

Научная статья

УДК 550.344; 550.348; 622.235; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-17-28

РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ ЗАРЯДАМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ РЕЗКИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

✉ **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

Аннотация. Оценивается эффективность применения технологии ударно-волновой резки горных пород и материалов. Приводится сравнение технологий ударно-волновой и кумулятивной резки материалов. Показано существенное сокращение расхода взрывчатого вещества и повышение эффективности при ударно-волновой резке с одновременным снижением безопасных расстояний. Решение задач подводных взрывов в интересах спасательных работ при чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: ударно-волновой заряд, билинейный заряд, математическая модель, волна Маха, эксперимент, горная порода, бетонный блок, подводный взрыв

Для цитирования: 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.

Scientific article

DESTRUCTION OF ROCKS AND MATERIALS USING AMMUNITION BASED ON SHOCK-WAVE CUTTING TECHNOLOGY IN EMERGENCY SITUATIONS

✉ **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

Abstract. The paper assesses the effectiveness of shock-wave technology cutting for rocks and materials. A comparison of materials cutting technologies using a shock-wave and a shaped charge is done. Shows a significant reduction in the consumption of explosives and an increase in efficiency in shock-wave cutting with a simultaneous reduction in safe distances. Solving the problems of underwater explosions in the interests of rescue operations in emergency situations.

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

For citation: Doroshenko S.I., Nefedev S.A., Malykh V.A. Destruction of rocks and materials using ammunition based on shock-wave cutting technology in emergency situations // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 3 (67). P. 17–28. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-17-28.

Введение

В России, как и во всем мире, нарастает озабоченность в связи с возрастающим количеством чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера, увеличением их масштабов, ростом потерь и ущерба от них. Складывающаяся обстановка требует принятия мер по совершенствованию управления безопасностью и развитию новых решений насущных задач. Ограниченные сроки аварийно-спасательных работ определяют необходимость широкого использования энергии взрыва, которая способна быстро выполнить большой объем данных работ, что создает условия для сокращения их общих сроков и стоимости.

Эффективность выполнения аварийно-спасательных и других неотложных работ связана с наличием в структуре МЧС России надежной системы применения взрыва в ЧС в комплексе с технологиями и безопасностью. При выборе рациональных и эффективных параметров и технологии производства взрывных работ требуется прогноз воздействия ударных и сейсмических волн взрыва, дальность разлета фрагментов взорванных конструкций, разработка способов по снижению вредных эффектов взрыва.

Для выполнения взрывных работ в промышленном комплексе страны имеется довольно широкая линейка взрывчатых веществ (ВВ) и зарядов, проработаны технологии их применения с учетом требований взрывобезопасности. Но российская наука не стоит на месте, и в развитии взрывных технологий появились новые ВВ, средства инициирования и новые технологии, воплощенные в новые заряды. Такому инновационному методу – ударно-волновой резке взрывом – посвящена эта работа. Ее инструментом является заряд ударно-волновой резки (ЗУВР), который в разы превосходит качества зарядов, имеющиеся в промышленности, а в отдельных случаях – не имеет равных.

1. Теоретические основы технологии ударно-волновой резки

В настоящее время основным средством резки материалов и пород взрывом являются кумулятивные заряды (КЗ). При резке большой толщины значительно увеличивается масса КЗ, что требует применения специальных дорогостоящих мер защиты окружающей среды и объектов от действия взрыва. Более эффективно использование технологии ударно-волновой резки.

1.1. Конструкция ударно-волнового заряда (УВЗ)

В отличие от кумулятивной, ударно-волновая резка основана на использовании экстремальных (Маховских) режимов интерференции ударных волн, образованных при синхронной детонации параллельных зарядов на поверхности преграды [1–3].

В результате теоретических и экспериментальных исследований в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова) с участием специалистов Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России разработана конструкция УВЗ [3–6], которая представлена на рис. 1.

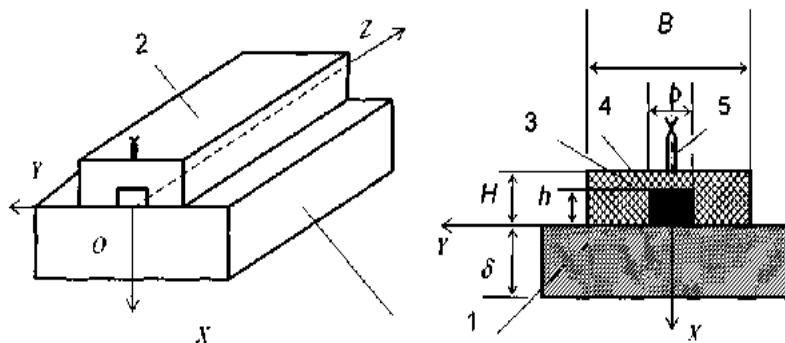


Рис. 1. Конструкция ударно-волнового заряда: 1 – преграда (металл); 2 – УВЗ; 3 – ВВ; 4 – сердечник-линза; 5 – детонатор

1.2. Математическая модель УВЗ

Для совершенствования технологии ударно-волновой резки проведены теоретические исследования разрушения преград импловзивными (симметрично сходящимися) ударными волнами. Разработаны физические и математические модели, описываемые системами уравнений (1), (2).

Основные уравнения движения сплошной среды:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{dE}{dx} + \frac{dF}{dy} = 0 \quad . \quad (1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}; \quad E(Q) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{pmatrix}; \quad F(Q) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{pmatrix}.$$

$$e = \rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2).$$

Уравнение внутренней энергии и уравнение состояния:

$$\varepsilon(\rho, T) = \varepsilon_x(\rho) + \varepsilon_T(\rho, T); \quad p(\rho, T) = p_x(\rho) + \rho \gamma(\rho) c_v T, \quad (2)$$

где

$$\gamma(\rho) = \gamma_0 - \gamma_1 \frac{\rho}{\rho_0}.$$

Разрушение происходит в результате разгрузки материала за фронтом волны Маха и позволяет эффективно резать преграды толщиной до 1 500 мм и более.

2. Практический опыт применения ЗУВР

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова разработан технический проект, и совместно со «Специальным конструкторско-технологическим бюро «Технолог» (ФГУП СКТБ «Технолог») на защитных сооружениях Санкт-Петербурга выполнено с помощью ЗУВР обрушение транспортного моста весом $\approx 2\,000$ т. Результаты до и после показаны на рис. 2.



Рис. 2. Обрушение транспортного моста с применением ЗУВР:
а) мост до разрушения; б) мост после разрушения

Демонстрационные испытания ЗУВР для Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ) выполнялись на 18 испытательном полигоне инженерных войск (ИВ) (пос. Елизаветинка) по программе и методике, утвержденным командованием ИВ ВС РФ. В ходе работ были проведены сравнительные подрывы ЗУВР и инженерных кумулятивных зарядов (рис. 3, 4). Преграды соответствовали предельным характеристикам по пробивной способности кумулятивных зарядов. В результате работ получены сравнительные показатели (табл. 1, 2).



Рис. 3. Примеры выполнения работ по резке стального листа 13 мм фигурным ЗУВР

Таблица 1

Сравнительные показатели для кумулятивных зарядов и ЗУВР

Заряды	КЗУ-2	УМКЗ	СЗ-1Э	ЗУВР
Удельный расход, г/см ²	118,2	68,4	7,7	2,9
Уменьшение массы ЗУВР	в 40,8 раз	в 23,6 раз	3,7 раз	–

**Рис. 4. Перебитие бетонного блока толщиной 520 мм с помощью ЗУВР**

Таблица 2

Сравнительные показатели для кумулятивного заряда и ЗУВР

Заряды	ЛКЗ-80	КЗУ	ЗУВР
Удельный расход, г/см ²	1,2	4,6	0,1
Уменьшение массы ЗУВР	в 12 раз	в 46 раз	–

На острове Новая Земля инженерной службой 6 армии Военно-воздушных сил и противовоздушной обороны по методике БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова выполнено взрывное обрушение аварийной стрелы подъемного крана высотой 80 м (рис. 5), при этом официально установлен рекорд России № 00828. Применение ЗУВР позволило снять риски ЧС в порту «Новая Земля» от воздействия ударных волн и осколочного воздействия на работу коммуникаций и боеготовность порта в целом.



Рис. 5. Обрушение стрелы крана с применением ЗУВР

Примерами выполнения экспериментальных работ с применением импловзивных ударных волн взрыва приведены на рис. 6–8. Технология позволяет вести взрывные работы в стесненных условиях и пожароопасных объектах. Снижение массы заряда на метр реза конструкций и отсутствие запреградного действия повышает безопасность взрывных работ.



Рис. 6. Разрушение конструкции самолета с применением ЗУВР



Рис. 7. Разрушение трака бронированной машины с применением ЗУВР

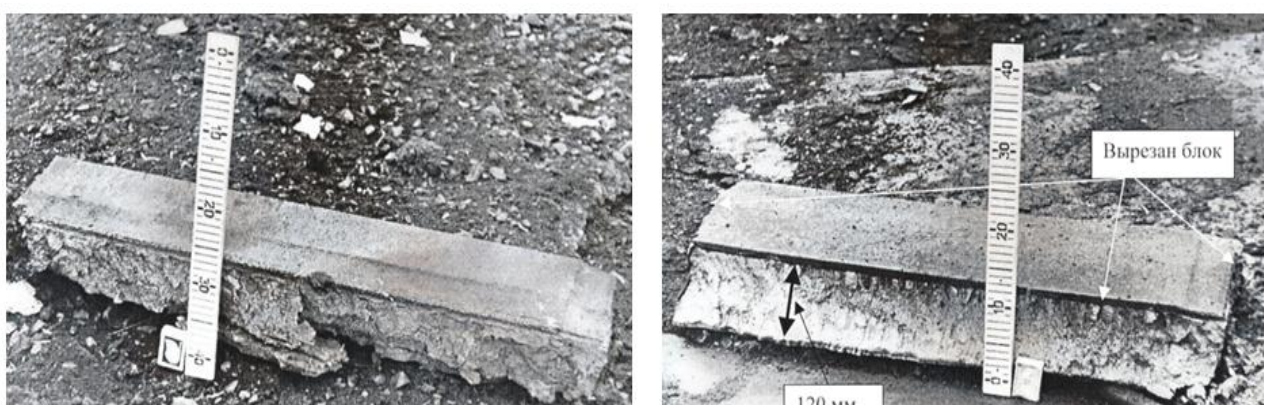


Рис. 8. Разделка металлоконструкции с применением ЗУВР

В ходе испытаний зарядом ЗУВР под водой было вырезано отверстие в стальной трубе. Длина реза составила 2 400 мм. Расход ВВ составил 600 г. На рис. 9 представлен образец, полученный после применения ЗУВР под водой, толщина стенки трубы – 10 мм.



Рис. 9. Разрушение (резка) стальной трубы под водой

3. Сравнение с аналогами промышленных образцов

В промышленности имеются линейка шнуровых кумулятивных зарядов (табл. 3) [9] от производителей ФГУП «ГосНИИ «Кристал» (г. Дзержинск) и ФГУП «СКТБ «Технолог» (Санкт-Петербург).

Заряды представляют собой эластичные шнуры с продольной параболической кумулятивной выемкой, облицованной металлопластиком. Металлопласт применяется для облицовки вещества на полимерной основе, содержащее значительное (до 85 %) порошкообразного железа, а также и ВВ, обладающее свойством эластичности, представлен на рис. 10 а, на рис. 10 б показан вариант дополнительного приспособления для инициирования заряда.

Таблица 3

Основные характеристики промышленных зарядов для резки конструкций

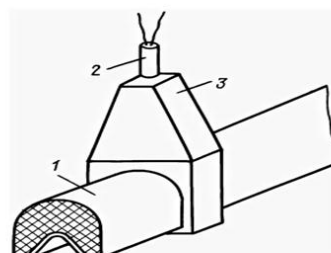
Тип заряда	Масса ВВ, кг	Размеры, мм			Эффективность действия		
		длина	высота	ширина	сталь	алюминий	ж/б
Алмаз-4	15 г/м	5 500	4	5	2 мм	4 мм	по дереву – 20 мм
Алмаз-8	45 г/м	3 000	8	9	5 мм	по дереву – 50 мм	
ШКЗ-1	65±15 г/м	1–30 м	∅9±1,5	ВВ – Г	4	8	
ШКЗ-2	130±20 г/м	1–30 м	∅13±1,5	– « –	7	14	
ШКЗ-3	240±25 г/м	1–30 м	∅17±1,5	– « –	11	22	
ШКЗ-4	340±30 г/м	1–30 м	∅21±2,0	– « –	15	30	
ШКЗ-5	520±35 г/м	1–30 м	∅26±2,0	– « –	19	28	
ШКЗ-6	730±40 г/м	1–30 м	∅32±2,5	– « –	25	50	

Основными техническими недостатками способа резки шнуровыми зарядами:

- способ не позволяет осуществить резку крупногабаритных толстостенных конструкций с толщиной стенки 30–100 мм и более;
- способ и заряд не позволяет осуществить резку с высоким качеством поверхности реза для последующего монтажа и сварки;
- способ и заряд не позволяет осуществить резку под водой;
- установка зарядов на конструкцию требует дополнительных приспособлений для выдерживания фокусных расстояний, обеспечивающих устойчивое формирование струйных течений в теле преграды и, чем больше калибр применяемого заряда, тем сложнее решается задача;
- требуется дополнительное устройство для гарантированного инициирования.



а)



б)

Рис. 10. а – ШКЗ; б – вариант дополнительного приспособления для инициирования заряда ШКЗ:
1 – заряд ШКЗ; 2 – промежуточный заряд ВВ в корпусе; 3 – электродетонатор

Заряды производятся из эластичного ВВ на основе гексогена, но конструктивные характеристики и состав ВВ более сбалансирован в зарядах «Алмаз» производителя ФГУП «СКТБ «Технолог», где в качестве ВВ применен «Эластит 15». В сравнении «Алмаз-8» и ШКЗ-1 при равных габаритах работоспособность «Алмаз-8» выше на 20–25 % при одновременном снижении массы ВВ 25–30 %. В зарядах ЗУВР и применено ВВ «Эластит 15» ТУ 7276-418-05121441-201.

Основные проблемы шнуровых зарядов решены в способе с применением имплозивных ударных волн взрыва, где в качестве инструмента используется ЗУВР.

Производство ЗУВР освоено ФГУП «СКТБ «Технолог» (Санкт-Петербург) [7, 8]. Заряды выпускаются в двух типоразмерах согласно ТУ 20.51.12-001-02066374-2020. Заряды рассчитаны на разрушение 10 мм и 30 мм конструкционной стали, проходят этап контрольных и приемочных испытаний для разрешения на постоянное применение в соответствии со ст. 3 Технического регламента Таможенного союза 028/2012 и ст. 6 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности от 3 декабря 2020 г. № 494 [9, 10].

Удлиненный заряд ВВ ЗУВР (рис. 11) выполнен в форме монолитного желоба, полость которого симметрична оси и заполнена инертной вставкой, со стороны, противоположной стороне с полостью, выполнены скругления краевых частей и канавка с возможностью размещения детонирующего шнура, канавка выполнена с закраинами с возможностью фиксации в канавке детонирующего шнура, при этом кратчайшее расстояние между противоположными краями закраин меньше диаметра детонирующего шнура (ДШ). При этом инертная вставка выполнена с магнитным материалом (виниловый магнит), что позволяет ЗУВР крепить к ферромагнитной преграде без лишних приспособлений. Наличие канавки обеспечивает удобную установку детонатора и надежное инициирование заряда, а в фигурных зарядах повышает надежность передачи детонации с применением ДШ. ДШ, специально изготовленный из высокоскоростного ВВ, также поставляется в комплекте. В сумме используемые технические решения обеспечивают высокую технологичность ведения взрывных работ, надежность и качество.

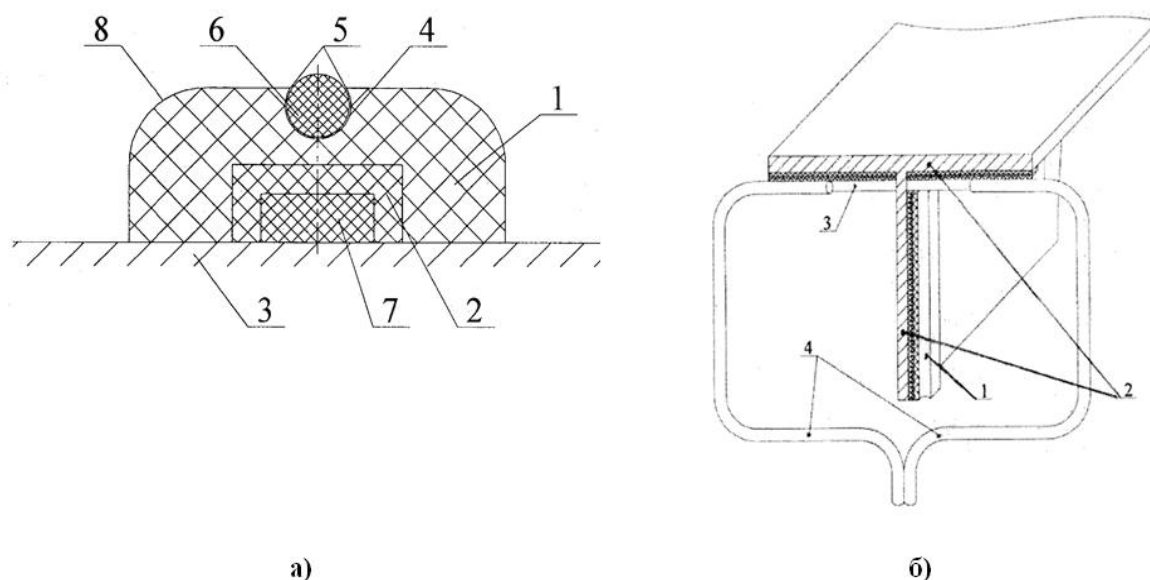


Рис. 11. а – ЗУВР: 1 – ВВ «Эластит-15»; 2 – инертная вставка; 3 – преграда; 4 – канавка; 5 – закраины для фиксации детонатора и ДШ; 6 – ДШ; 7 – виниловый магнит; 8 – скругления в краевых частях; б – вариант крепления ЗУВР на конструкции: 1, 3 – ЗУВР; 2 – металлоконструкция; 4 – ДШ

Из представленных испытаний наглядно видны преимущества резки (разрушений) преград, материалов с применением ЗУВР: значительно снижен расход ВВ, снижено воздействие ударных волн, практически отсутствует запреградное действие взрыва, значительно улучшена технология применения по сравнению с шнуровыми зарядами и расширена область применения, все это положительно скажется на спасательных работах при ЧС.

Но самое большое достоинство способа – возможность выполнения взрывных работ под водой, на глубинах до 6 000 м, аналогов для работы под водой нет.

Заключение

В качестве выводов можно отметить, что резка с помощью ЗУВР по сравнению с резкой другими видами зарядов обладает рядом преимуществ, которые могут быть использованы в интересах решения задач при ЧС:

- имеет расход ВВ в 2 ... 6 раз ниже при разрушении стальных конструкций большой толщины (до 200 мм и более);
- не изменяет структуру и состав металла в области разрушения;
- исключает образование высокоскоростных осколков и обладает минимальным запреградным воздействием ударных волн при оптимальной (минимально-возможной) величине заряда;
- допускает работу с преградами, имеющими сложный рельеф поверхности (шар, конус, цилиндр и их производные) с минимальным радиусом кривизны благодаря небольшому сечению и выбору эластичного материала заряда ВВ;
- допускает работу под водой, в том числе на глубинах до 6 000 м;
- допускает работу как с готовыми (заводскими) ЗУВР, так и изготовление зарядов необходимого размера и формы из штатных пластичных ВВ на месте производства работ, без применения специального оборудования;
- ударно-волновая резка пород с использованием билинейных зарядов, реализующих резку волнами Маха, позволит существенно снизить расход взрывчатых материалов и время проведения работ;
- технологичность и простота применения, не требует дополнительного оборудования, что обеспечивает высокий темп выполнения задач.

Список источников

1. Физика взрыва: в 2-х т. / под. ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. М., 2004.
2. Михайлов Н.П. Основы математического моделирования процессов взрыва и удара: учеб. СПб.: Балт. техн. гос. ун-т, 2012. 202 с.
3. К вопросу эффективной ликвидации ЧС природного характера на основе инновационных технологий ударно-волновой резки / С.И. Дорошенко [и др.] // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междун. уч. Воронеж, 2014. С. 241-244.
4. Михайлов Н.П., Дорошенко С.И., Бригадин И.В. Совершенствование технологии резки, сварки и упрочнения металлов // Взрывное дело. 2013. № 109/67. С. 101–117.
5. Ударно-волновая резка массивных стальных конструкций / Н.П. Михайлов [и др.] // Вопросы оборонной техники. 2012. № 5-6. С. 55–60.
6. Развитие технологии разрушения пород импловивными ударными волнами / Н.П. Михайлов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. С. 313–320.
7. Заряд для разрезания твердых материалов: пат. 2701600 Рос. Федерация: МПК В21D 26/08 В26F 3/00 F42B 1/00 F42B 3/08; патентообладатель Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ») (RU); заявл. 03.07.2017; опубл. 30.09.2019;

8. Удлиненный заряд взрывчатого вещества: пат. 204402 Рос. Федерация: МПК F42B 1/04 F42B 3/093 B21D 26/08 B26F 3/00; заявл. 19.05.2020; опубл. 24.05.2020; авторы и патентообладатели: Дорошенко С.И. и др.

9. Управление взрывом средства взрывания. Взрывобезопасность: учеб. пособие / С.И. Дорошенко [и др.]. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 100 с.

10. Взрыв и взрывные явления, взрывчатые вещества и взрывные устройства. Взрывобезопасность: учеб. пособие / С.И. Дорошенко [и др.]. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 100 с.

References

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

2. Mihajlov N.P. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya processov vzryva i udara: ucheb. SPb.: Balt. tekhn. gos. un-t, 2012. 202 s.

3. K voprosu effektivnoj likvidacii CHS prirodnoho haraktera na osnove innovacionnyh tekhnologij udarno-volnovoj rezki / S.I. Doroshenko [i dr.] // Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij: materialy III Vseros. nauch.-prakt. konf. s Mezhdun. uch. Voronezh, 2014. S. 241–244.

4. Mihajlov N.P., Doroshenko S.I. Brigadin I.V. Sovershenstvovanie tekhnologii rezki, svarki i uprochneniya metallov // Vzryvnoe delo. 2013. № 109/67. S. 101–117.

5. Udarno-volnovaya rezka massivnyh stal'nyh konstrukcij / N.P. Mihajlov [i dr.] // Voprosy oboronnoj tekhniki. 2012. № 5-6. S. 55–60.

6. Razvitie tekhnologii razrusheniya porod implozivnymi udarnymi volnami / N.P. Mihajlov [i dr.] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. S. 313–320.

7. Zaryad dlya razrezaniya tverdyh materialov: pat. 2701600 Ros. Federaciya: MPK B21D 26/08 B26F 3/00 F42B 1/00 F42B 3/08; patentoobladatel' Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «VOENMEKH» im. D.F. Ustinova (BGTU «VOENMEKH») (RU); zayavl. 03.07.2017; opubl. 30.09.2019;

8. Udlinennyj zaryad vzryvchatogo veshchestva: pat. 204402 Ros. Federaciya: MPK F42B 1/04 F42B 3/093 B21D 26/08 B26F 3/00; zayavl. 19.05.2020; opubl. 24.05.2020; avtory i patentoobladateli: Doroshenko S.I. i dr.

9. Upravlenie vzryvom sredstva vzryvaniya. Vzryvobezopasnost': ucheb. posobie / S.I. Doroshenko [i dr.]. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 100 s.

10. Vzryv i vzryvnye yavleniya, vzryvchatye veshchestva i vzryvnye ustrojstva. Vzryvobezopasnost': ucheb. posobie / S.I. Doroshenko [i dr.]. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 100 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.05.2023; одобрена после рецензирования: 22.08.2023;
принята к публикации: 28.08.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 23.05.2023; approved after review: 22.08.2023;
accepted for publication: 28.08.2023

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, 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., 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>