

канд. физ.-мат. наук, доцент **Тарковский В.В.** / **Tarkovskiy V.V.**, Ph.D.¹

кандидат физ.-мат. доцент **Василевич А.Е.** / **Vasilevich A.E.**, Ph.D.¹

инж. **Б Балькин А.С.** / **Balykin A.S.**, Eng.¹

магистр. **Стахейко П.Н.** / **Stakheyko P.N.**, Eng.¹

магистр **Леванович А.В.** / **Levanovich A.V.**, M.Sc.²

Сакович Э.И. / **Sakovich E.I.**²

Филипович С.М. / **Filipovich S.M.**²

кандидат техн. наук **Скрипко А.Н.** / **Skripko A.N.**, Ph.D.³

Przyjęty/Accepted/Принята: 12.08.2015;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 10.11.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2015;

Мощное, компактное электрогидравлическое устройство для раскалывания объектов из бетона и горных пород при проведении спасательных работ⁴

A powerful and Compact Electro-hydraulic Device for Demolishing Concrete Structures and Mining Rocks during Rescue Operations

Kompaktowe narzędzie elektrohydrauliczne o dużej mocy do rozbijania obiektów z betonu i skał kopalnianych podczas działań ratowniczych

АННОТАЦИЯ

Цель: Обеспечение безопасности людей при разборе разрушенных зданий при проведении спасательных работ.

Введение: известно большое количество методов разбора и разрушения бетонных конструкций при проведении аварийно-спасательных работ (с использованием взрывчатых веществ, пневматического, гидравлического оборудования и инструментов, бензорезов и т.д.). Каждый из известных методов, помимо достоинств, имеет недостатки. Поэтому существует необходимость в разработке новых эффективных методов разрушения бетонных конструкций. Авторы предлагают их разрушать электрогидравлическим методом, основанным на использовании энергии плазмы, возникающей при электрическом разряде в объеме, заполненном водой. В бетонной конструкции выполняются цилиндрические шпурсы, которые заполняются водой. После введения в шпурсы специальных электродов производится электрический разряд. Он приводит к образованию расширяющейся плазмы. Ударные волны, наводимые при этом, являются причиной механических напряжений, испытываемых объектом разрушения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ возможных вариантов «Устройства», применительно к решению поставленной им задачи;

¹ Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» Министерства образования Республики Беларусь, г. Гродно; mail@grsu.by / The Establishment Educational “Yanka Kupala State University of Grodno” of the Ministry for Educational of the Republic of Belarus, Grodno;

² Научно-практический центр учреждения «Гродненское областное управление МЧС» Республики Беларусь, г. Гродно / The scientific and practical center of establishment «Grodno regional department of the Ministry for Emergency Situations» of the Republic of Belarus, Grodno;

³ Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск / The Establishment «Research Institute of Fire Safety and Emergencies» of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk; rifs.minsk@gmail.com;

⁴ Процентное участие в создании статьи / Percentage contribution: Tarkovskiy V.V. – 30%, Vasilevich A.E. – 5%, Balykin A.S. – 20%, Stakheyko P.N. – 5%, Levanovich A.V. – 15%, Sakovich E.I. – 10%, Filipovich S.M. – 10%, Skripko A.N. – 5%;

- осуществить разработку и макетирование отдельных узлов и блоков «Устройства»;
- изготовить и произвести наладку узлов и блоков «Устройства», произвести сборку и лабораторные испытания макета «Устройства»;
- провести анализ лабораторных испытаний «Устройства», устранить выявленные недостатки, осуществить доработку и корректировку принципиальной электрической схемы и конструкции «Устройства»;
- разработать макет «Устройства» и произвести его испытания в полевых условиях.

Выводы: Разработанное «Устройство» может использоваться для разрушения стандартных строительных блоков и конструкций. Мощность «Устройства» может варьироваться под размеры разрушаемых конструкций. Промышленный образец «Устройства» может быть размещен на шасси автомобиля малой грузоподъемности.

Значение для практики: Безопасность для жизни и здоровья людей, находящихся вблизи и под завалами, возможность разрушать громоздкие бетонные конструкции, отсутствие выделения вредных веществ, воздействия ударных и акустических волн, разлетающихся осколков, возможность задавать линию раскола.

Ключевые слова: электрический тепловой взрыв проводника, электрогидравлический эффект, электроразрядный способ, разрядный контур, плазма, ударная волна

Вид статьи: оригинальная научная статья

ABSTRACT

Aim: To ensure the safety of people during rescue operations who are engaged with the removal of rubble from destroyed buildings.

Introduction: There are a large number of approaches used in dismantling and demolishing concrete structures during rescue operations. These include: explosives, pneumatic and hydraulic equipment, and petrol power cutters. Each of the known methods, in addition to advantages, has disadvantages. Therefore, there is a need to develop new and effective methods of dismantling and demolishing concrete structures. The authors propose utilization of an electro-hydraulic approach based on the use of plasma energy, which is generated when an electrical discharge occurs in a receptacle filled with water. A concrete structure is perforated with cylindrical holes, which are then filled with water. Special electrodes are inserted into the holes. After the insertion of special electrodes an electrical discharge is generated. This leads to the formation of an expanding plasma. Induced shock waves combined with water cause a mechanical stress to the structure being demolished.

To achieve this goal it was necessary to address the following:

- Perform an analysis of possible alternative devices, bearing in mind the purpose
- Develop and prototype elements of the device
- Produce and assemble elements of the device and test the laboratory model .
- Analyze results of laboratory tests, eliminate identified defects, refine and adjust electric circuit and construction of the device.
- Finalise a working model of the device and perform field trials.

Conclusions: The developed device may be used to break up standard bricks and building structures. Power of the device can vary, depending on the size of the structure, which is being dismantled. An industrial sized device may be transported by a vehicle with a light duty chassis.

Implications for practice: Protection of life and health of people, near to or buried under rubble. Ability to demolish bulky concrete structures. Elimination of harmful substance emissions. Avoidance of impact from shock and acoustic waves, flying debris and ability to set a course for a breach in a wall.

Keywords: electric thermal conductor explosion, electrohydraulic effect, electrical discharge technique, plasma, shock wave

Type of article: original scientific article

ABSTRAKT

Cel: Zagwarantowanie bezpieczeństwa ludzi w czasie odgruzowywania zniszczonych budynków podczas działań ratowniczych.

Wstęp: Istnieje wiele metod rozbioru i rozbijania konstrukcji z betonu podczas prowadzenia działań ratowniczych (np. użycie materiałów wybuchowych, sprzętu i narzędzi pneumatycznych i hydraulicznych oraz palnika benzynowego do cięcia tlenem itd.). Każda ze znanych metod ma nie tylko zalety, ale też i wady. Dlatego konieczne jest opracowanie nowych skutecznych metod niszczenia konstrukcji betonowych. W artykule autorzy zaproponowali wykorzystywanie metod elektrohydraulicznych, opartych na energii plazmy powstającej podczas wyładowania elektrycznego w przestrzeni wypełnionej wodą. W konstrukcji betonowej znajdują się otwory strzałowe, które wypełnia się wodą. Po wprowadzeniu do otworów specjalnych elektrod przeprowadza się wyładowanie elektryczne. Prowadzi ono do wytworzenia się powiększającej się plazmy. Fale uderzeniowe z wodą prowadzą do naprężenia mechanicznego niszczonego obiektu.

Aby osiągnąć wyznaczony cel, należało:

- przeprowadzić analizę możliwych alternatywnych wariantów urządzenia, biorąc pod uwagę jego przeznaczenie;
- opracować i przygotować modele konkretnych mechanizmów i bloków urządzenia;
- przygotować i przeprowadzić połączenie mechanizmów i bloków urządzenia, przeprowadzić prace montażowe i badania laboratoryjne modelu urządzenia;
- przeprowadzić analizę badań laboratoryjnych urządzenia, wyeliminować wykryte wady, dopracować i poprawić schemat elektryczny i konstrukcję urządzenia;
- opracować model urządzenia i przeprowadzić jego badania w terenie.

Wnioski: Opracowane urządzenie może być używane do rozbijania standardowych bloczków i konstrukcji budowlanych. Moc urządzenia może być dostosowana do rozmiaru niszczonej konstrukcji. Model przemysłowy urządzenia może być przewożony samochodem z podwoziem o małej nośności.

Znaczenie dla praktyki: Bezpieczeństwo życia i zdrowia ludzi, znajdujących się w pobliżu gruzowiska i pod gruzami, możliwość rozbijania masywnych konstrukcji z betonu, brak szkodliwych substancji, brak wpływu fal uderzeniowych i akustycznych, brak latających odłamków, możliwość wyznaczenia linii rozłamu.

Słowa kluczowe: elektryczny wybuch cieplny przewodnika, efekt elektrohydrauliczny, metoda wyładowania elektrycznego, plazma, fala uderzeniowa, granica wyładowania

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Введение

При проведении аварийно-спасательных работ разработано достаточно большое количество различных методов разрушения и утилизации бетонных конструкций (с использованием взрывчатых веществ, пневматического, гидравлического, электрического оборудования и инструментов, бензорезов и т.д.) [1, 2]. Эти методы имеют свои сильные и слабые стороны. Пневматические и гидравлические инструменты не обеспечивают достаточную скорость разрушения объектов из бетона, а бензорезы не позволяют осуществлять глубокое резание. Нахождение непосредственно под завалами людей не позволяет использовать взрывчатку, так она несет непосредственную угрозу жизни пострадавших. В связи с этим актуальным является задача в разработке альтернативных высокоэффективных и безопасных для жизни и здоровья людей методов воздействия на бетонные и скальные конструкции при проведении аварийно-спасательных работ.

Гродненский государственный университет имени Я.Купалы в сотрудничестве с Научно-практическим центром Гродненского областного управления МЧС Республики Беларусь предлагает разрушать бетонные конструкции в указанных выше ситуациях электрогидравлическим способом, который основан на использовании ударных волн, возникающих при мощном электрическом разряде в воде [3–6]. Положительным фактором является то, что ударная воздействует только на объект разрушения. Находящиеся рядом люди при этом не страдают. Кроме того, при соответствующем расположении шпуров можно задавать линию раскола.

Инициирование разряда электрически взрываемым проводником (ЭВП) по сравнению с высоковольтным пробоем при равных возможностях электрооборудования может обеспечить заданную геометрию разрядного канала путем локализации области пробоя и достичь больших пиковых воздействий. Это позволяет добиться увеличения эффективности перехода электрической энергии в механическую энергию взрыва. Кроме того, это позволяет существенно снизить рабочее напряжение устройств с уровня 50–500 кВ до ~ 5 кВ, а, следовательно, и уровень изоляции. Безопасность метода, соответственно, повышается.

К положительным сторонам предлагаемого метода относится способность разрушения крупногабаритных бетонных конструкций, возможность задавать протяженную линию раскола в бетонных плитах, отсутствие разлетающихся осколков, ударных волн и выделения опасных для жизни веществ и в совокупности – обеспечение безопасности для жизни и здоровья людей.

Необходимо отметить, что предлагаемое электрогидравлическое устройство не представляет опасности для взрыва пылегазовоздушной смеси, так как электрический взрыв происходит в воде, а силовые модули устройства находятся на безопасном расстоянии от объекта воздействия. Кроме того, возможно применение данного метода в других областях реального сектора экономики (например, в горнодобывающей промышленности, при установке свай по технологии РИТ, очистке заготовок от формовочной смеси в сталелитейной промышленности и др.) [4, 7].

2. Разработка и испытание одноканального лабораторного макета устройства для разрушения объектов из кирпича, бетона и скальных пород способом электрического теплового взрыва

Электроразрядный способ разрушения основан на известном эффекте Юткина [8]. Исследования электроразрядных технологий проводились многие годы (и даже в рамках закрытых тематик), но широкого внедрения они не получили, а сам автор Юткин Л.А. в сталинское время был репрессирован. Что касается электроразрядного способа разрушения в жидкой среде, то, как правило, использовались многоэлектродные системы [9–10]. Они обладают низким сопротивлением и в связи с этим необходимы генераторы с импедансом порядка единиц и даже меньше единиц Ом. Из этого вытекают многие негативные моменты. К ним можно отнести деформацию импульса, большие потери в предпробивной стадии. Вследствие этого необходимо использовать большие напряжения (десятки и сотни киловольт), а сами устройства весят десятки тонн.

В последнее время на основе современной элементной базы создаются мощные импульсные малогабаритные источники тока с требуемыми параметрами импульса и применяются безыскровые коммутаторы. Это позволяет работать в частотном режиме (более 15 имп/с), а значит, повысить эффективность и спектр возможностей метода.

Электроразрядный способ разрушения объектов из бетона и горных пород заключается в том, что разрушение твердого тела происходит за счет суммирования напряжений, возникающих вокруг канала электрического разряда в воде, т.е. вокруг расширяющейся плазмы канала пробоя. Вследствие распространения в жидкой среде ударных и акустических волн возникают высокое давление и напряжения, эффективно воздействующие на объект разрушения.

На кафедре лазерной физики и спектроскопии Гродненского государственного университета создана универсальная лазерная система [11]. Основное назначение предлагаемой лазерной системы – создание мощных лазеров на красителях. Для них разработаны мощные источники питания. В связи с этим авторы предлагают инновационный метод использования разработанных источников в высокоэффективном электрогидравлическом устройстве для разрушения объектов из бетона и горных пород методом теплового взрыва [12]. В этом случае электроды электрогидравлического устройства замыкаются тонким проводником. В этом случае вместо искрового разряда между электродами происходит тепловой взрыв тонкой проволоочки. Использование теплового взрыва позволяет уменьшить энергетические потери на 10% за счет полного устранения стримера. Кроме того, это позволяет производить электрогидравлические удары рядом с проводящими поверхностями, осуществлять селективное воздействие по произвольному наперед

заданному контуру. Преимуществами способа являются возможности осуществления электрогидравлических ударов вблизи проводящих объектов (непосредственно на их поверхности), получения локализованных направленных ударов по любому наперед заданному контуру [12].

Исходя из назначения, требований, предъявляемых к разрабатываемому электрогидравлическому «Устройству» и имеющегося задела оптимальным образом подходит силовая часть лазера на красителях с ламповой накачкой. Установлено, что параметры емкостных накопителей, коммутирующих устройств и высоковольтного блока питания, наилучшим образом подходят для разрабатываемого «Устройства». Учитывая эти соображения, структурная схема разрабатываемого «Устройства» должна включать элементы, показанные на рис. 1. В качестве предлагаемого «Устройства» использована универсальная система, которая строится на основе силовых блоков лазеров на красителях с ламповой накачкой.

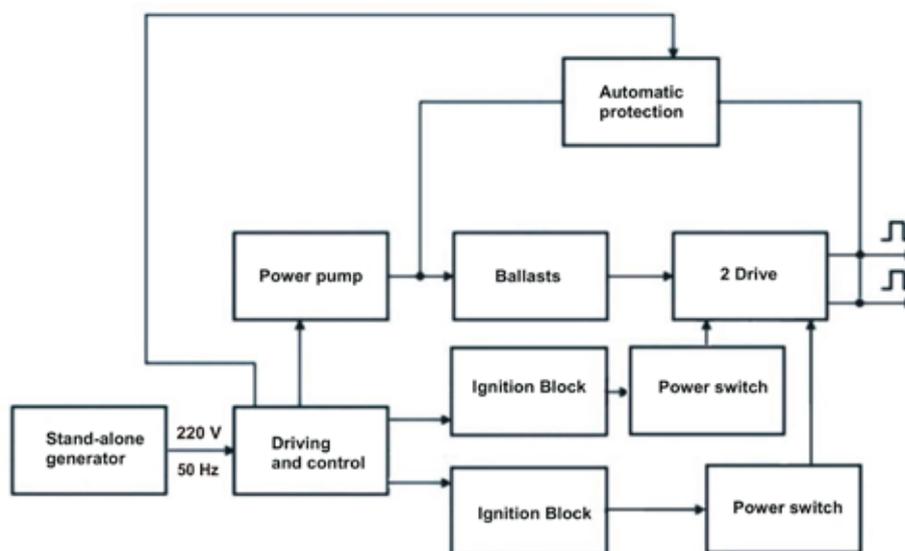


Рис. 1. Структурная схема «Устройства»

Fig. 1. Block diagram of the Device

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балькиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

В разрядный контур могут включаться пять типов емкостных накопителей на основе конденсаторов ИК 25-12У4, ИК 40-5У4, К75-30, К75-48 и К410-7. Емкостные накопители питаются от единого автономного источника. В качестве коммутаторов используются игнитронные ртутные разрядники ИРТ-4-1 и ИРТ-6, что позволяет работать с емкостными накопителями большой мощности и обеспечивать любые параметры разряда.

В окончательном варианте «Устройства» использован емкостный накопитель на основе конденсаторов К410-7 (100 мкФ, 5 кВ).

Как видно из структурной схемы (рис. 1) и электрической принципиальной схемы (рис. 2), устройство состоит из высоковольтного источника (элементы Т4, VD9-VD12), схемы поджига (Т1, VD1-VD4), спусковой тиристорной схемы VS1, С1, импульсного трансформатора Т5 и холодного тиратрона VL2; вспомогательного источника питания +24В (Т2, VD5-VD8) и пульта управления и контроля, включающего в себя контакторы К1 «высокое» и К2 «поджиг», управляемыми от кнопок S1 и S2 и S3, S4 соответственно.

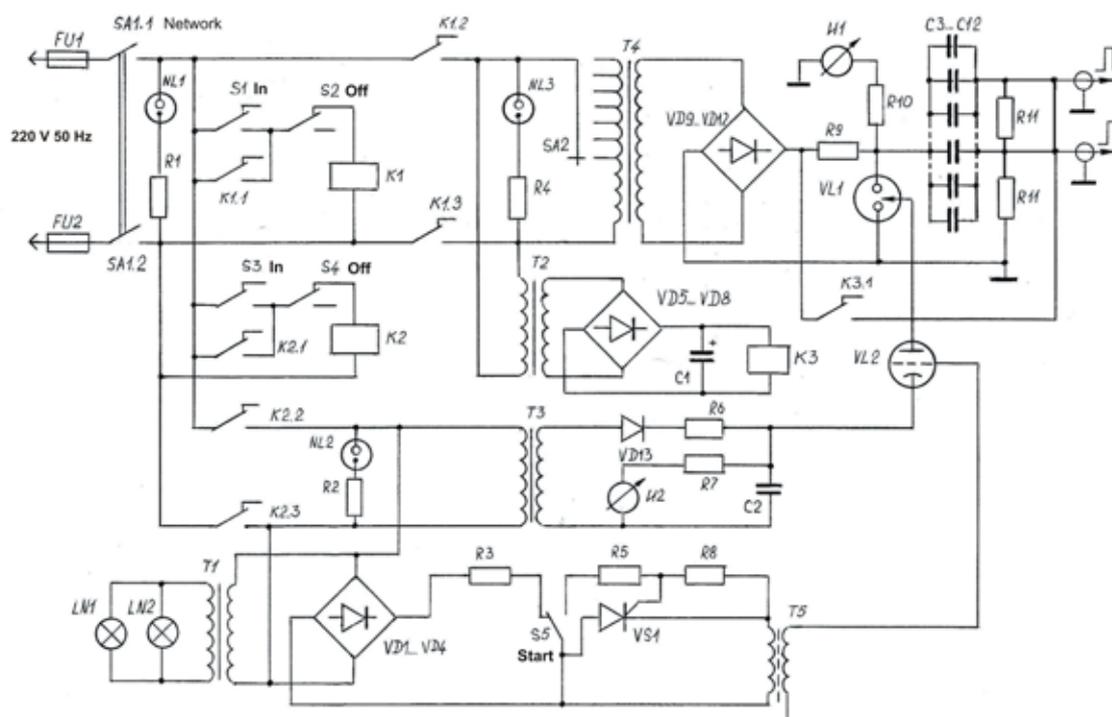


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема «Устройства»

Fig. 2. The electrical circuit diagram of the Device

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балькиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

К источнику питания подключены два одинаковых силовых модуля. Каждый состоит из блока накопителя (С4–С8), разрядника игнитронного типа и схемы защиты К5. Каждый модуль формирует высоковольтный импульс длительностью 20 мкс и энергией 7–8 кДж, который подается на тепловые взрывающиеся элементы через разъемы «Вых 1» и «Вых 2».

Предусмотрена схема коммутации, которая обеспечивает возможность подключения с помощью вакуумных выключателей К3 и К4 к базовому блоку любой из двух силовых модулей или, при необходимости, оба модуля одновременно. Это обеспечивает гибкую систему применения устройства в зависимости от выполняемой задачи.

Предусмотрена защита по высокому напряжению 5 кВ. Для этого в каждый из силовых модулей вынесен балластный резистор R9 и высоковольтный вакуумный выключатель К5.

При расчете балластного резистора использованы следующие соображения: емкостный накопитель должен успеть зарядиться до прихода следующего импульса поджига. В нашем случае период следования импульсов поджига составляет величину не более 1 с, тогда емкостный накопитель должен быть заряжен до $0,7 \times U_{\max}$, тогда из формулы

$$\tau = R \cdot C \quad (1)$$

где τ – время заряда в секундах;

R – сопротивление балластного резистора в Омах;

C – емкость накопительного конденсатора в Фарадах.

Если $\tau = 0,7$ с, $C = 5 \times 10^{-6}$ Ф. Находим $0,7 = R \times 5 \times 10^{-6}$ отсюда $R = 140$ кОм.

На принципиальной схеме показано, что при соединении имеющихся резисторов КЭВ20–100К получаем в соответствии с заданными условиями общее сопротивление $150 \text{ кОм} \pm 20\%$.

После осуществления разряда с помощью системы автоматической защиты осуществляется принудительное снятие остаточного заряда емкостного накопителя. Система автоматической защиты включает вакуумный выключатель К3 и рабочие контакты К3.1. Они посредством переключателя «Сеть» после выключения питающего напряжения замыкают накопитель на балластный резистор R9. При этом отключается питание трансформатора T2 и через контакты К3.1, которые в данном случае замыкаются, обесточивается обмотка управления К3. При этом через балластный резистор R9 происходит разрядка емкостного накопителя С3–С7.

С помощью специально проградуированного стрелочного индикатора И1, имеющего две шкалы, контролируется высокое напряжение. На одной шкале отображается напряжение в кВ, а на второй запасаемая энергия в кДж.

Энерговыводящий узел (рис. 3) предназначен для преобразования энергии накопителя в ударную волну, передающуюся через воду на стенки шпура. Он представляет собой тонкий проводник 5 (тепловой взрывающийся элемент), подсоединенный к высоковольтному разъему 1 через электроды 3,4. В зависимости от глубины шпура применяются сменные электроды соответствующей длины. Энерговыводящий узел соединяется с устройством с помощью высоковольтного силового кабеля длиной 20 м.

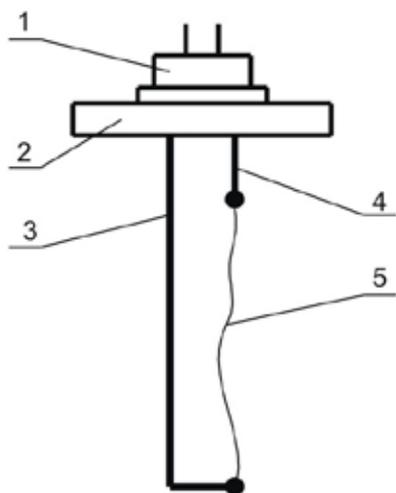


Рис. 3. Структурная схема энерговыделяющего узла
1 – высоковольтный разъем; 2 – корпус; 3 – электрод;
4 – электрод; 5 – тонкий проводник

Fig. 3. Structure diagram of the high-voltage energy emitting element

1 – connector; 2 – housing; 3 – electrode; 4 – electrode;
5 – thin wire

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балыкиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

Разряд может осуществляться с панели управления основного блока устройства так и с помощью специального дистанционного пульта. На рис. 4 представлен общий вид разработанного «Устройства» для создания электрического теплового взрыва. Были проведены лабораторные испытания разрядного контура одноканального макета «Устройства» [13–14]. Результаты испытаний показали, что все элементы разрядного контура работают стабильно.



Рис. 4. Общий вид «Устройства» для создания электрического теплового взрыва

Fig. 4. General view of the Device for creating electric thermal explosion

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балыкиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

Благодаря тому, что в конструкцию разрядного контура внесены изменения, позволяющие емкостному накопителю увеличивать запасаемую электрическую энергию и тем самым эффективно разрушать объекты из бетона. Испытания показали, что нет необходимости использования охлаждения игнитрона. Также испытания показали, что для сокращения пауз между импульсами разряда конденсаторной батареи необходимо увеличить мощность источника питания и переделать конструкцию водяного балластного резистора путем устройства рубашки охлаждения. Усовершенствование системы охлаждения водяного балластного резистора позволило не допустить его перегрева в ходе испытаний.

Установлено, что на работу «Устройства» положительное влияние оказывает улучшенная схема подключения управляющих и коммутирующих устройств, а также что удлиненный кабель дистанционного управления вполне обеспечивает безопасность применения «Устройства». Установлено, что улучшенная конструкция излучателя обеспечивает возможность установки электродов различной длины и их эффективное срабатывание и что во время взрыва тонкой проволоки жидкость из шпура не выбрасывается. В ходе испытаний установлено, что оптимальным диаметром шпура необходимо считать диаметр в пределах 25–30 мм. Испытания показали, что наиболее надежную работу продемонстрировал излучатель на основе взрывающейся проволоки. Безопасное использование «Устройства» вполне обеспечивает удлиненный кабель дистанционного управления [14].

Произведено пошаговое испытание отдельных узлов и конструкции в целом. В ходе испытаний серьезных недостатков не выявлено. Установлена надежность работы таких узлов схемы как: блока поджига, регулируемого источника высокого напряжения, устройства автоматической защиты и вентилятора охлаждения блока балластного резистора, источника высокого напряжения, накопительных конденсаторов, киловольтметра, высоковольтного трансформатора, игнитрона, излучателя, вакуумного выключателя. Все эти системы в ходе испытаний работали вполне надежно. По результатам испытаний устранен единственный недостаток, выявленный в ходе испытаний – увеличено количество разъемов в электрических кабелях питания и управления. Это в окончательной конструкции «Устройства» позволяет обеспечить большее удобство в его эксплуатации.

Импульсный электрический разряд создавался в шпурах, пробуренных в объектах из бетона или скальных породах и заполненных водой (рис. 5). В результате взрыва тонкой проволоки и ударного расширения плазменного шнура происходит эффективное преобразование энергии мощного электрического импульса в механическую энергию ударных волн сжатия-растяжения, эффективно воздействующих на стенки канала и соответственно в целом на разрушаемый объект. В результате воздействия

всех факторов зарождаются и развиваются радиальные трещины, что приводит к раскалыванию объекта на несколько фрагментов. Фазы технологии разрушения можно представить в следующей последовательности:

- В раскалываемом объекте бурятся вертикальные шпуров с оптимальным диаметром (25–30) мм. Шаг бурения определяется в каждом конкретном случае и зависит от размеров разрушаемого объекта, например, ширины бетонной плиты. В зависимости от этого выбирается одно-, двух-, трех- или четырехканальный вариант воздействия.

- В шпуров заливается обычная вода и устанавливаются излучатели с тепловыми взрывающимися элементами, подключенные к электроразрядному устройству. Герметизация шпуров не обязательна, так как соотношение площадей боковой поверхности шпура плюс дна и открытого отверстия несопоставимы.
- На излучатели подается высоковольтный импульс.
- После раскалывания объекта из железобетона необходимо с помощью бензореза перепилить прутья арматуры.

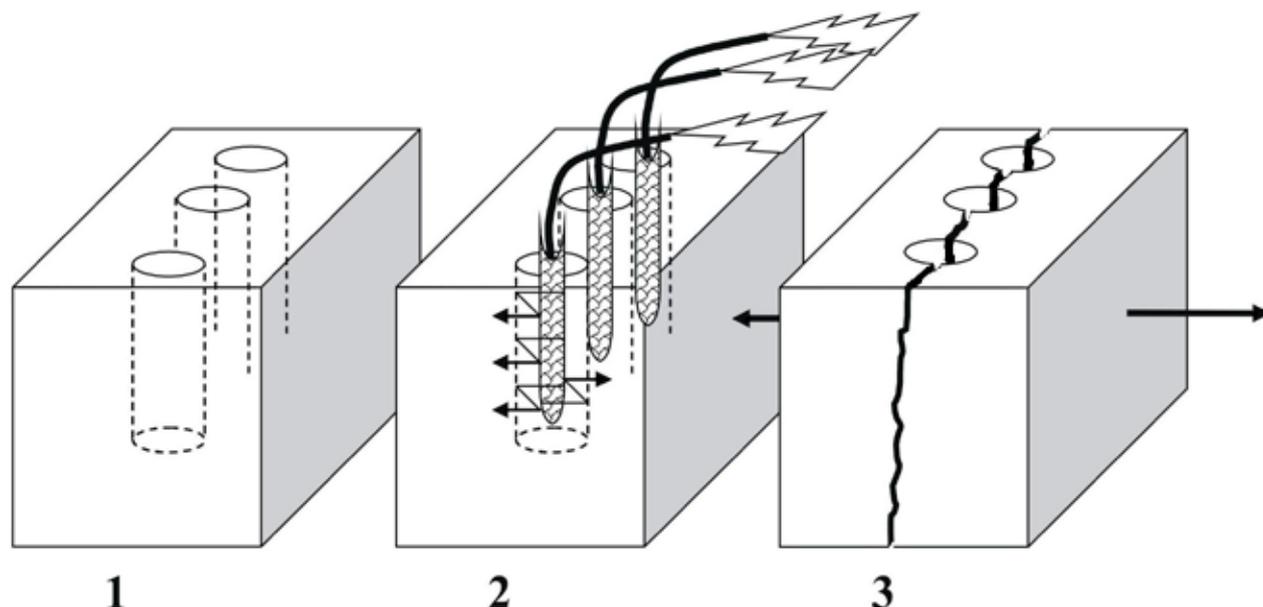


Рис. 5. Стадии технологического процесса разрушения бетонного блока

Fig. 5. Stages of the process of destruction of a concrete block

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балькиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

Для описания процесса разрушения объектов из бетона и скальных пород предложен механизм, суть которого, в основных чертах, сводится к следующему. Высоковольтный электрический импульс пропускается через тонкий металлический проводник, соединяющий электроды энерговыделяющего узла. Тонкий проводник в результате кратковременного выделения в нем огромной тепловой энергии взрывается. На месте проводника образуется плазменный шнур, который с высокой скоростью расширяется. Водяной пар и плазма, вокруг которых находится вода, образуют кавитационный пузырь цилиндрической формы. Кавитационный пузырь растет до максимально возможного в данных условиях размера и через

несколько сотен микросекунд схлопывается. Во время расширения плазмы и схлопывания пузыря наводятся ударные волны, которые являются причиной механических напряжений, испытываемых материалом раскалываемого объекта (рис. 6).

В качестве объектов воздействия использовались бетонные блоки размером 300x500 мм и гранитные валуны диаметром 300 или 500 мм. Во время испытаний одноканального варианта устройства при воздействии на объект из камня или горных пород наблюдается радиальное развитие трещин и раскалывание объекта на три или более фрагментов (рис. 6, 7).



Рис. 6. Радиально-симметричное разрушение объекта из гранита при одноканальном воздействии
Fig. 6. Radially symmetric destruction of the object of granite by single-channel impact

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V.



Рис. 7. Радиально-симметричное разрушение объекта из бетона при одноканальном воздействии
Fig. 7. Radially symmetric destruction of the object of concrete by single-channel impact

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

Таким образом, в результате проведенных испытаний было установлено, что одноканальный вариант устройства не позволяет использовать его для решения задач аварийно-спасательных служб при разборе завалов для раскалывания бетонных плит и блоков в заданном направлении [13–14].

3. Разработка и испытание двухканального лабораторного макета устройства для разрушения объектов из кирпича, бетона и скальных пород способом электрического теплового взрыва

Дальнейшие исследования проблемы протяженного линейного раскола потребовали на базе одноканального создания двухканального устройства. Такое устройство было разработано (рис. 8).

Принципиальная схема его представлена на рис. 9. В связи с введением второго канала в базовую схему устройства введен коммутатор каналов (К3, К4), добавлен аналогичный одноканальному модуль 2, изменена схема поджига (FV6, FV7), на пульт управления

выведен переключатель SA3, позволяющий производить по необходимости выбор каналов (первый, второй или оба одновременно), а также переключатель SA4, обеспечивающий по стрелочным индикаторам PA1 и PA2 контроль напряжения (энергии) на накопителях модулей 1 и 2 соответственно.

Однофазное питание 220В, 50 Гц подается через предохранители FU1 и FU2 5А на выключатель SA1 «Сеть». При установке выключателя «Сеть» в положение «Вкл» на панели управления загорается индикаторная лампа FV1. Выход выключателя SA1 через кнопки SV1 и SV3 соединен с обмотками контакторов S1 «Высокое» и S3 «Поджиг» соответственно.

При нажатии кнопки SV1 напряжение 220 В, 50 Гц подается на обмотку контактора К1, который через свои контакты К1.1 становится на самоблокировку, а рабочими контактами К1.1 и К1.3 подается питание через ступенчатый переключатель SA2 «Рег. высокого» на первичную обмотку высоковольтного трансформатора Т5. Переключатель SA2 позволяет ступенчато через 500 В регулировать выходное напряжение от 3-х до 5 кВ.



Рис. 8. Смонтированные узлы дополнительного второго блока двухканального варианта «Устройства»
Fig. 8. Mounted units of the additional second two-channel unit version of the Device

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

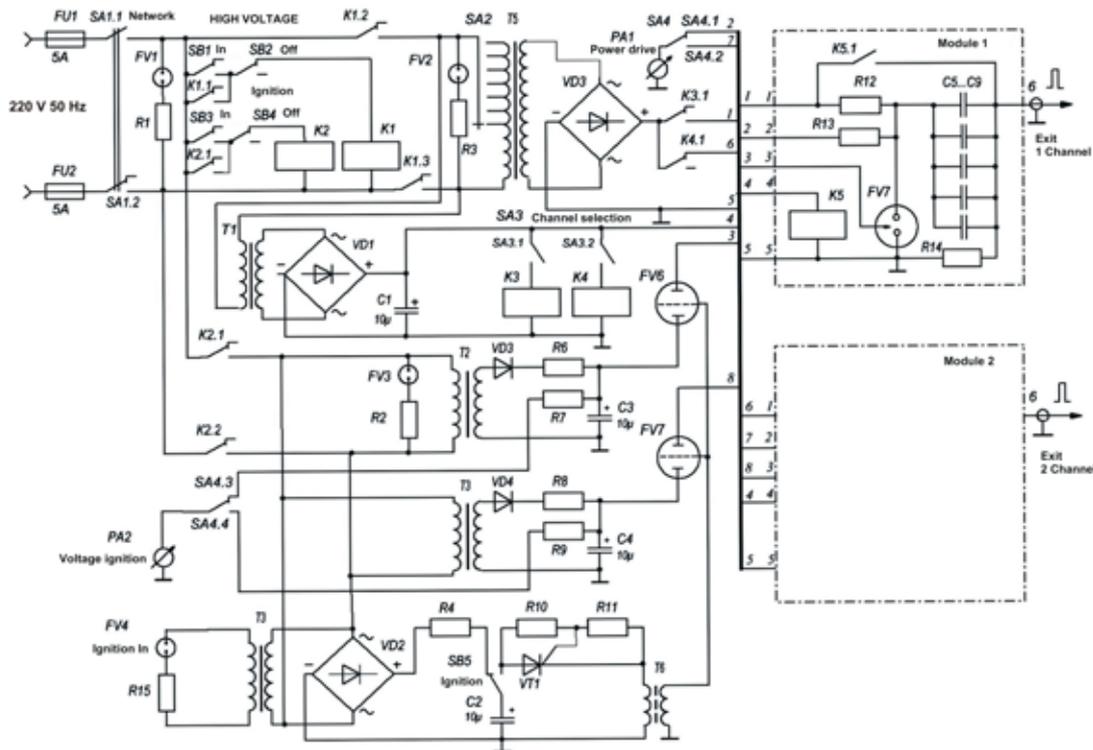


Рис. 9. Электрическая принципиальная схема двухканального «Устройства»

Fig. 9. The electrical circuit diagram of a two-channel Device

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балькиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

Выпрямленное высоковольтным мостом VD3 напряжение подается на нормально разомкнутые контакты высоковольтных разъединителей K3.1 и K4.1. При включении переключателя SA3 в положение «Модуль1» напряжение +24 В от источника T1, VD1 через контакт SA3.1 поступает на втягивающую

обмотку высоковольтного разъединителя K3, контакт которого K3.1 соединяет выход высоковольтного моста VD3 через балластный резистор R10 модуля 1 с емкостным накопителем C4...C8, заряжая его до выбранного переключателем SA2 требуемого напряжения (энергии).

Контроль напряжения на емкостном накопителе модуля 1 осуществляется стрелочным индикатором И1 коммутацией переключателя S8 в положении «U мод.1».

Напряжение +24 В поступает в модуль 1 через контакты 4 на рабочую обмотку высоковольтного разъединителя K5, который выполняет роль автоматической защиты.

Устройство заряжено до рабочего выбранного высокого напряжения и ожидает команды на разряд.

Разряд накопителя на энерговыделяющий элемент осуществляется мощным высоковольтным коммутатором FV7 типа ИРТ-4.

Управление коммутатором FV7 осуществляется от устройства поджига. Нажатием кнопки S3 «Поджиг вкл.» запитывается контактор K2, который своим контактом K2.1 становится на самоблокировку, а рабочими контактами K2.1 и K2.2 подает питание на первичную обмотку трансформатора T2, при этом загорается индикаторная лампа FV3 панели управления базового блока. Выпрямленное диодом VD3 высокое напряжение 2,5 кВ через ограничительный резистор R6 заряжает конденсатор C3. Контроль заряда конденсатора C3 осуществляется стрелочным индикатором И2. Это высокое напряжение прикладывается к аноду «холодного» тиратрона FV6. Питание с контактов K2.1, K2.2 одновременно выпрямляется мостом VD2 и через вреязадающий резистор R4 через нормально замкнутые контакты кнопки S7 заряжает конденсатор C2. Время заряда конденсатора C2 выбрано меньшим времени заряда емкостного накопителя. При достижении заданного напряжения 2,5 кВ отмеченного зеленым сектором на индикаторе И2, производится нажатие кнопки S7. Конденсатор C2 разряжается через тиристор VT1 на первичную обмотку импульсного трансформатора T5. На вторичной обмотке импульсного трансформатора T5 возникает короткий импульс, который подается на управляющую сетку тиратрона FV6 открывая его. Напряжение +2,5 кВ через открытый тиратрон поступает в качестве поджигающего импульса на управляющие электроды коммутаторов FV7 обоих модулей. При этом импульс поджига поступающий на второй модуль действует вхолостую т.к. второй модуль не задействован по высокому напряжению. Коммутатор VF7 замыкает емкостной накопитель C4...C8 через высоковольтный кабель на энерговыделяющий элемент, производя при этом взрыв проволоки соединяющей его электроды. Возникшая в результате взрыва серия затухающих ударных волн через несжимаемую среду воздействует на стенки шпура в раскаляемой породе производя при этом разрушающие действия.

После проведения взрыва выключатель SA1 «Сеть» устанавливается в положение «Выкл» при этом пропадает напряжение +24 В в результате чего обесточивается втягивающая обмотка высоковольтного разъединителя K5 типа ВВ10 контакты разъединителя K5.1 замыкаются, тем самым разряжая в целях безопасности остаточный заряд на балластный резистор R10.

Для работы с модулем 2 или с двумя модулями синхронно, галетный переключатель S6 устанавливается в положение «Модуль II» или «Модуль I-II»

соответственно, при этом работа устройства аналогична как и при работе с модулем 1.

Конструктивно модуль 2 выполнен в виде отдельного блока. Модуль 2 соединяется с базовым блоком комплектом кабелей снабженными быстростъемными разъемами, позволяющими оперативно разъединять их при перемещении и транспортировке. Готовность модуля 2 к работе индицируется сигнальной лампой на панели модуля 2.

Был изготовлен дополнительный энерговыделяющий узел для второго канала (рис. 10). Оба узла предназначены для преобразования энергии накопителя в ударную волну, передающуюся через воду на стенки шпура. Взрывающийся элемент представляет собой тонкий проводник 5, подсоединенный к высоковольтному разъему 1 через электроды 3,4. В зависимости от глубины шпура применяются сменные электроды соответствующей длины. Энерговыделяющие узлы соединяются с устройством с помощью высоковольтных силовых кабелей длиной 20 м.



Рис. 10. Энерговыделяющие узлы: 1 – высоковольтный разъем; 2 – корпус; 3 – электрод; 4 – электрод; 5 – тонкий проводник

Fig. 10. Energy emitting components: 1 – high-voltage connector; 2 – housing; 3 – electrode; 4 – electrode; 5 – thin wire

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

Разряд на оба узла или по отдельности может осуществляться с панели управления основного блока «Устройства» так и с помощью специального дистанционного пульта. На рис. 11 представлен общий вид разработанного двухканального «Устройства» для создания электрического теплового взрыва [15].

Разработана методика испытания двухканального варианта «Устройства» для разрушения бетонных и каменных конструкций при проведении аварийно-спасательных работ. В связи с тем, что «Устройство» состоит из функциональных блоков: блока накачки,

балластного устройства, емкостного накопителя, схемы управления и контроля, блока поджига, силового коммутатора и устройства автоматической защиты, то основой предлагаемой методики является поэтапное испытание работы всех функциональных элементов «Устройства».



Рис. 11. Общий вид «Устройства» для создания электрического теплового взрыва: 1 – базовый блок управления и первого канала, 2 – дополнительный 2-й блок, 3 – энерговыделяющие узлы 1-го и 2-го каналов

Fig. 11. General view of the Devices for creating electric thermal explosion: 1 – basic control unit and the first channel; 2 – additional 2nd unit; 3 – energy emitting units of the 1st and 2nd channel

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.
Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

Вначале проверяется работа блока накачки на предмет обеспечения необходимого уровня заряда емкостного накопителя на основе импульсных высоковольтных конденсаторов К410-7. Параллельно проверяется функционирование жидкостного балластного устройства и силового коммутатора на основе игнитронного разрядника ИРТ-2. Главным элементом данного этапа испытания является проверка обеспечения

ими достаточной скорости заряда емкостного накопителя и недопущении перегрева во время работы. Проверяется надежность работы схемы управления и контроля. Очень важным этапом испытания является проверка надежности системы автоматической защиты, построенной на основе вакуумных выключателей [14, 15].

После проведенных испытаний доработан базовый блок питания и панель управления «Устройства». Произведена перекомпоновка элементов для уплотнения монтажа. Установлены вакуумные высоковольтные коммутаторы ВВ-20. На задней панели базового блока установлены разъемы, связывающие его со вторым каналом. Установлен сигнальный разъем, высоковольтный разъем накачки, импульсный разъем, разъем на поджиг второго канала (2 кВ). Произведена перекоммутация высоковольтного выпрямителя (+5 кВ) для работы на первый канал, на второй канал и на оба канала одновременно. В связи с изменением схем коммутаций, выпрямитель (+24 В) заменен на более мощный. Введена схема коммутации каналов I, II, I+II. Установлен переключатель напряжения накачки емкостных накопителей каналов I и II. В связи с добавлением схемы коммутации прежний выпрямитель +24 В заменен на более мощный. Изготовлены кабели: высоковольтный (+5 кВ) для накачки, коаксиальный кабель поджига, сигнальный кабель, разрядный кабель. Установлена шина заземления. Кроме вышеуказанных элементов установлен коммутатор индикации напряжения накачки I-го и II-го базовых блоков питания.

После доработки были проведены испытания установки в режиме работы обоих каналов. Испытания показали надежную работу двухканального «Устройства». На рис. 12,13 показаны образцы разрушенных бетонных и каменных объектов в двухканальном режиме работы [16-18]. Было установлено, что при двухканальном воздействии на объект из камня или горных пород наблюдается раскалывание объекта только на два фрагмента по линии, задаваемой пробуренными шпурами.

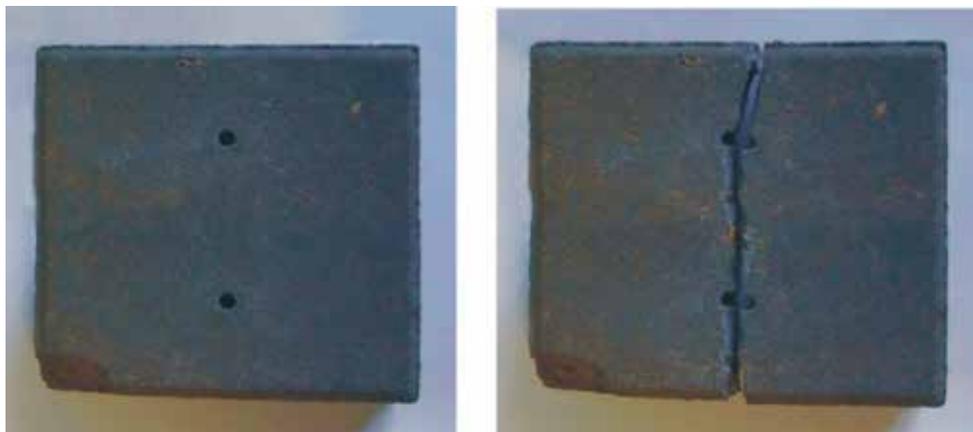


Рис. 12. Образцы разрушенных при помощи двухканального «Устройства» бетонных блоков

Fig. 12. Samples of concrete blocks destroyed with the use of a two-channel Device

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.



Рис. 13. Разрушение объекта из гранита по заданной линии раскола при двухканальном воздействии
Fig. 13. Destruction of granite on a given line of a split in the two-channel impact

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

С целью повышения надежности работы двухканального «Устройства» изготовлен дополнительный блок поджига для второго канала (рис. 1 и 14). Необходимость изготовления второго блока поджига связана с тем, что в процессе эксплуатации двухканального «Устройства» в ряде случаев выявилось одновременное срабатывание каналов, связанное с разбросом некоторых характеристик игнитронов.

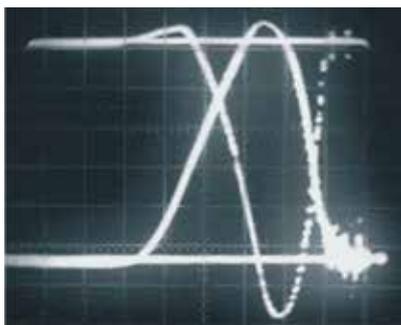


Рис. 14. Токвые импульсы срабатывания каналов
Fig. 14. Current pulses of the channels

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

Осуществлено изготовление более надежного и простого по конструкции тепловыделяющего элемента двухканального варианта «Устройства» (рис. 15). Такое решение связано с тем, что в процессе интенсивной эксплуатации тепловыделяющих элементов происходит их разрушение при максимальной энергетической нагрузке. Конструкция тепловыделяющего элемента была изменена таким образом, чтобы исключить пробой высокого напряжения на корпус. Из рисунка видно, что основой тепловыделяющего элемента является сам высоковольтный коаксиальный кабель. Одним из электродов является центральная «жила» кабеля, роль второго электрода выполняет коаксиальная медная оплетка. Оба электрода разнесены в пространстве и между ними натянута тонкая проволока. Основным преимуществом предлагаемой системы является ее простота и надежность. В этом случае совершенно нет необходимости использовать какую-то специальную конструкцию энерговыделяющего узла. Проведенные испытания показали его абсолютную надежность.

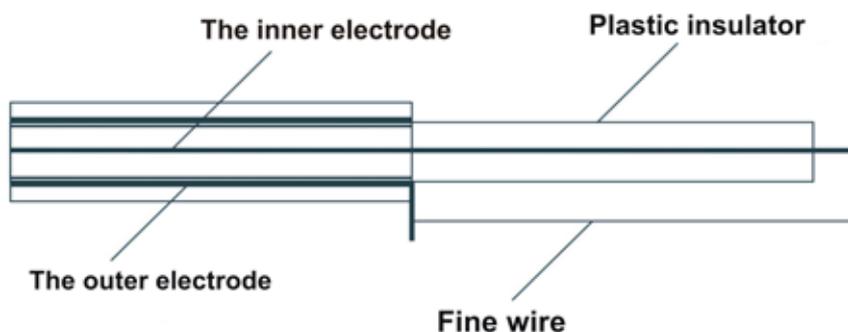


Рис. 15. Конструкция нового тепловыделяющего элемента

Fig. 15. Design of the new heat emitting element

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В. и Балыкиным А.С.

Source: Figure elaborated by Tarkovskiy V.V. and Balykin A.S.

Проведены полевые испытания устройства (рис. 16). Для обеспечения автомобильной транспортировки «Устройства» во время полевых испытаний

использовался внедорожный грузовой полноприводный автомобиль УАЗ-3303.



Рис. 16. Полевые испытания мобильного модернизированного «Устройства»

Fig. 16. Field tests of the modernized mobile Device

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

Полевые испытания модернизированного мобильного устройства прошли успешно. Все узлы и агрегаты работали надежно без сбоев. Была подтверждена правильность принятых конструктивных решений

устройства. В процессе испытаний были разрушены объекты из бетона и горных пород. На рис. 17 показан объект разрушения 1, последовательные фазы процесса его раскалывания 2-5 и результат разрушения 6.



Рис. 17. Объект разрушения – 1; последовательные фазы процесса его раскалывания – 2-5; результат разрушения – 6

Fig. 17. Destroyed object – 1; the successive phases of the process of splitting – 2-5; result of its destruction – 6

Источник: Рисунок разработан Тарковским В.В.

Source: Figure by Tarkovskiy V.V.

Создана методика проведения испытаний двухканального варианта «Устройства» при питании от автономного генератора. Она осуществляется по следующему алгоритму [19].

Ток от автономного генератора посредством высоковольтного трансформатора повышается до необходимого рабочего напряжения, выпрямляется и заряжает емкостный накопитель. Емкостный накопитель с помощью ионитронного разрядника ИРТ-2 разряжается

в воде между двумя электродами замкнутыми тонким проводником из алюминия (меди). Импульсный электрический разряд через вышеуказанный проводник приводит к выделению в нем до 85–90% энергии емкостного накопителя, в результате чего проводник взрывается с образованием плазменного шнура. Температура плазмы может составлять 15–30 тыс. градусов. Энергия плазмы идет на совершение механической работы. В практически несжимаемой жидкости, которой можно считать воду, образуются волны расширения-сжатия. Так как скорость расширения полости в воде может быть сверхзвуковой, то эти волны являются ударными. Давление на фронте распространяющейся ударной волны может превышать 10000 атмосфер. В результате этого происходит раскалывание объектов из бетона и скальных пород.

Литература

- [1] Usov A.F., Tsukerman A., *Sravnitel'nyy analiz effektivnosti sposobov dezintegratsii gornyykh porod i rud*, MGGU, Issue 7, Moskva 2002, 132–136.
- [2] Merkelo A.A., *Osobennosti i klassifikatsiya nevzryvnykh sposobov razrusheniya materialov*, Portal magistrów DonNTU [elect. resource], Donetsk 2002, <http://masters.donntu.edu.ua/2002/ggeo/merkelo/diss/lib/merkelo.rtf>, [accessed 26.01.09].
- [3] Cheys U., *Kratkiy obzor issledovaniy po vzryvayushchimsya provolochkam*, [w:] *Vzryvayushchiyesya provolochki*, Inostrannaya literatura, Moskva 1963, 9–17.
- [4] Yutkin L.A., *Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti*, Mashinostroyeniye, Moskva 1986.
- [5] Rukhadze A.A., Shmigelya I.S. (red.), *Elektricheskiy vzryv provodnikov*, Mir, Moskva 1965, 360.
- [6] Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinskiy A.V., *Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh*, Energoizdat, Moskva 1990, 217.
- [7] Tarkovskiy V.V., Balykin A.S., Yanichkin V.V., *Innovatsionnoye ispol'zovaniye elementov elektropitaniya moshchnykh lazerov dlya sozdaniya elektrogidravlicheskogo teplovogo vzryva*, Materialy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii „Lazernaya fizika i opticheskiye tekhnologii”, Institut fiziki im. B.I. Stepanova Akademii Nauk Belarusi, Minsk 2010, 213–216.
- [8] Yutkin L.A., *Elektrogidravlicheskaya obrabotka metallov*, [w:] *Elektrozaryadnaya obrabotka materialov*. Mashinostroyeniye, Leningrad 1971.
- [9] Vorob'yev A.A., Vorob'yev G.A., Chepikov A.T., *Zakonmernosti proboya tverdogo dielektrika na granitse razdela s zhidkim dielektrikom pri deystvii impul'sa napryazheniya*, *Svidetel'stvo na otkrytiye* No. A-122 ot 29.04.1998 s prioriteto ot 14.12.1961.
- [10] Semkin B.V., Usov A.F., Kurets V.I., Semkin B.V., *Osnovy elektroimpul'snogo razrusheniya materialov*, Nauka, Sankt Petersburg, 1995, 276.
- [11] Goldfarb V., Bundy R., Dunton A., Shneerson G., Krivosheev S., Adamian Yu., *Digest of Technical Papers 11th IEEE International Pulsed Power Conference*, USA, Baltimore 1998, V.2, 1078–1085.
- [12] Anufrik S.S., Tarkovskiy V.V., *Mnogotslevaya universal'naya lazernaya sistema na osnove rastvorov krasiteley*, materialy III-y konferentsii po lazernoy fizike i spektroskopii, Institut fiziki im. B.I. Stepanova Akademii nauk Belarusi, Minsk 1997, 196–199.
- [13] Tarkovskiy V.V., Balykin A.S., Yanichkin V.V., *Innovatsionnoye ispol'zovaniye elementov elektropitaniya moshchnykh lazerov dlya sozdaniya elektrogidravlicheskogo teplovogo vzryva*, materialy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii „Lazernaya fizika i opticheskiye tekhnologii”, Institut fiziki im. B.I. Stepanova Akademii nauk Belarusi, Minsk 2010, 213–216.
- [14] Yanichkin V.V., Balykin A.S., Tarkovskiy V.V., Pat. 7578 RB, MPK6 E21C 37/18. *Ustroystvo dlya raskalyvaniya razryadom monolitnykh konstruksiy, zayavitel' i patentoobladatel' GrGU im. Ya. Kupaly*, No. U20101083, 30.10.2011, Issue 5 (82), 261.
- [15] Tarkovskiy V.V., Yanichkin V.V., Balykin S.A., Levanovich A.V., Rybachok A.I., Filipovich S.M., Pat. 8879 BY, MPK6 E21C37/18. *Mnogokanal'noye ustroystvo dlya raskalyvaniya razryadom monolitnykh konstruksiy*, No. u20120482, 17.07.2012.
- [16] Levanovich A.V., Rybachok A.I., Filipovich S.M., Tarkovskiy V.V., *Razrusheniye betonnykh, zhelezobetonnykh i kamennykh konstruksiy metodom elektrogidravlicheskogo teplovogo vzryva pri provedenii avariyno-spatatel'nykh rabot*, materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii „CHS: teoriya i praktika”, Gomel' 16 maya 2013, 177–179.
- [17] Tarkovskiy V.V. i.a., *Ustroystvo dlya raskalyvaniya betonnykh i kamennykh konstruksiy pri provedenii avariyno-spatatel'nykh rabot*, „Vestnik GrGU” Issue 1 2012, pp. 90–99.
- [18] Levanovich A.V. i.a., *Elektrogidravlicheskiye tekhnologii dlya MChS*, „Chrezvychaynyye situatsii: obrazovaniye i nauka” Vol. 7, Issue 1, 2012, pp. 39–44.
- [19] Tarkovskiy V.V., Balykin A.S., Yanichkin V.V., Levanovich A.V., Rybachok A.I., Filipovich S.M., Pat. 9812 BY, MPK6 E21C37/18. *Mobil'naya ustanovka dlya razrusheniya monolitnykh konstruksiy*, No u20130502, zayavl. 11.06.2013; zayavitel' i patentoobladatel' GrGU im. Ya. Kupaly.

4. Заключение

С использованием разработанного источника питания проведены испытания мощного одно- и двухканального устройства для локального высокоэнергетического электроимпульсного воздействия. Анализ испытаний подтвердил правильность заложенных принципов построения мощных электроразрядных устройств. Полученные результаты позволяют сконструировать сверхмощное многоканальное устройство, которое посредством создания электрогидравлического эффекта позволит осуществлять высокоэнергетическое воздействие на широкий круг объектов: раскалывать, дробить, бурить, уплотнять, штамповать.

* * *

Тарковский Викентий Викентьевич, заместитель декана физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, образование высшее, автор 4-х патентов и 10-и статей в области электрогидравлических технологий.

Василевич Александр Евгеньевич, директор РУП УНПЦ «Технолаб», кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, образование высшее, разработчик электронной техники.

Балыкин Александр Сергеевич, инженер 1-й категории кафедры лазерной физики и спектроскопии Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, образование высшее, автор 4-х патентов и 10-и статей в области электрогидравлических технологий.

Стахейко Павел Николаевич, магистрант кафедры лазерной физики и спектроскопии Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, образование высшее, автор 1-го патента и 3-х статей в области электрогидравлических технологий.

Леванович Андрей Викторович, начальник научно-практического центра учреждения «Гродненское областное управление МЧС» Республики Беларусь, магистр технических наук, образование высшее, автор 4-х патентов и 5-и статей в области пожарной безопасности и электрогидравлических технологий.

Сакович Эрнест Иванович, ведущий научный сотрудник научно-практического центра учреждения «Гродненское областное управление МЧС» Республики Беларусь, образование высшее, автор 2-х статей в области электрогидравлических технологий..

Филипович Сергей Михайлович, научный сотрудник научно-практического центра учреждения «Гродненское областное управление МЧС» Республики Беларусь, образование высшее, автор 6-и патентов и 5-и статей в области пожарной безопасности и электрогидравлических технологий.

Скрипко Алексей Николаевич, начальник отдела исследований в области предупреждения чрезвычайных ситуаций учреждения «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, соискатель степени кандидата технических наук, образование высшее, автор 2-х патентов, 1-го научного издания в области пожарной безопасности.