ru/87306.html> (дата обращения: 25.05.2024).
3. Взорвавшийся электросамокат разнес квартиру в пермской многоэтажке // Новости НТВ : сайт. URL: <https://www.ntv.ru/novosti/2592901/> (дата обращения: 25.05.2024).
4. Литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы: маркетинговые уловки и распространенные ошибки / Хабр : сайт. URL: <https://habr.com/ru/articles/397705/> (дата обращения: 25.05.2024).
5. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Пожнаука, 2004. Ч. 1. 713 с.
6. Белов Г. В., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 96 с.
7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 (с изменениями на 30 декабря 2022 г.).
8. Патент № 2729231 Российская Федерация, В01J3/00. Способ получения октакарбонила дикообальта : № 2020112840 : заявл. 02.04.2022 : опубл. 05.08.2022 / Соколов Б. Г. [и др.] // Google Patents : патенты. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2729231C1/ru> (дата обращения: 25.05.2024).
9. Терентьев Д. И., Мансуров Т. Х. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов электросамокатов, электроскутеров, велосипедов с электроприводом и других аналогичных устройств. Безопасность в чрезвычайных ситуациях – 2022 : сб. материалов международной научно-практической конференции. Минск : УГЗ, 2022. С. 72–75.
10. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 // Гарант.ру : инф.-прав. портал. URL: <https://clck.ru/34X4rc> (дата обращения: 10.05.2023).
11. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов / Д. М. Гордиенко [и др.]. М. : ВНИИПО, 2012. 242 с.

REFERENCES

1. Report on UPS Jet's Crash Highlights Batteries – WSJ. – URL: <https://www.wsj.com/articles/SB10001424052748703806304576241563707603894>
2. A roller coaster with 4 thousand burnt-out cars sank. – URL: <https://news.drom.ru/87306.html>
3. An exploding electric scooter demolished an apartment in a Perm high-rise building // NTV News. – URL: <https://www.ntv.ru/novosti/2592901/>
4. Lithium-ion and lithium polymer batteries: Marketing tricks and common mistakes / Habr. – URL: <https://habr.com/ru/articles/397705/>

5. A. Ya. Korolchenko, D. A. Korolchenko. Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them. Reference book: in 2 hours — 2nd ed., reprint. and additional - M.: Acc. "Pozhnauka", 2004. — T.I. — 713 c. — ISBN 5-901283-02-3.

6. G.V. Belov, B.G. Trusov. Thermodynamic modeling of chemically reacting systems. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2013. 96c.

7. Sanitary rules and norms of SanPiN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans» Approved by Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 2 dated January 28, 2021 (as amended on December 30, 2022)

8. The method of obtaining dicobalt octacarbonyl " Scientific research at St. Petersburg State University [https://pureportal.spbu.ru/ru/publications/---\(22fa7e62-e05c-4849-8c06-44696448df2b\).html](https://pureportal.spbu.ru/ru/publications/---(22fa7e62-e05c-4849-8c06-44696448df2b).html)

9. D. I. Terentyev, T. H. Mansurov. Fire hazard of lithium-ion batteries of electric scooters, electric scooters, electric bicycles and other similar devices. Safety in emergency situations – 2022: Collection of materials of the international scientific and practical conference. – Minsk: UGZ, 2022. C. 72-75. ISBN 978-985-590-157-19.

10. Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard : Approved by Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 11/14/2022 No. 1140 : reg. in the Ministry of Justice of the Russian Federation on March 20, 2023, reg. number 72633 // Garant.ru : inf/portal. – URL: <https://clck.ru/34X4rc>

11. D.M. Gordienko, Yu.N. Shebeko, A.Yu. Shebeko, D.S. Kirillov, V.A. Truneva, A.N. Giletich, P.M. Komkov Manual for determining calculated fire risk values for industrial facilities – M.: VNIPO, 2012. – 242 c.

Информация об авторах

Терентьев Дмитрий Иванович, кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), РИНЦ ID: 47228; Scopus Author ID 55900790600, ResearcherID: ADT-7503-2022, ORCID: 0000-0002-3991-4366, e-mail: terentyevdi@uigps.ru

Тикина Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), РИНЦ ID: 843403; Scopus Author ID: 56444380800, ResearcherID: KMY-6069-2024, ORCID: 0000-0001-6262-1580, e-mail: tikinaiv@uigps.ru

Курочкин Александр Рудольфович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), РИНЦ ID: 796177, Scopus Author ID: 55802439500; ResearcherID: U-

Information about the authors

Dmitriy I. Terentiev, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russian Federation), ID RISC: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366, e-mail: terentyevdi@uigps.ru

Irina V. Tikina, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russian Federation), ID RISC: 843403; Scopus Author ID: 56444380800; ResearcherID: KMY-6069-2024; ORCID: 0000-0001-6262-1580; e-mail: tikinaiv@uigps.ru

Aleksandr R. Kurochkin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics.), Senior Lecturer of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russian Federation), ID RISC: 796177; Scopus Author ID: 55802439500,

2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339,
e-mail: kurochkinar@uigps.ru

e-mail: kurochkinar@uigps.ru

Сатюков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), РИНЦ ID: 793362;
e-mail: satyukovrs@uigps.ru

Roman S. Satukov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the educational and scientific complex of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russian Federation), ID RISC: 793362,
e-mail: satyukovrs@uigps.ru