

УДК 622.235

**ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ
НА АЛМАЗОНОСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЯКУТИИ**

С. В. Ковалевич¹, И. В. Зырянов^{1,2}, В. И. Чернобай³

¹Институт “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА” (ПАО), E-mail: institut-yna@alrosa.ru,
ул. Ленина, 39, 678174, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

²Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного
федерального университета им. М. К. Аммосова,

ул. Тихонова, 5/1, 678174, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

³Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: chernobay_vi@pers.spmi.ru,
Васильевский остров, 21 линия, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия

Приведены данные опытно-промышленных испытаний различных средств и технологий, обеспечивающих производительность труда и качество алмазосодержащей руды на требуемом уровне. Использование колонковых зарядов взрывчатого вещества с радиальным зазором и зарядов эмульсионных взрывчатых веществ с воздушными промежутками позволяет управлять напряженным состоянием массива и сокращает зоны повышенного риска повреждений кристаллов. Гирляндные заряды оказались удачной технологической находкой для сложных условий добычи. Выполнен анализ современных методов ведения буровзрывных работ на горнодобывающих площадках АК “АЛРОСА” (ПАО).

Рудник, карьер, кимберлитовая руда, взрывное разрушение, скорость детонации, отрезная щель, гранулометрический состав, забойка, запирающее устройство, формирование зарядов, затухание ударной волны, радиальный зазор, удерживающее приспособление, обводненные скважины

DOI: 10.15372/FTPRPI20220610

В настоящее время по объему добычи алмазной продукции АК “АЛРОСА” (ПАО) занимает лидирующие позиции в мире. Это связано с наличием минерально-сырьевой базы, производственного потенциала, применения современных технологий, а также непрерывного цикла работ от поиска и оценки алмазонасных месторождений до добычи и реализации товарной продукции, что расширяет ее возможности и обеспечивает экономическую устойчивость [1]. Поддерживать столь высокое положение компании на рынке непросто. Одно из действенных направлений — усовершенствование используемых технологий, поиск и разработка инновационных методов и средств для постановки бортов карьера в конечное положение, реализация “щадящего взрывания” в обводненных условиях и других методов буровзрывных работ, обеспечивающих сохранность добываемых кристаллов с одновременным удержанием темпов производства на требуемом уровне.

К сожалению, поддержание высоких темпов производства в современных условиях невозможно без применения взрывного способа добычи, а именно без формирования начального взрывного импульса, образующегося при детонации взрывчатых веществ (ВВ) и затем передаю-

щегося горной породе, который имеет большое значение, особенно при использовании мощных ВВ [2–7]. Величина этого начального импульса является важнейшим инструментом, научившись управлять которым можно разработать максимально алмазосберегающую технологию взрывной добычи кристаллов. Снижение ударных нагрузок на алмаз во всех процессах горной добычи и обогащения — первейшая цель в сохранении кристаллов.

Известно, что импульс взрыва рассчитывается как площадь, ограниченная кривой избыточного давления продуктов детонации в функциональной зависимости от времени. Сама же временная функция избыточного давления может иметь разнообразные формы в зависимости от характеристик применяемого ВВ. В целом эта кривая состоит из двух частей — высокоскоростного нарастания пикового давления и относительно более плавного его убывания. Применение менее мощных ВВ приводит к растяжению этой комплексной кривой и занижению амплитуды пикового давления, тем самым формируя щадящее взрывание [8]. Но для этого необходимы дополнительные средства, например специальные забойки, конструкции зарядов с воздушными осевыми или радиальными промежутками и другие методы ведения буровзрывных работ, в том числе и в скважинах с повышенной обводненностью [9–20].

Несмотря на многочисленные исследования, энергетика взрывного воздействия на массив горных пород недостаточно изучена, особенно в обводненных скважинах. Распространение волн напряжений в алмазосодержащих породах имеет научный интерес у исследователей, разрабатывающих новые методы и средства эффективного взрывного разупрочнения кимберлитовых руд с одновременной минимизацией негативного силового воздействия на кристаллы алмазов. Основные сложности связаны с решением следующих задач: описание механизма распространения ударных нагрузок в кристалле [21, 22]; описание механизма трещинообразования при переходе волны напряжений из вмещающей породы в кристалл (на стыке раздела двух сред) [23–25]; описание энергетики распространения волн напряжений в горных породах (в частности, в кимберлитах) при взрыве ВВ [26, 27]; разработка эффективной технологии взрывной добычи алмазов с минимизацией потери их качества [1, 10, 13, 14, 16, 17, 28–30].

Эффективность производства алмазодобывающих предприятий связана с качеством добываемой товарной продукции. Однако техногенное влияние на целостность кристаллов и, в частности, взрывной способ их добычи создают взаимоисключающие факторы: если возникает необходимость наращивания объемов добычи, то возрастает повреждаемость алмазов, а в попытках обеспечения надлежащего качества добываемого сырья — резко снижается производительность. В любом случае это негативно влияет на конкурентоспособную стоимость алмазов и на маркетинговую привлекательность. Добыча минерального сырья осложняется и высокой водообильностью, которая с углублением разработок только усиливается. Это замедляет процесс заряжания скважин и создает неблагоприятные условия для детонации заряда взрывчатого вещества. Поэтому поиск новых и усовершенствование имеющихся инструментов для заряжания и инициирования — весьма актуальная задача.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной работе используются следующие методы исследований: анализ; обобщение; синтез; эмпирические методы и опытно-промышленные испытания. Отработка алмазоносных месторождений АК “АЛРОСА” (ПАО) осуществляется открытым и подземным способами разработки, а подготовка горной массы к экскавации — буровзрывным способом. С учетом принятых систем разработок способы ведения буровзрывных работ в зависимости от их вида имеют свои отличительные особенности.

Подземные горные работы. В подземных условиях буровзрывной способ применяется при проходческих и очистных работах. В подземном руднике “Айхал” принята камерная система разработки с закладкой выработанного пространства (рис. 1а), а в подземном руднике “Удачный” им. Ф. Б. Андреева — подэтажная система разработки с торцевым выпуском руды и с отбойкой алмазоносной руды взрыванием вееров восстающих скважин длиной до 38 м (рис. 1б), при этом взрывные работы ведутся в зажатых условиях.

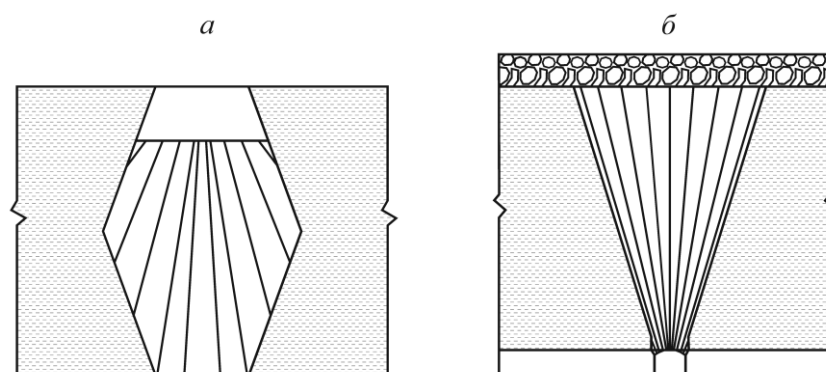


Рис. 1. Схемы бурения вееров вниз направленных (а) и восстающих (б) скважин

Наибольшую сложность вызывает ведение буровзрывных работ восстающими скважинами, включающее два основных этапа:

- формирование отрезной щели (компенсационного пространства);
- отбойка руды на компенсационное пространство.

Создание отрезной щели проводится в несколько этапов — формирование отрезного восстающего и дальнейшее его развитие до необходимых размеров. В кровле выработки бурятся две восстающие компенсационные скважины диаметром 1100 мм с недобуром не более 2 м до проектного контура. В качестве бурового оборудования используется буровой станок ZSYD-1.0/40/60. Коэффициент крепости кимберлита составляет 4–6 по шкале проф. М. М. Протодьяконова, средний объемный вес 2.5 г/см³. Согласно проведенному хронометражу, средняя скорость бурения составляет 4 м в смену. После проходки компенсационных скважин бурятся отбойные скважины диаметром 98–102 мм (рис. 2).

Как показали исследования, для исключения запрессовки взорванной горной массы [31] при проектировании расположения скважин в пределах заданного контура восстающего необходимо, чтобы объем образующейся после взрыва полости превышал взрывааемый более чем в 1.25 раза. Для рудника “Удачный” данный коэффициент принят 1.50.

После бурения выполняется зарядание отбойных скважин и взрывание. На начальном этапе осуществляется отбойка скважин 1, 2, 3 с поскважинным короткозамедленным взрыванием и последующей отгрузкой руды, далее — отбойка скважин 4, 6 и 5, 7 также с поскважинным короткозамедленным взрыванием. Затем проводится контролируемый выпуск рудной массы. При появлении признаков вскрытия полости отрезного восстающего для обеспечения безопасности зарядки следующих скважин отгрузка руды приостанавливается для исключения неконтролируемых просыпей.

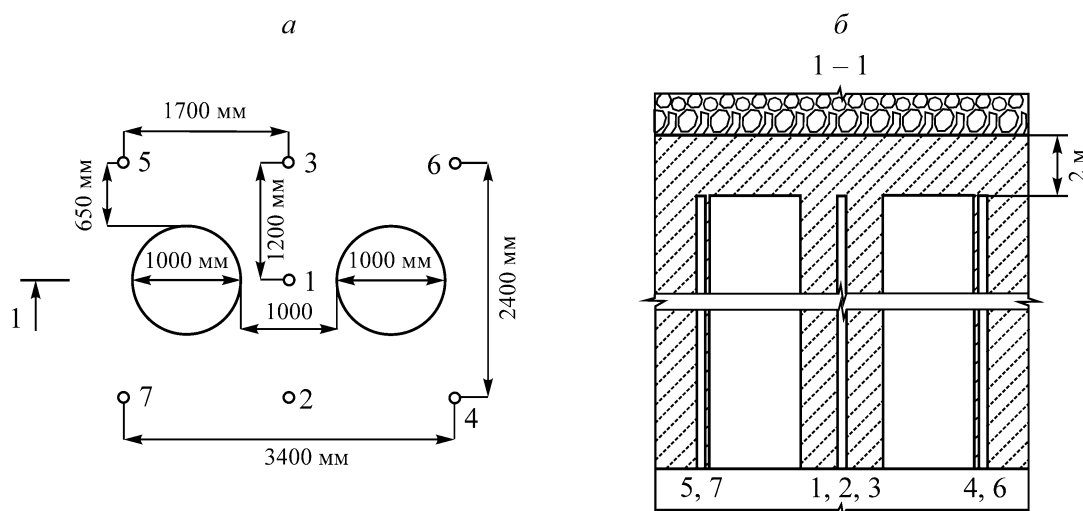


Рис. 2. Схема разбуривания скважин 1 – 7: *а* — вид сверху; *б* — разрез по линии 1 – 1

На сформировавшемся компенсационном пространстве отрезного восстающего расходящимися фронтами приступают к образованию отрезной щели (рис. 3). На первом этапе осуществляется отбойка скважин 1, 2 с контролируемым выпуском руды, затем скважин 7, 8, далее — зарядание и взрывание скважин 3, 4 и 9, 10 и аналогично отбиваются последующие ряды, при этом применяется короткозамедленное поскважинное взрывание. После формирования отрезной щели на сформированное компенсационное пространство проводят отбойку массива веерами восстающих скважин со следующими параметрами: расстояние между веерами 3.50–3.75 м, недобур скважин 1–2 м, поскважинное короткозамедленное взрывание, линия наименьшего сопротивления 3.5 м.

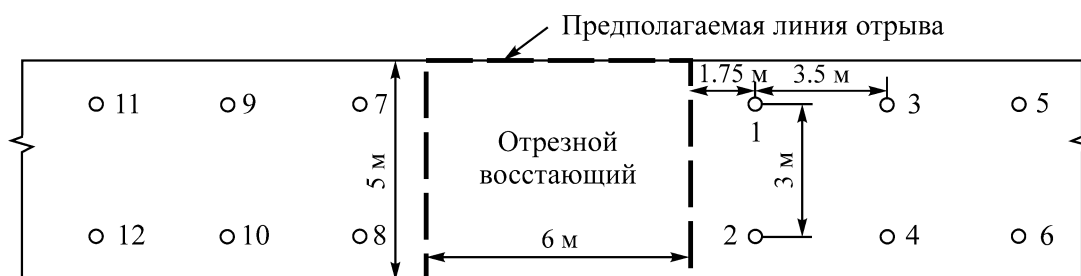


Рис. 3. Схема бурения отбойных скважин при формировании отрезной щели

Зарядание восстающих скважин проводится с применением гранулированных или эмульсионных взрывчатых веществ с помощью смесительно-зарядных машин. В качестве гранулированных ВВ применяется граммонит М21 с использованием пневматического способа зарядания. При зарядании эмульсионным ВВ (ЭВВ) смешивание компонентов (эмульсии и газогенерирующей добавки) происходит непосредственно в скважине при выходе из зарядного шланга зарядчика. Компоненты ЭВВ доставляются от пункта приготовления невзрывчатых компонентов, находящегося на территории базисного склада ВВ Удачинского ГОКа, к месту ведения взрывных работ доставщиками в специальных кассетах, из которых они перекачиваются в смесительно-зарядные машины.

Последовательность заряжания восстающих скважин ЭВВ следующая. Смесительно-зарядные машины устанавливают в выработку под пробуренными скважинами, определяют плотность ЭВВ путем взвешивания взятой пробы с помощью мерного сосуда. Регулировкой дозирования подачи газогенерирующей добавки достигается необходимая плотность ЭВВ ($0.95 - 1.15 \text{ г/см}^3$), при этом образуется некоторое количество отходов ЭВВ, подлежащих дальнейшей утилизации, что требует дополнительных расходов. Затем с помощью зарядчика вводят зарядный шланг в скважину до ее забоя и осуществляют зарядку необходимого количества ЭВВ. Далее извлекают зарядный шланг из скважины и устанавливают на его смеситель парашют для фиксации с промежуточным детонатором ДПМ-70, подсоединенным к средству инициирования, после чего вводят в скважину до предыдущего заряда и продолжают зарядку. При необходимости установки дополнительных промежуточных детонаторов операцию повторяют.

При проходке подземных горных выработок буровзрывным способом кроме использования патронированных тротилсодержащих ВВ применяются патронированные ЭВВ (ПЭВВ) местного приготовления II и III класса опасности. Также проводятся опытно-промышленные испытания заряжания горизонтальных шпуров наливными ЭВВ II класса опасности с помощью смесительно-зарядных машин производства НАО «Нипигормаш».

Переход на эмульсионные ВВ. В настоящее время одно из приоритетных направлений развития буровзрывных работ в АК «АЛРОСА» — замещение тротилсодержащих ВВ на ЭВВ местного приготовления. На площадках АК «АЛРОСА» эксплуатируются пункты по приготовлению компонентов ЭВВ стационарного и мобильно-модульного типа. В Удачинском ГОКе на базе ММТЛ-500 внедрен модуль патронирования ЭВВ производства НАО «Нипигормаш». Производственная линейка выпускаемой продукции включает производство патронированных ЭВВ диаметром 32–120 мм II и III класса опасности, применяемых для заряжания шпуров и скважин, а также в качестве промежуточных детонаторов и самостоятельных зарядов. Сенсибилизация выпускаемых ПЭВВ производится стеклянными микросферами.

С целью эффективного использования ПЭВВ Институтом «Якутнипроалмаз» совместно с НАО «Нипигормаш» выполнено научно-методическое сопровождение работ, определены оптимальные составы ПЭВВ и параметры буровзрывных работ, успешно применяемые в условиях подземных и открытых разработок АК «АЛРОСА» (ПАО).

Открытые горные работы. Основной объем производства горной массы в Удачинском, Айхальском и Мирнинско-Нюрбинском ГОКах приходится на открытые горные работы. По состоянию на 2022 г. он составляет 55.6 млн м^3 .

Подготовка к экскавации горной массы проводится буровзрывным способом. Взрыванию подлежат вскрышные породы, слагаемые из доломитов, известняков, долеритов и др., с коэффициентом крепости 1–16 по шкале проф. М. М. Протодяконова, плотностью $1.84 - 2.98 \text{ т/м}^3$ и кимберлиты с коэффициентом 1–7 и плотностью $2.31 - 2.56 \text{ т/м}^3$. Высота рабочих уступов 10–15 м, диаметр скважин 120–230 мм, сетка расположения скважин до $9 \times 9 \text{ м}$, перебур — 2 м. Для бурения скважин используются буровые станки и установки шарошечного и ударно-вращательного типов отечественного и зарубежного производства.

Заряжание скважин осуществляется гранулированными ВВ, наливными и патронированными ЭВВ механизированным способом с помощью смесительно-зарядных машин или ручным способом. В качестве промежуточных детонаторов выступают шашки-детонаторы типа ПТП-500, ТГ-500 и ПЭВВ НПГМ-П-II-М с массой патрона 630–1320 г. Внутрискважинное

иницирование выполняется неэлектрической системой инициирования (НСИ) Искра-С, Коршун-М ДИН-С с номиналами замедлений 450 мс и устройством с электронным замедлением инициирования Искра-Т. Поверхностная взрывная сеть монтируется с использованием НСИ Искра-П, Коршун-М ДИН-П, Искра-Старт и ДШ. Для инициирования поверхностной взрывной сети применяется система радиовзрывания Друза-М.

Применение зарядов с воздушным промежутком. Наряду с удлиненными колонковыми зарядами с высокой эффективностью применяются рассредоточенные заряды с воздушным промежутком при взрывании 15-метровых или сдвоенных 10-метровых уступов, а также в зимний период при погашении карьерных дорог, съездов и других элементов системы открытой разработки со смерзшимся/уплотненным верхним слоем. Для формирования зарядов, рассредоточенных воздушным промежутком, разработано, запатентовано и успешно применяется специальное устройство, состоящее из съемного фиксатора и рукава [32].

Сборка устройства проходит на взрывном блоке перед заряданием [33]. Формирование рассредоточенного заряда с воздушным промежутком при помощи данного устройства осуществляется следующим образом. В донной части пробуренной скважины (рис. 4) известными способами размещают заряд ВВ и промежуточный детонатор, подсоединенный к средству инициирования, затем формируют верхнюю часть заряда. Для этого подготовленное устройство, состоящее из рукава, нижняя часть которого завязана с помощью узла и съемного фиксатора, опускают в скважину, при этом его диаметр должен быть больше диаметра скважины. Для удобства опускания на дно устройства, образованное с помощью узла, кладут кусок горной породы. В верхней части устройства располагают заряд ВВ с размещением промежуточного детонатора, подсоединенного к системе инициирования и выполняют забойку.

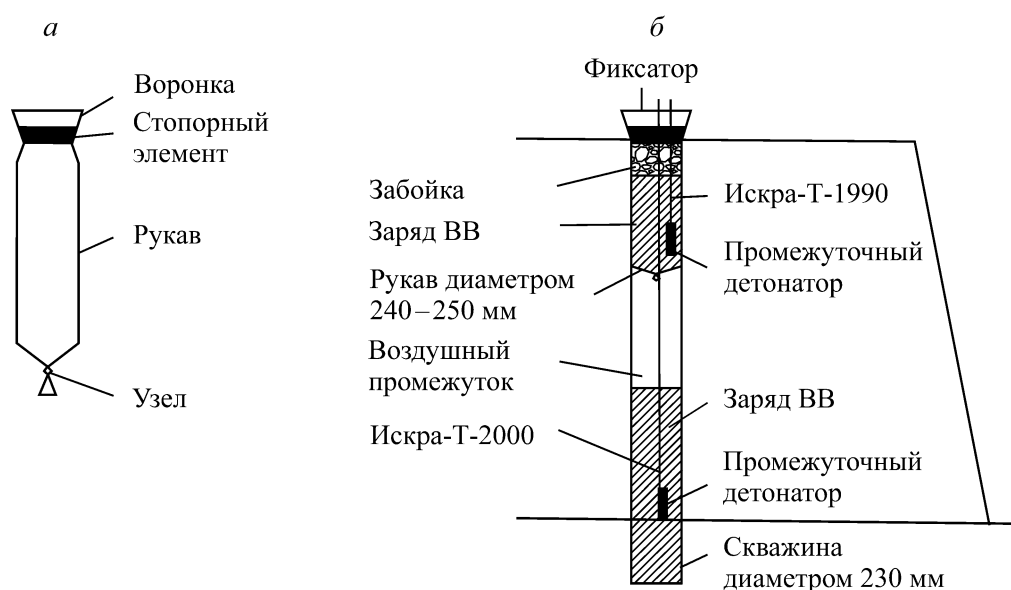


Рис. 4. Конструкция скважинного заряда и устройство для его рассредоточения воздушным промежутком: а — подготовленное устройство; б — рассредоточенный заряд с воздушным промежутком

Постановка бортов карьера в конечное положение. Особенности открытой разработки месторождений кимберлитовых трубок характеризуются большой глубиной карьеров. Для обеспечения безопасных условий ведения горных работ большое внимание уделяется сохранности бортов карьеров при постановке их в конечное положение, при этом высота уступов достигает 60 м.

Принятая в АК «АЛРОСА» технология постановки бортов карьера в конечное положение осуществляется буровзрывным способом с предварительным щелеобразованием (экранированием). Экранирующая щель создается для предохранения законтурного массива горных пород от разрушающего воздействия массовых взрывов при ведении горных работ вблизи конечного контура карьера. Согласно [34], при некоторых соотношениях акустических жесткостей сред от экрана отражается 20–25 % энергии волн напряжений, 67–72 % энергии волн теряется в объеме экрана и лишь 8–10 % энергии волн проходит за экран. Образование экранирующей щели с иной, чем у массива, акустической жесткостью происходит через 70 мс и более. За меньшее время щель не успевает раскрыться и действие взрывных волн снижается незначительно.

Для создания искусственной щели по линии проектного контура карьера на высоту нерабочего уступа бурятся контурные скважины. Скважины заряжаются гирляндными зарядами, сформированными из капсул чувствительных патронов ЭВВ, помещенных в матерчатый или полипропиленовый рукав и двух нитей ДШ. При этом рукав используется диаметром 90–100 мм, сквозь прорезь внутрь которого помещаются патроны ЭВВ диаметром 38–60 мм, через определенные промежутки в соответствии с линейной плотностью заряжения, параллельно поверх рукава проводятся две нити ДШ (рис. 5а). Фиксируются патроны и ДШ к рукаву затяжкой с помощью пластиковых хомутов или проволоки через определенные промежутки (рис. 5б).

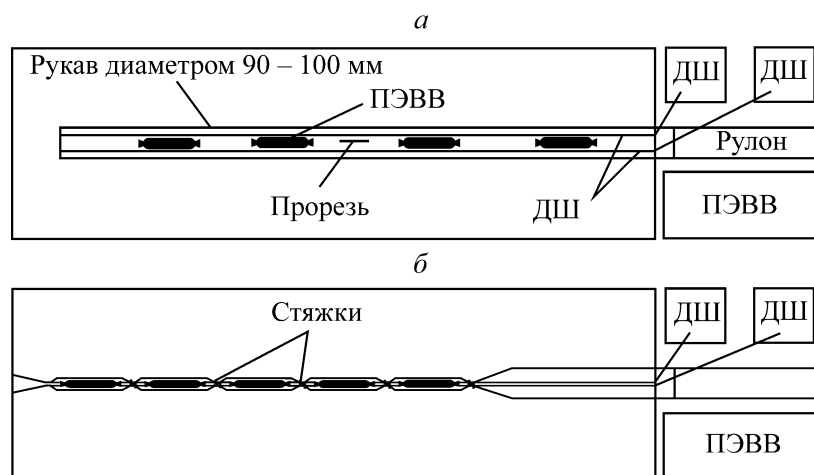


Рис. 5. Изготовление гирляндного заряда: а — проведение нитей ДШ; б — стяжка хомутами

Для удобства ручной зарядки контурных скважин глубиной, равной или превышающей 45 м, рекомендуется гирляндный заряд делить на две части: нижнюю и верхнюю. Эту конструкцию изготавливают заранее в помещении подготовки взрывчатых материалов. Конструкция гирляндных зарядов доставляется до места проведения взрывных работ, опускается в скважину контурного ряда вручную и фиксируется путем затягивания узла на предварительно подготовленную перекладину/жердь, установленную на поверхности устья скважины поперек ее оси, или связыванием краев рукавов от двух соседних скважин. При этом перекладина/жердь помещается с краю устья скважины со стороны ее наклона. Нити ДШ от гирляндных зарядов подсоединяют к магистральной линии из ДШ. Вверху скважины формируют забойку длиной 3 м с помощью фиксатора и рукава с диаметром больше диаметра скважины (рис. 6).

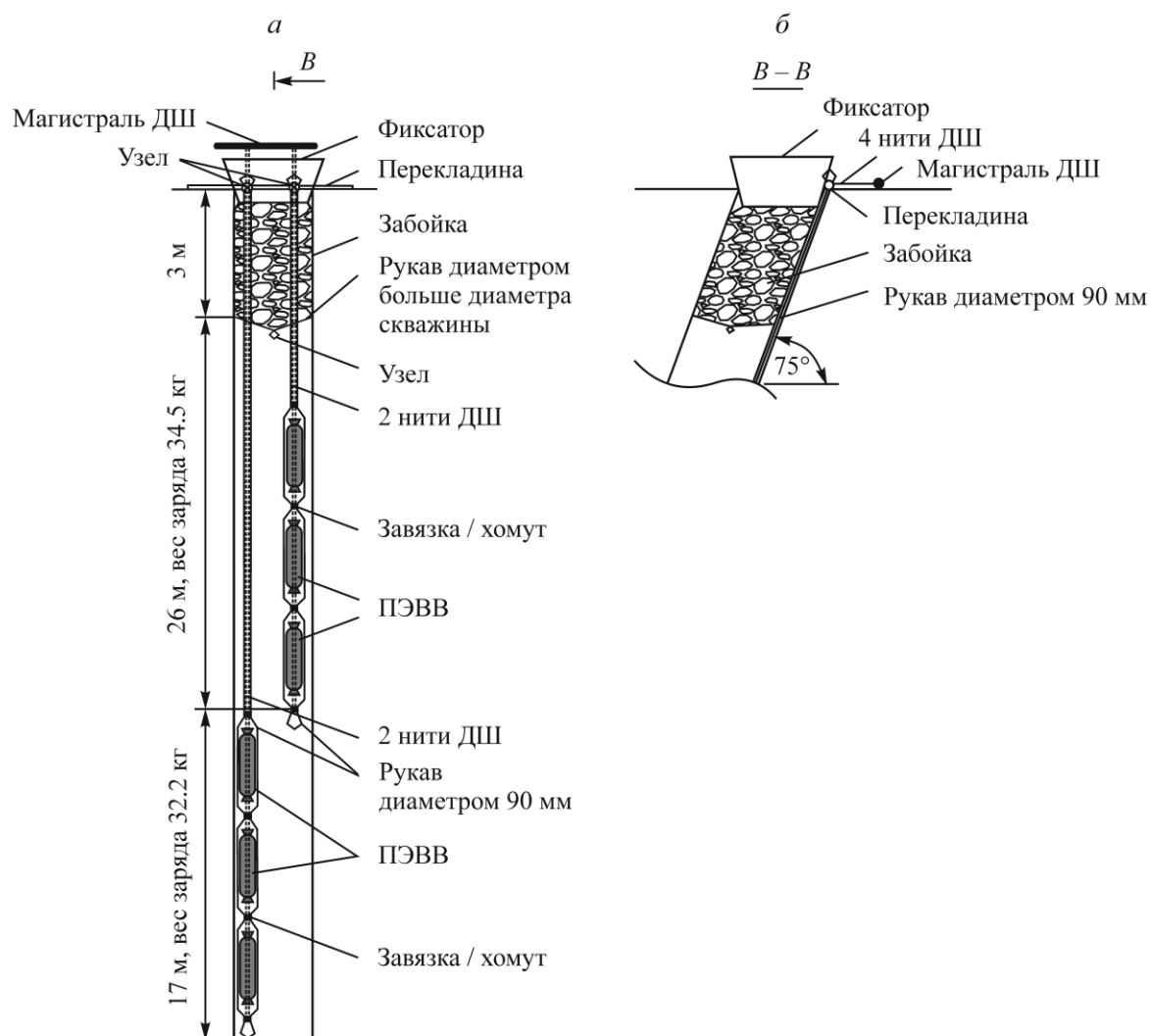


Рис. 6. Конструкция гирляндного заряда при зарядании скважин контурного ряда: *а* — вид сбоку; *б* — разрез по линии *В–В*, устье скважины

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных опытно-промышленных испытаний в подземных условиях добычи определено, что при длине колонки заряда более 8 м требуется установка дополнительного промежуточного детонатора через каждые 8 м для обеспечения стабильной детонации по всей колонке заряда. В нижней части колонки устанавливают промежуточный детонатор из 4–5 патронов аммонита 6ЖВ, затем с помощью ампулы минерализованной ускоренной АМУ 38-350 выполняют забойку. Конструкции скважинного заряда восстающей скважины приведены на рис. 7.

Согласно [35, 36], в 2019–2021 гг. в карьерах АК «АЛРОСА» (ПАО) проведены опытно-промышленные испытания применения увеличенных интервалов замедления при взрывании скважинных зарядов [37], в результате которых достигнуто уменьшение удельного расхода ВВ до 15 %, объема бурения до 10 % с улучшением качества дробления, характеризующимся увеличением выхода среднего куска во взорванной горной массе.

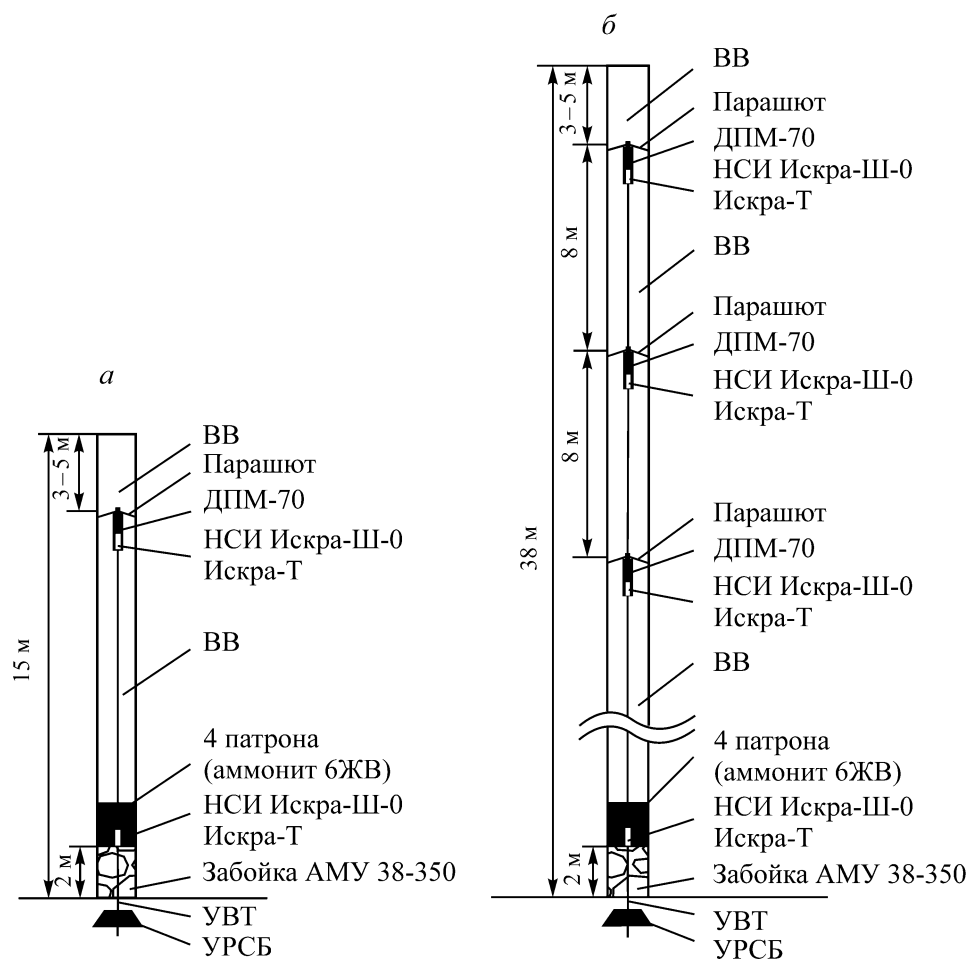


Рис. 7. Конструкция скважинного заряда с длиной восстающей скважины менее 15 м (а) и более 15 м (б): ДПМ — насос пожарный механический; УРСБ — устройство распылительное с блокировкой взрывной сети; УВТ — ударно-волновая трубка

Для реализации приведенного эффекта применялось поскважинное взрывание удлиненных колонковых и рассредоточенных зарядов с интервалами замедлений между скважинами в ряду 176, 200 мс, между рядами скважин 218, 243, 300 мс. С целью исключения подбоя поверхностной взрывной сети использовались внутрискважинные замедления с номиналом замедлений 1000 мс (НСИ), 1990–2000 мс (Искра-Т).

В 2021 г. в карьере “Заполярный” опробована и успешно используется технология постройки бортов со слабыми неустойчивыми породами буровзрывным методом, в которой осуществляется бурение контурного ряда сближенных скважин без их взрывания. Пустые скважины играют роль ориентира конечного контура при экскавации взорванной горной массы и концентрации ударной энергии от буферных взрывных скважин с последующим отражением ударной энергии по плоскости контурного ряда скважин.

Для реализации данной технологии на участках глубинных тектонических нарушений, залегаемых на бортах карьера, рекомендован следующий порядок действий:

- для формирования проекта массового взрыва геологической службой определяется участок тектонического разлома на поверхности блока;
- маркшейдерская служба карьера согласно выделенному участку выставляет точки границы участка тектонического разлома;

- служба буровзрывных работ на выделенном участке предусматривает сгущение контурных скважин ориентировочно на 30–35 % от штатно принятых параметров;
- сближенные контурные скважины на участке тектонического разлома не заряжаются.

Линейная плотность заряжения скважин контурного ряда определяется как

$$q_{\text{пзвв}} = q_{\text{эт}} \frac{Q_{\text{т400Г}}}{Q_{\text{пзвв}}}.$$

Здесь $q_{\text{эт}} = 1$ — линейная плотность заряжения шашек Т-400Г, кг/п. м; $Q_{\text{т400Г}}$, $Q_{\text{пзвв}}$ — теплоты взрыва шашек Т-400Г и НПГМ-П-II-M, кДж/кг. Подставив значения в формулу, имеем $q_{\text{пзвв}} = 1.52$ кг/п. м.

В 2020–2021 гг. в карьерах АК “АЛРОСА” успешно проведены опытно-промышленные испытания применения колонковых зарядов с радиальным зазором и с использованием устройства [32], в результате которых выявлено улучшение качества дробления горной массы с увеличением выхода средней фракции и уменьшение зоны переизмельчения [33].

При использовании конструкции заряда в подземных условиях (рис. 7) обнаружено особое влияние выбора систем инициирования, в части погрешности их срабатывания, на полноту детонации всей длины колонки заряда. С учетом значительной длины скважины (до 38 м) и размещением в ней нескольких промежуточных детонаторов требуется одновременное их инициирование с погрешностью, не превышающей время детонирования участка заряда между ними. Если расстояние между промежуточными детонаторами составляет 8 м, а скорость детонации ВВ принять 3500 м/с, то время детонирования такого участка заряда составит 2.3 мс. С учетом номенклатуры выпускаемых неэлектрических систем инициирования Искра-Ш и ее аналогов данную погрешность может обеспечить только НСИ Искра-Ш-0 с нулевым интервалом замедления.

Применение в качестве внутрискважинных систем инициирования НСИ Искра-Ш-0 требует дополнительных систем инициирования для короткозамедленного взрывания скважин, что увеличивает трудоемкость и стоимость буровзрывных работ. Также необходимо учесть, что скорость прохождения импульса по ударно-волновой трубке (волновод) НСИ — 2000 м/с, а скорость детонации ВВ значительно выше и составляет 3500 м/с и более. В этой связи образованная от взрыва первого от устья скважины промежуточным детонатором детонационная волна в ВВ опережает импульс в ударно-волновой трубке и инициирование последующих капсуль-детонаторов. Соответственно, промежуточный детонатор будет происходить не от импульса, а от детонации самого ВВ последовательно — от устья к забою скважины, что может вызвать нагнетание давления впереди фронта детонационной волны вдоль скважины и, как следствие, переуплотнение и выгорание ВВ. Чтобы избежать данного эффекта и обеспечить одновременный приход импульса во все капсуль-детонаторы, волноводы всех систем, находящихся в одной скважине, должны иметь одну длину и инициироваться на одном расстоянии от их конца, что характеризуется увеличением расхода ударно-волновой трубки и повышением стоимости буровзрывных работ.

Высокую эффективность использования в качестве внутрискважинных систем инициирования при взрывании длинных восстающих скважин показало устройство Искра-Т с электронным замедлением инициирования. Погрешность инициирования данного устройства не превышает 1 мс, что удовлетворяет заданным требованиям. Диапазон времени замедления составляет от 10 до 2000 мс, которого достаточно для короткозамедленного взрывания веерообразных восстающих скважин. Кроме этого, применение Искра-Т аналогично с НСИ Искра-Ш и не требует дополнительного переобучения взрывников.

Приведенные системы инициирования являются не предохранительными II класса и используются при взрывных работах на земной поверхности, а также в рудниках и шахтах, не опасных по газу или пыли. Но так как рудник “Удачный” относится к опасным по газу и нефтепроявлениям, то применение данных систем в рамках опытно-промышленных испытаний осуществляется одновременно с помощью распылительного устройства с блокировкой взрывной сети, которое обеспечивает предварительную инертизацию призабойного пространства горных выработок. Для дальнейшего промышленного совместного применения данных устройств в выработках, опасных по газу и нефтепроявлениям, в настоящее время разрабатывается обоснование безопасности производственного объекта.

В ходе опытно-промышленных испытаний выявлены некоторые недостатки применяемых технологий заряжания восстающих скважин посредством гранулированных и эмульсионных ВВ. К общим недостаткам данных технологий можно отнести высыпание/выпадение ВВ из полости скважины в процессе заряжания, что приводит к потере некоторого количества ВВ и необходимости дальнейшей его утилизации. При заряжании ЭВВ трудноосуществим контроль плотности заряжания, которая влияет на стабильное протекание детонации по всей длине заряда, зависит от количества подаваемого ВВ и скорости извлечения зарядного шланга из заряжаемой скважины. При этом количество подаваемого ВВ за единицу времени должно соответствовать скорости формирования колонки восстающего скважинного заряда ВВ с заданной плотностью, что реализовать в промышленных условиях весьма проблематично.

С целью уменьшения негативного влияния приведенных факторов на качество буровзрывных работ специалистами АК “АЛРОСА” (ПАО) ведутся разработки новых устройств и способов заряжания восстающих скважин.

С понижением горных работ в карьерах возникает необходимость ведения буровзрывных работ в обводненных условиях, при этом формирование рассредоточенных зарядов в таких условиях имеет свои особенности, которые заключаются в следующем.

В пробуренную скважину (рис. 8а) опускают два промежуточных детонатора (ПД), подсоединенных к системе инициирования (СИ) с одинаковыми номиналами замедлений, причем один патрон-боевик необходимо опустить до уровня линии перебура, второй — до проектного уровня размещения верхнего заряда. Затем рулон рукава располагают на специальных салазках над заряжаемой скважиной, через открытый край рукава помещают кусок горной породы и завязывают двойной узел, далее рукав опускают до дна скважины (рис. 8б), отрезают на 0.5–1.0 м выше устья и крепят к фиксатору, который устанавливается в устье скважины (рис. 8в). Через фиксатор в рукав вводится зарядный шланг и опускается до забоя скважины, подается ВВ в необходимом количестве для формирования нижнего заряда (рис. 8г), после этого шланг поднимается на проектную высоту размещения верхнего заряда и осуществляется повторная подача ВВ в необходимом количестве для формирования верхнего заряда (рис. 8д). В процессе технологического создания рассредоточенного заряда в скважине пустой участок рукава (промежуток между верхним и нижним зарядами) испытывает объемное давление воды, которое его (рукав) сжимает и не допускает проваливания верхнего заряда на нижний. Проконтролировать наличие плотного контакта промежуточного детонатора с верхним зарядом можно плавным подергиванием за ударно-волновую трубку.

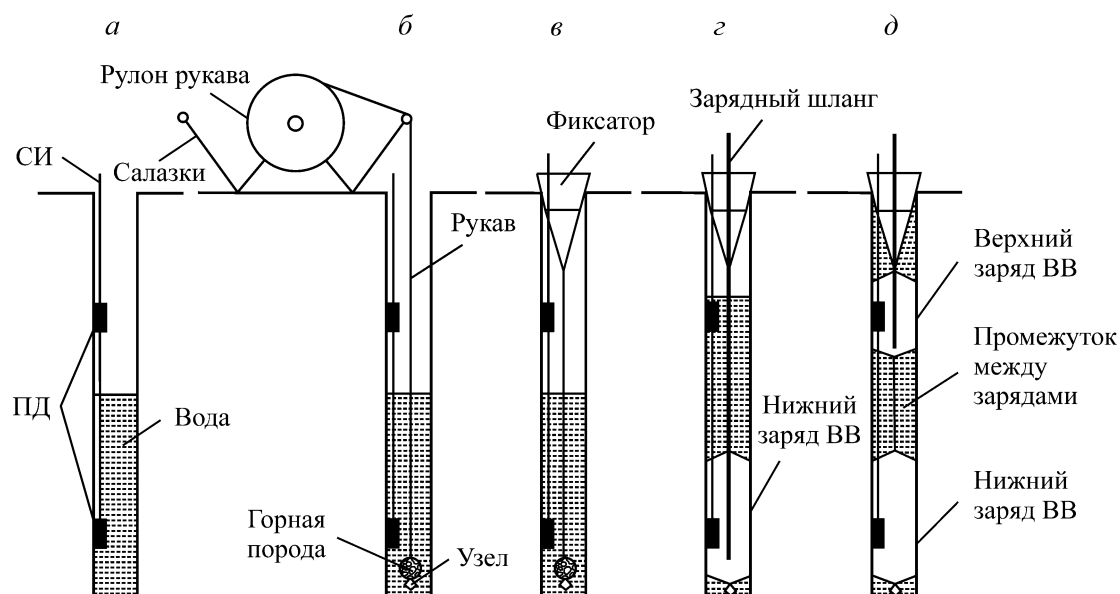


Рис. 8. Формирование рассредоточенного заряда в обводненной скважине с помощью разработанного устройства

Формирование рассредоточенного заряда в водной среде данным способом возможно также для зарядов с радиальным зазором с применением рукава меньшего диаметра, чем диаметр скважины. Для надежной фиксации верхнего заряда по высоте колонки необходимо наличие минимальной высоты столба воды, содержащейся в скважине, которая должна быть не менее расстояния между верхним и нижним зарядами, а для зарядов с радиальным зазором определяется как

$$H_v = h_p + \frac{(S_s - S_z)h_z}{S_s},$$

где H_v — минимальная высота столба воды в скважине, м; h_p — высота промежутка между частями рассредоточенного заряда, м; S_s — площадь поперечного сечения скважины, м; S_z — площадь поперечного сечения заряда, м; h_z — высота заряда, м.

Отметим, что инициирование рассредоточенных зарядов осуществляется только с использованием Искра-Т, при этом в обводненных скважинах инициирование верхнего и нижнего зарядов должно быть одновременным, а в сухих скважинах для верхнего заряда с номиналами замедлений 1990 мс, для нижнего — 2000 мс.

Как показывает опыт ведения взрывных работ в обводненных массивах в карьерах АК “АЛРОСА” (ПАО) удельный расход ВВ следует уменьшать до 30 % в сравнении со взрыванием в необводненном массиве. При формировании гирлянды из патронов НПГМ-П-П-М, применяемой для создания искусственной щели по линии проектного контура карьера, необходимо учитывать дифференцированную линейную плотность зарядов по глубине скважины, т. е. на нижней части скважины (40 % от длины скважины) заряд рекомендуется усиливать на 25 % от средней плотности заряжения ($q_{пэВВ} = 1.9$ кг/п. м), на верхней части (60 % от длины скважины) — уменьшать на 12.5 % ($q_{пэВВ} = 1.33$ кг/п. м).

На основе результатов исследований экранирующих свойств искусственной щели в породах с различными физико-механическими свойствами в таблице приведена классификация пород по степени трещиноватости и экранирования [38].

Зависимость эффективности экранирования от степени трещиноватости

Класс пород	Трещиноватость	Расстояние между трещинами, м	Характеристика массива и эффективности экранирования
I	Очень редкая	3.0 – 1.0	Массивные и толстослоистые осадочные породы. Очень высокая эффективность экранирования
II	Редкая	1.0 – 0.3	Массивные и толстослоистые осадочные породы. Высокая эффективность экранирования
III	Густая	0.3 – 0.1	Тонкослоистые осадочные породы, зоны тектонических нарушений. Средняя эффективность экранирования
IV	Очень густая	0.10 – 0.03	Зоны дробления расположены на значительных глубинах. Низкая эффективность экранирования

С увеличением трещиноватости массива уменьшается эффективность экранирования. Также взрыв заряда в контурных скважинах отрицательно воздействует на законтурный массив из-за разупрочнения слагаемых его отдельностей горных пород и увеличения трещиноватости. Бурение контурных скважин в массивах с высокой трещиноватостью сопровождается обрушением стенок пробуренных скважин, при этом становится невозможным поместить в них гирляндный заряд на всю глубину, что приводит к потере скважин. Данные факторы значительно увеличивают стоимость и трудоемкость ведения буровзрывных работ.

Таким образом, постановка уступов в предельное положение с предварительным щелеобразованием в сильно нарушенных массивах горных пород является малоэффективным и требует применения других методов ведения буровзрывных работ при заоткосных работах.

ВЫВОДЫ

В алмазодобывающей промышленности буровзрывные работы по-прежнему распространены, несмотря на значительные (до 20 %) потери кристаллов. Переход на эмульсионные ВВ местного приготовления, в том числе с использованием модуля патронирования, позволяет достичь финансовой прибыли, ускорения технологии заряжания шпуров и скважин, высокой безопасности ведения буровзрывных работ, особенно в процессах доставки ВВ и заряжения. Подземная отбойка руды восстающими скважинами с предварительным щелеобразованием показала высокую эффективность; разработанные параметры конструкции заряда с рекомендуемым одномоментным режимом инициирования промежуточных детонаторов при помощи устройства с электронным замедлением инициирования Искра-Т позволяют достичь высоких результатов, хотя и с незначительным увеличением стоимости буровзрывных работ. На открытых горных работах применение зарядов с воздушным промежутком наряду с удлиненными колонковыми зарядами весьма успешно с применением Искра-Т; в качестве вспомогательного инструмента для создания воздушного промежутка рекомендовано специальное устройство, состоящее из съемного фиксатора и рукава. Детонация зарядов ВВ в скважинах с воздушным промежутком дает возможность равномернее распределять энергию взрыва в массиве с обеспечением высокой сохранности алмазов. Высокую устойчивость бортов карьера при постановке их в конечное положение обеспечивает искусственная щель по линии проектного контура карьера, образуемая с помощью гирляндных зарядов из патронированных эмульсионных ВВ.

Основываясь на положительных результатах проведенных опытно-промышленных испытаний, планируется продолжить исследования, ориентированные на оценку техногенной повреждаемости алмазов от взрывных работ с применением зарядов с радиальным зазором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айгистов М. Р., Герасимов Е. Н., Бондаренко И. Ф., Зырянов И. В. Современные технологии при добыче и переработке алмазосодержащего сырья // ГИАБ. — 2022. — № 5-2. — С. 6–21.
2. Викторов С. Д. Взрывное разрушение породы — основа прогресса в горном деле // ГИАБ. — 2015. — № 1. — С. 63–75.
3. Чебан А. Ю., Секисов А. Г., Хрунина Н. П., Васянович Ю. А. Технологии комбинированной выемки руд при разработке месторождений кристаллосырья // ГИАБ. — 2022. — № 7. — С. 55–67.
4. Fitsak V. V., Lomakina E. S., Strakhova A. A., and Chernobai V. I. Determination of room-and-pillarsystemparameters for transition to greater depths, *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2017, Vol. 12, No. 22. — P. 12322–12331.
5. Жариков С. Н., Кутуев В. А. Анализ сейсмического эффекта в различных породах и грунтовых условиях // ГИАБ. — 2020. — № 12. — С. 44–53.
6. Afanasev P. I., Sergey K., and Valentin I. The equation of state for explosive detonation products, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 2018, Vol. 9, No. 13. — P. 865–868.
7. Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N., and Mysin A. V. Impact of multicharge detonation on explosion pulse value, Paper presented at the IOP Conf. Series: Earth Env. Sci., 2018, Vol. 194, No. 8. — 082031.
8. Лапин А. А. Определение параметров способа щадящего взрывания обводненных трещиноватых массивов с целью повышения сохранности кристаллосырья: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — СПб., 1993. — 20 с.
9. Масаев Ю. А., Мильбергер Н. В. Механизм взаимодействия взрыва заряда ВВ с гидрозабойкой и формирования импульса взрыва // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 4 (98). — С. 27–31.
10. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б. Забойка взрывных скважин на карьерах. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2008. — 224 с.
11. Moldovan D., Chernobai V., and Kovalevskiy V. Solving the issue of regulating the granulometric composition of shattered rock mass depending on the quality of locking explosion products in the explosion cavity, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 2017, Vol. 8, No. 11. — P. 133–1142.
12. Ефремов Э. И., Никифорова В. А. Влияние диаметра скважины на площадь контакта взрывчатого вещества с разрушаемой породой и на выход мелких фракций // Современные ресурсоэнергосберегающие технологии горного производства. — 2012. — № 2 (10). — С. 9–15.
13. Шевкун Е. Б., Гоманюк Д. С. Скважинные заряды с воздушными промежутками // Ученые заметки ТОГУ. — 2017. — Т. 8. — № 4. — С. 520–531.
14. Пат. 2664281С1 РФ, МПК E21C 41/22, E21F 15/08, E21F 16/00. Способ разработки кимберлитовых месторождений / И. Ю. Рассказов, Г. В. Секисов, А. Г. Секисов, А. Ю. Чебан, Н. П. Хрунина: № 2017136355, заявл. 13.10.2017 г. // Опубл. в БИ. — 2018. — № 23.
15. Marinin M. A., Evgrafov M. V., and Dolzhikov V. V. Production of blasting operations for a given granulometric composition of ore within the framework of the “mine-to-mill” concept: Current state and prospects, *Geo Assets Eng.*, 2021, Vol. 332, No. 7. — P. 65–74.
16. Таннант Д. Д., Петерсон Д. Развитие взрывных работ на алмазном руднике ЭКАТИ (ЕКАТИ™) // Взрывное дело. — 2019. — № 125-82. — С. 157–180.
17. Кульминский А. С., Калмыков В. Н., Котик М. В., Петрова О. В. Моделирование и опытно-промышленные испытания взрывной отбойки зарядами с водяным кольцевым зазором // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2019. — № 3. — С. 225–237.
18. Еременко А. А., Еременко В. А., Ермак Г. П., Эйсмонт С. Н., Терешенков А. А. Опыт ведения буровзрывных работ на карьере Тейского месторождения // Горн. пром-сть. — 2004. — № 5. — С. 59–61.
19. Козырев С. А., Аленичев И. А. К вопросу влияния обводненности карьера на механизм разрушения апатит-нефелиновых руд и параметры буровзрывных работ // Взрывное дело. — 2018. — Вып. 114/71. — С. 160–177.

20. Ефремов Э. И. Особенности и методы взрывного разрушения обводненных горных пород // Металлургическая и горнорудная пром-сть. — 2010. — № 2. — С. 151–156.
21. Павловский М. Н., Хищенко К. В., Жерноклетов М. В. и др. Фазовые превращения и сжимаемость алмаза и графита в ударных волнах // Изв. КБГУ. — 2017. — Т. 7. — № 4. — С. 28–30.
22. Зотеев В. Е. Параметрическая идентификация диссипативных механических систем на основе разностных уравнений // Машиностроение. — 2009. — 344 с.
23. Menjulin M. G., Kazmina A. J., and Afanasew P. I. Die Einwirkung der Sprengarbeiten auf den Erhaltungszustand des Massivs ausserhalb der Sprengzone mit und ohne Vorspaltenbildung, Scientific Reports on Resource Issues, Freiberg, Int. University of Resources, 2011, Vol. 1. — P. 184–187.
24. Хищенко К. В., Чарахчян А. А., Милевский В. В., Фортон В. Е., Фролова А. А., Шуршалов Л. В. Об усилении сходящихся ударных волн в пористых средах // Хим. физика. — 2007. — Т. 26. — № 12. — С. 46–56.
25. Sher E. N. Modeling the axially symmetric fracture evolution in deep-hole blasting, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2020. — P. 012008.
26. Господариков А. П., Выходцев Я. Н., Зацепин М. А. Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку // Зап. ГИ. — 2017. — Т. 226. — С. 405–411.
27. Шер Е. Н., Александрова Н. И. Исследование влияния конструкций скважинного заряда на размер зоны разрушения и время ее развития в горных породах при взрыве // ФТПРПИ. — 2007. — № 1. — С. 76–85.
28. Власов В. М., Андросов А. Д., Бескрованов В. В. Уровень современных кристаллосберегающих технологий добычи алмаза на Севере // ГИАБ. — 2001. — № 8. — С. 5–6.
29. Дугарцыренов А. В., Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Николаев С. П. Взрывное разрушение сложноструктурных мерзлых массивов с разнопрочными слоями // Взрывное дело. — 2016. — № 115/72. — С. 71–76.
30. Шадрин А. И., Ященко Д. А. Энергоемкость основных и вспомогательных процессов добычи алмазов // Горн. журн. — 2010. — № 5. — С. 70–75.
31. Шехурдин В. К., Несмотряев В. И., Федоренко П. И. Горное дело. — М.: Недра, 1987. — 440 с.
32. Пат. 210477U1 РФ, МПК F42D 1/08, F42D 3/04. Устройство для формирования скважинного заряда / С. В. Ковалевич, С. И. Ким, А. А. Кожемякин и др.: № 2021134393, заявл. 24.11.2021 г. // Опубл. в БИ. — 2022. — № 11.
33. Зырянов И. В., Бондаренко И. Ф., Ковалевич С. В., Ким С. И. Влияние взрыва скважинного заряда с радиальным зазором на качество разрушения алмазоносной руды // ГИАБ. — 2022. — № 5-2. — С. 57–70.
34. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.
35. Кочанов А. Н. К вопросу о выборе интервалов замедления при короткозамедленном взрывании // Физические проблемы разрушения горных пород. — Новосибирск, 2003. — С. 162–164.
36. Митюшкин Ю. А., Лысак Ю. А., Плотников А. Ю., Ружицкий А. В., Шевкун Е. Б., Лещинский А. В. Оптимизация параметров взрывных работ увеличением интервалов замедления // ГИАБ. — 2015. — № 4. — С. 341–347.
37. Боровиков В. А., Лексовский А. М. Особенности амплитудно-временных характеристик волны при взрыве гранулита малой плотности // Физические проблемы разрушения горных пород — М.: ИПКОН РАН, 2005. — С. 255–258.
38. Волох А. С. Основы управления действием взрыва с помощью экранирования. — М.: Наука. — 1989. — 222 с.

Поступила в редакцию 13/VII 2022

После доработки 18/VIII 2022

Принята к публикации 24/XI 2022