

Научная статья

УДК 550.344; 550.348; 622.235; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-86-95

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ РЕЗКИ**

✉Дорошенко Станислав Иванович;

Нефедьев Сергей Аркадьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Малых Вадим Александрович.

АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия

✉[stasdoroshenko@mail.ru](mailto:stasdoroshenko@mail.ru)

*Аннотация.* Оценивается эффективность применения технологии ударно-волновой резки горных пород. Показано существенное сокращение расхода взрывчатого вещества и повышение эффективности при ударно-волновой резке. Решены задачи в интересах спасательных работ при чрезвычайных ситуациях. Приведены характеристики степеней разрушений, методы и способы разбора завалов. Дан анализ развития критических ситуаций со смертностью пострадавших. Представлено использование билинейных зарядов, реализующих резку волнами Маха (экстремальные режимы интерференции ударных волн). Ударно-волновая резка пород является инновационной технологией для горной промышленности, взрывных работ при сносе сооружений и спасательных работ при завалах пород, зданий и сооружений.

*Ключевые слова:* ударно-волновой заряд, билинейный заряд, математическая модель, волна маха, эксперимент, горная порода, бетонный блок

**Для цитирования:** Дорошенко С.И., Нефедьев С.А., Малых В.А. Эффективность разрушения пород и железобетонных конструкций при решении задач в чрезвычайных ситуациях с применением технологии ударно-волновой резки // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 86–95. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-86-95.

Scientific article

## **EFFICIENCY OF DESTRUCTION OF ROCKS AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURE IN SOLVING PROBLEMS IN EMERGENCY SITUATIONS USING SHOCK WAVE CUTTING TECHNOLOGY**

✉Doroshenko Stanislav I.;

Nefedev Sergey A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Malykh Vadim A.

JSC «RPE» Radar mms», Saint-Petersburg, Russia

✉[stasdoroshenko@mail.ru](mailto:stasdoroshenko@mail.ru)

*Abstract.* The article evaluates the effectiveness of the use of technological shock wave cutting of rocks. A significant reduction in the consumption of explosives and an increase in efficiency in shock-wave cutting are shown. Tasks have been solved in the interests of rescue operations in emergency situations. Characteristics of the degrees of destruction, methods

and given. An analysis of the development of critical situations with the mortality of victims is given. Use of bilinear charges that realize Mach wave cutting (extreme modes of shock wave interference). Shock wave cutting of rock is an innovative technology for the mining industry, blasting operations during the demolition of structures and rescue operations in case of debris of rocks, buildings and structures.

*Keywords:* shock-wave charge, bilinear charge, mathematical model, Mach wave, experiment, rock, concrete block

**For citation:** Doroshenko S.I., Nefedev S.A., Malykh V.A. Efficiency of destruction of rocks and reinforced concrete structure in solving problems in emergency situations using shock wave cutting technology // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 3 (71). P. 86–95. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-86-95.

## Введение

В настоящее время сохраняется тенденция роста чрезвычайных ситуаций (ЧС). В области гражданской обороны основной задачей является проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ при возникновении опасностей для населения как при военных конфликтах, так и при ЧС природного и техногенного характера. Работы направлены на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение ущерба для окружающей среды и материальных потерь, прекращение действия опасных факторов и локализацию зон ЧС. В планах действий по предупреждению и ликвидации ЧС, наряду с созданием группировки сил, куда могут включаться все силы гражданской обороны, в том числе поисково-спасательные службы и формирования, предусматривается выделение различных средств, в частности, взрывчатых материалов. В статье рассмотрены способы ведения аварийно-спасательных работ в завалах, представлен инновационный способ ведения взрывных работ, владение которым обеспечит высокий темп спасательных работ с одновременным повышением безопасности самих взрывных работ. Данный способ может применяться как в горной промышленности, так и в строительстве.

## Аварийно-спасательные работы

Чрезвычайные ситуации, независимо от характера и причин их возникновения, также порождают сложные инженерные задачи, связанные с выполнением больших объемов аварийно-спасательных и других неотложных работ. Если увидеть, что представляют собой работы в завалах при ликвидации последствий землетрясений, взрывов, обрушений (демонтаж) зданий и сооружений, можно понять, какой объем мероприятий необходимо выполнить. В большинстве случаев скорость ликвидации завалов играет большую роль, ведь потеря времени увеличивает опасность для жизни и здоровья людей. Завалы образуются вследствие обрушения зданий и сооружений, вызванных землетрясениями, взрывами, бурями, ураганами, смерчами, селями, оползнями и другими природными и техногенными явлениями. Характер завала зависит от источника (причины) его образования, от типа и длительности действия поражающего фактора, от типа и этажности зданий, от особенностей застройки и других факторов. Степень разрушения зданий подразделяется на четыре категории (табл. 1) [1].

**Характеристика степеней разрушения жилых и общественных зданий**

Степень разрушения	Характеристика разрушения
Слабая	Частичное разрушение внутренних перегородок, кровли, дверных и оконных коробок, легких построек и др. Основные несущие конструкции сохраняются. Для полного восстановления требуется капитальный ремонт
Средняя	Разрушение меньшей части несущих конструкций. Большая часть несущих конструкций сохраняется и лишь частично деформируется. Может сохраняться часть ограждающих конструкций (стен), однако при этом второстепенные и несущие конструкции могут быть частично разрушены. Здание выводится из строя, но может быть восстановлено
Сильная	Разрушение большей части несущих конструкций. При этом могут сохраняться наиболее прочные элементы здания, каркасы, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей. При сильном разрушении образуется завал. В большинстве случаев восстановление нецелесообразно
Полная	Полное обрушение (демонтаж) здания, от которого могут сохраниться только поврежденные (или неповрежденные) подвалы и незначительная часть прочных элементов. При полном разрушении образуется завал. Здание восстановлению не подлежит

Завалы представляют собой хаотичное нагромождение крупных и мелких обломков строительных конструкций, технологического оборудования, коммунально-энергетических устройств, мебели и т.д.

В толще завалов могут оставаться крупные щели, через которые свободно проходят запахи и звуки от находящегося там человека. Это облегчает поиски людей, оказавшихся в завалах (рис. 1).



Рис. 1. Поиск и обнаружение людей в завалах

Сели и оползни помимо разрушений периодически образуют плотины, вследствие чего создаются риски катастроф по затоплению населенных пунктов (рис. 2).



Рис. 2. Сели и оползни

По статистике объем завалов при разрушении жилых зданий составляет 35–50 %, промышленных зданий – 15–20 % от строительного объема. Объем пустот в завалах составляет 40–60 %. Наибольшая высота завалов жилых зданий – 1/5–1/7, а промышленных зданий – 1/4–1/10 их высоты. Средний угол откосов завалов  $-30^\circ$  [1].

Разрушение зданий в ходе ЧС сопровождается блокированием людей и их поражением, но даже при сильных разрушениях могут сохраняться наиболее прочные элементы здания, каркасы, ядра жесткости.

Рассмотрим статистические данные поражения людей при возникновении ЧС в части образовавшихся завалов [2].

Число безвозвратных потерь в момент разрушения зданий и сооружений в среднем может составлять величину, равную 10–20 % от общего числа пострадавших.

Поражение при катастрофах сопровождается, как правило, физическими травмами:

20 % пораженных – крайне тяжелая степень;

20 % пораженных – тяжелая степень;

20 % пораженных – средняя степень;

40 % пораженных – легкая степень поражения.

Начиная с 3–4 сут с момента землетрясения люди, находившиеся под завалами живыми, начинают гибнуть от переохлаждения, жажды и других причин. В результате через 7–10 дней шансы обнаружить живого человека в завале практически равны нулю. Как правило, около половины пострадавших (40–50 %) не в состоянии заявить о своем существовании из-за полученных травм. В первые сутки после поражения при отсутствии медицинской помощи летальность среди пострадавших может достигать 40 %. В этой связи необходимо максимально быстро проделать проходы в завалах к имеющимся пустотам с людьми.

При ведении спасательных работ применяют механизированный (основной), термический, взрывной, электрогидравлический или их комбинированный способ по демонтажу конструкций зданий и сооружений, породы для устранения ЧС, а также извлечения пострадавших из-под завалов.

При механизированном способе применяются (рис. 3):

– экскаваторы и экскаваторы-разрушители со сменным навесным оборудованием: гидравлическими ножницами, грейферным захватом, фрезой, клином-молотом, шар-молотом и т.п. При большей высоте предусматривается устройство пандуса, позволяющего вести работы на безопасном расстоянии. Применяют гидравлические экскаваторы, а также автокраны, грузоподъемные краны на пневмоколесном или гусеничном ходу, универсальными гидравлическими захватами, экскаваторы с гидравлическими или механическими ножницами. Для быстрого разрушения бетонных и железобетонных конструкций, асфальтобетонных покрытий используется гидравлический молот как рабочий сменный орган экскаватора-погрузчика;

– станки с алмазными отрезными дисками – при резке бетона и железобетона толщиной до 450 мм;

– алмазный канат – стальной трос с расположенными на нем алмазными втулками, с применением канатного автомата с двигателем и системой роликов, управляющих движением каната. Применяется при больших толщинах кирпича, природного камня, бетона и железобетона;

– клиновые раскалыватели с применением гидроцилиндра;

– электрогидравлические и дизельные роботы со сменным навесным оборудованием.



Рис. 3. Механизированные спасательные работы

В стесненных условиях, когда другие способы не могут быть использованы, снос производится ручным пневматическим и электрифицированным инструментом: отбойные молотки, механические пилы, пневматические бетоноломы, домкраты, лебедки и др.

При термическом способе используются средства воздействия на материалы конструкций:

- кислородное копьё;
- газоструйное порошково-кислородное копьё;
- порошково-кислородный резак;
- реактивно-струйная горелка;
- электродуговое плавление.

Термический способ разрушения основан на применении источника тепла в форме высокотемпературного газового потока или электрической дуги. С помощью этого способа производится прожигание в бетоне отверстий диаметром 30–120 мм и глубиной до 4 м и резка бетона и железобетона толщиной 300–400 мм.

К средствам взрывного воздействия на материал конструкций относятся:

- взрывчатые вещества (ВВ);
- гидровзрыв.

Гидровзрыв применяют для дробления и раскалывания материала строительных конструкций. При электрогидравлическом способе разрушения железобетонных монолитных конструкций применяется эффект гидравлического удара высокого давления, возникающего в ограниченном объеме жидкости при электрическом разряде.

Взрывной способ рекомендуется применять на свободных площадках (рис. 4) в качестве сноса (разрушения) зданий и сооружений с использованием ВВ. В стесненных условиях требуются устройства защиты от разлета осколков и пыли. Данный способ является наиболее опасным из перечисленных, но самым быстрым для выполнения задачи.



Рис. 4. Снос зданий (сооружений) взрывным способом

Сложность, опасность и ограниченные сроки выполнения спасательных работ определяют необходимость широкого использования энергии взрыва. Привлекаемые к ликвидации структурные подразделения различных ведомств должны оснащаться современными инновационными взрывными технологиями, позволяющими эффективно решать эти задачи. На данный момент потенциал энергии взрыва при проведении спасательных работ, в том числе спасения человеческих жизней, сильно ограничен.

Основным средством резки материалов (металлов) взрывом являются кумулятивные заряды, действие которых основано на сверхскоростном выносе материала из полости реза, объем которой примерно пропорционален толщине разрезаемой преграды. При сквозном разрезании преграды часть кумулятивной струи поражает объекты, находящиеся за ней, что ограничивает возможности кумулятивной резки. А при подводных взрывах кумулятивные струйные течения не развиваются, и для решения сложных подводных работ специалисты вынуждены применять накладные линейные (фигурные) заряды, которые превышают по массе кумулятивные.

Эти проблемы можно решить, применив инновационный метод взрывных работ с укладкой билинейных зарядов (БЛЗ) ударно-волновой резки. Эта технология позволяет оперативно с высокими экономическими показателями решать задачи спасательных работ, а также может применяться в горной промышленности и при строительстве.

### **БЛЗ ударно-волновой резки**

В научно-аналитическом журнале «Проблемы управления рисками в техносфере» авторами довольно подробно представлена указанная технология и ее уникальная характеристика [3, 4]. В этих публикациях исследовался готовый промышленно изготовленный заряд ударно-волновой резки (ЗУВР). В данной статье авторами показаны результаты испытаний БЛЗ ударно-волновой резки, изготавливаемых непосредственно на объекте выполнения взрывных работ из любого ВВ. Учитывая степень готовности зарядов, технологичность применения, относительно небольшие массы ВВ, отсутствие запреградного действия, технология позволяет в кратчайшие сроки решить спасательные задачи, в том числе и в завалах бетонных конструкций, выполнять и другие специальные работы, связанные с резкой (разрушением) различных материалов.

Ударно-волновая резка основана на использовании экстремальных (Маховских) режимов интерференции ударных волн, образованных в материале при синхронной детонации параллельных зарядов на поверхности преграды.

Разрушение происходит практически без массопереноса вследствие взаимодействия трех волн разгрузки за фронтом волны Маха. В результате преграда разрезается по линии наименьшего сопротивления преграды плоскими трещинами. Установлено, что между массой ударно-волнового заряда и толщиной разрезаемой преграды сохраняется линейная зависимость.

Для оценки возможности применения ударно-волновой резки горных пород выполнены аналитические расчеты кинематических параметров столкновения ударных волн параллельных зарядов в граните.

Как известно, скорость ударных волн ( $D_v$ ) в граните остается равной скорости звука ( $C$ ) до давлений  $p \leq 37$  ГПа [5]. В общем случае образование ударных волн конической и цилиндрической формы происходит при условии  $D_n > D_v = C$ , где  $D_n$  – скорость детонации зарядов.

Основным параметром, определяющим режим интерференции волн, является угол их столкновения ( $\alpha$ ). Нерегулярный (Маховский) режим реализуется при  $\alpha \geq \alpha_{кр} \approx 68...74^\circ$  [6].

Аналитическими методами расчета получена зависимость углов  $\alpha$  при столкновении конических волн ( $D_n \geq C$ ) [6]:

$$\sin(\alpha/2) = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \beta}{1 + y/L}}, \quad (1)$$

где  $\beta = \arcsin \frac{D_v}{D_n} = \arcsin \frac{C}{D_n}$ ;  $L$  – расстояние между зарядами;  $y$  – расстояние от поверхности преграды до точки столкновения волн. Для цилиндрических волн  $\beta=0$  и по формуле (1) получаем:

$$\sin(\alpha/2) = \sqrt{1 - \frac{L}{y + L}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что для цилиндрических волн режим нерегулярного столкновения реализуется в широком диапазоне параметров БЛЗ, что обеспечивает их применение для разрушения горных пород, бетона и других кристаллических сред.

Физическая сущность ударно-волновой резки заключается в формировании и последующем взаимодействии достаточно сложного цуга ударных и отраженных волн.

В результате суперпозиции отраженных волн разрушение пород осуществляется отрывом, что требует меньших энергетических затрат.

В результате теоретических и экспериментальных исследований в Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д.Ф. Устинова с участием специалистов Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, АО «НПП «Радар ммс» (Санкт-Петербург) разработан ряд конструкций ударно-волновых зарядов [2, 3].

Для совершенствования технологии ударно-волновой резки проведены теоретические исследования разрушения преград импловивными (симметрично сходящимися) ударными волнами. Разработаны физические и математические модели, описываемые системами уравнений [7–9].

На базе ООО «Промстройвзрыв» проведены испытания по резке горных пород и бетонных блоков импловивными ударными волнами. Для резки применялись БЛЗ на основе патронированного эмульсионного ВВ нитронит-П и геляпора [7, 10, 11].

Эксперименты по применению БЛЗ проводились при ликвидации нависания (козырьков) скального массива над участком строящейся автодороги «Санкт-Петербург – Сортавала». Размеры нависающего массива – 3,1x1,3x1,5 м. Площадь реза до 3,5 м<sup>2</sup>. Заряды располагались по поверхности блока двумя параллельными рядами по линии реза. Расстояние между рядами – 100 мм (рис. 5).



Рис. 5. Резка пород с помощью БЛЗ

Симметричное столкновение ударных волн в массиве обеспечивалось одновременным инициированием.

В результате подрыва наблюдалось сквозное разделение блока в плоскости симметрии БЛЗ. Удельный расход ВВ составил  $1,26 \text{ г/см}^2$ , что в 2...5 раз меньше показателей при отколе массива сосредоточенным зарядом.

Демонстрационные испытания ЗУВР выполнялись на 18 испытательном полигоне инженерных войск Министерства обороны Российской Федерации (пос. Елизаветинка) по программе и методике, утвержденным командованием инженерных войск Российской Федерации. В ходе работ были проведены сравнительные подрывы ЗУВР и инженерных кумулятивных зарядов, в том числе и по бетонным блокам с помощью БЛЗ (рис. 6) [12]. Эти испытания были взяты за основу при натурных работах на базе ООО «Промстройвзрыв», где и были проведены испытания по резке горных пород импловивными ударными волнами.



Рис. 6. Перебитие бетонного блока толщиной 520 мм с помощью БЛЗ

Опыты с применением ЗУВР и БЛЗ для резки железобетонных конструкций показали положительные результаты только по резке (разрушению) бетона. Между массой ударно-волнового заряда и толщиной разрезаемой железобетонной конструкции сохраняется линейная зависимость. В целях частичного выноса бетона с области реза для получения доступа к арматуре масса заряда увеличивалась на 15–20 %. Увеличение запреградного действия при таком увеличении заряда незначительное.

### Заключение

В качестве выводов можно отметить, что:

1. Ударно-волновая резка пород является инновационной технологией и перспективной для горной промышленности, взрывных работ при сносе сооружений и спасательных работ в завалах зданий и сооружений.

2. При применении технологии ударно-волновой резки железобетонных конструкций потребуется выполнение двух операций: разрушение и вынос бетона зарядом БЛЗ или ЗУВР и резка арматуры любым доступным образом.

3. Использование БЛЗ, реализующих резку волнами Маха, позволит существенно снизить расход взрывчатых материалов и время проведения работ, при этом увеличит безопасность и эффективность спасательных и промышленных работ.

### Список источников

1. Аварийно и поисково-спасательные работы в условиях завалов // Fireman.club. URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/avariyno-i-poiskovo-spatatelnyie-raboty-v-usloviyah-zavalov/> (дата обращения: 07.09.2023).

2. Заряд для разрезания твердых материалов: пат. Рос. Федерация № 2701600 С2 / Михайлов Н.П., Знаменский Е.А., Дорошенко С.И., Кравцов В.О., Кэрт Б.Э., патентообладатель

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова; заявл. 03.07.2017; опубл. 30.09.2019.

3. Удлиненный заряд взрывчатого вещества: пат. № 204402 Рос. Федерация / С.И. Дорошенко [и др.]; заявл. 19.05.2020; опубл. 24.05.2021.

4. Дорошенко С.И., Нефедьев С.А., Малых В.А. Разрушения пород и материалов зарядами на основе технологии ударно-волновой резки при чрезвычайных ситуациях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 17–28. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-17-28.

5. Физика взрыва / под. ред. Л.П. Орленко: в 2-х т. 3-е изд., перераб. М., 2004.

6. Михайлов Н.П. Основы математического моделирования процессов взрыва и удара: учеб. СПб.: БГТУ «Военмех», 2012. 202 с.

7. Михайлов Н.П. Технологические основы управления ударно-волновыми процессами: дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: БГТУ «Военмех», 2001.

8. Михайлов Н.П., Дорошенко С.И., Бригадин И.В. Совершенствование технологии резки, сварки и упрочнения металлов // Взрывное дело. № 109/67. С. 101–117.

9. Михайлов Н.П., Чан Ван Зонь. Резка металла ударными волнами // Записки Горного института. 2005. С. 61–62.

10. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. М.: Недра, 1988. С. 232–235.

11. Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Закалинский В.М. Повышение эффективности взрывных работ при освоении месторождений полезных ископаемых // Взрывное дело. 2013. № 110/67. С. 3–15.

12. Дорошенко С.И., Нефедьев С.А., Малых В.А. Разрушения материалов зарядами ударно-волновой резки под водой в чрезвычайных ситуациях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 8–22. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-8-22.

## References

1. Avarijno i poiskovo-spasatel'nye raboty v usloviyah zavalov // Fireman.club. URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/avarijno-i-poiskovo-spasatelnyie-raboty-v-usloviyah-zavalov/> (data obrashcheniya: 07.09.2023).

2. Zaryad dlya razrezaniya tverdyh materialov: pat. Ros. Federaciya № 2701600 C2 / Mihajlov N.P., Znamenskij E.A., Doroshenko S.I., Kravcov V.O., Kert B.E., patentoobladatel' Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «Voenmekh» im. D.F. Ustinova; заявл. 03.07.2017; опубл. 30.09.2019.

3. Udlinennyj zaryad vzryvchatogo veshchestva: pat. № 204402 Ros. Federaciya / S.I. Doroshenko [i dr.]; заявл. 19.05.2020; опубл. 24.05.2021.

4. Doroshenko S.I., Nefed'ev S.A., Malyh V.A. Razrusheniya porod i materialov zaryadami na osnove tekhnologii udarno-volnovoj rezki pri chrezvychajnyh situacijah // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 3 (67). S. 17–28. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-17-28.

5. Fizika vzryva / pod. red. L.P. Orlenko: v 2-h t. 3-e izd., pererab. M., 2004.

6. Mihajlov N.P. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya processov vzryva i udara: ucheb. SPb.: BGTU «Voenmekh», 2012. 202 s.

7. Mihajlov N.P. Tekhnologicheskie osnovy upravleniya udarno-volnovymi processami: dis. ... d-ra tekhn. nauk. SPb.: BGTU «Voenmekh», 2001.

8. Mihajlov N.P., Doroshenko S.I., Brigadin I.V. Sovershenstvovanie tekhnologii rezki, svarki i uprochneniya metallov // Vzryvnoe delo. № 109/67. S. 101–117.

9. Mihajlov N.P., Chan Van Zon'. Rezka metalla udarnymi volnami // Zapiski Gornogo instituta. 2005. S. 61–62.

10. Kutuzov B.N. Vzryvnye raboty. M.: Nedra, 1988. S. 232–235.

11. Trubeckoj K.N., Viktorov S.D., Zakalinskij V.M. Povyszenie effektivnosti vzryvnyh rabot pri osvoenii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh // Vzryvnoe delo. 2013. № 110/67. S. 3–15.

12. Doroshenko S.I., Nefed'ev S.A., Malyh V.A. Razrusheniya materialov zaryadami udarno-volnovoj rezki pod vodoj v chrezvychajnyh situacijah // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 4 (68). S. 8–22. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-8-22.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 28.05.2023; одобрена после рецензирования: 18.07.2024; принята к публикации: 03.09.2024

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 28.05.2023; approved after review: 18.07.2024; accepted for publication: 03.09.2024

*Информация об авторах:*

**Дорошенко Станислав Иванович**, доцент кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, заслуженный военный специалист Российской Федерации, Лауреат Государственной премии им. Г.К. Жукова, e-mail: stasdoroshenko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7191-1439>, SPIN-код: 3130-8841

**Нефедьев Сергей Аркадьевич**, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор военных наук, профессор, e-mail: doktorsan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2299-4638>, SPIN-код: 8084-2125

**Малых Вадим Александрович**, ведущий инженер-конструктор АО «НПП «Радар ммс» (197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А), e-mail: malyh\_@radar-mms.com, <https://orcid.org/0009-0002-9096-1608>

*Information about the authors:*

**Doroshenko Stanislav I.**, associate professor of the department of mining rescue and explosion safety of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, honored military specialist of the Russian Federation, Laureate of the G.K. Zhukov State prize, e-mail: stasdoroshenko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7191-1439>, SPIN: 3130-8841

**Nefedev Sergey A.**, professor of the department of fire safety of technological processes and productions of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of military sciences, professor, e-mail: doktorsan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2299-4638>, SPIN: 8084-2125

**Malykh Vadim A.**, leader design engineer of JSC «RPE» Radar mms» (197375, Saint-Petersburg, Novoselkovskaya str., 37, let. A), e-mail: malyh\_@radar-mms.com, <https://orcid.org/0009-0002-9096-1608>