

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 625.235.5

DOI:10.7242/echo.2023.1.7

ЗАВИСИМОСТЬ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА ШПУРОВОГО ЗАРЯДА ОТ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА ДЛЯ ПАТРОНОВ ВВ СТАНДАРТНОГО ДИАМЕТРА

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

Аннотация: Рассмотрено влияние величины радиального зазора на импульс взрыва удлиненного шпурового заряда при стандартных диаметрах патронов ВВ и различных диаметрах шпуров.

Ключевые слова: удлиненный заряд, диаметр патрона, импульс взрывных газов, длительность импульса, радиальный зазор, динамическая прочность, степень дробления, радиус трещинообразования.

При проходке выработок БВР-способом, например, в выбросоопасных породах или при проходке участков замороженных пород в процессе строительства шахтного ствола, необходимо знать радиус трещинообразования от взрыва шпуров. Для расчета параметров БВР необходимо оценить величину радиуса трещин вокруг одиночного заряда.

Стандартный диаметр патронов ВВ для шпуровых зарядов, как правило, составляет: 23-24 мм; 31-32 мм; 36-37 мм; 44-45 мм (при проведении вертикальных стволов) [1].

При бурении шпуров диаметр выбирается обычно с учетом диаметра имеющихся патронов ВВ ($d_{\text{патр.}}$) и необходимого зазора между стенкой шпура и патронами ВВ, позволяющего посылать патроны в шпур без усилий.

Начальный диаметр резцов и коронок для патронов ВВ диаметром 36-37 обычно составляет 41-43 мм, для патронов диаметром 44-45 мм – 51-53 мм. Чаще всего фактический диаметр шпура на 5-8 мм больше диаметров применяемых патронов ВВ. При изношенных коронках диаметр шпура на 2-3 мм больше диаметра патрона [1]. Таким образом, между стенками шпура и поверхностью патрона ВВ всегда имеется зазор.

Использование в качестве основного фактора разрушения горной породы импульса взрывных газов, образующихся при взрыве шпурового заряда, предполагает учет радиального зазора между патроном ВВ и стенками шпура (зарядной камеры).

Известно, что с увеличением расстояния от центра заряда давление взрывных газов уменьшается в степенной зависимости. Величины импульса давления в зависимости от расстояния до центра взрыва с учетом имеющегося радиального зазора находится по выражению [2]:

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

где $J(r)$ – импульс взрыва в массиве на расстоянии r , Па·с; K_z – коэффициент радиального зазора; P_n – расчетное 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.

Коэффициент зазора K_z в формуле (1) вводится для определения величины импульса давления взрывных газов за счет многократных отражений фронта детонационной волны от стенок шпура и от столкновения волн в центре заряда при их обратном встречном движении от стенок шпура в процессе стабилизации давления в зарядной камере.

Величина коэффициента зазора определяется с учетом следующих формул:

$$\Delta = (r_s - r_0)/r_0 \quad (2)$$

$$K_{z1} = 0,95/\Delta \quad (3)$$

$$K_{z2} = 9,6 \cdot \Delta \quad (4)$$

где Δ – относительный безразмерный радиальный зазор; r_0 – радиус патрона, м; r_s – радиус зарядной камеры (шпура), м; K_{z1} – коэффициент, характеризующий общее уменьшение импульса давления взрыва патрона ВВ при значении радиального зазора Δ , равного или больше оптимальной величины зазора $\Delta_0 = 0,3125$. Например, при патроне диаметром 32 мм в шпуре диаметром 44 мм $\Delta = 0,375$ и $K_{z1} = 2,5$; K_{z2} – то же при диаметре шпура менее 42 мм.

Экспериментально установлено [3], что увеличение зазора при неизменном диаметре заряда ВВ d_0 приводит к росту импульса давления взрывных газов, при этом максимальное значение импульса достигается при относительном радиальном зазоре $\Delta_0 = 0,3125$. При этом на расстоянии $100 r_0$ этот максимальный импульс в 3 раза больше минимального импульса патрона ВВ без зазора при полном зарядании шпура (при равенстве диаметров шпура и патрона), при этом $K_{z1} = K_{z2} = 1$.

Начальное давление взрыва P_n зависит от свойств применяемого ВВ (плотности заряда, скорости детонации), физико-механических свойств породы (плотности, скорости звука) и рассчитывается по следующим формулам [2, 3]:

$$P_n = K \cdot \rho_v \cdot D^2 / (1 + \gamma) \quad (5)$$

$$K = 2 \cdot \rho \cdot C / (\rho \cdot C + \rho_v \cdot D) \quad (6)$$

$$\gamma = 2,1 \cdot (0,001 \cdot \rho_v)^{0,73} \quad (7)$$

где K – коэффициент отражения; ρ – плотность породы, кг/м³; C – скорость распространения продольной волны в породе, м/с; γ – коэффициент Грюнайзена используемого ВВ [2, 3]; ρ_v – плотность ВВ, кг/м³.

Длительность импульса определяется по следующим формулам [3]:

$$t(r) = r_s [\tau + 0,21 \cdot (r - 1)] \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

$$\tau = 0,21 + 1000 \cdot t(0)/r_s, \quad (9)$$

$$t(0) = L_z / 0,612 \cdot D, \quad (10)$$

где τ – приведенная начальная длительность импульса, мс/м; $t(0)$ – начальная длительность импульса, с; D – скорость детонации ВВ, м/с;

Показатель степени затухания n для исследуемой породы определяется расчетом на основании подобия кривых горных пород и известной кривой эталонной породы – гранита по уравнению [2, 3]:

$$\sigma_{nu}/r^n = \sigma_{ng} \cdot \rho_u \cdot C_u / \rho_g \cdot C_g \cdot r^{1,69} \quad (11)$$

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; ρ_u , C_u , ρ_g , C_g – плотность и скорость распространения продольных колебаний, соответственно, в исследуемой породе и граните, кг/м³, м/с; n – степень затухания напряжения с расстоянием в исследуемой породе.

Показатель степени затухания n определяется методом последовательных приближений до установления равенства обеих частей уравнения (11).

Использование в качестве основного разрушающего фактора взрывааемых горных пород импульса взрывных газов предполагает применение в качестве критерия разрушаемости теоретического расчетного показателя динамической прочности породы, который представляет собой математическое моделирование динамической сопротивляемости массива горных пород воздействию взрыва с учетом их физико-механических свойств (ρ , C , σ), характеристик ВВ (ρ , v , D) и длительности минимального разрушающего импульса давления взрыва $t(0)$ [4]:

$$I_i = f_v \cdot \rho \cdot C \cdot \sigma \cdot t(0) / \rho_v \cdot D \cdot i_0^2 \quad (12)$$

где I_i – теоретический расчетный показатель динамической прочности породы, Па·с; f_v – эмпирический коэффициент, зависящий от типа ВВ, для аммонита 6ЖВ $f_v = 1,8$; σ – прочность породы при одноосном сжатии, Па; i_0 – степень дробления образцов, соответствующая его устойчивому разрушению.

Определение радиуса зоны трещинообразования камуфлетного взрыва производится при устойчивой степени дробления $i_0 = 1,3$, при которой образец теоретически разделяется на два равновеликих куска и мелкие куски, составляющие примерно 20% от объема одного куска [4].

Величина радиуса зоны трещинообразования R м, находится при помощи относительного безразмерного расстояния Rt по формуле [4]:

$$J(Rt)/I_i = 1, \quad (13)$$

где $J(Rt)$ – импульс давления взрывных газов на относительном расстоянии Rt , при котором он становится равным динамической прочности породы. На расстоянии, большем Rt , первоначальная волна сжатия, двигаясь по породе, затухает и перестает разрушать массив.

Искомая величина Rt входит в аргумент, поэтому для численного решения уравнения (13) предлагается использовать метод последовательных приближений до получения результатов с заданной точностью, при этом радиус зоны трещинообразования находится по формуле [4]:

$$R = r_0 \cdot Rt, \text{ м.} \quad (14)$$

Изменение радиуса трещинообразования рассмотрено для патронов ВВ диаметром 32 мм, 36 мм и 45 мм, расчеты производились по формулам 1-14.

На графиках (рис. 1, 2, 3) показаны зависимости радиуса зоны трещинообразования для указанных стандартных диаметров патронов ВВ типа аммонит 6ЖВ от диаметра шпура.

Выводы

1) радиус трещинообразования растет при увеличении диаметра шпура для каждого стандартного диаметра патрона ВВ до величины, при которой образуется оптимальный радиальный зазор $\Delta_0 = 0,3125$, а затем уменьшается (см. рис. 1, 2, 3);

2) с увеличением диаметра патронов растет радиус трещинообразования;

3) для заряда ВВ типа аммонит 6ЖВ длиной 1,6 м в шпуре длиной 2,1 м радиус трещинообразования для камуфлетного взрыва в сильвините в подземных условиях лежит в диапазоне:

- для патрона диаметром 32 мм от 0,45 м до 1,06 м (см. рис. 1),
- для патрона диаметром 36 мм от 0,54 м до 1,23 м (см. рис. 2),
- для патрона диаметром 45 мм от 0,69 м до 1,64 м (см. рис. 3);

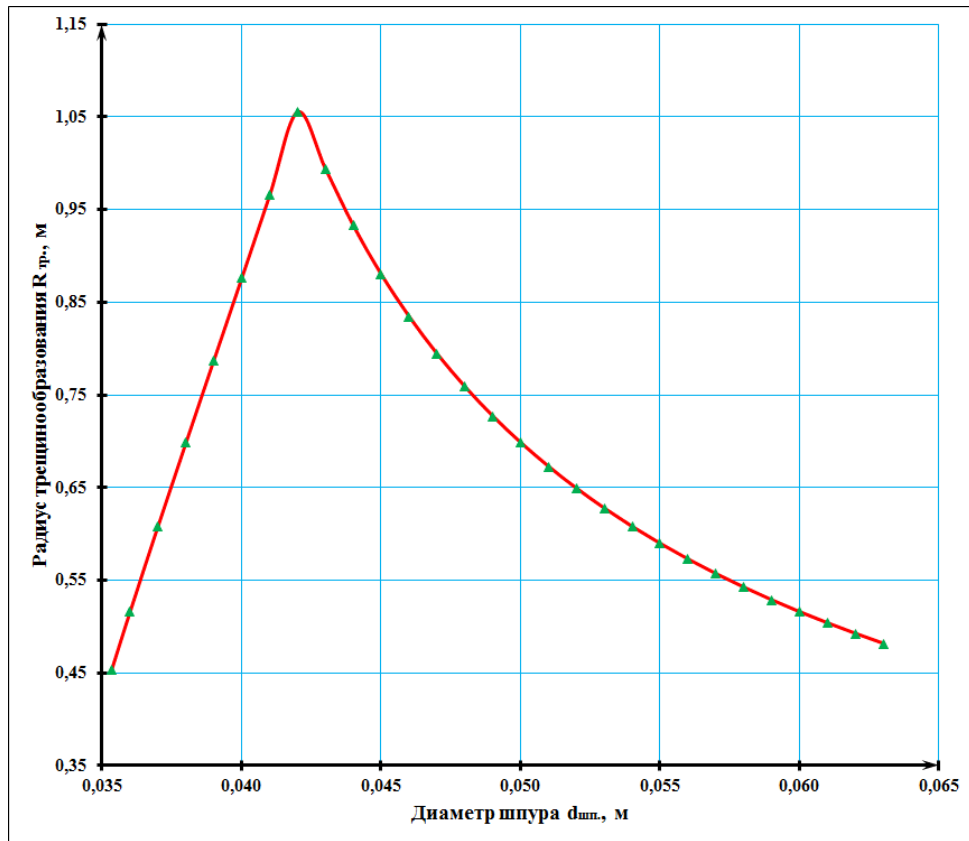


Рис. 1. Зависимость радиуса трещинообразования от диаметра шпура для патрона ВВ типа аммонит 6ЖВ диаметром 32 мм

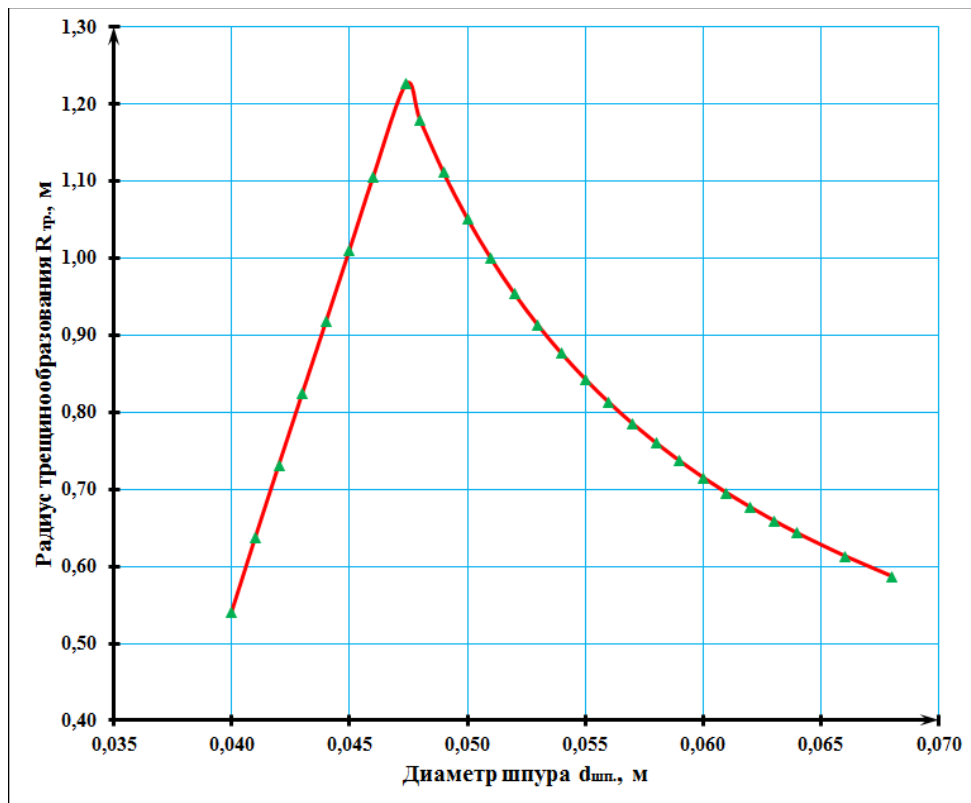


Рис. 2. Зависимость радиуса трещинообразования от диаметра шпура для патрона ВВ типа аммонит 6ЖВ диаметром 36 мм

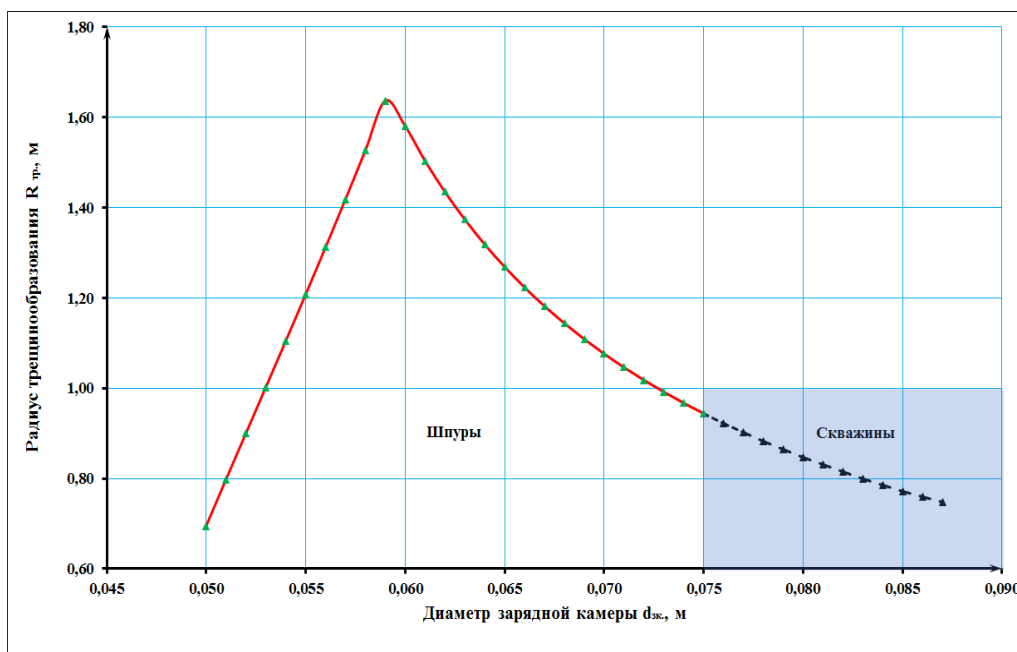


Рис. 3. Зависимость радиуса трещинообразования от диаметра зарядной камеры для патрона ВВ типа аммонит 6ЖВ диаметром 45 мм

4) для уменьшения радиуса трещинообразования при неизменном заряде ВВ в шпуре следует либо уменьшить радиальный зазор до минимально возможного, обеспечивающего зарядание патронов в шпур без усилий, либо увеличить диаметр шпура таким образом, чтобы радиальный зазор не оказывал влияние на величину импульса:

- для патрона диаметром 32 мм – диаметр шпура не менее 62 мм,
- для патрона диаметром 36 мм – диаметр шпура не менее 68 мм,
- для патрона диаметром 45 мм – диаметр зарядной камеры не менее 87 мм

(на рис. 3 часть кривой, соответствующая диаметру от 50 мм до 75 мм, относится к шпурам, выделена красным цветом; свыше 75 мм, выделенная черным пунктиром, относится к скважинам);

5) для увеличения радиуса трещинообразования при неизменном заряде ВВ в шпуре необходимо обеспечить оптимальный радиальный зазор в шпуре $\Delta_0 = 0,3125$, при этом для патронов ВВ диаметром 32 мм диаметр шпура равен 42 мм, для патронов ВВ для патронов диаметром 36 мм – 47 мм, для патронов ВВ для патронов диаметром 45 мм – 59 мм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (регистрационный номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Росинский Н.Л., Магойченков М.А., Галаджий Ф.М. Мастер-взрывник: учебник для проф. обучения рабочих на пр-ве. – 3-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1988. – 384 с. : ил.
2. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение величины линии наименьшего сопротивления шпурового заряда ВВ с учетом его радиального зазора // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 42-46. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.9.
3. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
4. Andreiko S.S., Maltsev V.M., Anikin V.V., Nesterov E.A. Calculation of crack formation radius by modeling the explosive charge with a radial clearance // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V. 32, № С. – P. 3-9. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.002.