
**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 622.236.4

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВЗРЫВНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ВЗРЫВОРЕАКТИВНОМ РАЗРУШЕНИИ
ПОРОДНЫХ МАССИВОВ**

© 2023 г. В. О. Соловьев^{1,*}, И. М. Шведов^{2,1}

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

²*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

*e-mail: solovievvo@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Выполнено моделирование изменения спектральной плотности импульса напряжений при работе взрывореактивного комплекса в породном массиве. Разработан алгоритм вычисления распределения спектральной плотности импульса давления для нестационарных газодинамических процессов с учетом физико-механических свойств горных пород.

Ключевые слова: взрывореактивный способ, разрушение горных пород, спектральный анализ, импульс давления

DOI: 10.31857/S0235711923040156, **EDN:** XWRKLI

Для выбора рационального режима работы взрывореактивного комплекса (ВРК) при проведении горных работ различного назначения, таких как дробление негабарита, взрывное бурение скважин или создание воронок выброса, необходимо проводить исследования процессов формирования импульса давления в центральном канале и импульса напряжений в породном массиве [1].

Эффективность действия взрыва определяется параметрами взрывного импульса, условиями взрывания и физико-механическими свойствами горных пород [2, 3].

Для работы ВРК особое значение имеют исследования формирования нестационарного газодинамического канала — как источника силового поля давления, а также временных факторов самого взрывного импульса. Сложность исследований заключается в конструктивных особенностях работы такого комплекса, где формирование силового поля в канале уже носит нестационарный характер, а процесс распространения вглубь массива полей напряжения также нестационарный из-за особенностей (цикличности) развития зон разрушения. Картину разрушения в массиве во многом определяют характер интерференции упругих волн, процессы преломления и отражения на границах отдельностей, минеральных зерен и геологических неоднородностях. Все это приводит к образованию зон нерегулируемого дробления в массиве.

Параметры для формирования оптимального импульса давления в центральном канале во многом будут определяться требуемыми значениями для импульса напряжения в породной массе, такими как значения упругих свойств пород (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, акустическая жесткость среды) и параметры затухания, отражения и преломления упругих волн.

В ряде экспериментальных работ были выполнены исследования действия ударных волн в породных массивах и на лабораторных образцах, с учетом параметров взрывного импульса и физико-механических свойств пород, а также исследовались последовательные стадии процесса растрескивания с учетом напряжений в массиве и эквивалентных образцах [4–9]. Для анализа и моделирования динамических процессов при взрывных работах применяют различные численные методы, позволяющие определять временные и скоростные параметры разрушения [10, 11].

В настоящей статье исследуются параметры взрывного импульса при работе ВРК методом частотного преобразования Фурье [12, 13].

Для первого этапа исследований – качественной оценки эффективности возникающих параметров импульса давления в центральном канале при работе ВРК была рассмотрена модель массива сплошной изотропной средой с заданными физико-механическими свойствами. Для модели необходимо было определить параметры импульса напряжений, исходя из требуемой степени дробления, и решить задачу перехода к обоснованию эффективных параметров взрывного импульса.

Рассматривался импульс критических напряжений для области в массиве, где величина динамической нагрузки превышает предел прочности на разрушение. Для количественной оценки использовали ранее полученные результаты моделирования затухания амплитуд упругих колебаний ударной волны в массиве [14].

В модельном плане единичный импульс напряжений можно представить как некоторую временную функцию $J_0(t)$

$$J_0(t) = \int_{t_1}^{t_2} \sigma_t dt, \quad (1)$$

где σ_t – величина критических (разрушающих) напряжений в рассматриваемой точке в данный момент времени, Па; t_1 – время начала разрушения, с; t_2 – время окончания процесса разрушения, с.

Полагая, что импульс полностью участвует в дроблении, его параметры будут эффективны для данной области массива, т.е. для разрушения породной массы до требуемого гранулометрического состава.

При традиционных способах ведения взрывных работ на горных предприятиях получить эффективный импульс дробления для всех точек массива невозможно из-за особенностей размещения взрывчатого вещества (ВВ) в скважине и существующих схемах инициирования ВВ. Конструкция ВРК и принцип его работы позволяет создать квазиоднородное поле напряжений от суперпозиции импульсов давления в ударной волне, тем самым обеспечить условия эффективного дробления значительной области в массиве и уменьшить переизмельчение породы в ближней зоне к центральному каналу. Для определения границ области дробления необходимо также учитывать физико-механические свойства самого массива, параметры затухания самого импульса при его распространении и энергоемкость процесса разрушения.

Известно, что коэффициент поглощения упругих колебаний зависит так же от формы самого импульса. Такая зависимость обусловлена неодинаковым поглощением среды в разном частотном диапазоне.

Анализ распределения спектральной плотности импульса напряжений, позволит решить задачу о нахождении эффективных параметров для формирования импульса давления в центральном канале ВРК.

Используя преобразования Фурье можно перевести временную функцию $J_0(t)$ в частотную функцию $J(f)$ посредством интегрального соотношения

$$J(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} J_0(t) e^{-i2\pi ft} dt.$$

Исходная независимая переменная t для времени (длительность импульса, с) изменяется в интервале $(-\infty, +\infty)$. Получаемая новая независимая переменная будет определяться в том же интервале и имеет смысл частоты колебаний, Гц.

Применение метода Фурье к анализу импульса напряжения требует некоторый комментарий, т.к. возникающее поле напряжений при взрыве заряда в массиве обусловлено однократным импульсом, поэтому необходимо принять некоторые допущения для представления такого процесса волной напряжений.

Разрушаемый взрывом породный массив изначально разбит различными по длине и раскрытию системами трещин, поэтому необходимо учитывать экранирующее действие на распространение энергии взрывной волны. Выделяют две характерные зоны разрушения — это ближняя зона или зона регулируемого дробления, где происходит интенсивное разрушение на отдельности (минеральные зерна) и зона нерегулируемого дробления. Варьируя параметрами работы ВРК, можно целенаправленно изменять крупность дробления в ближней зоне и минимизировать зону нерегулируемого дробления, где наблюдается стохастический процесс разрушения. Поэтому важными исследованиями в выборе режимов работы ВРК является моделирование и анализ формирования областей дробления в зависимости от развития газодинамических процессов в центральном канале.

Модель суперпозиции импульсов напряжения при работе ВРК позволяет на первом этапе рассматривать такой процесс как периодический, а любую гармоническую функцию $f(x)$ можно разложить в ряд Фурье по тригонометрическим функциям

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega t n + b_n \sin \omega t n), \quad (2)$$

где a_0, a_n, b_n — коэффициенты Фурье

$$a_n = c_n \cos \varphi_n, \quad b_n = c_n \sin \varphi_n; \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{b_n}{a_n}.$$

Коэффициенты a_n и b_n вычисляются по формулам

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \cos \omega t n dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \sin \omega t n dt,$$

где T — период основной частоты, с; n — любое целое число.

Взрывные процессы и их исследования возможны с применением Фурье преобразования, обобщая метод разложения на непериодическую функцию, делая допущение в рассмотрении непериодической функции как предельный случай периодической при неограниченно возрастающем периоде, полагая стремление периода основной частоты к бесконечности $\omega \rightarrow \infty$.

Тогда функция (2) после преобразования и замены переменных будет иметь вид

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt,$$

или

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (3)$$

где

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (4)$$

Функция (3) представляет собой спектральную плотность амплитуд. Если периодическая функция имеет дискретный спектр, то при выполнении предельного перехода от ряда Фурье к его интегралу, происходит слияние отдельных линий спектра и такой спектр уже будет сплошным.

Распределение спектральной плотности по частотам спектра является важной характеристикой состава сплошного спектра.

Породный массив можно рассматривать как квазистатическую систему, реагирующую на импульс давления, т.е. способную на резонансный отклик в определенном частотном диапазоне.

Для оптимизации процесса разрушения, управления таким процессом, необходимо формировать взрывной импульс таким образом, чтобы распределение спектральной плотности импульса и резонансные свойства среды находились в соответствии друг с другом. Согласованность такой системы для частотного диапазона можно оценить, вводя некоторый коэффициент отношения амплитуд колебаний

$$\varphi(\omega_n) = \frac{A_n}{A_0},$$

где $\varphi(\omega_n)$ — коэффициент соответствия амплитуд колебаний на частоте ω_n ; A_n — амплитуда возбужденного колебания на данной частоте в массиве, м; A_0 — амплитуда возбуждающего колебания (амплитуда взрывного импульса) на той же частоте, м.

При сплошном спектре величину этого коэффициента можно оценить через отношение спектральных плотностей распределения взрывного импульса и отклика системы

$$\varphi(\omega_n) = \frac{S_1(\omega_n)}{S_2(\omega_n)}, \quad (5)$$

где $S_1(\omega_n)$ — спектральная плотность амплитуд отклика в массиве на частоте ω_n , м/Гц; $S_2(\omega_n)$ — спектральная плотность амплитуд в центральном канале при работе ВРК на частоте ω_n , м/Гц.

Очевидно, что величина коэффициента $\varphi(\omega_n)$ будет зависеть от частоты колебаний, физико-механических (акустических) свойств массива, степени его нарушенности, размера и ориентации трещин в зоне разрушения.

Зная физические свойства горных пород, теоретически, можно построить зависимость коэффициента соответствия от частоты колебаний, но для получения более надежных результатов требуются экспериментальные исследования.

Вычислив распределение спектральной плотности импульса давления в центральном канале при работе ВРК можно определить и параметры самого импульса

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

или

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_1(\omega)}{\varphi(\omega)} e^{i\omega t} d\omega \quad (6)$$

Эффективные параметры импульса можно определить из условия создания критических полей напряжения — распределения спектральной плотности (4). С учетом конкретного строения горных пород и требуемого размера зоны разрушения при расстоянии r от центрального канала до точки в породном массиве и акустической жесткости z (для упрощения анализа модели будем рассматривать две отдельности в массиве

Таблица 1. Акустические свойства некоторых горных пород

Порода	ρ , кг/м ³	v_p , м/с	$z \times 10^{-6}$, Н/(м ³ с)	θ , м ⁻¹
Габбро	2900	6250	18.1	0.050
Гранит	2780	4350	12.6	0.130
Песчаник	2500	2800	7.1	0.260
Серпентинит	2740	6400	17.5	0.085

ве с импедансами z_1 и z_2 и коэффициенте поглощения θ), спектральную плотность импульса в массиве определяем следующим образом:

$$S_1(\omega) = \frac{S(\omega) z_2}{\theta r z_1} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (7)$$

Зная спектральную плотность требуемого импульса (7) можно обратным преобразованием вычислить его параметры – длительность τ , с; величину создаваемых им напряжений σ_1 , Па

$$\sigma_1(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{i\omega t} d\omega z_2}{2\pi \theta r z_1} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Для единичного импульса (1) величины спектральных плотностей имеют вид

$$S(\omega) = \sigma \tau \frac{\sin 0.5\omega\tau}{0.5\omega\tau};$$

$$S_1(\omega) = \frac{J_0(t) z_2}{\theta r z_1} \frac{\sin 0.5\omega\tau}{0.5\omega\tau}.$$

Характеристику самого импульса напряжений в глубине массива можно определить из выражения

$$\sigma_1(t) = \frac{J_0(t)}{2\pi \theta r} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{z_1}{z_2} \frac{\sin 0.5\omega\tau}{0.5\omega\tau} e^{i\omega t} d\omega.$$

Для расчетов параметров импульсов необходимо знать акустические параметры горных пород в массиве. Некоторые данные по акустическим свойствам (объемная плотность ρ , скорость продольной волны v_p , акустическая жесткость z и коэффициент затухания θ) приведены в табл. 1.

Алгоритм выполнения расчетов, следующий: **1.** По формуле (4) проводим вычисление спектральной плотности амплитуд колебаний $S_0(\omega)$ в центральном канале работающего ВРК, используя данные ранее проведенного моделирования газодинамических процессов [11]. **2.** Вычисляем спектральную плотность упругих колебаний в массиве на расстоянии r с учетом его акустических свойств $S_1(\omega)$

$$S_1(\omega) = \left(\theta r \frac{z_2}{z_1} \right)^{-1} S_0(\omega). \quad (8)$$

3. Рассчитываем величину возникающих напряжений в массиве на расстоянии r от центрального канала ВРК (задавая физико-механические свойства пород в массиве,

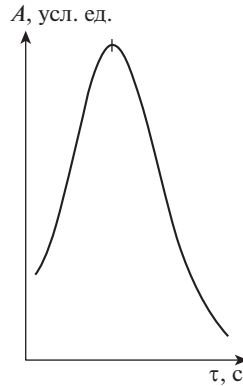


Рис. 1. Модельная форма импульса давления для участка центрального канала.

определяем границы области разрушения, тем самым можно управлять зоной регулируемого дробления)

$$\sigma_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\theta r \frac{z_2}{z_1} \right)^{-1} S_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (9)$$

4. Спектральную плотность импульса давления, возникающего в центральном канале ВРК, оцениваем по формуле, с учетом (5) и (8)

$$S_2(\omega) = \left[\varphi(\omega) \theta r \frac{z_2}{z_1} \right]^{-1} S_0(\omega). \quad (10)$$

5. Величину давления, соответствующего спектральной плотности (10), находим, используя выражение (6)

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\varphi(\omega) \theta r \frac{z_2}{z_1} \right]^{-1} S_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (11)$$

В дальнейшем, для численного моделирования были использованы результаты, полученные в работе [11].

Исследования показали, что газодинамический процесс при работе ВРК стохастический и весьма сложен для математического анализа, поэтому для упрощения вычислений был выбран участок фронта волны давления с максимальной амплитудой давления. Для количественной оценки модельного распределения спектральных плотностей импульсов напряжения в массиве и давления в центральном канале ВРК, был выбран фрагмент графика распределения величины давления в центральном канале. Форма исследуемого импульса показана на рис. 1.

Для модельных вычислений, длительность импульса, обеспечивающего эффективность разрушения породного массива (созданию критических напряжений σ_r), была принята $\tau = 100$ мс, предполагая, что такой импульс должен удовлетворять следующим условиям — превосходить критические амплитудные значения смещения в 2 раза и создавать зону разрушения в радиусе 10 м от стенки образующегося взрывного канала.

Расчеты распределения спектральной плотности импульса напряжения были выполнены для модели изотропной среды, сложенной песчаником с известными акустическими свойствами. Подставляя акустические исходные данные из табл. 1, получим

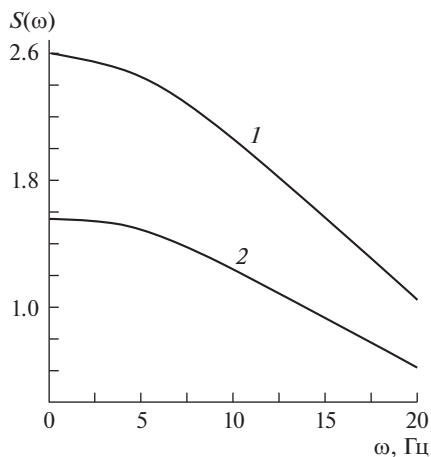


Рис. 2. Распределение спектральной плотности импульсов давления: 1 – для $S_0(\omega_0)$ с начальной длительностью $\tau_0 = 92$ мкс; 2 – для $S_1(\omega_1)$ с начальной длительностью $\tau_1 = 195$ мкс.

выражение для спектральной плотности импульса центрального канала с максимальной амплитудой

$$S_0(\omega_0) = 2.6\sigma_i e^{-\frac{\omega_0^2}{440}}. \quad (12)$$

Тогда значение для частотного распределения спектральной плотности импульса при спаде давления будет

$$S_1(\omega_1) = 1.56\sigma_i e^{-\frac{\omega_1^2}{440}}. \quad (13)$$

В полученных выражениях (12) и (13) частотные значения импульсов ω_0 и ω_1 задавались в диапазоне частот 0–20 кГц. На рис. 2 приведены графики распределения спектральных плотностей импульсов при изменении амплитуды и длительности импульса давления.

Используя формулу (9), с учетом (12), получим выражение для требуемого (эффективного) импульса напряжений у поверхности образующей скважины

$$\sigma_1(\tau) = 2.6\sigma_i e^{-550\tau^2}.$$

На рис. 3 приведено моделирование изменения амплитуды импульса напряжения при увеличении его длительности.

В выполненных расчетах полагалось, что начальная амплитуда импульса σ_i оставалась фиксированной величиной для всех случаев. Для наглядного представления динамики распространения импульса напряжения в изотропном массиве на расстояние 10 м от центрального канала, было выполнено моделирование в полярных координатах, где за полюс системы координат был выбран центр образующегося канала при работе ВРК. На рис. 4а, б приведены этапы эволюции фронта импульса напряжения при спаде амплитуды импульса и увеличении его длительности. Расчеты были сделаны для условия затухания амплитуды импульса с одновременным увеличением его длительности.

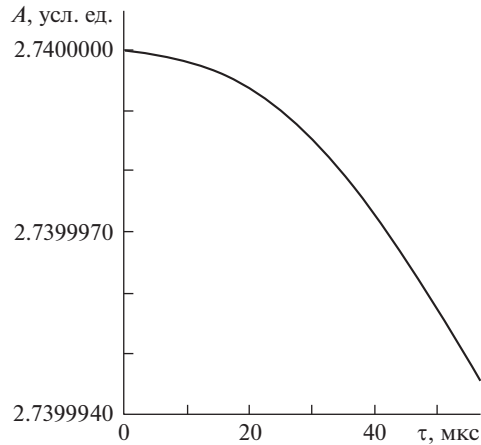


Рис. 3. Изменение амплитуды импульса напряжения у стенки скважины при возрастании длительности импульса до 57 мкс.

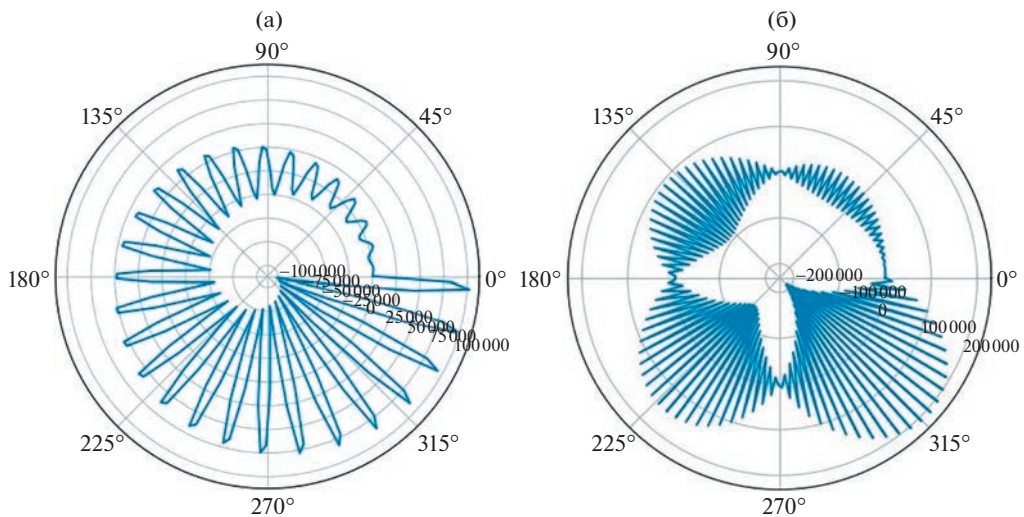


Рис. 4. Форма эволюции фронта распространения импульса напряжения в массиве: (а) – для импульса с $A = 2.6$ и $\tau = 92$ мкс; (б) – для импульса с $A = 0.5$ и $\tau = 195$ мкс.

Выводы. 1. Разработанная методика анализа распределения спектральной плотности импульса давления и выполненные предварительные расчеты показали принципиальную возможность ее применения для анализа сложных газодинамических процессов при работе твердотопливных генераторов ударных волн. **2.** Полученное выражение (11) для распределения спектральной плотности импульса давления можно рассматривать в качестве расчетной модели для анализа нестационарных газодинамических процессов при работе переносного взрывореактивного комплекса. **3.** Выполненный анализ изменения амплитуды импульса напряжения у стенки скважины с

увеличением длительности импульса, подтверждает ранее выполненные расчеты [14] о развитии зоны трещинообразования в радиусе 10 м от центрального канала при работе генератора ударных волн в довольно крепких породах. **4.** Моделирование ударных нестационарных процессов с учетом физико-механических свойств пород позволит выбрать эффективные параметры импульса давления в формирующейся скважине (центральный канал) и возникающего импульса напряжений в массиве для конкретных горно-геологических условий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Гончаров С.А., Дугарцыренов А.В.* Формирование импульса давления при взрыве скважинных зарядов на карьерах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ)*. 2000. № 12. С. 31.
3. *Кутузов Б.Н., Андриевский А.П.* Новая теория и новая технология разрушения горных пород удлиненными зарядами взрывчатых веществ. Новосибирск: Наука, 2002. 96 с.
4. *Зилеев Г.П., Зилеев А.Г.* Оценка влияния взрывного импульса на параметры взрывной воронки // *Записки Горного института*. 2004. Т. 156. С. 136.
5. *Wang J., Yin Y., Esmaili K.* Numerical simulations of rock blasting damage based on laboratory-scale experiments // *J. of Geophysics and Engineering*. 2018. V. 15. № 6. P. 2399. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aac1f7>
6. *Ge J., Xu Y., Huang W., Wang H. et al.* Experimental study on crack propagation of rock by blasting under bidirectional equal confining pressure load // *Sustainability*. 2021. V. 13 (21). 12093. <https://doi.org/10.3390/su132112093>
7. *Lou X., Luo R., Yu J.* Attenuation Law of Stress Waves in Cracked Rock Mass under Different Confining Pressures // *Advances in Civil Engineering*. 2019. № 3. P. 1. <https://doi.org/10.1155/2019/7325634>
8. *He C., Yang J., Yu Q.* Laboratory study on the dynamic response of rock under blast loading with active confining pressure // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. V. 102. № 5. P. 101.
9. *Rao J.S., Bhatnagar R., Verma A.K.* Experimental investigation of shock wave attenuation in rock media // *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. V. 57. P. 62.
10. *Yuan W., Su X., Wang W., Wen L., Chang J.* Numerical study of the contributions of shock wave and detonation gas to crack generation in deep rock without free surfaces // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. V. 177. P. 699.
11. *Li Y., Cao J., Chen X., Huang C., Zhao Q.* Numerical investigation on crack formation and penetration mechanism between adjacent blastholes // *Shock and Vibration*. 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1155/2020/8816059>
12. *Отнес Р., Эноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 428 с.
13. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831 с.
14. *Соловьев В.О., Шведов И.М.* Исследование особенностей скоростей роста трещин в горных породах при взрывореактивном способе их разрушения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021. № 5. С. 72.