

УДК 622.235.5.001.5:622.02

*д.т.н. Литвинский Г.Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)*

ГЕОМЕХАНИКА ВЗРЫВА ПОДЗЕМНОГО ЗАРЯДА НА ВЫБРОС (посвящается памяти русского инженера М.М. Борескова)

Рассмотрена базовая проблема геомеханики подземного взрыва - взаимодействие сферического заряда с массивом. Установлены закономерности подземного взрыва на выброс и предложена диаграмма-квадрат взрыва. Получена теоретическая формула показателя действия взрыва. Показана достоверность теории и ее совпадение с данными практики. Поставлены новые задачи исследования.

Ключевые слова: взрыв, заряд, показатель действия взрыва, теория, расчетная схема, камуфлет, взрыв на выброс, объем выброса, пробный взрыв, закономерности взрыва.

Введение и исторический обзор

Более 70% подземных горных выработок (а это свыше 500-700 км ежегодно) в угольной и почти все выработки в горнорудной промышленности Украины сооружаются буровзрывным способом, на что расходуются значительные материальные ресурсы. От эффективности буровзрывных работ во многом зависит стоимость и скорость строительства и реконструкции новых горизонтов, объемы добычи горного сырья на открытых работах, большинство технико-экономических показателей горной промышленности. Поэтому проблема обоснования эффективных параметров взрывных работ весьма актуальна.

Расчетные методы показателей взрыва начали развиваться на эмпирической основе с начала XVII века. Первая расчетная формула по определению массы заряда взрывчатого вещества (ВВ) была предложена французским горным инженером де Виллем в 1628 г. в предположении, что масса ВВ должна быть пропорциональна глубине ее расположения, что практикой взрывов не подтвердилось. Большой вклад в развитие теории взрыва внесли французский маршал Себастьян де Вобан, бывший министром оборонных укреплений (в 1669 г. ввел понятие линии действия взрыва), генерал-лейтенант инженерных войск Франц Велидор (в 1729 г. предложил понятие показателя действия взрыва), русский

военный инженер М.М. Фролов (1868 г. – новая функция показателя действия взрыва), генерал-лейтенант инженерных войск М.М. Боресков (1871 г. – современная формула действия взрыва), проф. А.Ф. Суханов, швед У. Лангефорс и др. [1-3].

Однако объемная гипотеза, основанная главным образом на эмпиризме, в 1940-50 гг. себя исчерпала и, с учетом громадного объема взрывных работ в промышленности, возникла объективная необходимость в постановке более глубоких теоретических исследований, использующих не только эмпирические, но и физические гипотезы с привлечением фундаментальных разделов науки (теории упругости и пластичности, гидродинамики, акустики и т.д.).

Вопросы теории действия взрыва в различных средах были существенно развиты в работах Г.И. Покровского, В.Н. Родионова, Г.П. Демидюка, В.Н. Мельникова, М.Ф. Друкованого, А.А. Вовка, М.А. Садовского и др. [4-6]. Их исследованиями были установлены важные закономерности действия взрыва в горных породах и, что еще важнее, предложены практические приемы управления взрывом в массивах горных пород. Однако полученные многочисленные расчетные формулы содержали значительную эмпирическую компоненту, исходили из разных, иногда противоположных, гипотез и часто не были доведены до уровня инженерных расчетов. Так,

без ответа остались вопросы теоретического обоснования роли и соотношения динамической и квазистатической фаз действия взрыва, расчетного обоснования формы и объема воронки выброса для разных систем зарядов, особенностей формирования зон трещиноватости вокруг зарядов и др. Поэтому перед геомеханикой взрыва до сих пор стоят сложные и далеко еще не решенные задачи раскрытия закономерностей механического действия взрыва в горных породах.

Цель исследований – разработка и обоснование теории взаимодействия подземного заряда взрывчатых веществ (ВВ) с массивом горных пород. Предмет исследований – процессы образования воронки выброса, объект – геомеханика взрыва одиночного заряда. Основная задача – теоретическое обоснование закономерностей геомеханики взрыва одиночного заряда на выброс.

Постановка задачи о взрыве подземного сферического заряда

В данной работе основное внимание уделено изучению закономерностей действия подземного сферического заряда на выброс – проблеме, которой посвятили свои усилия почти все исследователи геомеханики взрыва. Ответ на вопрос, – какова форма и размеры воронки выброса подземного заряда, – обычно выражался в виде эмпирической формулы, где всегда фигурировал так называемый показатель действия взрыва (который стал своеобразным отражением «зажима мышления», – устоявшейся и принимаемой на уровне подсознания традиции), в виде (рис. 1) отношения радиуса R воронки взрыва к линии его наименьшего сопротивления (ЛНС) W :

$$n = R/W = \operatorname{tg}\beta. \quad (1)$$

Главной эмпирической зависимостью, которую пытались найти все ученые-взрывники, была связь между массой заряда Q , глубиной его расположения W (ЛНС) и функцией показателя действия взрыва $F(n)$:

$$Q = qW^3 F(n), \quad (2)$$

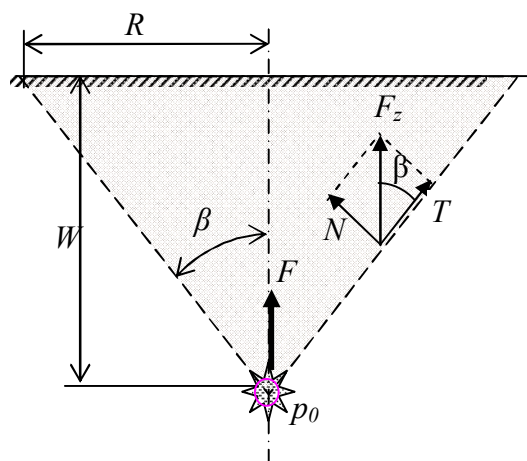


Рисунок 1 – Расчетная схема взрыва сферического заряда

где q – удельный расход ВВ при нормальном заряде выброса, т.е. когда $n=1$ [3].

Поиски правильного значения функции $F(n)$ продолжались давно, начиная с XVII в., и не закончились и поныне, о чем свидетельствуют данные таблицы 1.

Из этой таблицы 1 видно, что большое разнообразие предложенных, в основном, эмпирических формул доказывает сложность задачи получения искомой зависимости, которая так важна для практики расчетов параметров взрыва. При этом все формулы для нормальной воронки выброса (когда $n=1$) дают теоретически правильный результат, равный $F(n)=1$. В остальном диапазоне изменения n разброс результатов чрезмерно велик и является свидетельством необходимости проведения дальнейших исследований для получения теоретически обоснованной формулы.

Задача о выбросе пород при взрыве подземного заряда

Используя расчетную схему рисунке 1, решим в общей постановке основную задачу геомеханики взрыва – определение механического действия заряда в горном массиве, если известны: глубина заряда W , эффективный радиус r_0 камуфлетной полости (который включает в себя и радиальные трещины после взрыва), давление p_0 газообразных продуктов взрыва

ГОРНЫЕ НАУКИ

Таблица 1 – Вид предложенных функций $F(n)$ показателя действия взрыва $n=R/W$

Автор формулы	Год	Предложенная формула для функции $F(n)$	при	
			$n = 0$	$n = 3$
1. Б. Белидор	1731	$[(n+1^2)/2]^{(3/2)}$	0,35	1,18
2. Р. Мореско	1801	$((1+n^2)/2)^2 n^2$	0	20,1
3. Г. Лебрен	1812	$(0,1+0,9n)^3$ при $n>1$	0,2	22,4
4. Д. Мюллер	1845	$1,71(1+n^2\sqrt{1+n^2})$	0,23	11,7
5. Э. Рцига	1866	$0,16(1+4n^3)(1+n/4)$	0,16	30,5
6. М.М. Фролов	1868	$0,5+0,5n^3$	0,5	14,0
7. М.М. Боресков	1871	$0,4+0,6n^3$	0,4	16,6
8. Г. Гаузер	1871	n^3	0	27,0
9. Е. Бралион	1873	$0,2+0,8 n^3$	0,2	30,5
10. М. Дамбрен	1873	$(\sqrt{1+n^2}-0,41)^3$	0,20	20,8
11. А. Мейнеке	1885	$0,41(1+\sqrt{1+n^2}) n^2$	0	15,6
12. Г. Ларес	1933	$(\sqrt{1+n^2}+n^2)(1+\sqrt{1+n^2})$	0,125	24,9
13. О.Е. Власов	1946	$[(1+n^2)/2]^{(9/4)}$	0,35	37,4
14. Г.И. Покровский	1954	$[(1+n^2)/2]^2$	0,25	25
15. Т.М. Саламахин	1960	$2(4+3n^2)/(n+97)$	0,33	19,2
16. Ф.А. Авдеев	1975	$(\sqrt{1+n^2}-1)+0,35/(1+n^2)$	0,36	21,5
17. Г.Г. Литвинский	2006	$\pi[1 - (2/\pi) \arctg(n)]/24$	0,125	14

(ГПВ) и прочностные свойства пород. Вводим [7] три основные рабочие гипотезы, позволяющие решить поставленную задачу:

1) после образования камуфлетной полости с радиальными трещинами разрушение ударной волной происходит в ближней зоне заряда, а основную работу по разрушению и выбросу породы производят ГПВ;

2) при образовании воронки выброса сдвигающие напряжения от давления ГПВ после начальных сдвигов на поверхности конуса разрушения распределены равномерно (из условия работы пород в предельной и запредельной стадии деформирования);

3) окончательное формирование воронки выброса всегда происходит по максимально возможному предельному конусу разрушения, где выполняется условие сдвига.

За счет давления ГПВ образуется направленная в сторону свободной поверхности сила F_z , которая стремится оторвать или сдвинуть вышележащий конусообраз

ный участок массива. Эту силу можно определить из формулы:

$$F_z = p_0 = \pi r_0^2 p_0, \quad (3)$$

где $r_0=1$ – радиус взрывной полости; p_0 – давление ГПВ, которое определяется из условия детонации ВВ и с учетом формирования камуфлетной полости, МПа.

Определим по радиусу r_0 взрывной полости поверхность усеченного конуса выброса с углом β у вершины, расположенной в центре заряда, в которой действует сила F_z :

$$A = \pi W[W \operatorname{tg}(\beta) + 2r_0] / \operatorname{Cos}(\beta), \quad (4)$$

где A – площадь воронки выброса, м^2 . Разложим силу F_z на две составляющие, – нормальную N и сдвиговую T , – которые, как принято выше, равномерно распределены по боковой поверхности конуса выброса после начала пластической фазы сдвига пород:

$$N = F_z \operatorname{Sin}(\beta); T = F_z \operatorname{Cos}(\beta). \quad (5)$$

Вычислим действующие на поверхности конуса сдвигов нормальные и касательные напряжения σ_n ; τ_{nt} , используя зависимости (3), (4) и (5):

$$\sigma_n = \frac{N}{A}; \tau_{nt} = \frac{T}{A}. \quad (6)$$

С учетом того обстоятельства, что прочностные свойства пород в условиях объемного напряженного состояния существенно нелинейны, используем аналитическую теорию прочности [8], которая позволяет достаточно корректно учесть эту нелинейность при любом сочетании действующих напряжений.

Эта теория прочности, в отличие от существующих традиционных, не использует раз и навсегда выведенное алгебраическое уравнение прочности, а требует, в зависимости от внутреннего строения материала и наличия в нем тех или иных структурных несовершенств (неоднородностей), составления дифференциального уравнения паспорта прочности и его решения. В терминах аналитической теории прочности условие разрушения на произвольной конусной поверхности запишется в виде локального нормированного критерия разрушения:

$$\omega^* = \frac{\tau_{nt}}{[\tau_{nt}]} = \tau_0 \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^\alpha \geq 1, \quad (7)$$

где ω^* – нормированный критерий разрушения в виде отношения действующих напряжений к допустимым, разрушение происходит при $\omega^* > 1$, его нет при $\omega^* < 1$; $[\tau_{nt}]$ – допустимое сдвигающее напряжение на поверхности разрушения, МПа;

τ_0 , σ_0 – прочностные параметры материала, вводимые аналитической теорией прочности в виде когезий соответственно сдвига и отрыва, МПа [8];

α – параметр хрупкости материала, отражающий соотношение внутреннего сухого и жидкостного трения на трещинах сдвига и тем самым задающий степень нелинейности паспорта прочности, $0 \leq \alpha \leq 1$; при $\alpha = 0$ порода идеально пластичная, при

$\alpha = 1$ – идеально хрупкая.

Таким образом, задача полностью сформулирована, на основании чего можно, получив решение и варьируя входящие переменные, установить основные закономерности и определять результаты действия взрыва в виде угла раскрытия воронки выброса и ее объема.

Исследование закономерностей образования воронки выброса

Для удобства выполнения и анализа численных решений задачи введем безразмерные переменные: все геометрические размеры будут отнесены к эффективному радиусу r_0 взрывной полости, а величины с размерностью напряжений будут приведены в единицах когезии сдвига τ_0 . Чтобы не усложнять понимание дальнейшего изложения, мы оставим те же обозначения для относительных переменных, что и для абсолютных, поэтому при переходе к абсолютным величинам для вычисления любой величины с размерностью напряжений следует относительное ее значение умножить на τ_0 , а для величин с размерностью длины – умножить на величину r_0 .

Исследуем, как изменится угол раскрытия воронки выброса в зависимости от глубины W расположения заряда при разных давлениях ГПВ. Эта зависимость представлена на рисунке 2.

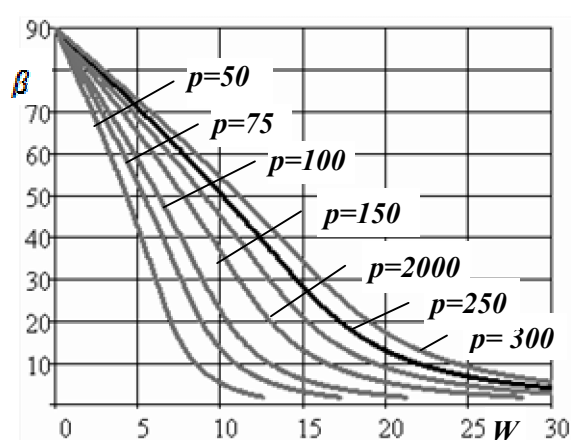


Рисунок 2 – Изменение угла β от глубины заложения заряда W при разных давлениях ГПВ сферического заряда

Как видно из полученных результатов расчетов, при весьма широком варьировании глубин заложения зарядов с ВВ различной мощности, на большей части все зависимости очень близки к прямым линиям. Исключение составляют углы $\beta < 10^0$, что объясняется особенностью поведения численного решения.

Если эти графики представить в относительных координатах $\beta_r = \beta/90^0$ и глубину заряда $w_r = W/W_k$, где W_k – предельная глубина, на которой заряд становится камуфлетным (т.е. когда наступает момент $\beta < 10^0$), то получим почти полное совпадение всех зависимостей $\beta_r = f(w_r)$, что видно на рисунке 3.

Эти зависимости почти во всем диапазоне изменения параметров являются линейными, за исключением области вблизи камуфлета $\beta_r < 0,1$. Эта область изменения угла воронки выброса всегда считается лежащей за пределами рационального

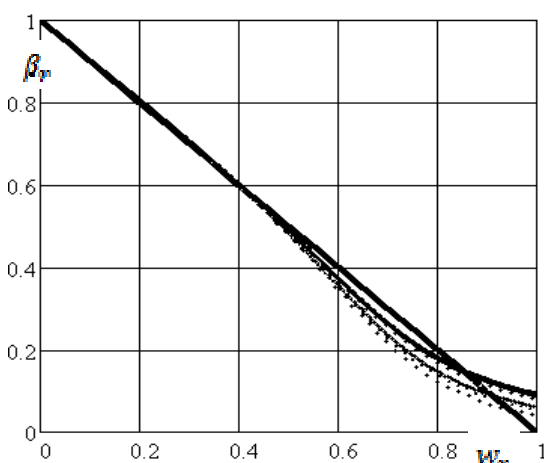


Рисунок 3 – Изменение относительного угла β_r от ЛНС $0 < w_r < 1$ при разных давлениях ГПВ сферического заряда $p = (5 \dots 30) 103$ МПа

использования взрыва и, по этому, может не приниматься во внимание.

Установленная закономерность имеет большое значение, поскольку появляется возможность обобщить все многообразие графиков при варьировании параметров

взрыва в обобщенную кривую, используя соответствующим образом выбранные координаты.

Рассмотрим совокупность решений механического действия взрыва сферического заряда при разной его глубине заложения и определим для каждого случая объем воронки выброса. Вначале построим графики для обычных координат, а затем в относительных координатах глубины заложения заряда $w_r = W/W_k$, которая меняется в пределах $0 < w_r < 1$.

Относительное значение объема выброса $0 < V_r < 1$ следует определять по формуле

$$V_r = V/V_{\max},$$

где V_{\max} – максимальный объем воронки взрыва для данного заряда ВВ. Как видно из графиков рисунка 4, максимальный объем воронки выброса достигается при относительной ЛНС, равной $w_r = 0,5$.

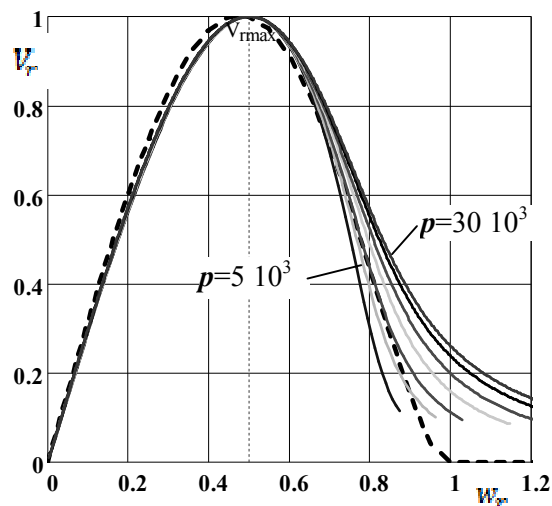


Рисунок 4 – Изменение относительных объема $0 < V_r < 1$ выброса от ЛНС $0 < w_r < 1$ при разных давлениях ГПВ цилиндрического заряда

Попутно заметим, что исследование на максимум теоретического решения дает значение относительной ЛНС, при котором достигается максимальный объем V_{\max} , равный $w_r = 0,476$, что близко к значению $0,5$. На рисунке 4 штриховой линией пока-

зан график усредненного значения относительного объема выброса, который рассчитывался по формуле объема конуса с учетом значения $V_{\max} = V_r(w_k/2) \cdot V_r$

$$V_r = \frac{8}{3} \pi w_r^3 t g^2 \left[\frac{\pi}{2} (1 - w_r) \right]. \quad (8)$$

Из графиков следует, что при $w_r < 0,8$ все кривые хорошо совпали с теоретическим решением (8), а существенные отклонения наблюдаются, когда $w_r > 0,9$, т.е. вблизи области камуфлета.

Эти отклонения могут быть объяснены принятыми идеализациями расчетной схемы взрыва сферического заряда. Действительно, «загибы» графиков V_r приводят к чрезмерно большой глубине камуфлетных зарядов, что не согласуется с практикой взрывов. Это доказывает правильность исходного предположения о конгруэнтности исследуемых графиков в приведенных нормированных координатах $w_r - V_r$.

Диаграмма-квадрат взрыва – теория и эксперимент

Попытаемся, используя полученные закономерности при взрыве сферического заряда, объединить результаты исследований в одной диаграмме. Поскольку пределы осей абсциссы и ординаты диаграммы одинаковы (от 0 до 1), то она представляет собой квадрат, на котором удобно поместить графики, отражающие главные закономерности взрыва сферического заряда в зависимости от приведенной ЛНС w_r в относительных величинах:

- а) угла воронки выброса $0 < \beta_r < 1$;
- б) объема выброса $0 < V < 1$.

Чтобы подчеркнуть особенности полученной обобщенной зависимости, ее уместно назвать «Диаграмма-квадрат взрыва» (для удобства введем сокращение ДКВ). На этой диаграмме одновременно отражены графики зависимости β_r и V_r от нормированной линии наименьшего сопротивления w_r . На рисунке 5 представлена ДКВ для сферического заряда. По мере углуб-

ления сферического заряда, т.е. роста ЛНС, угол объем воронки выброса β_r в соответствии с обнаруженной из теоретического решения закономерностью (см. рис. 3) будет снижаться по линейной зависимости

$$\beta_r = 1 - w_r. \quad (9)$$

Если на том же графике построить кривую изменения относительного объема выброса V_r согласно теоретической зависимости – (8), то получим вид кривой, совпадающий с графиком, построенным по результатам численных расчетов на рисунке 4 в тех же координатах. Некоторое рассогласование наблюдается только в локальной области, где $w_r > 0,9$.

Важно обратить внимание на то, что эти графики на ДКВ являются универсальны

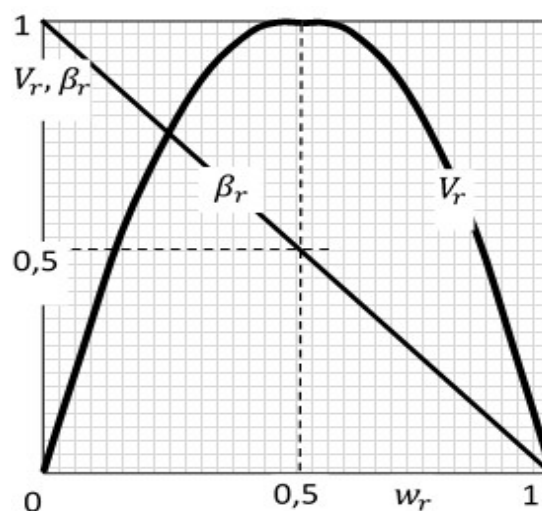


Рисунок 5 – Диаграмма квадрат взрыва для нормированных параметров $\beta_r = f(w_r)$ и $V_r = f(w_r)$

ми, поскольку обобщают фундаментальные закономерности взаимодействия сферического заряда со средой и не зависят от прочностных и деформационных свойств среды, типа и каких бы то ни было свойств ВВ. В этом состоит особое преимущество предлагаемой нами диаграммы. Разумеется, эти закономерности обнаруживаются только на графиках, постро-

енных в относительных нормированных координатах (рис. 5).

Проверка достоверности ДКВ

Однако диаграмма ДКВ должна подвергнуться скрупулезной проверке на достоверность и согласованность с практическими результатами взрывов. Поэтому полученные закономерности сопоставили с данными экспериментальных взрывов, проведенных в лаборатории ДонГТУ методом эквивалентного моделирования и опытными взрывами ДонНТУ [9] на реальных материалах с использованием различных типов ВВ. На графиках рисунка 6 приведены ДКВ, где сопоставлены теория и эксперимент.

Всего было подвергнуто статистическому анализу и сопоставлению с теоретической ДКВ данные по взрыванию сферических зарядов в разных средах (грунт, песок, уголь, скальные породы, глина, эквивалентные материалы) и разных типах и массах ВВ (аммонит БЖВ, аммонит ПЖВ-20, порох, опытные ВВ и др.). Проведенная статистическая обработка результатов проведенных взрывов сферических зарядов (табл. 2) показала вполне приемлемое совпадение теории, воплощенной в ДКВ, и эксперимента (В обработке данных принимал участие магистр П.Н. Шульгин).

Исходя из результатов исследований, можно сформулировать следующие главные закономерности, которые отражены в предложенной нами ДКВ:

1. Механическое действие взрыва сферических зарядов ВВ, если их представить на ДКВ в нормированных координатах, не зависит от свойств пород (среды) и свойств взрывчатого вещества, т.е. взрывы являются подобными (выполняются условия автомодельности).

2. Для сферического заряда с достаточно высокой степенью точности основная зависимость угла воронки выброса от нормированной ЛНС линейна, т.е. $\beta_r = 1 - w_r$.

3. Объем нормированной воронки выброса подчиняется параболической зависимости, которая является следствием линейности функции (9) и может быть записана формулой (8) или, приближенно $V_r = 4w_r(1 - w_r)$.

4. Максимальный объем воронки выброса V_r достигается, когда ЛНС равна половине глубины камуфлета (более точно, при $w_r = (0,476 \approx 0,5)$).

5. Реальный (абсолютный) размер воронки выброса определяется умножением нормированного объема на реальный

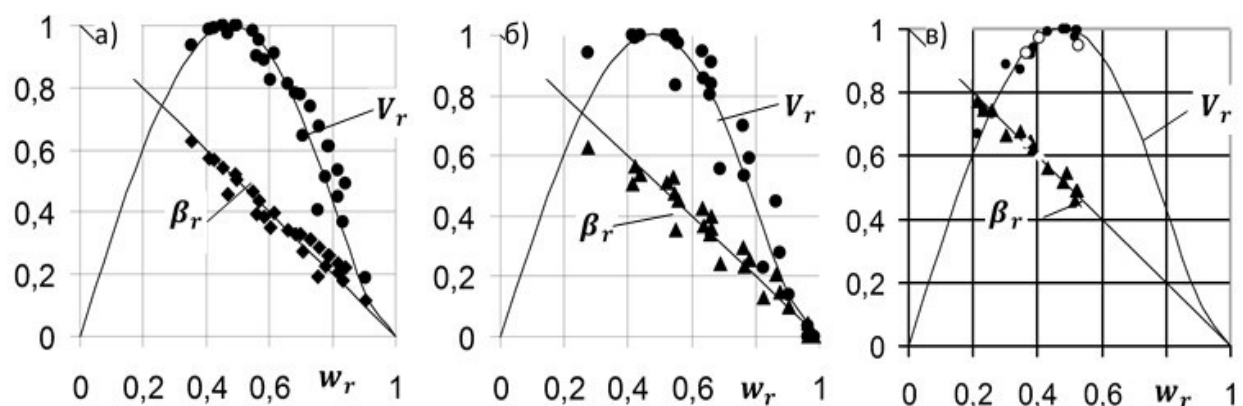


Рисунок 6 – Экспериментальная проверка концепции диаграммы-квадрата взрыва для опытных взрывов: а) в скальных породах – заряды из опытного состава ВВ; б) в угле – заряды из аммонита ПЖВ20; в) в песке и тиосульфате - заряды из пороха.

Таблица 2 - Экспериментальная проверка диаграммы-квадрат взрыва (рис.6)

Среды взрыва	Тип ВВ	Число опытов	Средне квадратич. отклонение	Станд. ошибка оценки	Корр. отношение
1.Песок	Угленит	71	0,092	0,144	0,702
2. Грунт с глиной	Аммонит 6ЖВ	34	0,187	0,095	0,931
3.Уголь	Аммонит 6ЖВ	27	0,196	0,050	0,973
4.Песок	Аммонит ПЖВ20	20	0,190	0,055	0,963
5.Скальные породы	Опытные ВВ	28	0,153	0,035	0,912
6.Песок	Порох	11	0,130	0,125	0,872

размер ЛНС в соответствующей степени (куб для шарового заряда и квадрат для единицы длины линейного заряда).

5. Влияние изменения массы заряда ВВ на воронку выброса

Интересно рассмотреть проблему, как зависят показатели взрыва от величины заряда Q , если зафиксировать его глубину (ЛНС). Эта функциональная зависимость будет как бы дополнительной для диаграммы-квадрата взрыва, где ранее за постоянную величину был принят заряд ВВ. При этом считаем, что проявлением масштабного эффекта в рассматриваемых изменениях геометрических размеров можно пренебречь. Будем при фиксированной ЛНС w_r постепенно изменять заряд ВВ и следить за изменением ЛНС, угла β_r и объема воронки взрыва V_r . Для удобства введем относительный показатель заряда ВВ $Q_r = Q_1/Q_0$, который показывает степень изменения заряда ВВ Q_1 относительно исходного Q_0 , под которым удобнее всего принять заряд нормального горна $w_r = 0,5$. Изменение массы заряда на величину k_Q приведет к увеличению радиуса r_0 зарядной полости до r_1 , и, поскольку масса заряда Q_1 пропорциональна его объему r_1^3 , получим для сферического заряда $r_1 = l_Q r_0 = \sqrt[3]{k_Q} r_0$, где параметр геометрического подобия равен $l_Q = \sqrt[3]{k_Q}$.

Полагаем, что все геометрические размеры, в силу закона подобия, изменятся также на величину. Тогда окажется, что при фиксированной глубине W относительная ее величина $w_r = W/r$, приведенная к размеру радиуса заряда r_0 , будет равна $w_{1r} = w_r/l_Q$. Это значит, что заряд ВВ как бы смещается по глубине в нормированных координатах при изменении величины заряда Q : если заряд увеличивается, относительная ЛНС его уменьшается, а при уменьшении заряда его относительная ЛНС w_r увеличивается (хотя абсолютная ЛНС остается неизменной ($W = \text{Const}$)). Поэтому, используя (9), определяем новые параметры взрыва при изменении массы заряда. Так, в частности, нормированный угол воронки выброса будет равен:

$$\beta_r = 1 - w_r/l_Q = 1 - w_r/\sqrt[3]{k_Q}. \quad (10)$$

Отметим, что при этом абсолютные величины параметров взрыва W , V следует находить, исходя из нового линейного масштаба, определяемого абсолютной величиной радиуса заряда.

Из полученной теоретической зависимости следует, что при некотором значении показателя массы заряда угол раскрытия воронки выброса становится равным нулю. Для этого необходимо положить $\beta_r = 0$, откуда $k_Q = w_r^3$. Если принять массу заряда нормального горна Q_0 известной, и учитывая, что нормированная ЛНС для него равна $w_{r0} = 0,5w_r$, можно получить выражение

предельного заряда камуфлета через массу Q_0

$$Q_k = Q_0 \cdot k_{Qk} = w_{r0}^3 = 0,125 \cdot Q_0$$

Следовательно, предельная наибольшая масса камуфлетного Q_k сферического заряда ВВ равна 1/8 массы заряда нормального горна Q_0 .

А теперь, опираясь на полученные закономерности, можно найти зависимость массы заряда от показателя действия взрыва в традиционном виде, как это представлено в таблице 1. Для этого в качестве исходной возьмем формулу (8), подставим туда соотношение (10) и решим относительно k_Q полученное равенство:

$$V = \frac{\pi}{3} W^3 \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{w_r}{\sqrt[3]{k_Q}} \right) \right],$$

$$k_Q = w_r^3 \left[1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{V}{V_0}} \right]^{-3}$$

Исходя из ранее принятых определений и обозначений, подставим в эту формулу выражения:

$$w_r = 0,5; \quad k_Q = \frac{Q}{Q_0}; \quad Q_0 = q_0 \cdot V_0;$$

$$V_0 = \frac{\pi}{3W^3}; \quad V = \frac{V_0}{n^2} = \frac{\pi}{2W^3 n^2},$$

и окончательно получим:

$$Q = \frac{\pi}{24} q_0 W^3 \left[1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(n) \right]^{-3}. \quad (11)$$

Это и есть искомая теоретическая формула механического действия сферического заряда на выброс. С ее помощью можно определить требуемый заряд ВВ, если задана ЛНС W и показатель действия взрыва n .

Кроме того, необходимо из экспериментального взрыва установить удельный

расход ВВ q_0 для заряда нормального горна $n = 1$, который зависит от свойств пород сопротивляться взрывному разрушению. Следует иметь в виду, что при выводе формулы (11) не учитывался собственный вес пород, а среда принималась однородной и изотропной. Кроме того, неявно предполагается, что независимо от масштаба взрыва при нормальном горне $n = 1$ для каждой породы $q_0 = \text{Const}$.

На рисунке 7 сопоставлены графики $Q/q_0 W^3 = F(n)$ всех ранее предложенных формул, сведенных в таблице 1. Все графики совпадают в одной и той же точке нормального горна $n = 1$, а до и после нее наблюдается значительный разброс графиков.

Обратим внимание на вторую характерную точку на графиках, а именно, $n = 0$. Это точка предельного нормированного заряда камуфлета. Здесь особенно велик разброс

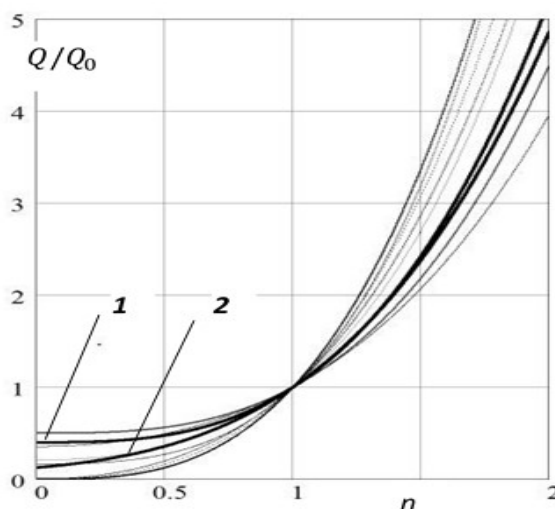


Рисунок 7 – Зависимости нормированной массы заряда ВВ Q/Q_0 от показателя действия взрыва n (1 – по Борескову М.М., 2 – по Литвинскому Г.Г.)

(см. табл.1): нормированная масса камуфлетного заряда $q_k = Q_k/Q_0$ изменяется от 0 до 0,5. В частности, для формулы М.М. Борескова $q_k = 0,4$, для формулы М.М. Фролова $q_k = 0,5$, а для Г.Г. Литвинского $q_k = 0,125$. Далее отличие графика М.М. Борескова от теоретического незначительно (16,6 и 14 при

$n=3$). Остается только отдать должное тщательности выбора эмпирической формулы, выполненного М.М. Боресковым в 1871 г.

По сути, формула (11) показывает, как изменяется удельный расход ВВ по мере увеличения показателя действия взрыва, а проще - при увеличении угла раскрытия воронки взрыва. Это свидетельствует о том, что объемная гипотеза расчета зарядов, которая господствует сейчас, не применима и ведет к большим ошибкам.

В частности, все существующие методики расчета паспорта БВР при проведении горных выработок основаны на неявном использовании объемной гипотезы. Это становится значительным тормозом для оптимизации паспортов ведения буровзрывных работ и приводит к широкому использованию эмпирических подходов при описании механического действия взрыва, которые не способны адекватно отразить все сложные явления взрывного разрушения пород и обосновать их эффективные параметры.

Уместно упомянуть, что в практике ведения взрывных работ при проведении массовых взрывов [6], когда расходуются в один прием десятки и сотни тонн взрывчатых веществ, особенно для траншейных зарядов, до сих пор применяются расчетные методы, основанные на использовании формулы М.М. Борескова. Понятно, при этом результаты взрывов оказываются не всегда оптимальными, что ранее было трудно объяснить. Поэтому эмпирические подходы по обоснованию параметров паспорта БВР, используемые в настоящее время, нуждаются в существенном пересмотре.

Сложностью функциональных зависимостей, связывающих параметры взрыва, можно объяснить те трудности по обработке и осмыслению экспериментальных данных и результатов взрыва, которые ранее казались непреодолимыми и вносили много путаницы в рас-

четные обоснования параметров взрывных работ. Установленные закономерности являются весьма важными и позволяют обрабатывать и давать толкование многочисленным ранее накопленным экспериментальным данным (см. рис. 6). Теперь, с появлением диаграммы-квадрата взрыва все данные можно достаточно просто логично упорядочить и привести в единую систему.

Пример. Рассмотрим один показательный случай применения диаграммы ДКВ для расчета параметров механического действия взрыва. Пусть при пробном взрывании сферического заряда массой $Q = 2 \text{ кг}$ на глубине $W = 0,8 \text{ м}$ получили воронку выброса с углом $\beta = 60^\circ$.

Необходимо определить удельный расход ВВ q для этой породы, и параметры воронки взрыва, если в этой же породе разместить заряд ВВ массой $Q_1 = 1,5 \text{ кг}$ на глубине $W_1 = 1,2 \text{ м}$. Решение приведено в таблице 3.

Из приведенного примера следует, что на основании измерения угла воронки выброса после проведения всего одного (!) пробного взрывания сферического заряда ВВ мы получаем, основываясь на закономерностях диаграммы ДКВ, полную картину механического действия любых таких зарядов в данной среде. При этом не возникает необходимости в определении физико-механических свойств горной породы и работоспособности ВВ, так как эта информация была неявно аккумулирована в результатах пробного взрыва.

Следовательно, для расчетов параметров взрывания сферического заряда необходимо провести хотя бы один пробный взрыв и зафиксировать, какой угол воронки выброса соответствует выбранной линии наименьшего сопротивления.

Разумеется, для повышения достоверности результатов промышленных взрывов, следует произвести несколько пробных взрывов с учетом наличия вероятностной компоненты, всегда присутствующей наряду с детерминированной из-за естественного разброса свойств горных пород и структур-

ГОРНЫЕ НАУКИ

Таблица 3 – Пример определения угла раскрытия и объема воронки выброса по результатам пробного взрывания сферического заряда ВВ

Определяемая величина	Вычисление
1. Нормированный угол воронки выброса	$\beta_r = \beta / 90 = 60 / 90 = 0,667$
2. Нормированная ЛНС	$w_r = 1 - \beta_r = 1 - 0,667 = 0,333$
3. Глубина камуфлета для пробного заряда	$W_k = W / w_r = 0,8 / 0,333 = 2,4 \text{ м}$
4. Нормированная глубина заряда нормального горна	$W_0 = W_k / 2 = 1,2 \text{ м}$
5. Объем воронки нормального горна Объем воронки выброса для заряда 2 кг	$V_0 = \pi \cdot W_0^3 / 3 = 1,81 \text{ м}^3$ $V_1 = 1,2^3 (1 - 2 / \pi \arctg(0,45)) = 1,26 \text{ м}^3$
6. Удельный расход ВВ для данной породы	$q = Q / V_0 = 2 / 1,81 = 1,1 \text{ кг} / \text{м}^3$
7. Нормированный угол воронки выброса, если этот заряд заглубить на $W_1 = 1,2 \text{ м}$	$\beta_{r1} = 1 - W_1 / W_k = 0,5$
8. Угол воронки взрыва, если заряд уменьшить до 1,5 кг	$\beta_{lr} = 1 - 0,5 / (1,5 / 2)^{1/3} = 0,45$
9. Глубина камуфлета для заряда 1,5 кг	$W_{kl} = W_1 / w_r = 1,2 / (1 - 0,45) = 2,18 \text{ м}$
10. Объем воронки выброса $V_1 = W_1^3 [1 - 2 \arctg(n) / \pi]$	$V_1 = 1,2^3 (1 - 2 / \pi \arctg(0,45)) = 1,26 \text{ м}^3$
Ответ: Угол воронки $\beta_{lr} = 0,45$; $\beta_r = 0,45 \cdot 90 = 40,5^\circ$; Объем воронки выброса $V_1 = 1,26 \text{ м}^3$	

ных неоднородностей массива, а затем методами теории вероятностей оценить надежность полученных данных.

Выводы

На основании проведенного исследования установлено, что существующие расчетные методы показателей механического действия взрыва в основном базируются на эмпирических подходах, развитых в работах многих инженеров и ученых, начиная с XVII столетия. Особенно большой вклад в учение о взрыве внесли русские инженеры Фролов М.М. и Боресков М.М. Формула действия взрыва М.М. Борескова не потеряла актуальности до настоящего времени. Однако эмпирические методы расчета не могут удовлетворить в настоящее время возросшие требования при проектировании и эксплуатации горных предприятий.

Решение задачи геомеханики взрыва о выбросе пород при взрыве сферического заряда ВВ с использованием реальной расчетной схемы, основанной на аналитической теории прочности, впервые позволил

установить важные закономерности:

- нормированный угол раскрытия воронки выброса β_r по мере углубления заряда ВВ фиксированной массы **линейно** снижается от 1 на поверхности до 0 при камуфлете;

- объем V воронки выброса максимален, когда линия наименьшего сопротивления равна половине глубины камуфлета, а нормированный угол раскрытия воронки равен $\beta_r = 0,5$;

- графики зависимостей нормированного угла раскрытия β_r и объема V_r воронки выброса от приведенной линии наименьшего сопротивления w_r представляют собой диаграмму-квадрат взрыва, обобщающую закономерности взаимодействия сферического заряда ВВ произвольной массы в горной породе с любыми физико-механическими показателями;

- предельная наибольшая масса камуфлетного Q_k сферического заряда ВВ равна 1/8 массы заряда нормального горна Q_0 ;

– глубина камуфлета W_k заряда ВВ возрастает прямо пропорционально давлению p газообразных продуктов взрыва, а максимальный объем V выброса – как ρ^3 ;

– теоретическая зависимость массы Q заряда от показателя действия взрыва n (11) близко совпадает с формулой М.М. Борескова при $n > 1...2$ и значительно отличается от нее при $n < 1$;

– достоверность указанных закономерностей подтверждена результатами взрывания разных ВВ в горных породах различного литологического состава и строения (корреляционное отношение от 0,7 до 0,97).

Задачи дальнейших исследований должны быть направлены на установление теоретических закономерностей механического действия других конструкций зарядов с массивом (горизонтальных, вертикальных и на-

клонных траншейных зарядов), построение для разного типа зарядов диаграмм ДКВ, изучение взаимодействия зарядов в массиве. Решению этих задач будут посвящены дальнейшие публикации автора, что закладывает теоретические основы геомеханики взрыва и позволяет перейти к разработке практически важных способов управления взрывным разрушением пород и обоснованию их технологических параметров.

В заключение автор выражает благодарность доц. Курману С.А. за помощь в программировании достаточно сложных нелинейных задач взрывного разрушения и магистру Шульгину П.Н. – за участие в подборе и обработке данных по взрыву сферических зарядов в различных средах, а доц. Купенко И.В. – за разрешение использовать свои данные по опытным взрывам.

Библиографический список

1. Покровский Г. И. Взрыв / Г. И. Покровский. — М.: Недра, 1973. — 178 с.
2. Энциклопедия взрыва. История взрыва, ч. 1-4, Web-site: www.biometrica.tomsk.ru/ftp/dict/explode/explode2.html - 35 К.
3. Таранов П. Я. Разрушение горных пород взрывом / П. Я. Таранов, А. Г. Гудзь. — М.: Недра, 1976. — 253 с.
4. Друкованый М. Ф. Действие взрыва в горных породах / М. Ф. Друкованый, В. М. Комир, В. М. Кузнецов. — Киев: Наукова думка, 1973. — 182 с.
5. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В. Н. Мосинец. — М.: Недра, 1976. — 271 с.
6. Авдеев Ф. А. Производство массовых взрывов / Ф. А. Авдеев, В. Л. Барон, В. Л. Блейман. — М.: Недра, 1977. — 312 с.
7. Литвинский Г. Г. Некоторые вопросы геомеханики подземного взрыва / Г. Г. Литвинский // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов : Сб. науч. тр. — Днепропетровск: Арт-Пресс, 2007. — С. 297-310.
8. Литвинский Г. Г. Прочность – критика, теория и новая концепция / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. тр. — Днепропетровск: НГУ, 2004. — С. 236-245.
9. Купенко И. В. Обоснование эффективных параметров буровзрывных работ при проходке вертикальных шахтных стволов : дис. канд. техн. наук: 05.15.04 / И. В. Купенко. — Донецк, 2004. — 182 л. : ил. — Библиогр.: л. 141-151.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Борзых А.Ф.,
д.т.н., проф. ДонНТУ Борщевским С.В.*

д.т.н. Литвинський Г.Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ГЕОМЕХАНІКА ВИБУХУ ПІДЗЕМНОГО ЗАРЯДУ НА ВИКИД

Розглянута базова проблема геомеханіки підземного вибуху - взаємодія сферичного заряду з масивом. Встановлені закономірності підземного вибуху на викид і запропонована діаграма-квадрат вибуху. Отримана теоретична формула показника дії вибуху. Показана достовірність теорії і її збіг з даними практики. Поставлені нові завдання дослідження.

Ключові слова: вибух, заряд, показник дії вибуху, теорія, розрахункова схема, камуфлет, вибух на викид, об'єм викиду, пробний вибух, закономірності вибуху

Doctor Engineering Litvinskiy G.G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

THE GEOMECHANICS OF EXCAVATING BLASTING

A basic geomechanics problem of excavating blasting is considered e.g. interaction of spherical charge with a rock massif. Regularities of excavating blasting are found and diagram-square of explosion is suggested. A theoretical formula for blasting factor is developed. Authenticity of theory and its coincidence with practical data are showed. The new tasks of research are put.

Key words: blast, charge, blasting factor, theory, calculation scheme, camouflet, excavating blasting, volume of the blasted rock, trial blasting, blast regularities.