
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 622.236.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СКОРОСТЕЙ РОСТА ТРЕЩИН
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ВЗРЫВОРЕАКТИВНОМ СПОСОБЕ
ИХ РАЗРУШЕНИЯ**© 2021 г. В. О. Соловьёв^{1,*}, И. М. Шведов^{2,1}¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия***e-mail: solovievvo@yandex.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 06.06.2021 г.

Принята к публикации 24.06.2021 г.

Исследована модель газодинамической неустойчивости во взрывном канале при взрывореактивном способе разрушения горных пород. Определены скорости развития трещин и области затухания упругих колебаний в породном массиве. Предложен критический амплитудный порог упругих колебаний, превышение которого свидетельствует о начале роста трещин в сплошной среде.

Ключевые слова: горные породы, взрывореактивный способ, газодинамический процесс, рост трещин

DOI: 10.31857/S0235711921050114

В работе [1] приведены результаты моделирования динамики нестационарных газодинамических процессов при работе переносного взрывореактивного комплекса (ПВРК). Применение таких комплексов весьма актуально для решения целого ряда специфических задач в инженерно-строительной области и горном деле. Для повышения эффективности применения таких комплексов на грунтах с различными физико-механическими свойствами, а также на мерзлых и вечномёрзлых горных породах, необходимы более детальные исследования особенностей развития процесса разрушения породного массива при формировании нестационарного газодинамического канала [2–4].

Ранее было установлено, что образование полости в горной породе взрывом сопровождается возникновением цуга нестационарных ударных волн, величины давления на фронтах которых, соизмеримы с давлением в струе продуктов детонации (ПД). Выполненные расчеты в постановке осесимметричной задачи показали, что одновременно образуются и зоны разряжения с давлением ниже атмосферного. Для моделирования таких процессов была использована система уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\frac{\rho u N}{r}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial k}{\partial t} + v \frac{\partial k}{\partial x} + u \frac{\partial k}{\partial r} = 0, \\ p = A \rho^k, \end{cases} \quad (1)$$

где p – давление ПД, Па; ρ – плотность ПД, кг/м³; r и x – радиальное и осевое расстояние от центра канала, м; v и u – радиальная и осевая массовая скорость ПД, м/с; t – время, с; k – показатель изоэнтропы; N – число частиц среды в единице массы (для цилиндрической симметрии $N = 1$).

Для задания начальных газодинамических условий среды в канале взрывореактивного устройства (ВУ) ПВРК и полости создаваемой скважины использовались параметры невозмущенной стандартной атмосферы при $k = 1.4$. В модельных расчетах для ПД использовались следующие экспериментальные данные: $k = 3.05$; скорость детонации $D = 8730$ м/с; начальная плотность взрывчатых веществ (ВВ) $\rho_0 = 1780$ кг/м³. Предполагалось, что процесс детонации каждой кассеты ВВ протекает мгновенно, и параметры на фронте детонационной волны определяются формулой [5]

$$P_n = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1},$$

где P_n – давление ПД в точке Чепмена–Жуге, Па.

Решение системы уравнений (1) осуществлялось конечно-разностным методом второго порядка точности типа предиктор-корректор в плавающих сетках с использованием метода трехточечного сглаживания [6].

Моделирование показало, что при взаимодействии со стенками образующейся полости происходит многократное отражение ударной волны и возникновение пульсации величины давления в рабочей области. Аналогичный процесс наблюдается в струе сверхзвукового потока в заглушенной полости при работе резонатора Гартмана.

Образование резонансных зон возрастания давления в образующейся полости должно привести и к неравномерности развития процесса разрушения окружающего породного массива за счет различных скоростей роста трещин. Проверить такую гипотезу экспериментально затруднительно.

В настоящей статье выполнен анализ скоростей роста трещин в породном массиве при работе ВУ.

Ввиду очевидной сложности исследования развития всей динамики газодинамического процесса, для анализа и выполнения расчетов был выбран фрагмент вариации величин давления и чисел Маха из выполненного моделирования для центрального канала при выбросе шлама и ПД. Ранее было установлено, что динамика движения расширяющихся ПД в образующейся полости будет во многом определяться ее геометрической конфигурацией и газодинамическими параметрами ПД [1].

На рис. 1, 2 показаны полученные результаты распределения газодинамических параметров при выбросе продуктов разрушения горной породы и газа в вертикальном направлении относительно поверхности забоя образующейся полости [1].

Исследовалась обобщенная модель породного массива как сплошная среда, сложенная горными породами средней крепости без выраженной трещиноватости. Полагая, что такие физико-механические параметры массива, как объемная плотность,

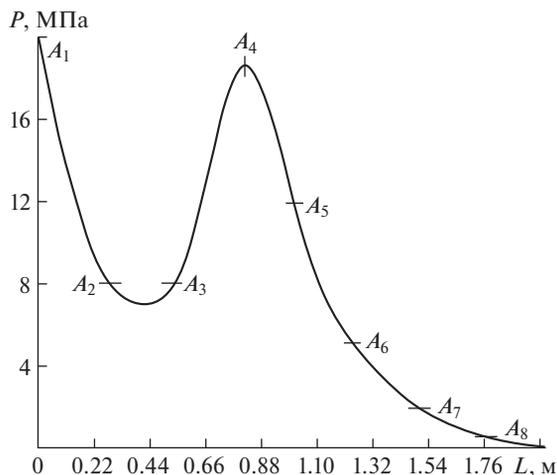


Рис. 1. Распределение величины давления в центральном канале.

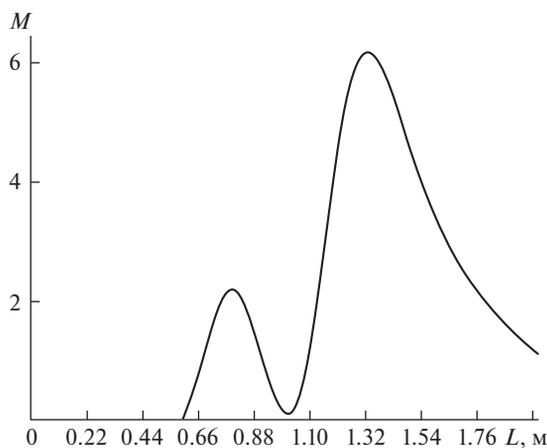


Рис. 2. Распределение чисел Маха в центральном канале.

модуль Юнга, коэффициент Пуассона, акустическая жесткость, постоянные и присущи для всей рассматриваемой области развития процесса разрушения.

Достаточно сложный процесс взрывного разрушения в моделях сплошной среды представляет распространение упругих волн сжатия со сверхзвуковой скоростью. В ближней зоне такая волна носит динамический характер с крутым передним фронтом и создает в среде сложнапряженное состояние.

В моделировании развития процесса разрушения породного массива обычно рассматривалась задача взрыва ВВ в шпуре, скважине или накладного заряда, т.е. само местоположение ВВ было статически закреплено, и задача решалась в условиях цилиндрической или сферической симметрии с возникновением ударной волны, ее рас-

пространением со сверхзвуковой скоростью в глубь массива и дальнейшим затуханием скорости распространения [7–9].

При работе ВУ процесс разрушения массива приобретает еще более сложный характер за счет динамического заглубления заряда и образующейся газодинамической неустойчивости во взрывном канале. Исследование таких стохастических процессов математическим моделированием довольно непростая задача, возможно, ее упрощение путем выделения для конкретной фазы колебания граничных и начальных условий.

Для анализа скоростей роста трещин в породном массиве для фазы развития газодинамического процесса в условиях работы касет на заглубление в породу, скорость роста трещин определялась как

$$v_T = \frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

где r – расстояние от центрального канала, образующегося от работы ВУ, до рассматриваемой области в породном массиве, м; t – время начала разрушения рассматриваемой области после прихода волны, с.

Такое время можно представить, как суммарное время прихода волны сжатия – t_1 и время – t_2 развития разрушающих касательных напряжений

$$t = \sum_{i=1}^2 t_i.$$

Шаг моделирования задавался с учетом возникновения различных зон ударной волны. Ближнюю зону – зону возникновения и распространения ударной волны с крутым передним фронтом и сверхзвуковой скоростью, обычно определяют в границах 3–7 радиусов заряда ВВ. Следующая зона – зона интенсивного разрушения, характерна для волн сжатия, где наблюдается выполаживание переднего фронта волны со скоростями распространения, учитывая гетерогенность массива, близкими к скоростям звука в некоторой усредненной по физико-механическим свойствам среде. Дальнейшее распространение волн носит сейсмический характер с постепенным затуханием.

Время прихода волны сжатия t_1 можно оценить по формуле

$$t_1 \approx \frac{r}{c_1},$$

где c_1 – скорость продольной волны в породном массиве

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}. \quad (3)$$

Для ориентировочных расчетов принято значение $\nu = 0.25$ (коэффициент Пуассона), для модуля Юнга использовалось его динамическое значение – E_d , тогда формула (3) приобретает вид

$$c_1 \approx 1.1 \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}. \quad (4)$$

В работе [10] приведено решение дифференциального уравнения вида (2) с учетом времени t_2

$$v_T = \frac{c_1}{D_T},$$

где D_T – коэффициент, учитывающий скорость роста трещин в зависимости от параметров $ВВ$ и физико-механических свойств породного массива. Для решения задачи в условиях цилиндрической симметрии

$$D_T = 1 + \frac{2(1 + \nu) \sigma_p k_B}{\pi \rho_{ВВ} e_{ВВ} (k - 1)} r_{пр},$$

где σ_p – предел прочности на растяжение горной породы, Па; k_B – коэффициент, учитывающий расширение ПД плоского заряда в боковые стороны; $e_{ВВ}$ – удельная энергия $ВВ$, Дж/кг; k – показатель адиабаты; $\rho_{ВВ}$ – плотность $ВВ$, кг/м³; $r_{пр}$ – относительное расстояние до точки рассмотрения в массиве.

В расчете рассматривалось образование сетки трещин в известняке с усредненными параметрами: $\sigma_p = 10$ МПа; $k_B = 1.25$ (для пород средней крепости); $e_{ВВ} = 5700$ кДж/кг [11]. После подстановки значений в формулу (4), значение коэффициента D_T получим

$$D_T = 1 + 4.08 \times 10^{-4} r_{пр}. \quad (5)$$

В расчетах для нахождения значения E_d использовали корреляционную зависимость между статическим и динамическим модулями упругости

$$E_{ст} = 0.35 E_d^{1.141}.$$

Величину массовой скорости определяли как

$$v_m = \frac{P_0}{\rho D_1}, \quad (6)$$

где P_0 – давление в ударной волне, Па; D_1 – скорость ударной волны в массиве, м/с.

Для анализа скорости роста трещин рассматривался породный массив, сложенный песчаником с $\rho = 2700$ кг/м³ и модулем упругости $E_{ст} = 65$ ГПа. С поверхности в глубину распространяется упругая волна детонации. Были выбраны точки на графике изменения величины давления (рис. 1) и данные по глубине образующейся полости, которые использовались в дальнейших расчетах (табл. 1).

С учетом глубины образующейся полости L , выражение для коэффициента (5) имеет вид

$$D_T = 1 + 4.98 \times 10^{-4} \times 12.5 L.$$

Результаты произведенных расчетов представлены в виде графиков изменения газодинамических параметров взрывной волны и скоростей роста трещин в массиве на рис. 3, 4.

На рис. 3 показаны графики флуктуации скорости роста трещин в массиве в зависимости от газодинамической неустойчивости на развивающемся фронте взрывной волны при заглублении полости.

Наблюдается рост скоростей развития разрушения среды на участках возрастания пульсации давления. Полученные расчетные значения скоростей роста трещин не превосходили величины скоростей звука в данной среде. Возможно, более корректно будет говорить о скорости развития некоторых областей разрушения в массиве, чем о самой скорости роста трещины, учитывая акустические свойства среды.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

P_0 , МПа	20	8	8	17.5	12	5	2	0.5	0
L , м	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2

По отношению к числу Маха (рис. 4), для газодинамической струи в канале выброса, график изменения скоростей роста трещин в массиве более инерционен. Сверхзвуковая пульсация скоростей потока в полузамкнутом пространстве, приводит к резонансным эффектам в соответствующих областях, обусловленными геометрическими параметрами полости и параметрами детонации. Теоретические основы возникновения такого рода резонансных эффектов подробно рассмотрены в работе [12].

Была выполнена оценка амплитуды упругого смещения частиц в массиве в разных точках распределения величин давления (рис. 1) при развитии ударной волны в центральном канале.

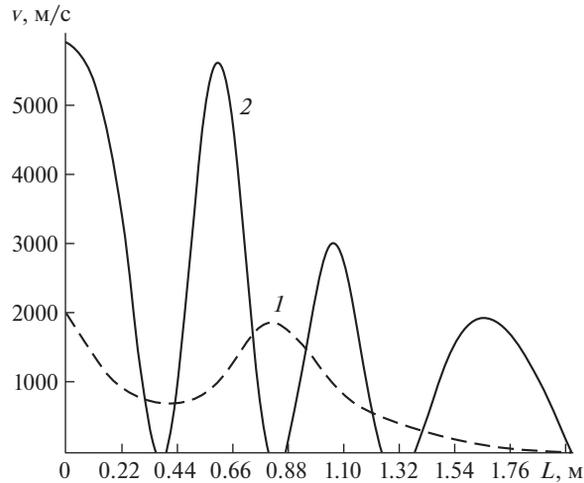


Рис. 3. Динамика скоростей роста трещин в зависимости от давления в ударной волне: 1 — изменение давления ПД; 2 — скорость роста трещин.

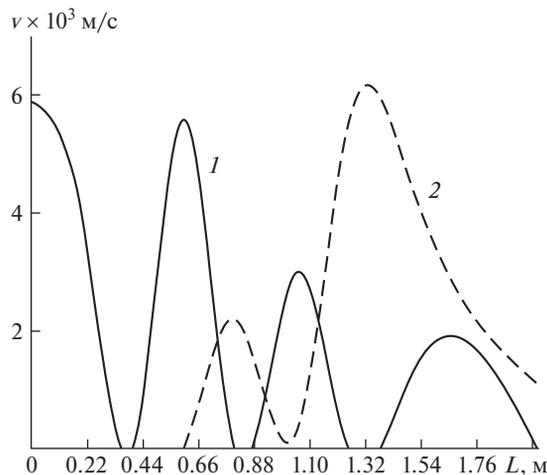


Рис. 4. Динамика роста трещин от пульсации чисел Маха на фронте ударной волны: 1 — скорость роста трещин; 2 — число Маха.

Таблица 2. Исходные данные для расчета амплитуд затухания упругой волны для различных точек волны детонации

P_0 , МПа	20	8	8	17.5	12	5	2	0.5
Исследуемые точки	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
A_0 , нм	139	54	54	118	81	34	14	3

Таблица 3. Результаты расчета амплитуд затухания упругих волн

Величина амплитуды, нм		Расстояние от центрального канала до точки в массиве r , м									
A_0	A_i	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
139	A_1	81.2	48.4	28.5	16.8	9.9	5.9	3.5	2.0	1.2	0.7
54	A_2	31.8	18.8	11.1	6.5	3.9	2.3	1.3	0.8	0.5	0.3
54	A_3	31.8	18.8	11.1	6.5	3.9	2.3	1.3	0.8	0.5	0.3
118	A_4	69.6	41.0	24.2	14.3	8.4	4.9	2.9	1.7	1.0	0.6
81	A_5	47.7	28.2	16.6	9.8	5.8	3.4	2.0	1.1	0.7	0.4
34	A_6	20.1	11.8	7.0	4.1	2.4	1.4	0.8	0.5	0.3	0.2
14	A_7	8.3	4.9	2.9	1.7	1.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.071
3	A_8	1.8	1.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.075	0.044	0.026	0.015

Из условия, что начальная скорость движения частиц породы на границе с газовой полостью определяется по формуле (6), является максимальной скоростью в данный момент времени $v_{\max} = A_0\omega$, где A_0 – величина начальной амплитуды волны, нм; ω – круговая частота, Гц. В результате получаем

$$A_0 = \frac{P_0}{2\pi f \rho D_T},$$

где P_0 – давление в точке, Па; f – линейная частота, Гц; ρ – плотность породы, кг/м³.

Вычисленные значения начальных амплитуд для различных точек волны детонации приведены в табл. 2.

Величина амплитуд затухания вычислялась по формуле

$$A = A_0 e^{-\theta r},$$

где θ – коэффициент поглощения, для массива из песчаника $\theta = 0.264$, м⁻¹; r – расстояние от центрального канала до точки в породном массиве, м.

Была выполнена оценка амплитуды упругого смещения частиц в массиве (в разных точках распределения величин давления в ударной волне) при развитии ударной волны в центральном канале.

Расчет величины амплитуды упругого смещения частиц в массиве в зависимости от расстояния r от центрального канала ВУ приведены в табл. 3.

По полученным данным были построены графики зависимости величин амплитуд затухания упругих колебаний в породном массиве от расстояния до центрального канала ВУ для рассматриваемых точек ударной волны (рис. 5).

В рассматриваемой модели массива использовалась гипотеза сплошной среды, без учета степени его естественной трещиноватости и гетерогенности. Задача заключалась в получении качественного исследования концепции взрывного преобразования

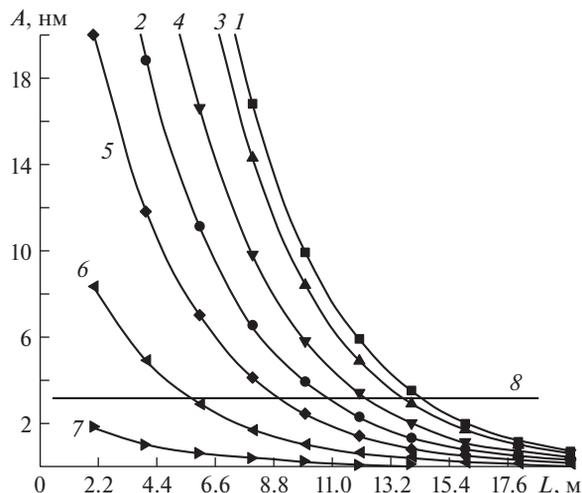


Рис. 5. Затухание амплитуд упругих колебаний для нестабильного фронта ударной волны в массиве: 1 – A_1 ; 2 – A_2 , A_3 ; 3 – A_4 ; 4 – A_5 ; 5 – A_6 ; 6 – A_7 ; 7 – A_8 ; 8 – уровень критических амплитуд упругих колебаний смещения.

энергии [13], в данном случае, в работу хрупкого разрушения согласно теории Гриффитса. Условия для создания макроскопических разрывов сплошности (трещин), их дальнейшего роста, связаны с накоплением и ростом дислокационных дефектов кристаллической структуры. Проведенный анализ результатов исследований особенностей роста трещин в различных материалах, в том числе и горных породах [14–19], позволил, задаваясь величиной межатомных плоскостей для кристаллических структур, обозначить уровень минимальных амплитудных значений упругих колебаний, превышение которого свидетельствует о начале роста трещин в породном массиве, в данном случае, модельном.

Выполненный расчет скоростей роста трещин в массиве при взрывореактивном способе разрушения и проведенное ранее моделирование газодинамических процессов, приводит к следующим **выводам**: **1.** Расчетные скорости роста трещин в массиве коррелируют со скоростями звука для данных пород, но не превосходят их по величине. **2.** Процесс разрушения массива относится к нелинейным процессам, соответствующий резонансному характеру пульсации давления в газодинамической струе ПД. **3.** Рост скоростей трещин в массиве совпадает с ростом давления в ударной волне, причем в пике давления волны, процесс роста трещин замирает. Спад величины давления приводит к возникновению критических напряжений и началу роста трещин. **4.** Флуктуационный характер изменения амплитуд скоростей роста трещин позволяет предположить о возникновении областей с различной интенсивностью разрушения. **5.** Предложен критический амплитудный порог упругих колебаний, составляющий 3 нм, превышение которого свидетельствует о начале роста трещин в сплошной среде. Для рассматриваемой модели при работе ВУ ПВРК предельная глубина развития локальных областей разрушения в массиве составляет порядка 13 м. Наиболее интенсивная область разрушения находится в радиусе 4–5 м от центрального канала.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. 012018.
2. *Дугарцыренов А.В., Заровняев Б.Н., Шубин Г.В., Николаев С.П.* Взрывное разрушение сложноструктурных мерзлых массивов с разнопрочными слоями // *Взрывное дело.* 2017. № 115/72. С. 71.
3. *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.
4. *Шевкун Е.Б., Лецинский А.В., Лысак Ю.А., Плотников А.Ю.* Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями // *ГИАБ (научно-технический журнал).* 2020. № 10. С. 29.
5. *Физика взрыва /* Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
6. *Кестенбойм Х.С., Росляков Г.С., Чудов Л.А.* Точечный взрыв. Методы расчета. М: МГУ, 1974. 190 с.
7. *Torbica V. Lapcevic.* Rock break by explosives. *EIJST.* 2014. V. 3. № 3. P. 96.
8. *Lie Changyou, Yang Jingxuan, Yu Bin.* Rock-breaking mechanism and experimental analysis of confined blasting of borehole surrounding rock // *International journal of Mining Science and Technology.* 2017. № 27. P. 795.
9. *Дугарцыренов А.В.* К механизму разрушения упругой среды (горной породы) при взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов // *ГИАБ (научно-технический журнал).* 2008. № 3. С. 12.
10. *Черниговский А.А.* Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1976. 319 с.
11. *Кутузов Б.Н.* Методы ведения взрывных работ. М.: Горная книга, 2009. 471 с.
12. *Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышение нефтеотдачи. Наука и практика. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 256 с.
13. *Solov'ev V.O., Shvedov I.M.* The concept of improving the efficiency of explosive energy converters // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. 012007.
14. *Yang X. and Wang S.* Meso-mechanism of damage and fracture on rock blasting // *Explos Shock Waves.* 2000. V. 20. № 3. P. 247.
15. *Ko T.Y., Kemeny J.* Subcritical crack growth in rocks under shear loading // *Journal of geophysical research.* 2011. V. 116. B01407. P. 1.
16. *Sivakumar G., Maij V.B.* Simulation of crack propagation in rocks by XFEM // *Recent Advances in Rock Engineering (RARE 2016).* 2016. P. 291.
17. *Ko T.Y., Lee S.S.* Characteristics of Crack Growth in Rock-Like Materials under Monotonic and Cyclic Loading Conditions // *Appl. Sci.* 2020. V. 10 (2). P. 719.
18. *Haiping Y., Feng W., Yan L., Hanbing B., Wen C. and Yixian W.* Time-dependent behavior of subcritical crack growth for rock plate: Experimental and numerical study // *IJDSN.* 2018. V. 14 (11).
19. *Chenglong H., Jun Y.* Dynamic crack propagation of granite subjected to biaxial confining pressure and blast loading // *Latin American Journal of Solids and Structures.* 2018. V. 15 (6), e45. P. 1.