
СНИЖЕНИЕ РИСКОВ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧС

Научная статья

УДК 550.344; 550.348; 622.235; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-8-22

РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЗАРЯДАМИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ РЕЗКИ ПОД ВОДОЙ В 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 материалов. Приводится сравнение технологий ударно-волновой, кумулятивных и накладных фигурных зарядов для резки материалов. Показано существенное сокращение расхода взрывчатого вещества и повышение эффективности при ударно-волновой резке с одновременным снижением безопасных расстояний. Решаются задачи подводных взрывов в интересах спасательных работ при чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: ударно-волновой заряд, заряд взрывчатого вещества, математическая модель, волна Маха, эксперимент, подводный взрыв

Для цитирования: 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.

Scientific article

DESTRUCTION OF MATERIALS BY SHOCK WAVE CUTTING CHARGES UNDER WATER 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. 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

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

For citation: Doroshenko S.I., Nefedev S.A., Malykh V.A. Destruction of materials by shock wave cutting charges under water in emergency situations // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 4 (68). P. 8–22. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-8-22.

Введение

Водный транспорт многие годы используется с целью перевозки крупных грузов. Это позволяет доставлять контейнеры с продовольствием и прочими необходимыми товарами на огромные расстояния с минимальными затратами. Наряду с этим водный транспорт используется для пассажирских перевозок. Сегодня более 60 % мирового грузооборота совершается по морю. На морских просторах по приблизительным расчетам находятся более 60 тыс. судов, рассчитанных на перевозку крупных грузов, а также чуть более 20 млн мелких судов, выполняющих разнообразные задачи (прогулочные катера, парусные яхты, лодки). Каждый день в акватории пребывают 30 тыс. судов, а общая численность экипажей на них превышает 1 млн чел.

Статистика аварий водного транспорта выделяет основные причины происшествий на воде:

– природный фактор – достаточно часто виновником происшествий становится стихия. Это штормы, ураганы, туман, лед. Сюда также относят и столкновение судна с находящимися на пути следования айсбергами, подводными скалами;

– человеческий фактор – ошибки при проектировании и последующей эксплуатации. К чрезвычайным ситуациям (ЧС) могут привести неверные капитанские решения или ошибочные действия членов экипажа, халатность при проведении плановых технических осмотров и ремонтов, перегруз свыше допустимой нормы.

Статистика аварий водного транспорта, по данным Регистра судоходства Ллойда, содержит информацию касательно ежегодной гибели 300–400 судов и аварий на 8 тыс. судах. Количество человеческих жертв также велико. За первое полугодие 2023 г. в мире потерпели крушение 77 судов, при которых погибли 848 чел. Пять крупнейших катастроф за 20 лет унесли 3 551 жизнь. В табл. 1 представлены резонансные кораблекрушения с 1939 по 2020 г. [1].

По статистике самым безопасным видом транспорта признан железнодорожный. На втором месте по безопасности – самолеты. Самым опасным транспортом признаны мотоциклы и мопеды. Сведения статистики представлены на рис. 1.

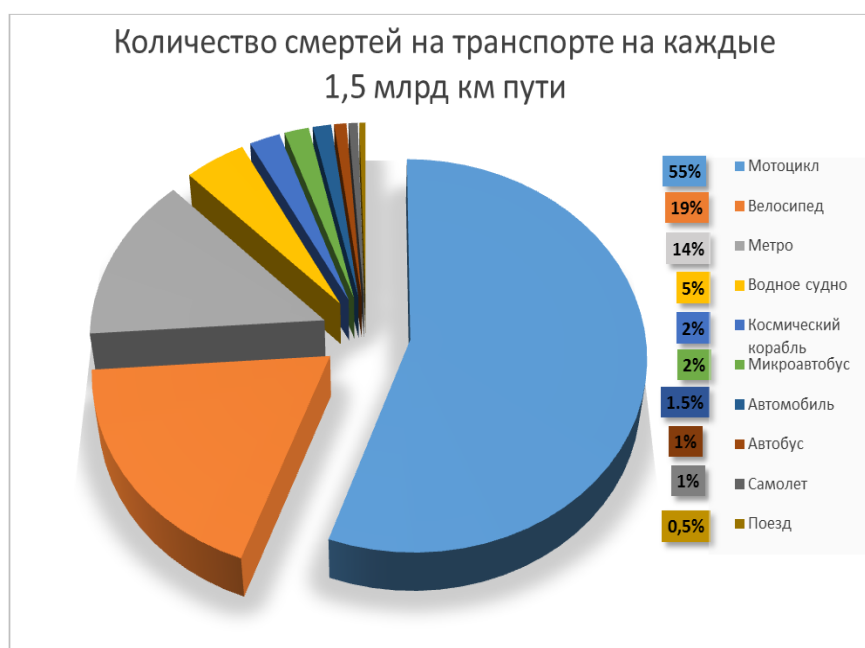


Рис. 1. Диаграмма смертности на различных видах транспорта

Таблица 1

Крупнейшие катастрофы (кораблекрушения)

Дата	Судно, место	Кол-во погибших
12.12.1939	«Индибирка», пароход, о. Хоккайдо, при шторме	745
01.09.1948	«Победа», теплоход, г. Рига, пожар	42
13.08.1950	«Маяковский», теплоход, г. Рига, перевернулся	147
05.06.1983	«Александр Суворов», теплоход, р. Волга, столкновение с мостом	176–600
31.08.1986	«Адмирал Нахимов», Сочи – Одесса	432
20.09.2002	«Джука», паром, у берегов Гамбии	1 863
02.11.2004	«Ароса» и «Вест», сухогрузы, Японское море	32
21.06.2008	«Принцесса звезд», паром, побережье о. Сибуян (арх. Ромблон)	805
10.07.2011	«Булгария», теплоход, Казань – Болгар, перевернулся	122
16.04.2014	«Севоль», паром, юго-западное побережье Корейского п-ова	313
02.04.2015	«Дальний восток», траулер, Охотское море	69
01.06.2015	«Звезда востока», теплоход, р. Янцзы в КНР	442
07.11.2016	«Новоульяновск», траулер, Охотское море	84
25.01.2018	«Восток», рыболовное судно, Японское море	20

Статистика аварий водного транспорта также имеет данные о гибели подводных лодок. За последние 60 лет в результате крушений военных судов погибло большое количество членов экипажа (табл. 2) [1].

Таблица 2

Аварии водного транспорта (включая подводные лодки) на ВМФ России и СССР

Дата	Судно, место	Кол-во погибших
30.10.1950	«Ворошиловск», Тихоокеанский флот (ТОФ)	20
01.12.1952	С-117, Японское море	52
29.10.1955	«Новороссийск», г. Севастополь	617
21.11.1956	М-200, Эстония	28
26.09.1957	М-256, Галинский залив	35
27.01.1961	С-80, Баренцево море	68
11.01.1962	Б-37, С-350, Военно-морская база Северного флота	122
08.09.1967	К-3, Норвежское море	39
08.03.1968	К-129, Гавайский остров	98
12.04.1970	К-8, Бискайский залив	52
14.06.1973	К-56, ТОФ	20

Дата	Судно, место	Кол-во погибших
1973	К-56, залив «Петра Великого»	27
30.08.1974	Большой противолодочный корабль «Отважный», Черноморский флот	24
21.10.1981	С-178, ТОФ	32
06.10.1986	К-219, Саргасово море	40
16.04.1987	МРК «Муссон», ТОФ	39
07.04.1989	К-278, Норвежское море	42
12.08.2000	«Курск» (К-141), Северный флот, Баренцево море	118
08.11.2008	«Нерпа», Японское море	20

По оценке специалистов Научно-исследовательского института (спасания и подводных технологий) Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия», за последние 20 лет доля опрокинувшихся кораблей и судов составила 17 % всех морских аварий. На перевернувшиеся суда пришлось почти 50 % всех погибших в результате аварий на море. Большое число жертв именно при опрокидывании корабля объясняется внезапностью и невозможностью быстро спасти людей с его борта. Люди массово гибнут как в морских, так и в речных акваториях. Яркий пример – гибель 122 чел. с теплохода «Булгария» на р. Волге в 2011 г. Судно перевернулось за считанные секунды, и люди не смогли выбраться на поверхность. В 2015 г. лайнер «Звезда Востока» перевернулся на китайской р. Янцзы, погибло 442 чел. Из всех 454 чел. спастись удалось только 12. Большинство людей просто не успели подняться на верхнюю палубу и оказались запертыми в отсеках. Настоящая катастрофа, унесшая жизни 4 386 чел., случилась в 1987 г. у берегов Филиппин. В результате столкновения парома «Донья Пас» и танкера с бензином произошло разрушение судов и пролив нефтепродуктов в море. Бензин загорелся, и тысячи людей не могли прыгнуть в воду. Те же пассажиры, которые оказались в воде, были растерзаны акулами. Спасти удалось только 24 участникам тех событий.

Во время миграции беженцев из Ближнего Востока люди тонут тысячами. Только в 2015 г. у берегов Италии на из одном кораблей, столкнувшихся с торговым судном, погибло почти 1 000 чел. По словам выжившего, многие оказались заперты в нижних отсеках. 14 июня 2023 г. судно с мигрантами перевернулось и затонуло в Ионическом море у берегов Пилоса (Греция), более 600 чел. погибло.

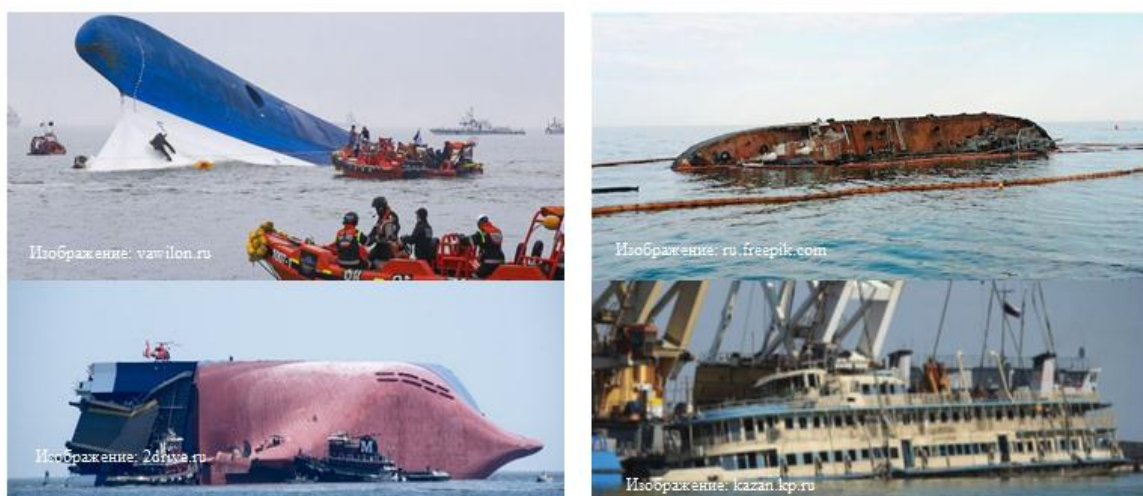


Рис. 2. Катастрофы и аварии на море

Методы спасения людей из опрокинувшегося корабля

При опрокидывании судов некоторые отсеки не полностью заполняются водой. Благодаря герметичности отсеков судна, в верхней части может образоваться воздушная подушка (рис. 2). Если находившиеся там люди не успели своевременно покинуть аварийное судно и не имеют возможности самостоятельно покинуть его после опрокидывания, то в течение некоторого времени они могут находиться в воздушной подушке в ожидании помощи. В большинстве случаев находящиеся в затопленных помещениях люди лишены возможности существенно повлиять на процесс собственного спасения. На сегодняшний момент спасение людей из перевернувшегося судна представляет собой довольно сложную и трудоемкую операцию с большой степенью риска в связи с отсутствием приемлемых средств и способов спасения.

Современные корабли и суда не имеют специальных приспособлений для эвакуации экипажа через днище в том случае, если судно легло на бок или перевернулось. В этих случаях спасательные операции предполагают изучение конструктивных особенностей судна и прорезание эвакуационных отверстий в местах, где это можно сделать проще и быстрее всего.

Существующие применяемые способы и устройства спасения людей из опрокинувшегося корабля предусматривают применение водолазных работ [2]. Их активно применяли, например, в ходе гибели линкора «Новороссийск» в г. Севастополе [2]. При этом операция по спасению предусматривает:

- подход спасательного корабля к опрокинувшемуся и обеспечение надежного удержания его на минимально возможном, безопасном расстоянии;
- получение объективных данных о наличии и местонахождении живых людей в отсеках погибающего корабля;
- разработку плана, маршрута движения и оснащения водолазов с учетом прогноза минимально возможного оставшегося времени пребывания корабля на плаву;
- переход лидирующей группы (2–3 чел.) водолазов по заданному маршруту внутри корабля до местонахождения людей с выставлением постов (2–3 чел.) из обеспечивающих водолазов на сложных участках перехода;
- передачу спасаемым доставленных водолазами дыхательных аппаратов, инструктаж и включение в них спасаемых;
- поочередное выведение с сопровождением спасаемых через затопленные отсеки корабля на спасательное судно.

Способ спасения людей из опрокинувшегося корабля путем прорезания в днищевых корпусных конструкциях больших отверстий и выведение через них людей описан в сборнике «Катастрофы на море»: Н.П. Муру. «Гибель и подъем линкора «Новороссийск». (СПб.: Судостроение, 1998. 392 с. (С. 267, 276) [2]. Способ чрезвычайно опасен для жизни водолазов, так как прогнозировать реальную продолжительность нахождения опрокинувшегося корабля на плаву проблематично. Кроме того, передвижение водолазов в отсеках опрокинувшегося корабля является весьма сложным и опасным.

Вероятность спасения людей через вырезанные отверстия в днищевых корпусных конструкциях также мала, так как прорезание отверстий с применением имеющихся технологий довольно трудоемкая и продолжительная операция, которая может вызвать стравливание воздушной подушки и потерю плавучести кораблем. Герметичная установка шлюзовой камеры над планируемым местом выреза отверстия для предотвращения стравливания «подушки» при волнении моря проблематична и опасна. А работы под водой еще более затратные по времени.

Для решения данных задач в системе применения взрыва в ЧС должны иметься надежные, эффективные, простые в применении средства, которые могут обеспечить одновременное, практически мгновенное создание больших отверстий. Но имеющиеся

специальные заряды для резки преград взрывом (кумулятивы) под водой не работают, вследствие чего применяются накладные фигурные (удлиненные) заряды. При этом требуется выполнять затратные по времени мероприятия по формированию и креплению зарядов. В комплекты удлиненных зарядов средства крепления не входят. Возникающие ударные волны и осколочное воздействие от разрушения преграды, в том числе запреградное, при использовании таких фугасов могут травмировать спасаемых.

Для решения сложнейших спасательных работ под водой в ЧС рассмотрим результаты применения инновационной технологии – ударно-волновой резки взрывом. В результате теоретических и экспериментальных исследований в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ») с участием специалистов Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России разработаны физические и математические модели, описываемые системами уравнений, для работ под водой, создана конструкция заряда ударно-волновой резки (ЗУВР) [3–5, 6].

Главное достоинство способа (не имеющего аналогов в мире) – возможность выполнения взрывных работ под водой, на глубинах до 6 000 м, альтернативы для работы под водой нет. Для разрушения преграды под водой с обеспечением возможности проникновения спасателей при ЧС в настоящее время потребуется мощный сосредоточенный заряд или специально изготовленный фигурный заряд (что технологически сложнее), при этом в обоих случаях за преградой будут развиваться избыточные давления ударной волны, в фигурных зарядах они будут несколько ниже в сравнении с сосредоточенным, кроме того, в области за преградой будет иметь место осколочное воздействие от разрушенной преграды.

В научно-аналитическом журнале «Проблемы управления рисками в техносфере» № 3 (67)–2023 в статье «Разрушения пород и материалов зарядами на основе технологии ударно-волновой резки в чрезвычайных ситуациях» была представлена инновационная технология, приведены теоретические основы технологии ударно-волновой резки, позволяющей в шадящем режиме вести взрывные работы по резке конструкций под водой, в том числе на больших глубинах [7]. Именно ЗУВР – инструмент технологии ударно-волновой резки – может выступить панацеей для решения сложных задач под водой, в том числе спасательных при ЧС. Учитывая тот факт, что уже имеются разработанные и испытанные два типоразмера для резки конструкций толщиной до 10 и 30 мм (в том числе разработана и изготовлена оснастка для серийного изготовления), можно говорить о создании линейки ЗУВР для различных задач. 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 ее наименьшего сопротивления плоскими трещинами.

Результаты испытания ЗУВР под водой и их обсуждение

Испытания ЗУВР под водой проводили БГТУ «ВОЕНМЕХ» и ФГУП «СКТБ «Технолог» при участии специалистов Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России и АО «НПП «Радар ммс».

При проведении испытаний определялись возможности зарядов по пробитию различных видов преград, в том числе прохождение детонационной волны в угловых соединениях макетов зарядов.

Для этого последовательно, в соответствии с табл. 3, производились подрывы зарядов в водной среде.

Порядок испытаний

№ п/п	Тип преграды	Кол-во испытаний	Кол-во зарядов, шт., (длина, мм)	Испытание
1	Стальная труба Ø530 мм и толщиной 10 мм	1	4 (600)	Испытания на пробитие преграды ЗУВР под водой
2	Стальная труба Ø530 мм и толщиной 10 мм	1	1 (600), 2 (300)	Испытания на пробитие преграды ЗУВР под водой и на прохождение детонационной волны через зазор
3	Элемент обшивки вертолета, подкрепленный силовым набором	1	2 (300)	Испытания на пробитие преграды ЗУВР под водой
4	Элемент обшивки судна из стеклопластика 10 мм	1	1 (300)	Испытания на пробитие преграды ЗУВР под водой

При подготовке зарядов к испытаниям проверялась их эластичность путем оборачивания вокруг шаблона Ø100 мм на 180°.

При разработке порядка действий при испытаниях по определению возможности зарядов по пробитию различных видов преград выставлялись зазоры между зарядами (для испытания № 2) при помощи калиброванных пластин, по временной схеме производилась крепление зарядов к поверхности преград и инициирующих устройств заряда.

Схемы проведения испытаний (укладки макетов зарядов)

Испытание № 1. Испытания на пробитие заряда ЗУВР под водой преграды (стальной трубы Ø530 мм и толщиной 10 мм). Осуществлялся квадратный рез 600х600 мм. Детонатор устанавливался в одном из углов ЗУВР (рис. 3).

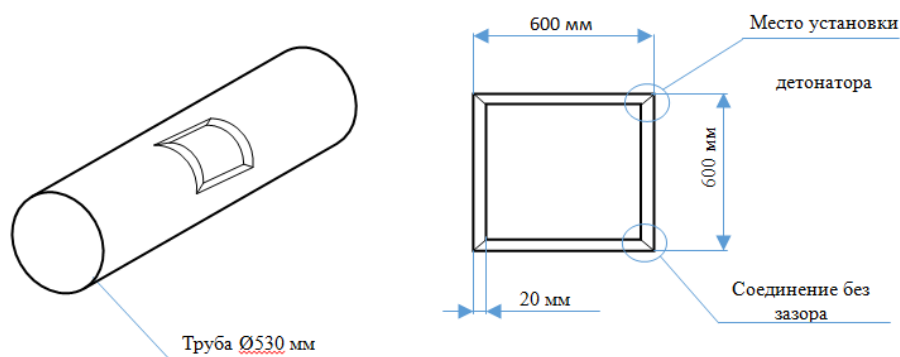


Рис. 3. Схема 1 установки зарядов

Испытание № 2. Испытания на пробитие ЗУВР под водой преграды (стальной трубы $\varnothing 530$ мм и толщиной 10 мм). Осуществляется «П»-образный рез. Зазоры между зарядами № 1 и № 2 – 1 мм, между зарядами № 2 и № 3 – 2 мм (выставлялись с помощью калиброванной пластины). Детонатор устанавливался по центру заряда № 2 (рис. 4).

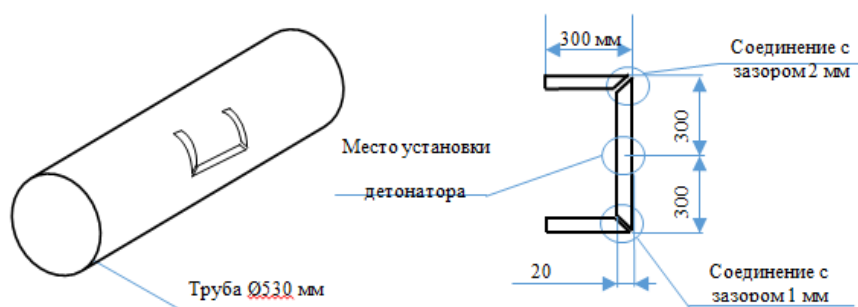


Рис. 4. Схема 2 установки зарядов

Испытание № 3. Испытания на пробитие макетом ЗУВР под водой преграды (элемента обшивки вертолета, подкрепленного силовым набором). Пробитие осуществлялось прямым зарядом (прямой рез). Детонатор устанавливался на одном из концов заряда (рис. 5).

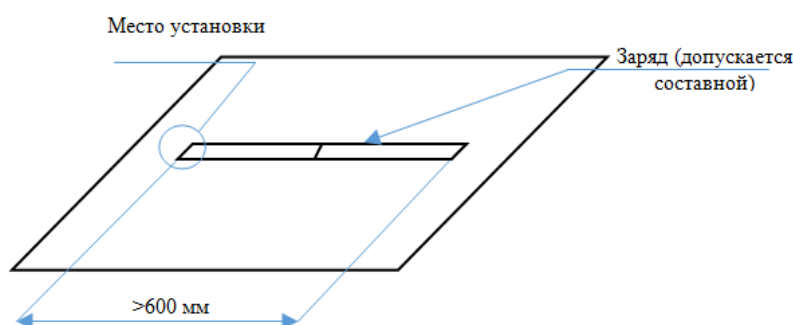


Рис. 5. Схема 3 установки зарядов

Испытание № 4. Испытания на пробитие ЗУВР под водой преграды (элемента обшивки судна из стеклопластика толщиной 10 мм). Пробитие осуществлялось прямым укороченным зарядом (прямой рез). Детонатор устанавливался в средней части заряда (рис. 6).

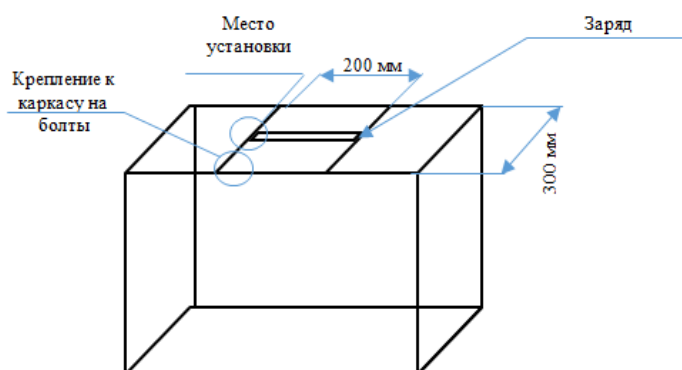


Рис. 6. Схема 4 установки зарядов

Результаты проведения испытаний

Во время проведения испытаний температура воздуха составляла 6 °С, а температура воды 8 °С.

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний

№ исп.	Глубина погружения, м	Масса ВВ, г	Расположение ВВ	Наличие зазоров между макетом заряда и преградой	Результат пробития преграды
1	0,5	588	схема 1	Зазор 1 мм (самоклеющаяся магнитная лента)	Полное пробитие, вырез «окна» в преграде
2	0,5	295	схема 2*	–	Полное пробитие и фрагментирование внешней оболочки преграды, имеется надрез силового набора на краю преграды на глубину 30 мм, остальные части силового набора были полностью пробиты и фрагментированы; детонация макетов ЗУВР распространялась через зазоры величиной 1 мм и 2 мм
3	0,5	148	схема 3	–	Полное пробитие внешней оболочки и силового набора преграды
4	0,5	74,5	схема 4	–	Полное пробитие и фрагментирование преграды

* – схема 2 была изменена, стальная труба была заменена на элемент обшивки вертолета, подкрепленный силовым набором

На рис. 7 показаны подготовленные к подрыву сборки макетов зарядов ЗУВР, закрепленные на преградах, и результаты их испытаний.

Как показали опыты, ЗУВР успешно справился с задачами, но нужно отметить, что в экспериментах применялись заряды, изготовленные по разработанным физической и математической моделям, описываемые системами уравнений, представленными в предыдущей статье [7]. В ходе изготовления зарядов для испытаний не учитывалась необходимость технологичности ведения взрывных работ с обеспечением высокого темпа (на образцах видно, что для крепления электродетонатора (ЭД) применен дополнительный детонатор из пластичного взрывчатого вещества (ВВ). В серийных образцах все эти проблемы решены [8]. Серийные образцы представлены на рис. 8.

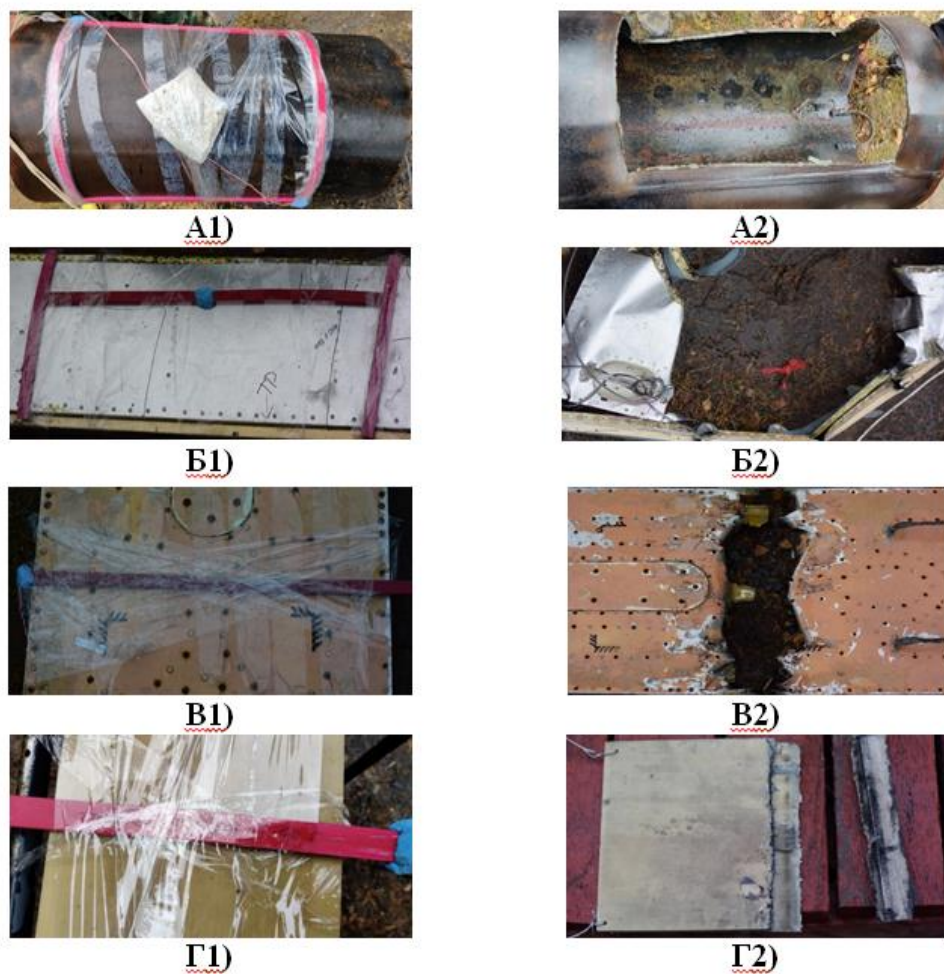


Рис. 7. Подготовка к подрыву: А1 – схема 1; Б2 – схема 2; В3 – схема 3; Г4 – схема 4;
 А2 – результат по схеме 1; Б2 - результат по схеме 2;
 В2 – результат по схеме 3; Г2 – результат по схеме 4

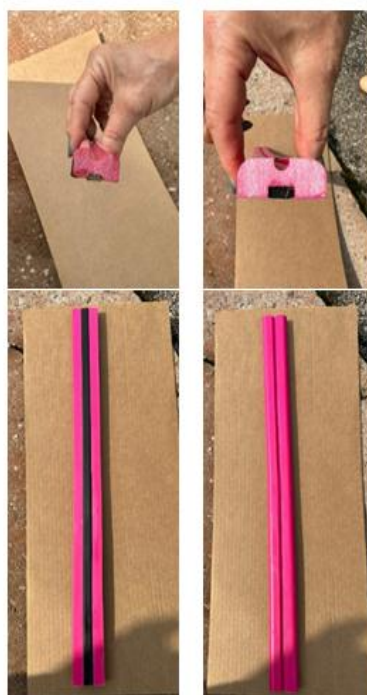


Рис. 8. Серийные образцы ЗУВР

Сравнительные показатели способов для резки взрывом под водой рассмотрим на фоне уже проведенных экспериментов, которые осуществлялись при участии специалистов БГТУ «ВОЕНМЕХ» и Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России на испытательной площадке ФГУП «СКТБ «Технолог». В ходе испытаний ЗУВР под водой было вырезано отверстие в стальной трубе периметром реза 600х600 мм (испытание № 1, рис. 5А и 6А). Длина реза составила 2 400 мм. Расход ВВ составил 600 г. Применялся первый типоразмер ЗУВР для реза преград толщиной до 10 мм.

Расчет расхода ВВ определяем для аналогичного реза контактными фигурными зарядами по формуле для перебивания листов толщиной до 20 мм [9]:

$$C = 4 \cdot 20F,$$

где C – вес заряда в граммах; F – площадь перебиваемого сечения листа по плоскости перебивания в квадратных сантиметрах; 4 – коэффициент при отсутствии подкрепления с обратной стороны заряды [9].

При использовании готовых зарядов из пластичного ВВ (пластит-4) в мягкой оболочке СЗ-6М диаметром 28 мм и длиной 1 200 мм вес ВВ – 6 кг. Понадобится четыре заряда [9]. Основные характеристики и внешний вид стандартных зарядов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Основные характеристики зарядов

Тип заряда	Общая масса, кг	Масса ВВ, кг	Габаритные размеры, мм
СЗ-1	1,4	1	65x166x126
СЗ-3	3,7	3	65x171x337
СЗ-3а*	3,7	2,8	98x142x200
СЗ-6*	7,3	5,9	98x142x395
СЗ-6м*	6,9	6	диаметр 82, длина 1 200
СЗ-4П	4,2	4	диаметр 45, длина 2 000
СЗ-1П	1,5	1	диаметр 45, длина 600

*могут применяться для взрывных работ под водой на глубинах до 10 м

Безопасные расстояния в воде для водолазов, пострадавших при ЧС, и ихтиофауны при данных подводных работах для больших зарядов ВВ рассчитываются по формуле [9]:

$$L = 250 \sqrt[3]{C},$$

где L – безопасное расстояние, м; C – вес взрывающегося заряда, кг.

Расчет для малых зарядов производится по формулам для избыточного давления во фронте Δp_ϕ и импульса фазы сжатия (i), общий вид которых предложен Р. Коулом [3, 10]:

$$\Delta p_\phi = 31995 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_3}}{r} \right)^{1,043}, \text{ кПа}; \quad (1)$$

$$i = 8986 \cdot \sqrt[3]{\omega_3} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_3}}{r} \right)^{0,964}, \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad (2)$$

где r – расстояние от места взрыва до водолаза; ω_3 – эквивалентная масса заряда ВВ, учитывающая расположение заряда и его тротильный эквивалент. Постоянные коэффициенты в представленных зависимостях определены для зарядов тротила на основе опытных данных.

Как показывают исследования, при избыточном давлении во фронте ударной волны менее 345 кПа и импульсе менее 215 Па·с повреждений организма человека не наблюдается. Безопасное расстояние будет определяться подстановкой указанных значений в зависимости (1), (2), что дает:

$$R_6 = \max \begin{cases} 77 \cdot \sqrt[3]{\omega_3}, \\ 48 \cdot (\sqrt[3]{\omega_3})^{2,037}. \end{cases}$$

При расчете эквивалентной массы заряда ω_3 необходимо учитывать тротильный эквивалент используемого ВВ и расположение заряда.

При взрыве в воде на дне водоема в расчетах ударной волны используют массу заряда, увеличенную в $2 \cdot \eta_1$ раз, где η_1 – коэффициент, учитывающий акустическую жесткость дна (табл. 6).

Таблица 6

Значения коэффициента η_1 для некоторых грунтов

Тип грунта	η_1
Скальный грунт	0,85...0,90
Глинистый грунт	0,65...0,70
Песчаный грунт	0,55...0,60

При взрыве на поверхности водоема (рис. 9) расчеты параметров ударной волны в направлении нормали ($\varphi=0$) проводят при массе заряда, равной $(0,3 \dots 0,35)\omega_3$, что позволяет учесть волну разгрузки, понижающую давление в ударной волне.

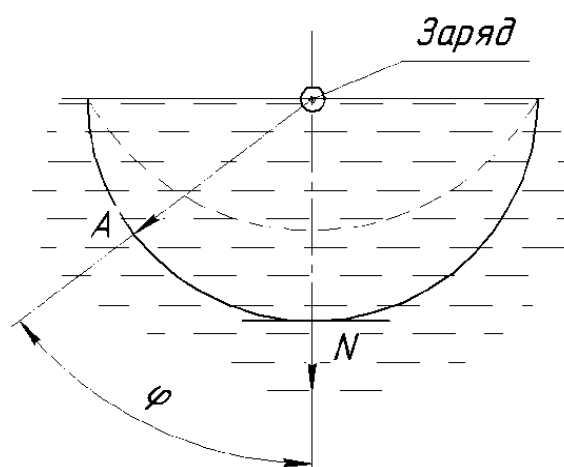


Рис. 9. Взрыв заряда на поверхности водоёма

При работах с зарядами малых масс наиболее опасным фактором для человека является избыточное давление, график зависимости безопасного расстояния от массы ВВ представлен на рис. 10.

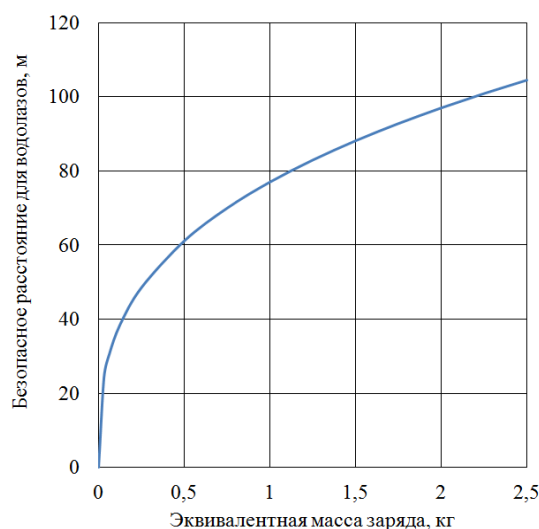


Рис. 10. Безопасное расстояние для водолазов

При работе с зарядами до 100 г водолазы должны находиться на расстоянии не менее 40 м. Для испытанной эквивалентной массы заряда, равной 600 г, безопасное расстояние составляет не менее 65 м. Масса ВВ ЗУВР меньше в 32 раза по сравнению с контактным фигурным зарядом и в 40 раз – при применении готового СЗ-6М. Расчетные показатели, приведенные в табл. 7 для ЗУВР, подтверждены экспериментом. При этом следует отметить, ЗУВР для работы с большими толщинами 200 мм и более (описание в предыдущей статье [7]) может быть быстро изготовлен промышленностью для специальных работ, что обеспечивается простотой конструкции заряда. Кроме того, возможно и разовое изготовление ЗУВР на месте ведения работ с применением пластичных ВВ. Соотношение по массе ВВ для таких зарядов будет значительно больше в сравнении с приведенными.

Таблица 7

Расчетные показатели зарядов

Наименование заряда	Масса ВВ, кг	Безопасные расстояния, м	Соотношение по массе ВВ	Соотношение по безопасным расстояниям
СЗ-6М	24	725	40	11
Фигурный	19,2	675	32	10
ЗУВР-1	0,6	65	–	–

Заключение

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

- имеет расход ВВ в 30...40 раз ниже при разрушении стальных конструкций для подводных работ;

- исключает образование высокоскоростных осколков и обладает минимальным запреградным воздействием ударных волн при оптимальной (минимально возможной) величине заряда;

- готов к работам под водой, в том числе на глубинах до 6 000 м (в ЗУВР применено ВВ «Эластит 15» ТУ 7276-418-05121441–201, содержит каучук);

- технологичность и простота применения, не требует дополнительного оборудования, что обеспечивает высокий темп выполнения задач;
- может обеспечить мгновенное проделывание необходимого количества больших отверстий одновременно, что не допустит стравливания «подушки» до начала эвакуационных работ;
- значительно снижает вредное воздействие на экологию и, в частности, на ихтиофауну, особенно при специальных работах с большими толщинами.

Список источников

1. Аварии кораблей и судов ВМФ РФ и СССР; Последнее погружение, аварии и катастрофы подводных лодок в СССР и России; Аварии на речном транспорте России в 2001–2014 гг.; Хронология крушения морских пассажирских судов с 2000 г.; Аварии кораблей НАТО; Хронология аварий и крушений российских рыболовецких судов // ТАСС-Досье/Происшествия. URL: <https://tass.ru/tass-dos-e-proisshestiya/> (дата обращения: 11.09.2023).
2. Муру Н.П. Гибель и подъем линкора «Новороссийск» / Катастрофы на море: сб. СПб.: Судостроение, 1998.
3. Физика взрыва / под. ред. Л.П. Орленко: в 2-х т. Изд. 3-е, перераб. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 832 с.
4. Михайлов Н.П. Основы математического моделирования процессов взрыва и удара: учеб. СПб.: Балт. техн. гос. ун-т, 2012. 202 с.
5. 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: сб. статей III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Воронеж: Воронежский ин-т ГПС МЧС России, 2014. С. 241–244.
6. Михайлов Н.П., Дорошенко С.И., Бригадин И.В. Совершенствование технологии резки, сварки и упрочнения металлов // Взрывное дело. 2013. № 109/67. С. 101–117.
7. Дорошенко С.И., Нефедьев С.А., Малых В.А. Разрушение пород и материалов зарядами на основе технологии ударно-волновой резки при чрезвычайных ситуациях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3. С. 17.
8. Заряд для разрезания твердых материалов: пат. на изобретение 2701600 С2 Рос. Федерация / Михайлов Н.П. [и др.]; патентообладатель БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова»; заявл. 03.07.2017; зарег. в Гос. реестре 30.09.2009.
9. Руководство по подрывным работам. М.: МО СССР (РПР-69), 1958. С. 23, 35, 142, 145. 349 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. С. 84–88.

References

1. Avarii korablej i sudov VMF RF i SSSR; Poslednee pogruzhenie, avarii i katastrofy podvodnyh lodok v SSSR i Rossii; Avarii na rechnom transporte Rossii v 2001–2014 gg.; Hronologiya krusheniya morskikh passazhirskih sudov s 2000 g.; Avarii korablej NATO; Hronologiya avarij i krushenij rossijskikh ryboloveckikh sudov // TASS-Dos'e/Proisshestiya. URL: <https://tass.ru/tass-dos-e-proisshestiya/> (data obrashcheniya: 11.09.2023).
2. Muru N.P. Gibel' i pod'em linkora «Novorossiysk» / Katastrofy na more: sb. SPb.: Sudostroenie, 1998.
3. Fizika vzryva / pod. red. L.P. Orlenko: v 2-h t. Izd. 3-e, pererab. M.: FIZMATLIT, 2004. 832 s.

4. Mihajlov N.P. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya processov vzryva i udara: ucheb. SPb.: Balt. tekhn. gos. un-t, 2012. 202 s.
5. K voprosu effektivnoj likvidacii CHS prirodnogo haraktera na osnove innovacionnyh tekhnologij udarno-volnovej rezki / S.I. Doroshenko [i dr.] // Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij: sb. statej III Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Voronezh: Voronezhskij in-t GPS MCHS Rossii, 2014. S. 241–244.
6. Mihajlov N.P., Doroshenko S.I., Brigadin I.V. Sovershenstvovanie tekhnologii rezki, svarki i uprochneniya metallov // Vzryvnoe delo. 2013. № 109/67. S. 101–117.
7. Doroshenko S.I., Nefed'ev S.A., Malyh V.A. Razrushenie porod i materialov zaryadami na osnove tekhnologii udarno-volnovej rezki pri chrezvychajnyh situacijah // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 3. S. 17.
8. Zaryad dlya razrezaniya tverdyh materialov: pat. na izobrenenie 2701600 C2 Ros. Federaciya / Mihajlov N.P. [i dr.]; patentoobladatel' BGTU «VOENMEKH im. D.F. Ustinova»; zayavl. 03.07.2017; zareg. v Gos. reestre 30.09.2009.
9. Rukovodstvo po podryvnyim rabotam. M.: MO SSSR (RPR-69), 1958. S. 23, 35, 142, 145, 349 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. S. 84–88.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 25.09.2023; одобрена после рецензирования: 13.11.2023; принята к публикации: 16.12.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 25.09.2023; approved after review: 13.11.2023; accepted for publication: 16.12.2023

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>