
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ

УДК 622.235.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ
ПРИ РАБОТЕ МОДУЛЬНОГО ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ГЕНЕРАТОРА
УДАРНЫХ ВОЛН

© 2024 г. В. О. Соловьев^{1, *}, И. М. Шведов^{2, 1}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

*e-mail: solovievvo@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.03.2024 г.

После доработки 05.06.2024 г.

Принята к публикации 15.06.2024 г.

Повышение эффективности использования энергии взрыва для разрушения породного массива при работе твердотопливных генераторов ударных волн, к которым относится взрывореактивный комплекс, во многом зависят от параметров импульса давления, физико-механических свойств пород и горно-геологических условий. В статье приведены результаты моделирования параметров взрывного импульса при работе взрывореактивного комплекса, исследованы величины амплитуд импульса давления в различных режимах его длительности. Определен рациональный режим работы взрывореактивного комплекса при разработке пород с коэффициентом крепости $f = 5-20$ по шкале проф. М. М. Протодяконова.

Ключевые слова: ударные волны, взрывореактивное бурение, горные породы, газодинамика, импульс давления, моделирование

DOI: 10.31857/S0235711924050139, **EDN:** NTFATI

Для эффективного управления параметрами взрывного импульса следует выявить основные определяющие факторы и их влияние на динамику импульса в процессах переноса энергии в гетерогенных средах, таких, как горные породы. Решение такой задачи заключается в нахождении временной функции распределения всех частиц среды по их координатам и импульсам, что практически является неразрешимой задачей.

Представление модели породного массива как сплошной среды, упрощает рассмотрение динамики его разрушения. Основное влияние на формирование импульса давления и его нарастания в образующейся скважине при работе взрывореактивного комплекса (ВРК) оказывает тип взрывчатого вещества (ВВ), конструкция его заряда и частота последовательного взрывания кассет.

Моделирование возникающего поля напряжений, его пространственное распределение для реального породного массива, сводится к значительным упрощениям и ограничениям, связанными с гетерогенным и многокомпонентным его геологическим строением, но в первую очередь будет зависеть от начальных условий — энергии взрыва и параметров взрывного импульса.

Поэтому исследованию эволюции импульса давления в процессе формирования и распространения волны детонации в образуемой скважине при работе ВРК явля-

ются актуальными в проблеме поиска управления параметрами поля напряжения в породном массиве.

В образующейся скважине при работе ВРК возникают сложные нестационарные газодинамические процессы, и одним из факторов, определяющих характер поля напряжения, является процесс детонации ВВ, который определяет величину начального пикового давления на фронте детонационной волны [1–4].

Возникающее поле напряжений и его распространение в массиве зависит от количества кассетных модулей в рабочем органе (РО) ВРК и особенностей их инициирования.

Исследования вариации пикового давления на фронте детонационной волны были выполнены на упрощенной математической модели без выделения фронта детонации.

Исследовать особенности распространения детонационной волны и ее переход в волну напряжения в массиве можно на модели изоэнтропического движения в уравнениях нестационарной газовой динамики.

В рассматриваемой цилиндрической системе координат вектор полной скорости V можно определить из осевой u и радиальной v его составляющих:

$$V^2 = u^2 + v^2.$$

Для исследования распространения волны напряжения в сплошной среде в условиях рассмотрения одномерной задачи можно воспользоваться подходом академика Е. И. Шемякина, использующего метод Лагранжа с выбором в качестве независимых переменных начальной координаты r_0 и координаты r в момент времени t [5, 6].

Уравнения движения и неразрывности в переменных Лагранжа имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_0}{\partial r} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r_0} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\varphi) r_0}{r_0 r} &= \rho \frac{\partial u}{\partial t}, \\ \frac{\partial r}{\partial r_0} &= \frac{\rho_0}{\rho} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_r , σ_φ — главные нормальные напряжения, Па; ρ , ρ_0 — плотность и начальное значение плотности среды, кг/м³; u — скорость перемещения частицы в направлении r , м/с.

В практических задачах целесообразно использовать относительную объемную деформацию $\varepsilon(r_0, t)$, ее дифференциал — как изменение плотности среды при динамическом процессе. Тогда уравнение неразрывности (1) (второе уравнение) можно переписать следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{r_0}{r} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{r_0}{r} \frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{2u}{r_0}. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой уравнение движения и неразрывности в переменных деформации, где $r(r_0, t)$ положение частицы в момент времени t ; r_0 — начальная координата частицы.

Следующее допущение к модели — массив рассматривается как идеально связанное тело (твердое тело со сцеплением), в котором состояние разрыва сплошности рассматривается как работа сил трения на сдвиг при разрыве когезионных связей. Тогда в условии теории прочности Кулона–Мора это соответствует линейной зависимости между инвариантами напряжений и имеет вид

$$\sigma_\varphi - \sigma_r = C + \eta(\sigma_\varphi + \sigma_r),$$

где C — сцепление, Па; η — коэффициент внутреннего трения; $\sigma_\varphi + \sigma_r$ — величина сдвиговых напряжений, Па. Эти величины будут константы для рассматриваемого типа горных пород. В случае цилиндрической волны напряжений эти

величины являются главными сжимающими напряжениями и различаются между собой, т.е. $\sigma_\phi \approx \gamma\sigma_r$, где коэффициент γ учитывает силы трения между частицами в условиях динамического нагружения среды. Можно предположить, что данное условие будет определять процесс перехода в область пластических деформаций, количественно зависящее от величины внутреннего трения.

Из анализа паспорта прочности в главных напряжениях для идеальной сплошной среды следует σ_r — предел прочности на одноосное сжатие, Па.

В условиях динамического нагружения величину среднего напряжения сжатия σ и величину объемной деформации $\varepsilon(r_0, t)$ можно выразить через модуль объемного сжатия K : $\sigma = K\varepsilon$, где $K = \lambda + 2/3\mu$, а λ, μ — константы Ламе, Па.

Волна напряжений представляет собой затухающий колебательный процесс сжатия–растяжения, скорость распространения которой совпадает со скоростью звука в среде.

Величину критических деформаций $\varepsilon(r_0, t)$ для массива в таких процессах, с учетом сил трения, можно оценить исследуя функцию вида:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{K}, & \text{при } \sigma < \sigma_E, \\ \varepsilon' - 1 + \left[\sum_{i=1}^n a_i \left(1 + \gamma_i \frac{\sigma - \sigma_E}{E_i} \right)^{-1/\gamma_i} \right]^{-1}, & \text{при } \sigma > \sigma_E, \end{cases}$$

где σ_E — предел упругости, Па; ε' — величина относительных пластических деформаций; a_i — коэффициент, характеризующий пластичность в рассматриваемом i -м элементарном объеме массива.

Аналитическое решение подобных задач достаточно сложное, поэтому для практического решения применяют феноменологический подход с использованием численных методов, чтобы с определенной точностью приблизиться к решению [7–12].

Для одиночных скважинных зарядов известны исследования формирования импульса давления и управления взрывом [13–17].

В настоящей статье было выполнено моделирование вариации параметров взрывного импульса для работы переносного взрывореактивного комплекса ВРК-21, работающего на самозаглубляющемся принципе с модульным набором рабочих кассет, снаряженных ВВ и регулируемой системой синхронно-перекрывающего срабатывания зарядов по сравнению с забойными зарядами ВВ [18].

В табл. 1 приведены габаритные параметры ВРК-21, состоящего из 3-х модулей по 7 кассет в каждом модуле.

Таблица 1. Габаритные параметры ВРК-21

Габаритные размеры	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм
Рабочий орган (РО) 21 кассета	160	58	800
Блок электрического инициирования	160	58	200

Оценить влияние работы РО комплекса на параметры взрывного импульса можно по анализу изменения давления в образующейся скважине [19, 20]. Учитывая особенности инициирования взрыва, обозначим через изменение координаты z_t закон движения продуктов детонации одной кассеты в образующейся скважине. В общем виде закон изменения газодинамического состояния — нарастание скорости ударной волны и величины давления можно представить как

$$P = P_{\max} F(z_t), \quad (3)$$

где $F(z_t)$ — функция, учитывающая конструкцию заряда ВВ и динамику развития взрыва (определяется высотой работающего заряда).

Для моделирования процесса и выявления общих закономерностей движения, силы сопротивления на данном этапе не учитываются. Такой процесс можно представить в виде дифференциального уравнения

$$P = \frac{1}{3} Nm \frac{d^2 z}{dt^2}, \quad (4)$$

где N — количество взрывааемых касет в рассматриваемом цикле, штуки; m — масса ВВ заряда, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения, образующейся скважины, кг/м², t — длительность импульса, с.

Неравномерность движения продуктов детонации по длине скважины (разные скорости и ускорения) учтена множителем 1/3.

Функцию $F(z_t)$ из уравнения (3) для детонации N касет можно представить в виде

$$F(z_t) = \left(\frac{h}{h + z_t} \right)^3, \quad (5)$$

где h — высота одной касеты, м.

После интегрирования уравнения (4) с учетом уравнений (3) и (5), получим

$$h + z_t = \sqrt{\frac{3P_{\max} h t^2}{Nm} + h^2}, \quad (6)$$

Подставляя полученное решение (6) в уравнение (3), получим уравнение для оценки влияния массы заряда, количества взрывааемых касет на параметры взрывного импульса

$$P = P_{\max} \left(\frac{\frac{1}{3} Nm h}{P_{\max} t^2 + \frac{1}{3} Nm h} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

В табл. 2 приведены характеристики ВВ верхнего и нижнего зарядов касеты, используемых в количественных расчетах.

Таблица 2. Характеристики ВВ для одной касеты

Контур касеты	Тип ВВ	Плотность, кг/м ³	Теплотворная способность, кДж/кг	Скорость детонации, м/с	Показатель изоэнтропы, k		Масса ВВ, кг
					$P > 200$, МПа	$P \leq 200$, МПа	
Верхний	ТНТ	1620	4230	6850	3.23	1.25	0.115
Нижний	Октоген	1780	5500	8730	3.05	1.25	0.171
	Гексоген	1620	5400	8100	3.05	1.25	

Для исследования влияния типа ВВ на параметры импульса давления в образующейся скважине с учетом особенностей их инициации, приведенных в табл. 2, преобразуем уравнение (7) к виду

$$P = P_{\max} \left[\frac{\frac{1}{3} h (\rho_H l_H + \rho_B l_B)}{P_{\max} t^2 + \frac{1}{3} h (\rho_H l_H + \rho_B l_B)} \right]^{3/2}, \quad (8)$$

где ρ_n, ρ_v — плотности ВВ соответственно для нижнего и верхнего контуров, кг/м^3 ; l_n, l_v — высота засыпки ВВ в кассете, соответственно для нижнего и верхнего контуров, м.

Схематичное устройство кассеты представляет собой одноразовый стальной усеченный конус с центральным отверстием и кольцевыми проточками с наружной и внутренней сторон, разделенные между собой стенкой (рис. 1). В кольцевые проточки с двух сторон стенки установлены кольцевые прижимной и забойный заряды ВВ, в которые вмонтированы прижимные цилиндрические отражатели, оснащенные соответственно кумулятивными прижимными и забойными зарядами ВВ. При инициировании кольцевого прижимного заряда ВВ с наружной стороны кассеты детонация на ее внутреннюю сторону передается через сквозные каналы в разделяющей стенке, оснащенной зарядами ВВ. Инициирование зарядов ВВ в каналах происходит с замедлением, обеспечивающим перекрытие во времени срабатывания забойных зарядов по сравнению с прижимными, что обеспечивает прижатие кассеты к забою.

Исходя из условия, что время разрушения одной кассеты составляет 1 мс, были выполнены модельные расчеты нарастания импульса давления при инициировании одной кассеты, одного модуля (состоит из 7 кассет), двух модулей и при полной отработке ВРК-21.

После подставления данных табл. 1 и 2 в формулу (11), были получены следующие эмпирические зависимости для расчета импульса давления и его длительности в зависимости от взрыва количества кассет. Расчетные формулы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Эмпирические зависимости расчета импульса давления

Детонация кассет, штук	Расчетная формула
1	$P(t) = 2 \cdot 10^6 \cdot 2.34^{1.5} (200t^2 + 2.34)^{-1.5}$
7	$P(t) = 2 \cdot 10^6 \cdot 114.6^{1.5} (200t^2 + 114.6)^{-1.5}$
14	$P(t) = 2 \cdot 10^6 \cdot 458.5^{1.5} (200t^2 + 458.5)^{-1.5}$
21	$P(t) = 2 \cdot 10^6 \cdot 1032^{1.5} (200t^2 + 1032)^{-1.5}$

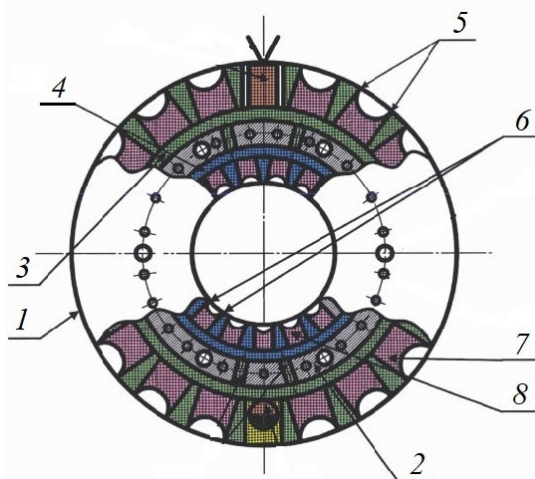


Рис. 1. Общая схема устройства кассеты: 1 — стальной усеченный конус; 2 — разделяющая стенка; 3 — кольцевой прижимной заряд ВВ; 4 — кольцевой забойный заряд ВВ; 5 — прижимной цилиндрический отражатель; 6 — забойный цилиндрический отражатель; 7 — кумулятивный прижимной заряд ВВ; 8 — кумулятивный забойный заряд ВВ.

Результаты моделирования изменения давления в рабочем канале приведены на рис. 2. Расчет был выполнен по формуле (8), использовались данные, представленные в табл. 1 и 2. Исследовалась динамика развития импульса давления при последовательной работе ВРК (от детонации одной кассеты до отработки полного комплекса — 21 кассеты).

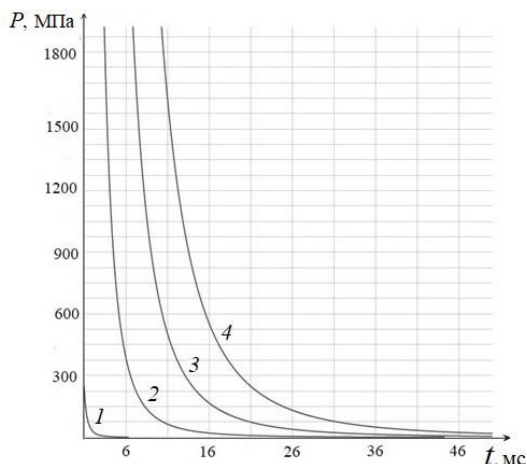


Рис. 2. Изменение величины импульса давления и его длительности в рабочем канале при работе ВРК: 1 — детонация одной кассеты; 2 — детонация 7 кассет; 3 — детонация 14 кассет; 4 — детонация 21 кассеты.

Прослежено нарастание общего импульса давления его амплитуды и длительности в рабочем канале при работе 1, 7, 14 и 21 кассеты. Сравнения стадий и параметров нарастания фронта импульса давления проводились по отношению к импульсу давления от одной кассеты, что было в сравнительных анализах принято за единственный импульс при работе ВРК.

Анализ полученных модельных графиков зависимостей нарастания импульса давления и длительности фронта давления был выполнен для условия создания максимально по частоте рационального цуга волн напряжений в массиве, рост трещин при этом не учитывался. Эффективность возникающих критических сжимающих напряжений для формирования зоны регулируемого дробления (за пороговое значение критического напряжения было принято $\sigma_{сж} = 250$ МПа) за счет интерференции волн напряжений оценивалось по длительности поддержания суммарного импульса. Установлено, что наибольшая эффективность от работы ВРК наблюдается при работе двух модулей. Длительность суммарного импульса давления возрастает при этом в 2.16 раза по сравнению с работой одного модуля, а при включении в работу третьего модуля относительная длительность возрастает только в 1.35 раза. Это объясняется тем, что в этом случае интенсивность разрушения смещается в зону практически нерегулируемого дробления, за счет возрастания амплитуды пикового давления. Блок электрического инициирования кассет позволяет регулировать частоту инициирования кассет в диапазоне 100–1000 Гц.

Проанализирован процесс нарастания фронта импульсов давления от работы модулей. Графики, приведенные на рис. 3, соответствуют огибающей фронта импульсов давления при поочередной работе модулей — одного (детонация 7 кассет), двух (детонация 14 кассет) и полной работе ВРК-21 (детонация 21 кассеты) при длительности процесса в скважине 3 мс.

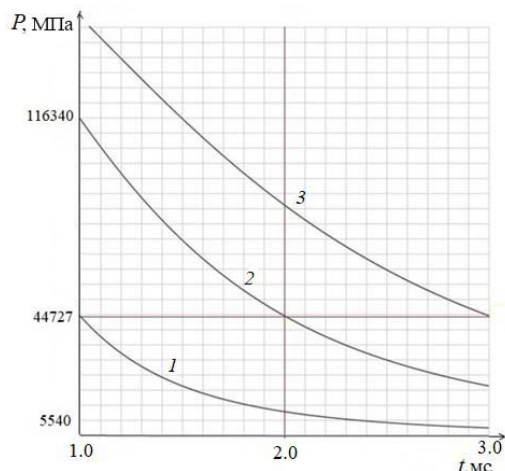


Рис. 3. Изменение величины давления в скважине при работе: 1 — одного; 2 — двух; 3 — трех модулей в диапазоне длительности импульса 3 мс.

Выполненный анализ показал, что наибольший спад величины давления происходит в течение 2 мс от инициирования взрыва модуля (или последовательности взрывания модулей). Такое сравнение было обусловлено еще тем, что длительность одиночного импульса от взрыва одной кассеты составляет 2 мс. Сравнение относительного спада величины давления для длительности импульса 2 мс показало, что относительное падение давления при работе двух модулей по сравнению с работой одного составляет 8 раз, при сравнении работы трех модулей и двух наблюдается падение давления в 3 раза.

На рис. 4 приведен график относительной длительности огибающей фронта импульса давления при работе одного, двух и трех модулей для анализа и выбора эффективной схемы работы ВКР-21 на породах высшей степени крепости (коэффициент крепости $f=20$ по классификации горных пород по проф. М. М. Протодьяконову). Такой подход был обусловлен тем, что при работе на породном массиве, сложенным такими горными породами могут быть задействованы все три модуля (работа полного набора кассет — 21 штуки).

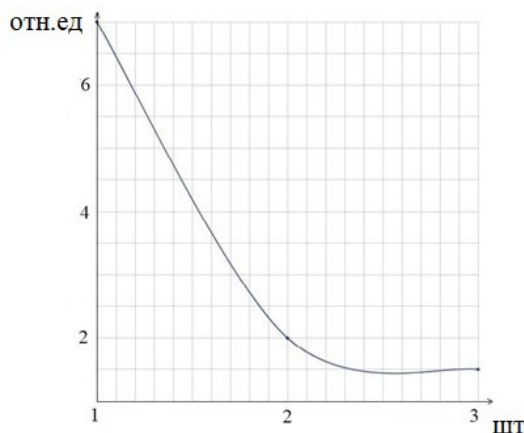


Рис. 4. Сравнение динамики развития относительной длительности эффективного импульса давления при совместной работе одного, двух и трех модулей (штуки).

Из анализа графика следует, что наибольший разрыв в длительности импульса давления наблюдается при работе между первым и вторым модулями. Происходит резкий спад длительности в 4.6 раза, что свидетельствует о преобладании в этот период нестационарных газодинамических процессов. Включение в работу третьего модуля (очередных семи кассет ВВ) делает процесс работы ВКР-21 квазистационарным, наблюдается линейное развитие нарастания огибающей фронта импульса давления.

Полученные результаты моделирования позволяют обосновать эффективные режимные параметры взрывореактивного бурения с применением установки ВКР-21 в зависимости от физико-механических свойств пород и конкретных задач.

Выводы. 1. Исследованы параметры развития импульса давления на разных стадиях работы ВКР-21. Получены расчетные эмпирические зависимости величины длительности импульса давления от количества взрывааемых кассет. **2.** Предложен подход к аналитическому решению выбора эффективных параметров взрывного импульса и возникающими напряжениями в породном массиве с учетом вязко-пластичных свойств среды. **3.** С учетом технических возможностей ВКР-21 были исследованы параметры возникающего импульса давления при работе одной кассеты, поочередной работы отдельных модулей и полного комплекса. Установлено, что для формирования зоны регулируемого дробления в массиве, эффективное возрастание импульса давления в 2.16 раза наблюдается при работе двух модулей ВКР. Показано, что процесс возрастания величины взрывного импульса носит выраженный нелинейный характер в течение 2 мс с начала инициирования. **4.** В анализе результатов выполненного моделирования работы ВКР-21 выявлено падение длительности импульса давления в 4.6 раза при окончании работы первого модуля до включения в работу второго, что свидетельствует о преобладании в этот период неустановившихся газодинамических процессов, а включение в работу третьего модуля переводит такой процесс в квазистационарный режим. Выполненный анализ результатов моделирования показал, что для создания эффективного ударного фронта давления достаточно использовать совместную работу 2-х модулей комплекса, что экономически целесообразно с учетом энергоемкости процесса разрушения массива.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Университета науки и технологий МИСИС. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шухман В. Л.* О влиянии среды, окружающей накладной заряд ВВ, на размеры воронки взрыва // Взрывное дело. 1967. № 63/20. С. 259.
2. *Островский А. П.* Новые процессы бурения глубоких скважин. М., Л.: Госгортехнадзор, 1960. 188 с.
3. *Шухман В. Л.* Дробление породы при бурении скважин взрывом // Взрывное дело. 1963. № 53/10. С. 63.
4. *Solov'ev V. O., Shvedov I. M.* Investigation of the gas-dynamic processes in the operation of an explosive-reactive complex // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1451 (1). P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1451/1/012018>.
5. *Шемякин Е. И.* Волны напряжений при подземном взрыве. В сборнике «Взрывное дело». Результаты научных исследований и практического опыта в области взрывного дела. М.: Межведомственная комиссия по взрывному делу при Академии горных наук, 2001. № 93/50. С. 4.
6. *Литвинский Г. Г.* Аналитическая прочность горных пород и массивов. Донецк: Норд-Пресс, 2008. 207 с.

7. Миндели Э. О., Кусов Н. Ф., Корнеев А. А., Марцинкевич Г. И. Исследование волн напряжений при взрыве в горных породах. М.: Наука, 1978. 112 с.
8. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
9. Gorev V. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion // J. of Physics: Conf. Series. 2019. V. 1425. 012177.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012177>
10. Ляхов Г. М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982. 288 с.
11. Друкованый М. Ф., Кравцов В. С., Чернявский Ю. Е. и др. Расчет зон разрушения при взрыве цилиндрических зарядов в скальных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1976. № 3. С. 70.
12. Lukic S., Draganic Hr., Gazic G., Radic I. Statistical analysis of blast wave decay coefficient and maximum pressure based on experimental results // WIT Transactions on The Built Environment. 2020. V. 198. P. 65.
13. Горинов С. А., Маслов И. Ю. Оценка влияния эффективного импульса при взрыве цилиндрического заряда // Проблемы недропользования. 2022. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.005>
14. Гончаров С. А., Дугарцыренов А. В. Формирование импульса давления при взрыве скважинных зарядов на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). 2000. № 12. С. 31.
15. Дугарцыренов А. В., Рахманов Р. А., Заровняев Б. Н., Шубин Г. В. Управление импульсом давления при взрыве скважинных зарядов на карьерах // Взрывное дело. 2018. № 117/76. С. 62.
16. Дугарцыренов А. В., Ким И. Т., Рахманов Р. А., Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Николаев С. П. Оценка времени истечения продуктов детонации из скважины в зависимости от параметров зарядной полости // Взрывное дело. 2015. № 114/71. С. 136.
17. Николаев С. Н., Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Дугарцыренов А. В. Формирование конструкции заряда с учетом динамики деятельного слоя в условиях многолетней мерзлоты // Взрывное дело. 2019. № 123/80. С. 162.
18. Solov'ev V.O., Shvedov I. M. Portable complex for controlled explosive reactive drilling of rocks // Int. J. of Engineering and Technology. 2018. V. 7 (2.23). P. 140.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11901>
19. Goel M. D., Matsagar V. A., Gupta A. K., Marburg S. An abridged review of blast wave parameters. // Defence Science J. 2012. V. 62 (5). P. 300.
20. Shirbhate, P.A., Goel, M.D. A Critical Review of Blast Wave Parameters and Approaches for Blast Load Mitigation // Arch Computat Methods Eng. 2021. V. 28. P. 1713.
<https://doi.org/10.1007/s11831-020-09436-y>