

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235.5

DOI:10.7242/echo.2021.1.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА ЗОНЫ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ОТ ОДИНОЧНОГО ШПУРОВОГО ЗАРЯДА С РАДИАЛЬНЫМ ЗАЗОРОМ ПРИ ТОРПЕДИРОВАНИИ ВЫБРОСОПАСНЫХ ПЛАСТОВ

В.М. Мальцев, В.В. Аникин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрено воздействие импульса давления взрывных газов с учетом радиального зазора шпурового заряда на процесс трещинообразования в массиве горных пород первичной волной сжатия при сотрясательном взрывании и показана возможность определения радиуса зоны трещиноватости по теоретической динамической прочности пород, учитывающей основные физико-механические характеристики.

Ключевые слова: импульс давления, степень затухания, прочность, радиус зоны трещинообразования, радиальный зазор.

Согласно п. 284 [1] «Сотрясательное взрывание должно проводиться при отработке пластов, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа, а также на угрожаемых пластах, где текущим прогнозом или прогнозом при вскрытии получены значения «опасно»... Требования настоящих Правил к сотрясательному взрыванию также распространяются на пластовое и внепластовое (передовое) торпедирование, предназначенное для предотвращения внезапных выбросов угля и газа».

При проведении выработок по выбросоопасным пластам торпедирование осуществляется удлинёнными зарядами взрывчатого вещества (ВВ) в режиме сотрясательного взрывания и производится для образования сплошной зоны трещин по сечению, которое должно превышать сечение выработки в проходке. Вместе с тем, чтобы произвести расчет параметров торпедирования всего сечения выработки, необходимо определить радиус трещин вокруг «торпеды» (одиночного шпура). Конструкция шпурового заряда показана на рис. 1.

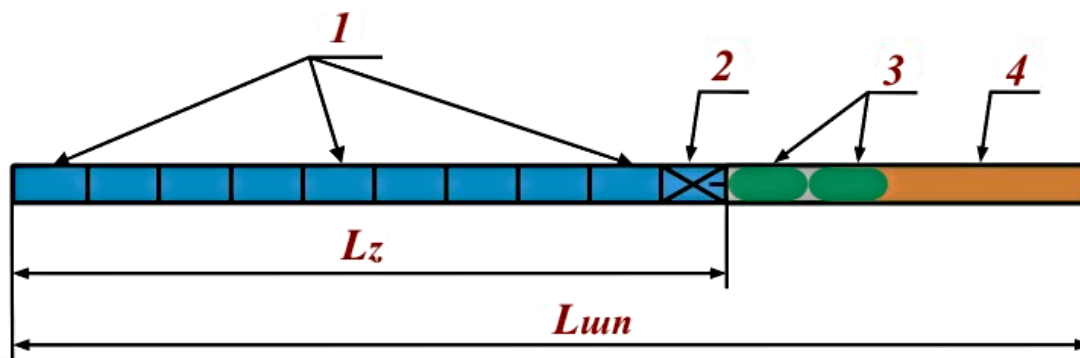


Рис. 1. Конструкция шпурового заряда при торпедировании:
1 – заряд патронированного предохранительного ВВ; 2 – патрон-боевик;
3 – гидрозабойка; 4 – песчано-глинистая забойка

По аналогии с работой [2] предлагается основным фактором разрушения горных пород при взрыве заряда ВВ принять импульс давления взрыва, который представляет собой произведение давления взрывных газов на длительность его

воздействия на взрываеваемый горный массив [3, 4]. Вместе с тем по сравнению с работой [2] зависимость импульса давления взрыва от расстояния предлагается определять по измененному уравнению (без учета максимальной эффективной длины заряда L_m):

$$J(r) = \frac{K_z \cdot P_n \cdot t(r) \cdot L_z^{0.5}}{r^n} \quad (1)$$

где $J(r)$ – импульс давления взрыва в массиве на расстоянии r , Па·с; K_z – коэффициент зазора; P_n – расчётное начальное давление в зарядной камере, Па; r – относительное (безразмерное) расстояние от центра заряда, выраженное в радиусах зарядной камеры; n – показатель степени затухания давления (и импульса) взрыва с расстоянием, зависит от типа породы и используемого ВВ; $t(r)$ – длительность действия импульса взрыва на расстоянии r от центра заряда, с; L_z – длина заряда, м.

Параметры импульса P_n и $t(r)$ могут быть рассчитаны по известным формулам или определены из практики ВР [4].

В работе [2] рассматривалась линия наименьшего сопротивления. В удлинённых зарядах увеличение длины заряда (и массы ВВ) больше некоторого значения эффективной длины заряда L_m не приводит к увеличению ЛНС, при этом порода разрушается в основном (до 90% по объему) отраженной волной растяжения. Следовательно, при определении величины ЛНС важно отношение L_z/L_m . Вместе с тем зона трещиноватости в породе создается первичной прямой волной сжатия и значение эффективной длины заряда L_m не имеет никакого значения, поэтому в формуле (1) вместо отношения L_z/L_m указана длина заряда L_z .

Коэффициент зазора K_z был введен [2] для определения длительности и величины импульса за счёт многократных отражений в радиальном зазоре в процессе стабилизации давления. Процесс разрушения горной породы за счет вторичной отраженной волны растяжения (при определении ЛНС) протекает более легко по сравнению с образованием первичных трещин прямой взрывной волной сжатия в условиях объемного напряженного состояния горной породы, поэтому величина K_z увеличена по сравнению со значением этого коэффициента в работе [2] и находится по формуле:

$$K_z = \frac{(r_s/r_0)^{-6}}{\Delta^m} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{r_s - r_0}{r_0} \quad (3)$$

где Δ – относительный радиальный зазор; m – эмпирический показатель степени затухания давления в радиальном зазоре, зависящий от величины этого зазора, $m = 3,4$ для ВВ типа аммонит 6ЖВ при оптимальном зазоре $\Delta_0 = 0,3125$; r_0 – радиус патрона, м; r_s – радиус шпура, м (рис. 2).

Ввиду того, что объём цилиндрического шпура (и радиального зазора) пропорционален квадрату его радиуса, поэтому с учетом выражения $P \cdot V^3 = const$ [3], степень в числителе (по абсолютному значению) при вычислении значения коэффициента K_z в выражении (2) равна 6.

В связи с использованием в качестве основного фактора разрушения импульса давления взрывных газов, вместо традиционной статической прочности был предложен новый критерий, аналогичный нормированному импульсу дробления, – теоретический расчётный показатель динамической прочности породы I_i [2].

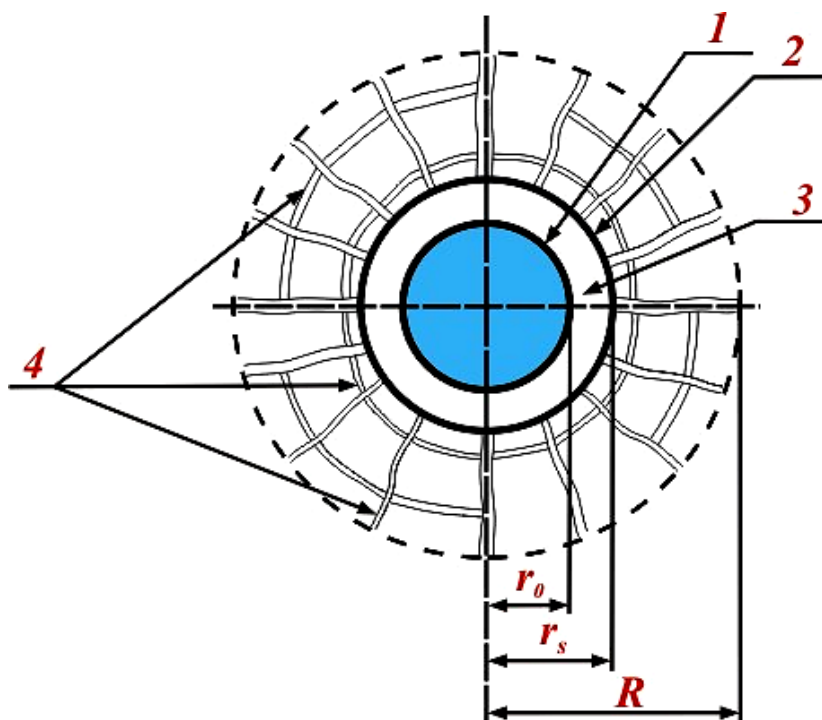


Рис. 2. Схема действия взрыва заряда с радиальным зазором при торпедировании:
1 – заряд патронированного предохранительного ВВ; 2 – шпур; 3 – радиальный зазор;
4 – зона трещинообразования после взрыва заряда ВВ

Вместе с тем в данной работе рассматривается воздействие на горную породу прямой взрывной волны сжатия, поэтому предлагается изменённая формула расчётного показателя динамической прочности:

$$I_i = \frac{A_{ВВ} \cdot \sigma \cdot \tau_0}{i_0^2 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)^{0,5}}, \quad (4)$$

$$A_{ВВ} = \frac{\rho \cdot C}{\rho_v \cdot D}, \quad (5)$$

где I_i – теоретический расчётный показатель динамической прочности породы, Па·с; ρ – плотность исследуемой породы, кг/м³; C – скорость распространения продольной волны возмущения в исследуемой породе, м/с; D – скорость детонации ВВ, м/с; σ – прочность породы при одноосном сжатии, Па; μ – коэффициент Пуассона; τ_0 – длительность начального действия давления взрыва в зарядной камере; i_0 – степень дробления пород при взрыве.

Коэффициент $A_{ВВ}$ учитывает способ воздействия на массив. Значение $A_{ВВ}=1$ наблюдается при условиях идеального взрывания, которое достигается подбором ВВ под взрывающую породу.

Произведение прочности породы на длительность начального действия давления взрыва в зарядной камере ($\sigma \cdot \tau_0$) – минимальный разрушающий импульс взрыва явля-

ется аналогом ударного импульса, используемого при определении нормированного импульса дробления.

Введение коэффициента Пуассона μ позволяет учитывать особенности разрушения горных пород взрывом.

Параметр i_0 представляет собой минимальную, достаточную для торпедирования пород степень дробления горных пород, $i_0 = 1,3$.

Оценка величины степени затухания напряжения (n) для исследуемой горной породы производится по величине известной степени затухания некоторой эталонной породы (гранита) с учетом соотношения акустических жёсткостей этих двух пород:

$$\frac{A_u}{A_g} = \frac{\rho_u \cdot C_u}{\rho_g \cdot C_g}, \quad (6)$$

где A_u, A_g – акустическая жесткость, соответственно, исследуемой породы и гранита, кг/м²с; ρ_u, ρ_g, C_u, C_g – плотность и скорость распространения продольных колебаний, соответственно, в исследуемой породе и граните, кг/м³, м/с;

Для большинства горных пород скорости сдвижения частиц массива зависят в основном только от типа применяемого ВВ, при этом напряжение в массиве определяется выражением [4]:

$$\sigma = A \cdot v, \quad (7)$$

где v – скорость сдвижения частиц массива при взрыве ВВ, м/с;

Таким образом, напряжение в массиве исследуемых пород, сходных с эталонной породой (гранит), имеющей степень затухания $n = 1,69$, можно определить по уравнению:

$$\frac{\sigma_{nu}}{r^n} = \frac{A_u \cdot \sigma_{ng}}{A_g \cdot r^{1,69}}, \quad (8)$$

где σ_{nu} – начальное напряжение в исследуемой породе, Па; σ_{ng} – начальное напряжение в граните, Па; r – безразмерное расстояние от центра взрыва, выраженное в радиусах шпура; n – степень затухания напряжения с расстоянием в исследуемой породе.

Для нахождения степени затухания n может быть использован метод последовательных приближений с целью установления равенства обеих частей уравнения (8).

Определение радиуса зоны трещинообразования R (рис. 2) производится по величине относительного безразмерного радиуса Rt :

$$J(Rt) = I_i \quad (9)$$

где $J(Rt)$ – импульс давления взрыва на относительном расстоянии Rt , когда сам импульс давления становится равным динамической разрушаемости породы. При дальнейшем увеличении расстояния первоначальная волна сжатия затухает и перестает разрушать массив горных пород.

Ввиду того, что искомая величина Rt входит в импульс, уравнение (9) решается методом последовательных приближений до получения результатов с заданной точностью. С этой целью первоначальное значение Rt , равное $Rt1$, берется для аналогичных условий из экспериментальных данных.

Величина радиуса зоны трещинообразования равна:

$$R = r_0 \cdot Rt, \text{ м} \quad (10)$$

В табл. представлены физико-механические характеристики пород и результаты расчётов по формулам (1-10) для 12 горных пород при взрывании заряда эталонного ВВ типа аммонит 6 ЖВ длиной 1,6 м.

Таблица
Характеристики горных пород и радиус зоны трещиноватости

Порода	ρ , кг/м ³	C , м/с	σ , МПа	μ , д.ед.	n , д.ед.	I_i , КПа·с	R , м
1	2	3	4	5	6	7	8
Галит крупнозернистый	2140	3140	21,5	0,28	1,90	100,0	1,24
Сильвинит	2020	3820	30,0	0,20	1,86	157,6	1,10
Сиенит	2600	1796	42,2	0,10	1,99	116,2	0,84
Известняк	2420	3430	45,0	0,26	1,84	284,3	0,79
Кварцит	2730	3021	48,0	0,12	1,84	239,5	0,88
Алевролит	2540	2765	98,1	0,26	1,89	524,4	0,48
Парагнейс	2640	4700	139,5	0,11	1,72	1034,0	0,49
Гранит розовый	2590	4650	172,0	0,18	1,73	1366,0	0,40
Доломит	2850	6600	188,5	0,28	1,57	2819,0	0,36
Андезит	2700	5520	195,0	0,30	1,66	2423,0	0,33
Песчаник 3	2630	5220	215,0	0,27	1,68	2295,0	0,33
Габбро-диабаз 2	3100	5640	260,0	0,23	1,60	3262,0	0,31

На рис. 3 показана зависимость радиуса зоны трещиноватости от прочности пород на одноосное сжатие для 12 горных пород, указанных в табл.

После проведения опытного взрывания в доломитовых породах [5] были проведены замеры радиуса зоны трещиноватости, среднее значение которого равно 0,5 м.

Выводы

1. Предлагаемый метод расчета, основанный на импульсе давления взрывных газов с учетом радиального зазора заряда, дает возможность определения радиуса зоны трещиноватости при торпедировании пластов, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа, а также на угрожаемых пластах, проводимого в режиме сотрясательного взрывания.

2. Для шпурового заряда с диаметром шпура 42 мм и длиной 1,6 м при использовании эталонного ВВ типа аммонита 6ЖВ в патронах диаметром 32 мм, обеспечивающих оптимальный относительный зазор $\Delta_0 = 0,3125$, определен радиус зоны трещиноватости при сотрясательном взрывании для 12 горных пород с прочностью от 21,5 МПа (га-

лит крупнозернистый) до 260 МПа (габбро-диабаз 2), значения которого лежат в диапазоне, соответственно, от 1,24 м до 0,31 м.

3. Замеры зоны трещиноватости [5], проведенные после опытного взрывания в доломитовых породах с использованием ВВ типа предохранительный аммонит АП-5ЖВ в патронах диаметром 36 мм и шпурах длиной 1,2 м с диаметром 42 мм при относительном зазоре $\Delta = 0,166$ показали хорошую сходимость (абсолютное максимальное отклонение 6%) с теоретической величиной радиуса трещин.

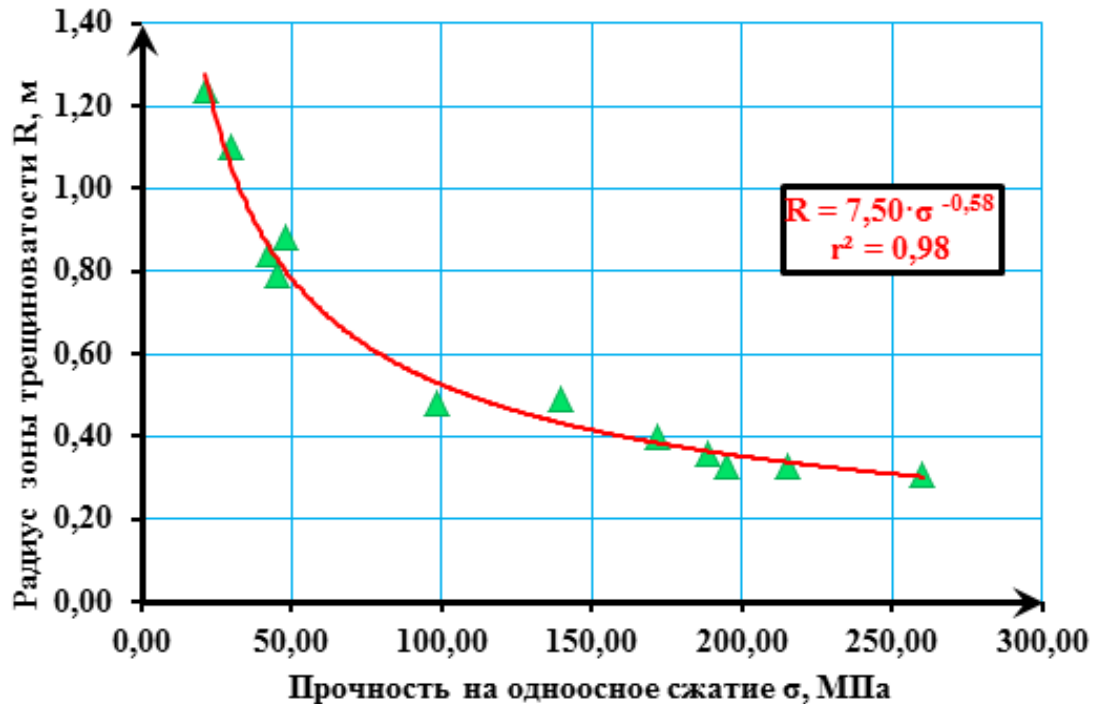


Рис. 3. Зависимость радиуса зоны трещиноватости R (м) от прочности пород σ (МПа)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах» с изменениями на 30 ноября 2017 года (введены в действие приказом Ростехнадзора от 30 ноября 2017 года № 518).
2. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение величины линии наименьшего сопротивления шпурового заряда ВВ с учётом его радиального зазора // Горное эхо. – 2020. -№1(78). С. 42-46.
3. Физика взрыва: монография / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. / - М.: Наука, 1975. 704 с.
4. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. М., Госготрехиздат, 1962. 200 с.
5. Исследование и разработка параметров технологии проведения подготовительных выработок во вмещающих породах буровзрывным способом с управлением интенсивностью выбросов породы и газа: отчет о НИР/ Андрейко С.С., Иванов О.В. [и др.]. – Пермь, 2019. – Фонды ГИ УрО РАН.