

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА

Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К., Грибанова Д.А.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Красноярск, Россия (660025 г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95), E-mail: aka_sancho@mail.ru

Для обеспечения лучших показателей проходческих работ и безопасности ведения взрывных работ в горном деле особое внимание уделяют совершенствованию и разработкам методик расчёта параметров буровзрывных работ. Расчёт таких параметров является одним из наиболее спорных вопросов в современном горном деле. Десятки учёных предлагают свои разработки, в которых отражают своё видение этой проблемы и её решение. Существует огромное количество методик расчёта параметров буровзрывных работ, однако до настоящего момента не разработано единой методики расчёта, которая охватывала бы все факторы и объясняла механизм образования трещин вокруг взрываемого заряда и сам процесс разрушения горной породы. В данной статье рассмотрены и систематизированы некоторые из существующих методик, предложенные ведущими учёными из разных стран. Задан предположительный вектор последующих работ в этом направлении.

Ключевые слова: взрыв, методика, обзор, параметры шпуров, расчёт зон разрушения, зона смятия, зона трещинообразования.

REVIEW OF EXISTING METHODS DETERMINATION OF ZONES ROCK MASS DESTRUCTION

Vokhmin S.A. , Kurchin G.S. , Kirsanov A.K. , Griбанова D.A.

Institute of mining, geology and geotechnologies the Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia (660025, avenue the Krasnoyarsk worker, 95), E-mail: aka_sancho@mail.ru

For providing best index of drivage and blasting safety in mining a special attention is paid to perfection and development of methods for calculating the parameters of drilling and blasting. The calculation of these parameters is one of the most contentious issues in modern mining. Dozens of scientists offer their design, which reflects the vision of the problem and its solution. There are many methods for calculating the parameters of drilling and blasting, but so far not developed a uniform methodology of calculation, which would encompass all the factors and explained the mechanism of formation of cracks around the explosive charge and the process of breaking rock. This article describes and systematized some of the existing methods proposed by leading scientists from different countries. Vector set presumable future work in this direction.

Keywords: blast, the method, review, parameters of holes, calculation of fractured zone, crushed zone, cracking zone.

Для эффективного разрушения массива горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых во всём мире уже давно применяют технологию буровзрывных работ (БВР). По мнению ведущих учёных в области горного дела, взрывное разрушение пород в обозримом будущем станет безальтернативной основой большинства горных технологий [2-4,7].

Современные тенденции при проходке горных выработок обуславливают применение технологии буровзрывных работ на высоком уровне. С помощью взрывных работ происходит не только отбойка породы с фронтальной части забоя, видимая невооружённым глазом, но и законтурное действие взрыва, которое в свою очередь может производить нежелательные повреждения, что зачастую приводит к увеличению затрат при проходке и проблем с безопасностью работы персонала.

В настоящее время существует большое количество методик, основанных на определении параметров зон разрушения породного массива при взрыве.

При построении такой методики очень важно определить закономерность воздействия ключевых показателей взрывного процесса. В результате изучения взаимодействия различных процессов в момент взрыва удлинённого заряда взрывчатого вещества (ВВ) в последние десятилетия учёными были достигнуты значительные успехи в изучении процесса взрыва. Так, при взрыве удлинённого заряда ВВ в горном массиве разные учёные выделяют от 2 до 3 основных проявляемых зон разрушения [1,2,7,9,13,15,17,21]:

1. Зона смятия (раздавливания, сжатия, ударная зона, зона мелкого дробления);
2. Зона трещинообразования (зона радиальных трещин);
3. Зона упругих деформаций (сейсмическая зона).

Эти зоны различаются по своим размерам и обозначают характерные этапы разрушения породы вокруг взрываемого шпура (рис.1).

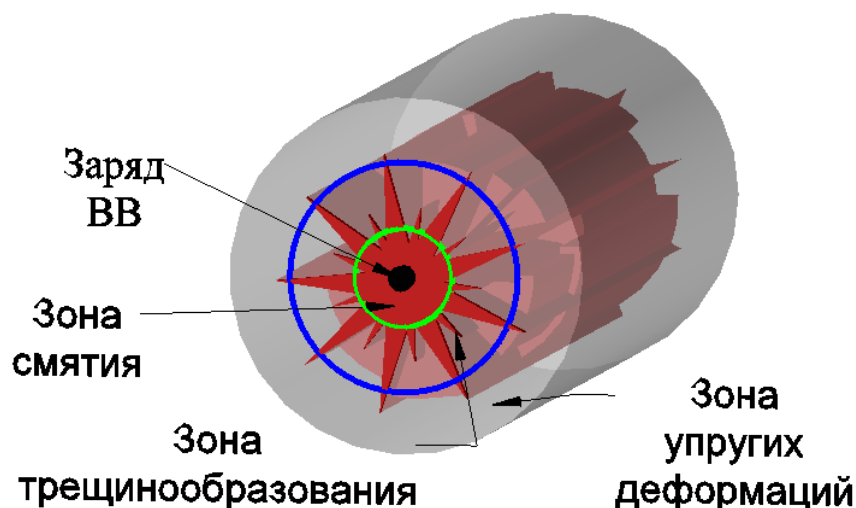


Рис.1. Схема формирования основных зон разрушения вокруг взрываемого шпура

По мнению ряда отечественных и зарубежных учёных, размеры зоны смятия не превышают 2–15 радиусов заряда [6,10,11,17]. По данным [6,11], радиус зоны трещинообразования находится в пределах 20–30 радиусов заряда.

Проведенный анализ современного состояния изученности БВР показывает, что за последние десятилетия проделан значительный объём исследований по совершенствованию и разработке новых методик расчёта параметров БВР [1-21]. Однако до настоящего момента не разработано единой методики расчёта, которая охватывала бы все факторы и объясняла механизм образования трещин вокруг взрываемого заряда и сам процесс разрушения горной породы.

Существуют различные модели для оценки степени измельчения породного массива вокруг удлинённого цилиндрического заряда [1,7,9,12-16,20]. Эти подходы зачастую

демонстрируют взрывное воздействие в идеальной детонационной среде, и оценка достоверности воздействия, рассчитанных по предлагаемым методикам зон разрушения на породный массив, представляется довольно сложной задачей. Краткое описание некоторых из существующих методик определения параметров буровзрывных работ на основании расчётных зон разрушения представлены ниже.

Рядом отечественных учёных были выведены различного вида зависимости по определению размеров зон разрушения. Так, в работе [15,19] Мосинец В.Н. и Горбачева Н.П. предложили формулы для определения трех зон разрушения. Радиус зоны смятия они предложили определять по следующей зависимости:

$$R_{CM} = \sqrt{\frac{C_S}{C_P}} \cdot \sqrt[3]{q}, \text{ м} \quad (1)$$

Радиус зоны трещинообразования:

$$R_{TP} = \sqrt{\frac{C_P}{C_S}} \cdot \sqrt[3]{q}, \text{ м} \quad (2)$$

Радиус зоны упругих деформаций:

$$R_{VD} = \frac{\sqrt{C_P}}{10} \cdot \sqrt[3]{q}, \text{ м} \quad (3)$$

где C_P – скорость распространения продольных волн в массиве, м/с; C_S – скорость распространения поперечных волн в массиве, м/с; q – вес заряда в тротиловом эквиваленте, кг.

Другие отечественные учёные под руководством М.Ф. Друкованного [13] вывели свои зависимости для определения размеров зон смятия и трещинообразования.

Радиус зоны смятия определяется по формуле:

$$R_{CM} = r_0 \cdot \left(\frac{P_b}{-\left(\frac{k}{f}\right) + \left[\sigma_c + \left(\frac{k}{f}\right) \right] \cdot L^{\frac{2f}{1+f}}} \right)^{\frac{1}{2\gamma}} \cdot \sqrt{L}, \text{ мм} \quad (4)$$

$$L = \frac{E}{\sigma_c \left[1 + \frac{\ln \sigma_c}{T} \right]} \quad (5)$$

где r_0 – радиус шпура, мм; P_b – давление в шпуре, Па; γ – адиабатическое расширение взрывчатого вещества; k – сцепление, Па; f – коэффициент внутреннего трения; σ_c – предел

прочности пород на сжатие, Па; T – предел прочности пород на растяжение, Па; E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона, Па.

Радиус зоны трещинообразования:

$$R_{TP} = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_T} \right) \cdot r_c, \text{ мм} \quad (6)$$

В своих работах Б.Р. Ракишев [9,10] предлагает следующий расчёт параметров зон разрушения:

Радиус зоны смятия в монолитных породах в камуфлетной стадии вычисляется из уравнения:

$$R_{CM} = r_{PP} \cdot \left(\frac{\rho_0 C^2}{5 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где r_{np} – предельный радиус взрывной полости, определяемый из выражения:

$$\overline{r_{PP}} = \left(\frac{P_H}{P_C} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

где P_H и P_C – начальное давление продуктов детонации и прочностная характеристика среды в условия взрывного разрушения соответственно.

$$P_H = \frac{1}{8} \rho_{BB} D^2 \quad (9)$$

$$P_C = \sigma_{СЖ} \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot c^2}{\sigma_{СЖ}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

где ρ_0 – плотность породы; c – скорость звука в породе; ν – коэффициент Пуассона; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие; σ_p – предел прочности пород на растяжение; $\rho_{вв}$ – плотность заряда ВВ; D – скорость детонации ВВ.

Радиус зоны трещинообразования определяется по зависимости:

$$R_{TP} = R_{CM} \cdot \frac{\nu}{1 + \nu} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}, \text{ м}. \quad (11)$$

Б.Н. Кутузов и А.П. Андриевский предложили метод определения размеров зон разрушения [7], представленный ниже:

Радиус зоны смятия определяется по формуле:

$$R_{CM} = d \sqrt{\frac{\rho \cdot D^2}{8 \cdot \sigma_{сж}}}, \text{ м} \quad (12)$$

где d – диаметр шнура, м; ρ – плотность ВВ, кг/м³; D – скорость детонации, м/с; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие, Па.

Радиус зоны трещинообразования, формирующейся вокруг шпура в монолитном скальном массиве при его взрывном нагружении удлинёнными зарядами, определяется по формуле [7]:

$$R_{mp} = 0,2102 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_{сж}^{-0,25} \cdot \tau_{ср}^{-0,5}, \text{ м} \quad (13)$$

где $\tau_{ср}$ – предел прочности разрушаемого массива на срез (для большинства пород $\tau_{ср}$ не превышает 20 МПа. Приблизительно $\tau_{ср}$ можно определить как $(0,1-0,02) \cdot \sigma_{сж}$ [8]), Па; d – диаметр шпура, м; D – скорость детонации, м/с; ρ – плотность ВВ, кг/м³; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие, Па.

Радиус зоны трещинообразования, формирующийся вокруг шпура в трещиноватом массиве при его взрывном нагружении удлинёнными зарядами, рассчитывается:

$$R_{mpm} = 0,2102 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_{сж}^{-0,25} \cdot \tau_{ср}^{-0,5} \cdot K_c^{-0,5}, \text{ м} \quad (14)$$

где K_c – коэффициент структурного ослабления породы взрываемого трещиноватого массива, рассчитываемый по формуле [7]:

$$K_c = \frac{1}{0,97 + 0,13 \frac{R_{mp}}{l_m}}, \quad (15)$$

где l_m – среднее расстояние между трещинами, м.

Среди зарубежных учёных вопросом определения параметров зон разрушения породного массива занимались:

В работе [20] Г. Сцуладзинский предложил рассчитывать радиус зоны смятия по следующей формуле:

$$R_{CM} = \sqrt{\frac{2r_0^2 p_0 Q_{EF}}{F'_C}}, \text{ мм} \quad (16)$$

где r_0 – радиус шпура, мм; p_0 – плотность взрывчатого вещества, кг/мм³; Q_{EF} – эффективная энергия взрывчатого вещества (предположительно 2/3 полной реакции); F'_C – предел прочности пород на сжатие, Па.

Н. Джорджевич [12] рекомендует рассчитывать радиус зоны смятия по формуле:

$$R_{CM} = \frac{r_0}{\sqrt{\frac{24T}{P_b}}}, \text{ мм} \quad (17)$$

где r_0 – радиус шпура, мм; T – предел прочности пород на разрыв, Па; P_b – давление в шпуре, определяемое по формуле [18]:

$$P_b = \frac{P_{CJ}}{2}, \text{ Па} \quad (18)$$

где P_{CJ} – скорость детонации, м/с;

$$P_{CJ} = \frac{p_0 D_{CJ}^2}{4} \quad (19)$$

С. Эсен и И. Онедerra в своих работах [14,16] предложили пользоваться следующими формулами для определения зон разрушения:

Радиус зоны смятия определяется по формуле:

$$R_{CM} = 0.812 r_b (CZI)^{0.219}, \text{ мм} \quad (20)$$

где r_b – радиус шпура, мм; CZI – индекс зоны разрушения, является безразмерным показателем, определяемым по формуле:

$$CZI = \frac{P_b^3}{K \cdot \sigma_c^2} \quad (21)$$

где P_b – давление в шпуре, Па; σ_c – предел прочности пород на сжатие, Па; K – жесткость горной массы;

$$K = \frac{E_d}{1 + \nu_d} \quad (22)$$

где E – модуль Юнга, Па; ν_d – коэффициент Пуассона, Па.

Проведенный анализ показал, что во всех методиках расчёта параметров зон разрушения породного массива не учитывается вязкость горных пород. При этом практические данные показывают, что вязкость оказывает существенное влияние на эффективность взрывных работ. Вязкими принято называть наиболее трудно разрушаемые породы, имеющие высокую прочность и большую зону пластических деформаций.

С увеличением вязкости пород возрастает поглощение упругих волн, уменьшаются ползучесть и пучение пород, возрастает энергоёмкость процессов дробления и измельчения пород при переработке полезных ископаемых и взрывных работах [5]. На настоящий момент не существует общепризнанного метода определения вязкости горных пород. Применительно к расчётам определения рациональных параметров буровзрывных работ это является большим минусом, так как этот фактор может существенно снизить эффективность взрывной отбойки.

Работа по изучению влияния вязкости на эффективность взрывных работ проводятся коллективом кафедры «Шахтное и подземное строительство» в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук – МК-5475.2015.8.

Список литературы

1. Вохмин С.А. Методика расчёта параметров буровзрывных работ при проходке горизонтальных и наклонных горных выработок / С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, А.К. Кирсанов, П.А. Дерягин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 5-9.
2. Вохмин С.А. Расчет конструкции прямого призматического вруба / С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, А.К. Кирсанов, Д.А. Грибанова // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/121-17267> (дата обращения: 13.05.2015).
3. Викторов С.Д., Галченко Ю.П., Закалинский В.М., Рубцов С.К. Разрушение горных пород сближенными зарядами. М.: ООО Изд-во «Научтехиздат», 2006. 276 с.
4. Викторов С.Д., Закалинский В.М. Взрывное разрушение горных массивов в России // Взрывное дело. 2012. №107-64. С. 181-190.
5. Горная энциклопедия / Вязкость. URL: <http://www.mining-enc.ru/v/vyazkost/> (дата обращения 13.05.2015).
6. Комир В.М. и др. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах. М., 1973. 215с.
7. Кутузов Б.Н., Андриевский А.П. Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлиненными зарядами взрывчатых веществ. Новосибирск: Наука, 2002. 96 с.
8. Проектирование взрывных работ в промышленности / под общ. ред. Б.Н. Кутузова. М.: Недра, 1983. 359 с.
9. Ракишев Б.Р. Определение размеров зон разрушения в массиве пород при скважинных зарядах дробления // Взрывное дело. 2010. № 103-60. С. 53-65.
10. Ракишев Б.Р. Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах. Алма-Ата: Наука, 1983. С.239.
11. Репин Н.Я. Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. М., 1978. 256 с.
12. Djordjevic N. Two-component of blast fragmentation. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast 1999, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa. 1999. pp. 213–9.
13. Drukovanyi, M.F., Kravtsov, V.S., Chernyavskii, Y.E., Reva, V.V. and Zerkov, S.N., 1976. Calculation of fracture zones created by exploding cylindrical charges in ledge rocks. Soviet Mining Science, 12(3): pp. 292-295.
14. Esen, S., Onederra, I. & Bilgin, H.A. 2003. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. Int. J. Rock Mech. Min. Scis: 40, 485–495.
15. Mosinets, V.N. & Gorbacheva, N.P. 1972. A seismological method of determining the parameters of the zones of deformation of rock by blasting. Soviet Mining Science, 8(6): 640–647.

16. Onederra, I., Esen, S. & Jankovic, A. 2004. Estimation of fines generated by blasting – applications for the mining and quarrying industries. *Mining Tech (Trans Inst Min Metall A):*113, A1-A11.
17. Ozkahraman H.T. Breakage mechanisms and an encouraging correlation between the Bond parameters and the friability value. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol.110. pp. 153–159.
18. Persson P, Holmberg R, Lee J. *Rock blasting and explosives engineering*. Florida, USA: CRC Press, 1993. p. 101, 106, 107.
19. Saharan, M.R. & Mitri, H.S. 2008. Numerical procedure for dynamic simulation of discrete fractures due to blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41(5): 641–670.
20. Szuladzinski G. Response of rock medium to explosive borehole pressure. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-4*, Vienna, Austria. 1993. pp. 17–23.
21. Yang J.H., Lu W.B., Chen M., Yan P. & Li P. Rjco. An equivalent simulation method for whole time-history blasting vibration / 10th Int Symp. on Rock Fragmentation by Blasting: 473-483. New Delhi, India.

Рецензенты:

Гилёв А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, г. Красноярск.

Косолапов А.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Открытые горные работы», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, г. Красноярск.