
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 622.534.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН
В ТРЕЩИНОВАТЫХ МАССИВАХ ПРИ РАБОТЕ ПЕРЕНОСНОГО
ВЗРЫВОРЕАКТИВНОГО КОМПЛЕКСА**© 2025 г. В. О. Соловьев¹, И. М. Шведов^{1, 2, *}¹*Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия*²*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия** *e-mail: svirell@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.02.2025 г.

После доработки 04.02.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

Приведены результаты моделирования распространения ударных волн в трещиноватом породном массиве при взрывореактивном бурении. Исследовались особенности процесса разрушения в случае плотного контакта структурных элементов массива и при наличии трещины с воздушным заполнением. Дана оценка взаимосвязи скоростей ударных волн со скоростями прошедших и отраженных волн на неоднородностях в породном массиве, скоростями смещения частиц среды и размерами зоны разрушения.

Ключевые слова: разрушение горных пород, волновые процессы в массиве, взрывореактивный комплекс

DOI: 10.31857/S0235711925030111, **EDN:** GNFOVM

Взрывные работы широко используются в горнодобывающей и строительной отраслях промышленности для разрушения горных пород. Совершенствование способов разработки полезных ископаемых связано с использованием новых методов разрушения, направленных на снижение энергоемкости процессов добычи, обеспечения экологической безопасности и экономической целесообразности, среди которых особое место занимает способ взрывореактивного бурения с использованием специально разработанного переносного взрывореактивного комплекса (ПВРК) для выполнения ряда особых инженерно-строительных задач и горных работ в сложных горно-геологических условиях. Принцип действия, конструктивные особенности и возможности взрывного бурения рассмотрены в работах [1–3].

Для повышения эффективности взрывных работ, наряду с учетом физико-механических свойств горных пород, важно учитывать закономерности распространения ударных волн с учетом трещиноватости массива. Наличие развитой трещиноватости в массиве, конфигурация, линейные размеры и степень раскрытости самих трещин будет оказывать существенное влияние на величину образующихся областей регулируемого и нерегулируемого дробления массива и на геометрические параметры образующейся скважины [4–9].

Вопрос потери энергии от взрывного импульса при распространении волны напряжения (взрывной волны) за счет отражения и преломления от стенок трещин,

границ минеральных зерен или отдельностей в массиве, всегда имеет место при ведении взрывных работ, но в литературных источниках недостаточно изучен, особенно при работе ПВРК.

Задача исследования заключалась в установлении особенностей распространения ударных волн на модели квазиизотропной блочной среды, выявления характера преломления и отражения упругих волн на поверхностях контакта отдельных блоков, оценка энергетических характеристик распространения взрывных волн, интенсивности волн сжатия-растяжения, условий образования отколов кусков от неоднородностей.

Процесс распространения и преломления взрывных волн от отдельностей обычно описывают теорией Сен-Венана. Этот подход позволяет считать, что в любой момент при распространении упругой волны по неоднородностям в массиве, при плотном контакте по границе или отдельностям, разделенным раскрытыми трещинами в каждой точке их поперечного сечения, скорость частиц, напряжение и деформации являются параметрами двух переменных – смещения частиц u (м) и времени t (с) [10].

Взрывное воздействие на породный массив рассматривалось с позиции волнового процесса – поглощения упругих волн с возникновением продольных деформационных областей сжатия-растяжения и поперечных сдвиговых деформаций. Параметрами которого являются величины давления в точке среды и мгновенных скоростей смещения частицы от положения равновесия, а также значения изменения плотности среды в волновом процессе. Переменные давления p (Па) и плотности ρ (кг/м³) среды можно представить в виде $p = p_0 \pm p_a$, $\rho = \rho_0 \pm \rho_a$, где p_0 и ρ_0 – величина давления и плотность, соответствующие невозмущенному состоянию среды; p , ρ – мгновенные значения давления и плотности; p_a , ρ_a – переменные давления и плотности самой упругой волны.

Величина мгновенной скорости частицы v' (м/с) в колебательном процессе смещения относительно положения равновесия (смещение частицы происходит в сторону разряжения – в область меньшего давления) определяется через величину u – смещения частицы относительно положения равновесия за время смещения t :

$$v' = du/dt. \quad (1)$$

Величина скорости смещения частицы в колебательном процессе значительно меньше скорости распространения акустической волны v .

Величины, изменяющиеся в пространстве и во времени, – акустическое давление, плотность среды и мгновенная скорость частицы – являются параметрами волнового процесса, составляющими систему уравнений волновой механики [11–13].

Без учета потерь на диссипацию энергии система представляет собой совокупность трех уравнений – уравнение движения частиц сплошной среды для элемента упругой деформированной среды, уравнение неразрывности (закон сохранения массы) и уравнение состояния (закон упругости). Система имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial v'}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \text{grad } p = 0, \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \rho_0 \text{div}(v) = 0, \\ p_a = K \frac{\rho_a}{\rho_0} = 0, \end{cases}$$

где K – модуль всестороннего сжатия, Па, а отношение вариации плотности среды при колебательном процессе имеет физический смысл относительных малых деформаций ε

в рассматриваемой точке (физической) среды: $\rho_a/\rho_0 = \varepsilon$. Величину возникающего избыточного давления p в распространяющейся волне напряжения от взрывного импульса можно определить через скорость смещения частицы при упругом смещении с учетом свойств самой среды, ее акустическим импедансом z ($\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^3$):

$$p = v' \rho c = v' z, \quad (2)$$

где c – скорость звуковой волны в породном массиве, м/с.

Исследование движения частиц в волне напряжения в массиве при работе ПВРК было выполнено для модели плоской продольной гармонической волны, распространяющейся от источника взрывного импульса, вдоль заданного направления x . Для оценки величины смещения частицы от положения равновесия использовано волновое уравнение: $v' = v_{\max} \sin(\omega t - kx)$, где v_{\max} – максимальное значение скорости частицы при смещении (амплитуда скорости); $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; k – волновое число. Тогда смещение частицы u от взрывного импульса от положения равновесия можно определить, интегрируя уравнение (1):

$$\begin{aligned} u &= \int v' dt = \int v_{\max} \sin(\omega t - kx) dt = -\frac{v_{\max}}{\omega} \cos(\omega t - kx) = -u_{\max} \cos(\omega t - kx) = \\ &= u_{\max} \sin\left(\omega t - kx - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Из формул (2) и (3), получим значение величины максимального смещения частицы с учетом начальных условий взрывного импульса и значения акустической жесткости (импеданса) породного массива $u_{\max} = p/\omega z$. Величина давления взрывного импульса в волне будет уменьшаться за счет потерь на преодоление сил вязкости среды и теплопроводности (тепловые потери), что учитывается коэффициентом поглощения θ (м^{-1}): $p = p_0 e^{-\theta x}$, где p_0 – величина давления (амплитуда) в начальной точке ($x = 0$) при инициировании взрывного импульса, а x – расстояние распространения волны напряжения в массиве, м.

В принятой блочной модели массив рассматривался с однородным (сплошным) строением отдельностей и плоскими граничными контактными условиями. При плотном контакте отдельностей и при наличии разрыва (трещины) между ними для условия нормального падения плоской гармонической волны к границе раздела между двумя изотропными средами с соответствующими плотностями и скоростями упругих волн (для первой среды – ρ_1 и v_1 , для второй – ρ_2 и v_2). Величины давления и скорости частиц можно представить через их потенциалы, скорость частиц v – через градиент скалярной функции ϕ , а связь величины давления p и потенциала через плотность среды ρ_0 . Получим $p = \rho_0 (\partial\phi/\partial t)$; $v = -\partial\phi/\partial x$.

Выражение для граничных условий при $x = 0$ для падающей, отраженной и преломленной упругой волны для величин давления и скорости частиц:

$$p + p_1 = p_2; v + v_1 = v_2. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) значение для избыточного давления (2) и принимая во внимание величины, соответствующие акустической жесткости сред (импедансы z_1 и z_2) для рассматриваемых в модели отдельностей, получим выражения для определения коэффициентов отражения k и преломления n

$$\begin{aligned} k_p &= p_1/p_2 = (z_2 - z_1)/(z_1 + z_2), n_p = p_2/p_1 = 2z_2/(z_1 + z_2), \\ k_v &= v_1/v_2 = (z_1 - z_2)/(z_1 + z_2), n_v = v_2/v_1 = 2z_1/(z_1 + z_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Из анализа выражений (5) следует, что при прохождении ударной волны (условие $z_2 \gg z_1$) в отдельности массива, который акустически более жесткий, фаза колебаний частиц будет меняться на величину π . При этом амплитуда скорости на границе отдельностей будет стремиться к нулю, а амплитуда давления в отраженной волне ($p_1 + p_2 = 2p_1$) возрастет в два раза. Это приведет к росту растягивающих напряжений в первой среде. С энергетической точки зрения интенсивность ударной волны определяется как $I = p^2/2\rho c = \rho c v^2/2$, а полная энергия W в волне (Дж) при длительности t и площади контакта S (м²) определяется как

$$W = \int_0^t \rho S v^2 dt. \quad (6)$$

Для численного моделирования использовались параметры физико-механических свойств железистых кварцитов Михайловского ГОКа (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика физико-механических свойств железистых кварцитов Михайловского ГОКа с учетом средней трещиноватости l_{cp} , м

Тип руды	E , ГПа	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	ν	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	$\tau_{сдв}$, МПа	l_{cp} , м
Гематит-магнетитовые Карбонат-магнетитовые Содержание железа общего 45–60%	4.8	3.2– 4.43	0.3	130– 150	10–12	32	1.42

Расчет параметров взрывной волны, с учетом нестационарности, возникающий при работе ПВРК-процессов, был выполнен с привязкой к максимальной амплитуде импульса взрыва, а для ориентировочных расчетов скорости взрывной волны и ее длительности использовались рекомендации, приведенные в работах [10, 14–20].

В табл. 2 представлены данные, используемые для расчета параметров взрывной волны при работе ПВРК, применительно к дроблению негабарита на железорудном ГОКЕ.

Таблица 2. Исходные данные для модельного расчета

Параметр		Величина
Взрывная волна	Скорость частиц волны V_n , м/с	6.1
	Длительность взрывной волны $\tau \cdot 10^5$, с	6.4
1-я отдельность	Площадь поверхности S_1 , м ²	0.4
	Плотность отдельности $\rho_1 \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	3.2
	Скорость продольной волны $c_{p1} \cdot 10^{-3}$, м/с	4.5
	Длина отдельности l_1 , м	1
	Предел прочности на растяжение $\sigma_{рас.1} \cdot 10^{-6}$, Па	7
	Ширина раскрытия трещин (в естественном состоянии) h_0 , мм	1.8
2-я отдельность	Площадь поверхности S_2 , м ²	0.3
	Плотность отдельности $\rho_2 \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	3.5
	Скорость продольной волны $c_{p2} \cdot 10^{-3}$, м/с	5
	Длина отдельности l_2 , м	0.82
	Предел прочности на растяжение $\sigma_{рас.2} \cdot 10^{-6}$, Па	10.1

Анализ перехода взрывной волны при ее движении из первой отдельности во вторую при плотном граничном контакте был выполнен для модели, показанной на рис. 1. Поскольку контакт между отдельностями плотный, скорости частиц в зоне контакта обеих отдельностей будут одинаковы, а в силу различных акустических свойств отдельностей падающая на плоскость контакта волна будет частично отражаться от этой плоскости обратно в первую отдельность массива.

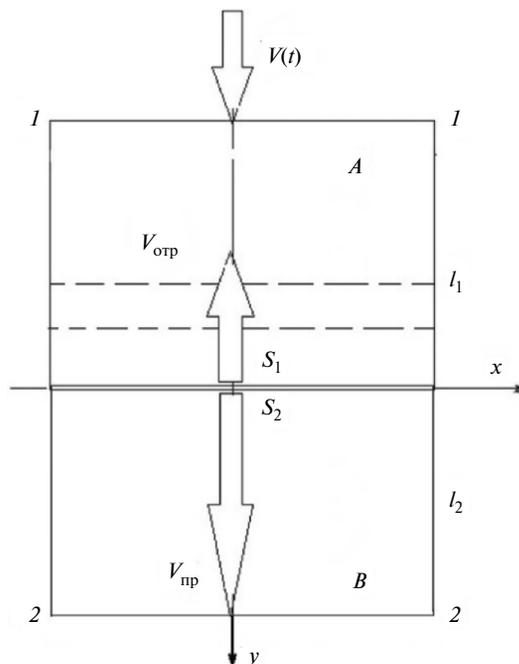


Рис. 1. Модель прохождения ударной волны при вертикальной ориентации оси ВР комплекса в условиях плотного контакта отдельностей *A, B*: 1–1 и 2–2 верхняя и нижняя границы отдельностей; S_1, S_2 – площади контакта отдельностей; $V_{пр}, V_{отр}$ – скорости прошедшей и отраженной волны от границы отдельностей; l_1, l_2 – соответственно длины отдельностей.

С учетом указанных условий для прошедшей и отраженной волны, используя выражения для коэффициентов преломления и отражения (5), получили следующие соотношения для величины скоростей преломления и отражения ударной волны на контакте отдельностей:

$$V_{пр} = V_{п} 2z_1 / (z_1 + z_2); \quad V_{отр} = V_{п} (z_2 - z_1) / (z_2 + z_1), \quad (7)$$

где $V_{пр}$ – скорость частиц в волне, прошедшей во вторую отдельность, м/с; $V_{отр}$ – скорость частиц в волне, отраженной от плоскости контакта в первую отдельность, м/с.

Используя данные табл. 2, мы рассчитали величины импедансов отдельностей: $z_1 = 14.4 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^3$, $z_2 = 17.5 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^3$. Определить полную энергию в прошедшем и отраженном импульсах можно, подставляя величины (7) в (6). Получим

$$W_{пр} = V_{п}^2 \frac{4Z_1^2 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} dt; \quad W_{отр} = V_{п}^2 \frac{Z_1 (Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} dt.$$

Результаты расчета скоростей $V_{пр}$ и $V_{отр}$, напряжений от импульса давления сжатия $\sigma'_{сж}$ в падающей, прошедшей $\sigma_{пр}$ и отраженной волне $\sigma_{отр}$, величины энергий в падающей $W_{п}$, прошедшей $W_{пр}$ и отраженной $W_{отр}$ волнах приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета параметров взрывной волны при плотном граничном контакте отдельных

$V_{пр}$, м/с	$V_{отр}$, м/с	$\sigma'_{сж}$, МПа	$\sigma_{пр}$, МПа	$\sigma_{отр}$, МПа	$W_{пр}$, кДж	$W_{отр}$, кДж	$W_{отр}$, Дж
5.5	0.6	85.8	79.3	8.54	13.7	11.2	130

Оценка разрушения возможного откола кусков была осуществлена при допущении наличия плотного контакта отдельных A и B . Такой контакт чаще наблюдается для горизонтально ориентированных трещин. Для сомкнутых трещин площади их контактов считались постоянными $S_1 = \text{const}$; $S_2 = \text{const}$.

При образовании ПВРК вертикальной скважины, образующая ударная волна от подрыва кассеты, пройдя через первую отдельность, будет отражаться от границы 2–2 второй отдельности. В этом случае в формуле (7) импедансом второй отдельности можно пренебречь, считая ее $z_2 \sim 0$, а скорости прошедшей и отраженной волны будут совпадать $V_{отр2} = V_{пр}$. В рассматриваемой модели величина растягивающих напряжений будет равна $\sigma_{отр2} = \rho_2 c_{p2} V_{отр2} = 96.25$ МПа. Полученная величина превышает предел прочности на растяжении второй отдельности (табл. 2). Длина волны фазы сжатия для переднего фронта составляет $\lambda_{отр2} = c_{p2} \tau = 0.32$ м, что меньше длины исходной отдельности $l_2 = 0.82$ м. Полученные значения свидетельствуют о возможности откола куска породы от второй отдельности за счет отраженной волны. Величина откалываемого куска находится в пределах половины длины волны отражения, т.е. $l_{отк2} \approx 0.5\lambda_{отр2} \approx 0.16$ м. Для первой отдельности также выполняется условие откола, при этом величина растягивающих напряжений будет $\sigma_{отр1} = 8.54$ МПа, и размер откалываемого куска $l_{отк1} \approx 0.29$ м.

При достаточном заглублении скважины от работы следующего блока кассет ПВРК будет прорабатываться массив и в горизонтальном направлении. В данном случае наблюдается взаимодействие ударной волны с вертикальными трещинами раскола (рис. 2).

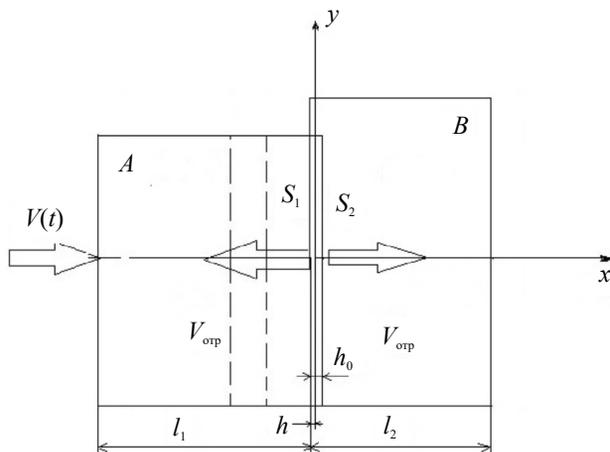


Рис. 2. Модель прохождения ударной волны через разрыв контакта h_0 между отдельностями A и B . S_1, S_2 – площади контакта отдельных; $V_{пр}, V_{отр}$ – скорости прошедшей и отраженной волны от границы отдельных; l_1, l_2 – соответственно длины отдельных, м; h_0 – ширина раскрытия трещины, мм; h – сближение отдельных при прохождении взрывной волны, мм.

Для двух отдельных раскола площади их плотного контакта не превышает 0.5% от плоскости трещины, при этом возможно смыкание трещины вплоть до полного контакта [10].

Динамику изменения площади контакта (S' – текущая площадь контакта) между двумя отдельностями до предельного значения их контакта S , можно определить по линейному закону из-за быстроты протекающего процесса:

$$S' = \gamma S, \quad (8)$$

где γ – показатель сближения бортов трещины, $\gamma = 2h/h_0$; h – величина сближения отдельностей в результате действия взрывной волны, м; h_0 – начальная ширина раскрытия трещины, м.

В начальный момент $h = 0$ и $\gamma = 0$. В этом случае падение взрывной волны в первой отдельности на свободную поверхность будет соответствовать соотношению (7) для отраженной волны и $V_{\text{отр}} = -V_{\text{п}}$, т. е. отраженная волна будет волной растяжения. В дальнейшем для исследования волновых процессов прохождения и отражения ударной волны, необходимо учитывать изменение импеданса второй отдельности, вводя в формулу (7) поправку на показатель сближения бортов трещины γ :

$$V'_{\text{п}} = V_{\text{п}} 2z_1 / (z_1 + \gamma z_2); V_{\text{отр}} = V_{\text{п}} (\gamma z_2 - z_1) / (\gamma z_2 + z_1), \quad (9)$$

где величина $V'_{\text{п}}$ соответствует скорости частиц контакта второй отдельности, передающих некоторый импульс во вторую отдельность. В данном случае можно ожидать скачок скорости и напряжений на границе и распространение импульса во второй отдельности с измененными параметрами:

$$V_{\text{отр}} = \gamma V'_{\text{п}}; \sigma_{\text{п}} = \rho_2 c_{p2} V_{\text{п}}; \quad (10)$$

Перемещение частиц первой отдельности с учетом (9) будет определяться дифференциальным уравнением $dh/dt = 2z_1 / (z_1 + \gamma z_2)$, интегрируя которое, получим зависимость сближения бортов трещины от длительности взрывного импульса $h(t)$:

$$h(t) = \int_0^t \frac{2z_1}{z_1 + \frac{2hz_1}{h_0}} dt. \quad (11)$$

Решение (11) в условиях $h = h_2$ при $t = t_2$ и $h = h_1$ при $t = t_1$, оно имеет вид

$$\frac{h_2^2 z_2}{h_0} + z_1 h_2 - \left[2z_1 V_n (t_2 - t_1) + \frac{h_1^2 z_2}{h_0} + z_1 h_1 \right] = 0,$$

где t_1 – момент начала действия импульса, с; t_2 – некоторый момент действия импульса, с.

Зависимость $h(t)$, рассчитанная для начальных условий $h_1 = 0$ и $t_1 = 0$, показана на рис. 3.

Из анализа графика следует, что величина сближения отдельностей h достигает значения $0.5h_0 = 0.9$ мм при $t = 1.3 \cdot 10^{-4}$ с, так что в промежуток времени $1.3 \cdot 10^{-4} < t < 6.4 \cdot 10^{-4}$ с происходит преломление взрывной волны во вторую отдельность, величину скорости которой можно определить по формуле (7).

Результаты расчетов значений для величины $V'_{\text{п}}$ по формуле (9) и $V_{\text{п}}$ – по (10) в диапазоне времен $0 < t < 1.3 \cdot 10^{-4}$ с, и величины $V_{\text{п}}$ для времен $1.3 \cdot 10^{-4} < t < 6.4 \cdot 10^{-4}$ с по формуле (7) представлены на графике скоростей прошедшей и отраженной волны от времени действия импульса взрыва (рис. 4).

Обсуждение полученных результатов. Из анализа графика (рис. 4) следует, что закрытие трещины (схлопывание ее бортов при $\gamma = 1$) за счет преобладающего напряжения сжатия в проходящей волне, приводит к возникновению отраженной волны

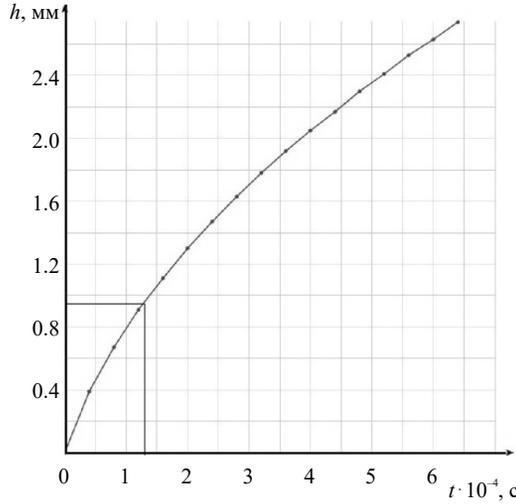


Рис. 3. График зависимости величины сближения бортов трещины от длительности взрывного импульса.

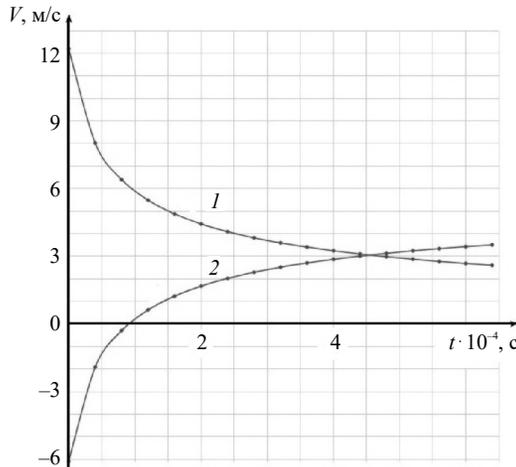


Рис. 4. Динамика скоростей частиц в отдельностях массива от времени действия импульса взрыва: 1 – в проходящей волне; 2 – в отраженной волне.

с начальной скоростью, почти на порядок меньше скорости проходящей волны. Возникающие поле растягивающих напряжений при увеличении длительности проходящей волны, для данного случая в 3.6 раза, приводит к образованию области суперпозиции скоростей $V_{\text{пр}} = V_{\text{от}} \approx 3.1 \text{ м/с}$ во второй отдельности, в которой наблюдаются максимальное падение скорости волны (и энергии в импульсе) в 4 раза и формирование отраженной волны.

Расчетная величина скорости частиц в прошедшей волне, при которой будет происходить откол в первой отдельности, составляет $V_{(1)\text{пр}} = \sigma_{p1}/(\rho_1 c_{p1}) = 0.48 \text{ м/с}$. При сопоставлении полученного значения скорости частиц со значением скорости частиц на переднем фронте в проходящей волне видно, что явление откола в первой отдельности может возникнуть за счет отражения волны от плоскости трещины, т. к. величина скорости в ударной волне $V_{\text{п}} = 6.1 \text{ м/с}$ более чем на порядок выше критической расчетной скорости откола. Из сопоставления длины взрывной волны $\lambda_1 = c_{p1} \tau \approx 1.3 \text{ м}$ с длиной

отдельности $l_1 = 1$ м следует, что интерференция волн падающей и отраженной будет на длине 0.65 м, поэтому производить разрушение не будет. Как только длина отраженной волны станет больше 0.65 м, а длина падающей волны (волны сжатия) меньше 0.65 м, то будет возникать явление откола этой отдельности.

Для второй отдельности величина скорости частиц во взрывной волне, при которой будет происходить откол во второй отдельности $V_{(2)пр} = \sigma_{p2}/(\rho_2 c_{p2}) = 0.58$ м/с. Скорость частиц на фронте взрывной волны $V_{п}$ тоже более чем на порядок превосходит предельную скорость частиц, прошедшей во вторую отдельность $V_{(2)пр}$ поэтому могут произойти явления откола во второй отдельности за счет отражения от свободной границы и преобразования в волну растяжения. Длина взрывной волны во второй отдельности будет $\lambda_2 = c_{p2}\tau \approx 1.3$ м. При сопоставлении с длиной отдельности $l_2 = 0.82$ м следует, что откол от второго торца отдельности может произойти, а размер откалываемого куска будет равен: $l_{2\text{отк}} = 0.5\lambda_2 = 0.32$ м.

Выводы. Исследованы закономерности прохождения импульса взрыва при вертикальном расположении ПВРК к поверхности модельного блочного породного массива с заданными физико-механическими свойствами при плотном контакте отдельностей и наличии трещины между ними. Показано, что при плотном контакте отдельностей происходит откол куска от второй отдельности за счет волны отражения, величина откалываемого куска находится в пределах половины длины волны отражения и в рассматриваемом случае составляет 0.16 м. В первой отдельности также выполняется условие откола за счет создания области критических растягивающих напряжений, расчетный размер откалываемого куска составляет 0.29 м. Установлено, что наличие трещины между отдельностями приводит к ее схлопыванию и потере скорости в отраженной волне почти на порядок по отношению к падающей, с образованием области суперпозиции скоростей во второй отдельности. С увеличением длительности импульса давления в 3.6 раза (детонации второй кассеты ПВРК) область суперпозиции проходящей и отраженной волны смещается в глубь второй отдельности, формируя за счет отраженной волны большую зону растягивающих напряжений с образованием зоны откола.

Финансирование. 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. Solov'ev V. O., Shvedov I. M. The concept of improving the efficiency of explosive energy converters // J. of Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1172 (1). P. 012007.
2. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. М.: Горная книга. 2007. 471 с.
3. 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. 140–142. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11901>
4. Тюпин В. Н. Динамика распространения волн деформаций в трещиноватых массивах при взрыве заряда ВВ // Взрывное дело. 2023. № 138/95. С. 114–130.
5. Дугарцыренов А. В., Рахманов Р. А., Заровняев Б. Н., Шубин Г. В. Управление импульсом давления продуктов детонации при взрыве скважинных зарядов на карьерах // Взрывное дело. 2018. № 119/76. С. 62–77.
6. Дугарцыренов А. В., Рахманов Р. А., Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Николаев С. Н. Учет расширения взрывной полости на напряженное состояние твердой среды // Взрывное дело. 2017. № 117/74. С. 50–59.

7. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. Белгород: БелГУ, 2017. 192 с.
8. Changyou L., Jingxuan Y., Bin Y. Rock-breaking mechanism and experimental analysis of confined blasting of borehole surrounding rock // Inter. J. of Mining Science and Technology. 2017. V. 27. P. 795.
9. Torbica S., Lapcevic M. Rock breakage by explosives // European Inter. J. of science and technology. 2014. V. 3 (2). P. 96–104.
10. Крюков Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. М.: Горная книга, 2006. Т. 1. 330 с.
11. Красильников В. А. Введение в акустику. М.: МГУ, 1992. 152 с.
12. Ямщиков В. С. Волновые процессы в массиве горных пород. М.: Недра, 1984, 271 с.
13. Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, доп. М.: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. 780 с.
14. Lunic S., Draganic H., Gazic G., Radic I. Statistical analysis of blast wave decay coefficient and maximum pressure based on experimental results // WIT Transaction on The Built Environment. 2020. V. 198. P. 65.
15. Покровский Г. И. Взрыв. М.: Недра, 1973. 182 с.
16. Кузьменко А. А., Воробьев В. Д., Денисюк И. И., Дауэтас А. А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1990. 173 с.
17. Chenglong H., Jun Y. Dynamic crack propagation of granite subjected to biaxial confining pressure and blast load // Latin American J. of Solids and Structures. 2018. V. 15 (6). P. 1–18.
18. Осокин А. А. Влияние структурных неоднородностей на характер деформирования и разрушения горных пород на субмикронном уровне // Взрывное дело. 2020. № 128/85. С. 7–19.
19. Менжулин М. Г., Парамонов Г. П., Шишов А. Н. Численное моделирование влияния запирающих газодинамических устройств на газодинамические процессы во взрывной скважине // Взрывное дело. 1999. № 92/49. С. 33–41.
20. Черниговский А. А. Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1976. 319 с.