

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.235.5

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-81-88

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАНИИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Сысоев Андрей Александрович^{1*},
Батраков Дмитрий Николаевич²

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

² Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли

* для корреспонденции: ia_sys@mail.ru

Аннотация.

Размеры зоны разрушений вокруг скважинных зарядов, применяемых при взрывной подготовке горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, определяют основные параметры буровзрывных работ, включающих размеры сетки скважин, длину перебура и забоечного пространства, а также такие возможные элементы конструкции скважинного заряда, как длина промежутков рассредоточения и длина придонной части скважины, свободной от взрывчатого вещества (ВВ). Оценка размеров зоны кондиционного дробления существенно важна при относительно небольших значениях высоты сплошной части заряда, что имеет место, в частности, при создании промежутков рассредоточения. В настоящей работе рассматривается теоретическая оценка размеров зоны разрушения при взрывании скважинных зарядов на основе энергетического подхода, в соответствии с которым считается, что объем зоны разрушения пропорционален массе заряда взрывчатого вещества. Получены расчетные формулы для геометрических размеров зоны кондиционного дробления в зависимости от высоты колонки заряда взрывчатого вещества, диаметра скважин и крепости пород. С использованием имеющихся в научных публикациях экспериментальных данных определены предельные значения длины промежутка рассредоточения заряда и свободной от взрывчатого вещества придонной части скважины, длины сплошных частей рассредоточенного заряда, которые можно применять без изменения размеров сетки скважин по сравнению с базовой конструкцией заряда. Предложенный метод позволяет обосновывать конструкцию скважинных зарядов при наличии свободных от взрывчатого вещества промежутков. Широко используемый в теории взрыва энергетический принцип, а также логически обоснованная динамика геометрической формы зоны дробления от сферической до цилиндрической (по мере увеличения длины сплошной части) являются признаками адекватности метода.



Информация о статье

Поступила:

11 мая 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

Ключевые слова:

разрез, скважинный заряд,
зона разрушений,
кондиционное дробление.

Для цитирования: Сысоев А. А., Батраков Д. Н. Теоретическая оценка размеров зоны разрушения при взрывании скважинных зарядов на основе энергетического подхода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 81-88. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-81-88, EDN: KPLUQX

Введение

При взрывной подготовке горной массы к
выемке в условиях открытой разработки

месторождений полезных ископаемых
конструкция скважинных зарядов и размеры
сетки скважин полностью зависят от размеров и

формы зоны разрушения отдельных зарядов. Исследование закономерности их изменения в зависимости от горнотехнических условий ведения взрывных работ (крепости пород, диаметра скважин, энергетических характеристик взрывчатого вещества) способствует более обоснованному проектированию параметров буровзрывных работ.

Теоретическая оценка размеров и формы зоны разрушения связана с современными представлениями о действии ударных волн на горную породу и ее состояние в окрестности заряда после взрыва. Интенсивность и качество дезинтеграции горного массива зависит от многих факторов, характеризующих структуру, прочностные и плотностные свойства горных пород в естественном залегании, а также свойства и характеристики применяемых способов и средств воздействия на массив.

Современные представления о механизме разрушения массива взрывом довольно разнообразны [1-5]. Одни исследователи считают, что разрушение массивов происходит под действием статических сил давления газообразных продуктов детонации ВВ. Другие – что разрушающим фактором являются волны напряжений. Третьи – что разрушение происходит от совместного действия продуктов взрыва и волн напряжений. Разнообразие гипотез разрушения горных массивов объясняется сложностью и кратковременностью процесса. Первичной является гипотеза, основанная на сопротивлении среды разрушению и мгновенном переходе потенциальной энергии ВВ в механическую, которая расходуется на разрушение части породы от основного массива по боковой поверхности, на преодоление инерции массы породы. Установлено, что величина скважинного заряда пропорциональна удельному расходу ВВ и объему разрушаемого массива.

Несмотря на бытующее утверждение о том, что единая точка зрения на теоретическую сущность процесса развития взрыва в горных породах не выработана, можно считать единой качественную физическую картину результатов этого процесса. Общая сформировавшаяся физическая картина заключается в том, что вокруг заряда образуется несколько областей с различным характером разрушений [6-12].

Первая из них, непосредственно прилегающая к заряду, относительно небольших размеров (относительно диаметра заряда) – зона раздавливания или зона переизмельчения ($R_{пер}$), которая возникает в результате всестороннего сжатия. Эту зону называют также зоной гидродинамического сжатия на том основании, что порода здесь подвергается всестороннему сжатию с давлениями, которые значительно

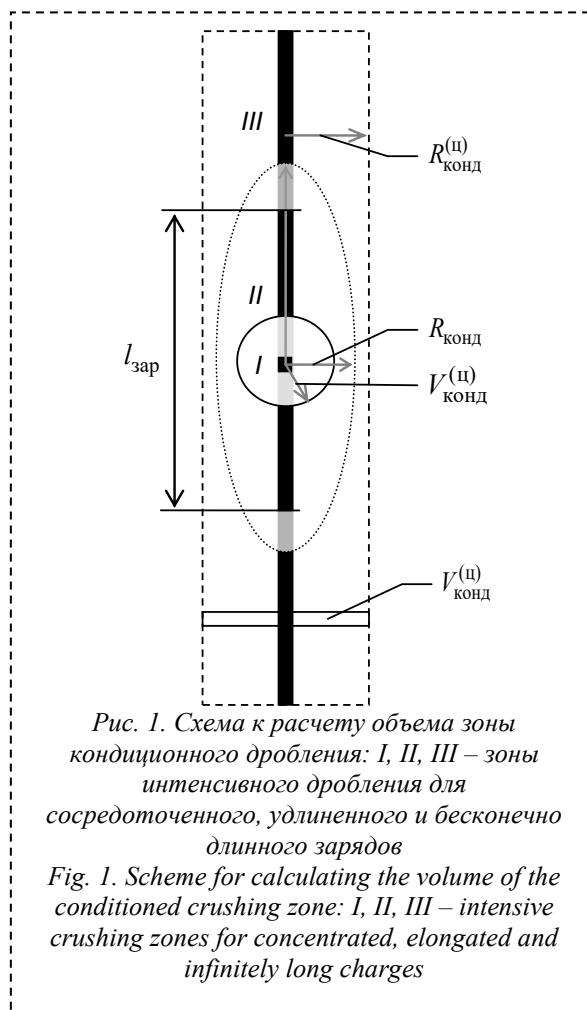


Рис. 1. Схема к расчету объема зоны кондиционного дробления: I, II, III – зоны интенсивного дробления для сосредоточенного, удлиненного и бесконечно длинного зарядов

Fig. 1. Scheme for calculating the volume of the conditioned crushing zone: I, II, III – intensive crushing zones for concentrated, elongated and infinitely long charges

превышают давления в других более удаленных зонах взрывного воздействия.

Вторая зона – зона дробления (или зона необратимых упругопластических деформаций). В практике ведения взрывных работ на разрезах вторую зону принято условно делить на зону интенсивного дробления ($R_{инт}$) и зону кондиционного дробления ($R_{конд}$).

Под кондиционным дроблением понимается наличие кусков такого размера в этой зоне, которые меньше негабаритного размера для используемого в процессе выемочно-погрузочных работ экскаватора. Такой подход имеет под собой основание в виде результатов исследований проф. И. А. Паначева, подробно представленных в [13], где дана оценка распределения размеров кусков в зависимости от расстояния до заряда.

В качестве основных посылок для оценки размеров зоны кондиционного дробления в зависимости от высоты колонки донного заряда примем следующие.

1. При длине заряда $2r_0$ зона имеет сферическую форму радиуса $R_{сф}$. По мере увеличения высоты заряда она принимает эллипсоидную форму (Рис. 1), горизонтальные

полуоси которой в силу симметрии являются одинаковыми и равными a , а вертикальная полуось составляет b :

$$a = R_{\text{конд}}; \quad b = 0,5l_{\text{зар}} - r_0 + R_{\text{сф}} \quad (1)$$

где $R_{\text{конд}}$ – радиус зоны кондиционного дробления, м.

Величина вертикальной полуоси обусловлена тем, что со стороны торцов заряда распространяется деформация в виде сферической, что определяет соответствующий радиус.

При бесконечно длинном заряде ($l_{\text{зар}} \rightarrow \infty$) зона интенсивного дробления имеет форму бесконечно длинного цилиндра с радиусом $R_{\text{ц}}$.

2. Объем зоны кондиционного дробления $V_{\text{конд}}$ пропорционален массе заряда:

$$V_{\text{инт}} = kM \quad (2)$$

3. Размеры различных зон действия взрыва и, в частности, зоны кондиционного дробления геометрически подобны относительно радиуса заряда ряда. Это подтверждается всеми авторами как по результатам теоретических исследований, так и по результатам экспериментов в лабораторных и натуральных условиях. Для производственных условий разрезов имеется дополнительное обоснование в том, что диаметр скважин изменяется в относительно небольших пределах – от 150 до 270 мм.

Метод решения

Предположим, что $R_{\text{ц}}$ известен, тогда коэффициент пропорциональности k определяется из отношения элементарной массы бесконечно длинного заряда и элементарного объема зоны интенсивного дробления

$$k = \frac{3}{2} \frac{R_{\text{ц}}^2}{\rho r_0^2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность ВВ, кг/м³. Отсюда можно определить радиус зоны кондиционного

дробления при случае, когда заряд можно считать сосредоточенным – длина заряда равна его диаметру:

$$R_{\text{сф}} = \left(\frac{3}{2} r_0 R_{\text{ц}}^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Объем эллипсоидной зоны определяется как объем фигуры, образованной вращением соответствующего графика функции в интервале $[x_1, x_2]$.

Для нашего случая функция и пределы интегрирования составляют

$$V = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} b \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) dx;$$

$$x_1 = 0;$$

$$x_2 = (0,5l_{\text{зар}} - r_0 + R_{\text{сф}})$$

где a, b – полуоси эллипса вращения в соответствии с формулами (1), м.

Не останавливаясь на громоздких математических выкладках, приведем результат теоретического расчета радиуса интенсивного дробления в зависимости от длины скважинного заряда и других факторов:

$$R_{\text{конд}} = \frac{R_{\text{ц}} l_{\text{зар}}}{l_{\text{зар}} + 0,25 \left(1,5 r_0 R_{\text{ц}}^2 \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

где $R_{\text{ц}}$ – радиус зоны кондиционного дробления при взрывании бесконечно длинного цилиндрического заряда.

По поводу полученной формулы сделаем два замечания, которые свидетельствуют о качественной адекватности формулы (5). Во-первых, она удовлетворяет поставленному выше требованию, что при бесконечно длинном заряде зона интенсивного дробления имеет форму бесконечно длинного цилиндра с радиусом $R_{\text{ц}}$, хотя эта качественная связь не использовалась в процессе вывода. Максимальный радиус зоны дробления асимптотически увеличивается по мере увеличения длины заряда. При длине заряда 25÷30 диаметров заряда радиус разрушения практически равен $R_{\text{ц}}$.

Во-вторых, формула имеет обобщенный характер и справедлива не только для зоны кондиционного дробления, но и для любой другой зоны необратимых деформаций, возникших в результате действия взрыва и выделенной по каким-либо иным признакам.

Закономерности формирования и размеры зоны разрушений в окрестности скважинных зарядов для условий угольных разрезов Кузбасса наиболее полно, на наш взгляд, представлены в работах проф. И. А. Паначева [13].

Радиус разрушения устанавливался экспериментально по скорости продольных волн

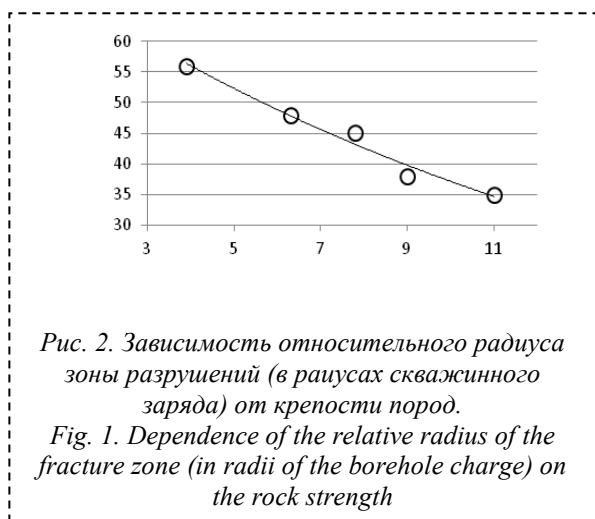


Рис. 2. Зависимость относительного радиуса зоны разрушений (в радиусах скважинного заряда) от крепости пород.

Fig. 1. Dependence of the relative radius of the fracture zone (in radii of the borehole charge) on the rock strength

в массиве при различных расстояниях от скважинного заряда. По мере удаления от скважины скорость волн возрастала до значений, свойственных для ненарушенного массива. Расстояние, при котором скорость продольных волн становилась равной скорости в ненарушенном массиве, принималось за радиус зоны разрушений.

Воспользуемся цитированными данными для формализации радиуса разрушения \bar{R}_p в зависимости от свойств пород. На Рис. 2 представлена зависимость относительного радиуса зоны разрушений (в радиусах скважинного заряда) от крепости пород по шкале проф. М. М. Протодеяконова. Данные наблюдений с достоверностью 0,9 аппроксимируются функцией

$$\bar{R}_p = 78,26 e^{-0,075 f}. \quad (6)$$

Очевидно, что коэффициент $\xi_H = 78,26$ в данном случае индивидуален и соответствует зоне необратимых деформаций. Для любой другой зоны этот коэффициент будет иметь меньшее значение. В частности, для зоны кондиционного дробления соответствующая величина $\xi_{\text{конд}} = 50$ определялась косвенно исходя из расстояния между скважинами [14] в опытно промышленных взрывах, существующего опыта проектирования параметров буровзрывных работ [15], а также из принятой на ряде разрезов Кузбасса методики расчета параметров буровзрывных работ [16].

Преобразуем формулу (5) с учетом (6) и перейдем к диаметру скважин ($d_{\text{скв}}$, м), который наиболее часто применяется в производственных условиях по сравнению с радиусом заряда:

$$R_{\text{конд}} = \frac{0,5 \xi_{\text{конд}} d_{\text{скв}} l_{\text{зар}} e^{-0,075 f}}{l_{\text{зар}} + 0,227 \xi_{\text{конд}}^{0,67} d_{\text{скв}} e^{-0,025 f}}.$$

При этом высота зоны кондиционного дробления $H_{\text{конд}}$ будет соответствовать двум большим полуосям эллипсоида (см. формулу 1) и составит

$$H_{\text{конд}} = l_{\text{зар}} - d_{\text{скв}} + 2R_{\text{сф}}.$$

Полученные формулы устанавливают функциональную взаимосвязь геометрических размеров зоны кондиционного дробления с диаметром скважин, длиной заряда и крепостью пород, в которых производится взрывание.

Практические результаты исследования.

Конструкция скважинных зарядов с применением некоторых их частей, не заполненных взрывчатым веществом, характеризуется совокупностью следующих линейных параметров: длиной промежутка рассредоточения, длиной незаполненной ВВ части скважины в области перебура, длиной

верхней и нижней сплошных частей скважинного заряда.

Для удобства выполнения расчетов при разработке проектов массовых взрывов с использованием полученных выше формул линейные размеры отдельных частей заряда были аппроксимированы в зависимости от основных горнотехнических факторов применительно к зоне кондиционного дробления.

Рассредоточения рекомендуется формировать в том случае, когда длина каждой части рассредоточенного заряда составляет не менее $(25 \div 30) d_{\text{скв}}$.

При этом максимально допустимая длина промежутка рассредоточения ($l_{\text{пр.р.}}$, м) определяется по формуле

$$l_{\text{пр.р.}} = (24 - 1,4f) d_{\text{скв}}.$$

Применение данного способа рекомендуется в вертикальных сухих и слабо обводненных скважинах при взрывании пород с коэффициентом крепости $f \geq 5$. Установка соответствующих устройств рекомендуется при условии, что длина заряда, находящегося над компенсатором (с учетом возможного использования других средств формирования конструкции заряда), составляет не менее $(25 \div 30) d_{\text{скв}}$. Длина свободного от ВВ донного участка скважины ($l_{\text{пр.д.}}$, м), при которой обеспечивается пересечение зон кондиционного дробления соседних скважинных зарядов на уровне подошвы уступа без изменения проектных размеров сетки скважин, составляет

$$l_{\text{пр.д.}} = (8,66 - 0,51f) d_{\text{скв}}.$$

В качестве примера использования сформулированных рекомендаций приведем укрупненные требования к линейным размерам рассмотренных элементов конструкции заряда при диаметре скважин $d_{\text{скв}} = 0,215$ м и при различной крепости взрывааемых пород, характерных для разрезов Кузбасса ($f = 5$, $f = 12$).

При любой крепости вскрышной породы длина сплошной части заряда, как уже отмечалось, не должна быть менее $(25 \div 30) d_{\text{скв}}$. Это условие является исходным при принятии решения о применении технических средств рассредоточения зарядов или средств создания свободных от ВВ полостей в нижней части скважины.

Промежуток рассредоточения при этом должен составлять при мелкоблочных слабых породах не более 3,5 м, при крупноблочных крепких породах не более 1,5 м.

Длина незаполненной взрывчатым веществом нижней части скважины на уровне подошвы

уступа тоже зависит от крепости взрывающей породы и рекомендуется при принятых ее значениях соответственно не более 1,3 м и 0,5 м.

Рассмотренный частный случай согласуется с результатами испытаний устройств формирования конструкции зарядов [17-19].

Выводы

1. Признаками адекватности рассмотренного метода расчета геометрических размеров зоны кондиционного дробления породы при взрывании скважинного заряда являются: общепринятый принцип зависимости объемов разрушения породы пропорционально массе заряда; логически обоснованная геометрическая форма зоны разрушения; количественная оценка эмпирических коэффициентов на основе фактически применяемых на разрезах параметров буровзрывных работ.

2. В практике ведения взрывных работ могут использоваться рассредоточенные скважинные заряды, а также заряды, которые имеют свободную от взрывчатого вещества часть скважины в нижней ее части. Изложенная модель расчета размеров зоны кондиционного дробления позволяет более обоснованно проектировать длину промежутков рассредоточения и длину забойной части скважины, свободной от взрывчатого вещества. В частности, сплошная часть заряда не должна быть менее 25÷30 диаметров заряда.

3. Практическое использование рекомендаций по определению линейных параметров скважинных зарядов, имеющих свободные от ВВ промежутки, будет способствовать снижению удельного расхода ВВ по сравнению с традиционной сплошной конструкцией заряда без ухудшения качества взорванной горной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов С. Д., Казаков Н. Н., Шляпин А. В., Лапиков И. Н. О теории дробления горных пород взрывом в карьерах // Сборник «Взрывное дело». 2021. № 130/87. С. 5–14.
2. Жариков И. Ф. Эффективность взрывной подготовки горной массы к экскавации // Сборник «Взрывное дело». 2024. № 142/99. С. 5–19.
3. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах : Монография. Белгород : ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. 192 с.
4. Жариков И. Ф. Механизм действия взрыва в упруго-пластической среде // Сб. «Взрывное дело». 2010. № 104/61. С. 50–63.
5. Аленичев И. А., Рахманов Р. А., Шубин И. Л. Оценка действия взрыва скважинного заряда в ближнем поле с целью оптимизации параметров буровзрывных пород в приконтурной зоне карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 4. С. 85–95. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-0-85-95.
6. Садовский М. А., Адушкин В. В., Спивак А. А. О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Механическое действие взрыва. М. : ИДГ РАН, 1994. С. 54–61.
7. Тюпин В. Н. Динамика распространения волн деформаций в трещиноватых массивах при взрыве зарядов ВВ // Сборник «Взрывное дело». 2023. № 138/95. С. 114–130.
8. Тюпин В. Н., Лизункин М. В., Лизункин В. М. Определение размера зоны разрушения напряженного трещиноватого горного массива при одновременном взрывании нескольких параллельно сближенных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). 2015. № 12. С. 46–51.
9. Silva J., Worsey T., Lusk B. Practical assessment of rock damage due to blasting // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 3. P. 379–385.
10. Лизункин М. В., Лизункин В. М., Тюпин В. Н. Определение размера зоны разрушения напряженного трещиноватого горного массива при одновременном взрывании нескольких параллельно сближенных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). 2015. № 12. С. 46–51.
11. Викторов С. Д., Казаков Н. Н., Шляпин А. В., Лапиков И. Н. Энергетические параметры камуфлетной зоны при взрыве скважинного заряда в карьере // Сб. «Взрывное дело». 2012. № 108/65. С. 73–80.
12. Жариков И. Ф. Структурные особенности деформирования горных пород при взрывном разрушении // Сб. «Взрывное дело». 2023. № 138/95. С. 22–31.
13. Паначев И. А., Нецветаев А. Г. [и др.] Особенности открытой добычи и переработки углей сложноструктурных месторождений Кузбасса. Кемерово : Кузбассвуиздат, 1997. 220 с.
14. Сысоев А. А., Гришин С. В., Кокин С. В. Анализ принципов проектирования и направлений совершенствования параметров БВР на разрезах Кузбасса. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2009. № 3 (73). С. 3–7.
15. Сысоев А. А., Катанов И. Б., Кондратьев А. С. Опытнo-промышленная проверка вероятностной модели короткозамедленного инициирования системы скважинных зарядов // Взрывное дело. 2019. № 125/82. С. 5–16.
16. Катанов И. Б., Сысоев А. А. Буровзрывные работы на карьерах. Кемерово : КузГТУ, 2019. 200 с.
17. Зыков В. С., Батраков Д. Н., Басарнов А. И. [и др.] Инструментальные исследования надежности критериев опасности массовых взрывов на разрезах Кузбасса для окружающих объектов и среды // Уголь. 2022. №

S12. С. 37–43. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-37-43.

18. Патент на полезную модель №162145 «Скважинный затвор» / Батраков Д. Н., Корнилков М. В., Русских А. П., Саяпин В. В., Чистяков Н. А., Доманов В. П. RU 162145 U1, 27.05.2016. Заявка № 2016101172/03 от 15.01.2016.

19. Патент на изобретение №2799969 «Устройство для рассредоточения взрывчатого вещества» / Басарнов А. И., Батраков Д. Н., Зотов И. Г., Русских А. П., Саяпин В. В., Чистяков Н. А. RU 148326 U1, 10.12.2014. Заявка № 2014114698/03 от 11.04.2023.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Сысоев Андрей Александрович, доктор технических наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: ia_sys@mail.ru, saa.rmpio@kuzstu.ru

Батраков Дмитрий Николаевич, заведующий лабораторией, Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли (650002, Кемерово, ул. Институтская, зд. 3, помещение 1), e-mail: dimankabann@gmail.com.

Заявленный вклад авторов:

Сысоев Андрей Александрович – постановка задачи, формализация модели.

Батраков Дмитрий Николаевич – постановка задачи, выполнение расчетов, технологическая оценка результата.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THEORETICAL ASSESSMENT OF THE SIZE OF THE FRACTURE ZONE DURING THE EXPLOSION OF BOREHOLE CHARGES BASED ON THE ENERGY APPROACH

Sysoev Andrey Alexandrovich ^{1*},
Batrakov Dmitry Nikolaevich ²

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² The Research Center of VostNII on industrial and environmental safety in the mining industry

*for correspondence: ia_sys@mail.ru



Article info

Received:

11 May 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

10 October 2024

Published:

24 October 2024

Keywords: cut, borehole charge,

Abstract.

The size of the destruction zone around the borehole charges used in the explosive preparation of rocks during the open-pit mining of mineral deposits determines the main parameters of drilling and blasting operations, including the size of the grid of wells, the length of the drilling and downhole space, as well as such possible structural elements of the borehole charge as the length of the dispersal gaps and the length of the bottom part of the well free of explosives. The estimation of the size of the zone of conditional crushing is essential for relatively small values of the height of the continuous part of the charge, which occurs, in particular, when creating dispersal gaps. In this paper, a theoretical assessment of the size of the fracture zone during the explosion of borehole charges is considered on the basis of an energy approach, according to which it is assumed that the volume of the resolution zone is proportional to the mass of the explosive charge. Calculation formulas have been obtained for the geometric dimensions of the conditioned crushing zone depending on the height of the explosive charge column, the diameter of the wells and the rock strength. Using experimental data

destruction zone, conditioned crushing.

available in scientific publications, the limiting values of the length of the charge dispersion interval and the bottom part of the well free of explosive, the length of the continuous parts of the concentrated charge, which can be used without changing the size of the well grid compared to the basic design of the row, were determined. The proposed method makes it possible to justify the design of borehole charges in the presence of gaps free of explosives. The energy principle widely used in the theory of explosion, as well as the logically justified dynamics of the geometric shape of the crushing zone from spherical to cylindrical (as the length of the continuous part increases) of the charge, are signs of the adequacy of the method.

For citation: Sysoev A.A., Batrakov D.N. Theoretical assessment of the size of the destruction zone during the explosion of borehole charges based on the energy approach. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):81-88. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-81-88, EDN: KPLUQX

REFERENCES

1. Viktorov S.D., Kazakov N. N., Shlyapin A.V., Lapikov I. N. On the theory of crushing rocks by explosion in quarries. *Collection "Explosive business"*. 2021; 130/87:5–14.
2. Zharikov I.F. The effectiveness of explosive preparation of rock mass for excavation. *Collection "Explosive business"*. 2024; 142/99:5–19.
3. Tyupin V.N. Explosive and geomechanical processes in fractured stressed mountain massifs. Monograph. Belgorod: Publishing house "Belgorod" NRU "BelGU"; 2017. 192 p.
4. Zharikov I.F. The mechanism of action of an explosion in an elasto-plastic medium. *Collection "Explosive action"*. 2010; 104/61:50–63.
5. Alenichev I.A., Rakhmanov R.A., Shubin I.L. Evaluation of the effect of an explosion of a borehole charge in a near field in order to optimize the parameters of drilling and blasting rocks in the contour zone of a quarry. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 4:85–95. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-0-85-95.
6. Sadovsky M.A., Adushkin V.V., Spivak A.A. On the size of zones of irreversible deformation during explosion in a block medium. *The mechanical effect of an explosion*. M.: IDG RAS; 1994. Pp. 54–61.
7. Tyupin V.N. Dynamics of propagation of deformation waves in fractured massifs during the explosion of explosive charges. *Collection "Explosive business"*. 2023; 138/95:114–130.
8. Tyupin V.N., Lizunkin M.V., Lizunkin V.M. Determination of the size of the fracture zone of a stressed fractured rock massif at simultaneous detonation of several parallel charges. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 12:46–51.
9. Silva J., Worsley T., Lusk B. Practical assessment of rock damage due to blasting. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019; 29(3):379–385.
10. Lizunkin M.V., Lizunkin V.M., Tyupin V.N. Determination of the size of the fracture zone of a fractured rock mass with simultaneous detonation of several parallel charges. *Mining Information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 12:46–51.
11. Viktorov S.D., Kazakov N.N., Shlyapin A.V., Lapikov I.N. Energy parameters of the kamuf-flight zone during the explosion of a borehole charge in a quarry. *Collection "Explosive case"*. 2012; 108/65:73–80.
12. Zharikov I. F. Structural features of deformation of rocks during explosive destruction. *Collection "Explosive business"*. 2023; 138/95:22–31.
13. Panachev I.A., Netsvetaev A.G. [et al.] The importance of open-pit mining and processing of coal from complex-structured deposits of Kuzbass. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 1997. 220 p.
14. Sysoev A.A., Grishin S.V., Kokin S.V. Analysis of the principles of design and directions for improving the parameters of BVR in the Kuzbass sections. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2009; 3 (73):3–7.
15. Sysoev A.A., Katanov I.B., Kondratiev A.S. Experimental and industrial verification of a probabilistic model of short-term initiation of a system of borehole charges. *Explosive business*. 2019; 125/82:5–16.
16. Katanov I.B., Sysoev A.A. Drilling and blasting operations at quarries. Kemerovo: KuzSTU; 2019. 200 p.
17. Zykov V.S., Batrakov D.N., Bazarnov A.I. [et al.] Instrumental studies of the reliability of criteria for the danger of mass explosions in Kuzbass sections for surrounding objects and environments. *Ugol*. 2022; S12:37–43. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-37-43.
18. Patent for utility model No. 162145 "Borehole gate" / Batrakov D.N., Kornilkov M.V., Russkih A.P., Sayapin V.V., Chistyakov N.A., Domanov V.P., RU 162145 U1, 05/27/2016. Application No. 2016101172/03 dated 01/15/2016.
19. Patent for invention No. 2799969 "Device for dispersing explosives" / Basarnov A.I., Batrakov D.N., Zotov I.G., Russkih A.P., Sayapin V.V., Chistyakov N.A. RU 148326 U1, 10.12.2014. Application No. 2014114698/03 dated 04/11/2023.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Andrey A. Sysoev, Dr. Sc. in Engineering, Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: ia_sys@mail.ru, saa.rmpio@kuzstu.ru

Dmitry N. Batrakov, Head of the Laboratory, Research Center of VostNII for Industrial and Environmental Safety in the Mining industry (650002, Kemerovo, Institutskaya str., zd. 3, r. 1), e-mail: dimankabann@gmail.com

Contribution of the authors:

Andrey A. Sysoev – problem statement, formalization of the model.

Dmitry N. Batrakov – setting the task, performing calculations, technological evaluation of the result.

All authors have read and approved the final manuscript.

