

И.В. Бригадин, Р.А. Возгрин, А.А. Кудрявцев, С.Ю. Николашин

О ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ ЗАТУХАНИЯ АМПЛИТУДЫ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВАХ В ПРОЧНЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ

Дано обоснование необходимости учета блочной структуры скального массива при выборе коэффициента затухания максимальной массовой скорости волны сжатия. На основе такого подхода к строению горного массива и анализа экспериментальных данных подземных взрывов установлена, в первом приближении, закономерность изменения коэффициента затухания максимальной массовой скорости волны сжатия от ранга структурно-тектонического блока. Физический смысл такого подхода заключается в том, что, чем ниже ранг структурно-тектонического блока, тем меньше эффект ослабления интегральной прочности крепости породы, слагающей этот блок, за счет менее значимого вклада петрогенетических трещин или тектонических разломов. Предложено ввести новое понятие «протогеологический коэффициент затухания», как минимально возможное значение для скальной породы, не подвергавшейся ранее геофизическому или техногенному воздействию. В случае, когда массив в целом или структурно-тектонический блок были подвержены какому-либо воздействию, то вклад в ослабление заметно непропорционально возрастает. Предлагаемый подход позволяет адекватно интерпретировать перенос данных, полученных в лабораторных экспериментах, на натурные условия карьеров блочного камня и глубоких рудников.

Ключевые слова: показатель степени затухания, массив блочной структуры, волна сжатия, подземный взрыв, массовая скорость, скальная порода, удельный расход.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-77-83

Введение

В горной промышленности при разработке месторождений рудных и нерудных ископаемых в карьерах и на рудниках взрывным способом весьма важным является предварительная оценка параметров буровзрывных работ (БВР). Эффективность БВР оценивается по величине удельного расхода [1–3] взрывчатых веществ (ВВ).

Вторым важным аспектом проблемы является интерпретация фактических по-

казателей БВР, которые могут существенно отличаться даже в пределах одного горного массива (карьера или рудника). Во многом это обусловлено явно выраженным трендом роста глубины разрабатываемых рудных тел.

В свою очередь удельный расход связан с размерами зон регулируемого и нерегулируемого дробления, при расчете которых необходимо корректное знание показателя степени затухания амплитуды массовой скорости волны сжатия,

генерированной подземным взрывом ВВ [4–9].

Показатель степени затухания амплитуды массовой скорости волны сжатия по результатам экспериментальных исследований изменяется в очень широких пределах, что затрудняет возможность корректной оценки параметров БВР [1–3].

Закономерности изменения собственно показателя степени затухания амплитуды массовой скорости в настоящее время изучены в недостаточно полной мере.

Блочный подход к строению скального горного массива

Из целого ряда факторов, определяющих закономерности изменения показателя степени затухания амплитуды массовой скорости (физико-механические характеристики горных пород, трещиноватость, обводненность и др.), наименее изученным является блочность горного массива.

В работах М.А. Садовского [10,11], В.В. Адушкина [4,13], Г.Г. Кочаряна [11–13] и А.Л. Бенедика [14], предложена модель земной коры, которая представляет собой систему, образующую дискретно-иерархическую блоковую модель. Размер различных структурно-тектонических блоков (СТБ) данной модели, формируемых сетью различных нарушений в массиве горных пород, слагающего массив не произволен, а формирует дискретный ряд, в котором порядок J иерархического уровня и минимальный размер L_J определяется выражением [12, 14]:

$$L_J = \begin{cases} (3 \div 6) \cdot 10^{\left(\frac{J-11}{2}\right)}, & \text{для } J = 2k - 1; \\ (1 \div 2) \cdot 10^{\left(\frac{J-10}{2}\right)}, & \text{для } J = 2k, \end{cases} \quad (1)$$

где k — целое число от 1 до 9; L_J — линейный размер блока, км.

Основные элементы структуры массива проявляются в виде квазилинейных нарушений сплошности. Масштаб нарушений заключен в весьма широком диапазоне размеров: от 10 нм (дефекты кристаллической решетки минералов) до тысяч км (протяженность крупных тектонических разломов). Для массивов среднего ранга этому размеру соответствуют петрогенетические трещины. Эти нарушения являются внешними границами обособленных объектов изометрической формы с квазиоднородным для каждого конкретного масштаба строением.

Дискретное строение массива горных пород при сильном (взрывном) воздействии может вызвать его разрушение, которое обуславливается, в том числе, подвижками структурных блоков. В такой среде существенно нарушение целостности этих блоков в результате механического воздействия (дробление, перемещение горной массы, сейсмический эффект) взрыва заряда.

При деформировании блочной структуры отдельные блоки разных иерархических уровней оказываются в различном напряженно-деформированном состоянии. При этом образуются разные подобласти — нагруженные блоки консолидации и относительно разгруженные свободные блоки. Это означает, что даже на достаточно большой глубине от свободной поверхности, где средние напряжения велики, распределение напряжений по пространству далеко не соответствует моделям сплошной среды, базирующихся на континуальном подходе.

При производстве взрывных работ, когда помимо постоянной действующей в массиве волны сжатия, возникают дополнительные объемные силы — силы инерции, вызывающие нарушение устойчивости отдельных частей (блоков) массива.

Массивы горных пород, в которых проводятся взрывные работы по добы-

че руды и нерудного сырья, также подчинены этим фундаментальным закономерностям.

Исследования коэффициента затухания

Известно, что при взрыве заряда ВВ в нем образуется детонационная волна с ударным фронтом, за которым следует зона реакции, и область расширяющихся газообразных продуктов взрыва. Детонационная волна при преломлении в породе генерирует в ней волну сжатия, характеризующиеся зависимостью максимальной массовой скоростью волны сжатия от приведенного расстояния. Эта зависимость (закономерность) наиболее часто описывается формулой [4–9, 11–13]:

$$u = A \left(\frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n} \quad (2)$$

где A — коэффициент сейсмичности; n — показатель степени (коэффициент) затухания; Q — масса заряда, кг; r — расстояние, м.

Значения A и n определяются, согласно современным представлениям, главным образом физико-механическими свойствами пород.

Значительный объем исследований по механическому действию крупномасштабных взрывов проведен за рубежом, в основном в США и скандинавских странах [7–9, 21].

Анализ многочисленных исследований показывает, что по степени взрывного воздействия на массив следует выделить две области: область упруго-пластических деформаций, то есть ближнюю зону взрыва, и область упругих деформаций, где остаточные деформации отсутствуют.

На основе анализа работ В.В. Адушкина [4, 13], Е.И. Шемякина [5], Г.Г. Кочаряна [11–13], Б.В. Замышляева с Л.С. Евтеревым [15] (для крупномас-

штабных взрывов), Ю.И. Виноградова, В.А. Артемова (маломасштабные взрывы) [16–18], А.А. Федосеева и С.В. Щербича [19, 20], (лабораторные эксперименты) на рисунке приведены значения показателя степени затухания массовой скорости волны сжатия от размера структурно-тектонического блока (ранга блока).

Согласно обзору исследований, изложенному выше, в массиве, где проводятся БВР, преобладает процесс упруго-пластического разрушения, поэтому для оценки разрушающего действия взрыва необходимо рассчитывать максимальную массовую скорость в упругоэластической волне с соответствующим показателем (коэффициентом) степени затухания этой массовой скорости.

Некоторые рекомендации по учету блочности пород отмечены у Б.Н. Кутузова. Согласно [1–3] удельный расход определяется выражением:

$$q = 0,13\rho^4\sqrt{f}(0,6 + 0,8L), \quad (3)$$

где ρ — плотность породы, т/м³; f — коэффициент крепости по шкале М. Протодьяконова; L — линейный размер отдельности (блока) в массиве, м.

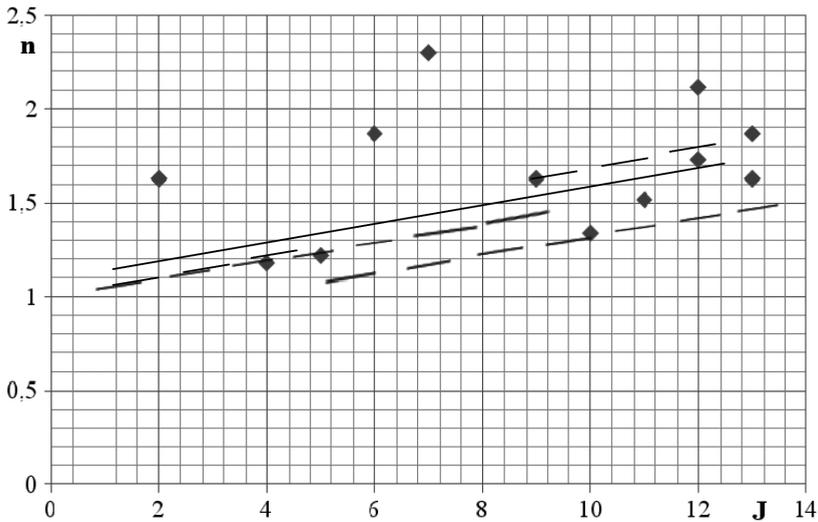
Известно, что определение массы заряда ВВ для дробления горной породы осуществляется в соответствии с объемным принципом:

$$Q = q \cdot V, \quad (4)$$

где Q — масса заряда ВВ, кг; q — удельный расход, кг/м³; V — объем разрушаемой горной массы, м³.

В свою очередь объем разрушенной породы V в зависимости (4) может существенно определяться величиной показателя степени (коэффициента) затухания волны сжатия.

Если ранг структурно-тектонического блока принять за параметр вариации, то среди параметров флуктуации следует выделить физико-механические характеристики скальных пород, в частности



Зависимость показателя степени затухания массовой скорости волны сжатия от размера структурно-тектонического блока (ранга блока)

прочность на сжатие, прочность на разрыв, плотность, скорость продольных и поперечных волн, коэффициент Пуассона, модуль Юнга и как производную величину — акустическую жесткость.

На этом же рисунке условно приведены 3 зависимости показателя степени затухания n массовой скорости волны сжатия от ранга J СТБ. Зависимость 1 (нижняя линия) будет соответствовать крепким и наиболее крепким скальным породам с высокой акустической жесткостью (кварциты, базальты, кварцевые порфиры), зависимость 2 (средняя линия) — крепким породам (граниты, крепкие песчаники), зависимость 3 (верхняя линия) — довольно крепким породам и породам средней крепости (песчаник, сланец, известняк, каменная соль). Акустическая жесткость пород для зависимости 1 достигает 100 ГПа, для зависимости 3 — 50 ГПа, для зависимости 2 — изменяется в пределах от 50 до 80 ГПа.

Зависимости 1, 2, 3 на рисунке описываются, в первом приближении, формулой:

$$n = 1 + b_1 J, \quad (5)$$

где $b_1 = 0,03; 0,04; 0,05$, соответственно.

Эти зависимости по нижней границе соответствуют минимальными значениями n , и их предлагается назвать протогеологическими. Физическая суть такого подхода заключается в том, что наибольшей интегральной крепостью обладают блочные массивы скальных пород, не подвергавшиеся ранее геофизическому или техногенному воздействию.

Массив экспериментальных значений показателя степени затухания массовой скорости волны сжатия, показанный на рисунке, изменяется в широком диапазоне.

Значения коэффициента n , лежащие выше значений, описываемых зависимостью (5), обусловлены повышенной естественной или наведенной трещиноватостью.

В случае, когда скальный массив в целом или структурно-тектонический блок были подвержены какому-либо воздействию, то вклад в ослабление заметно непропорционально возрастает.

Физический смысл этого подхода заключается в том, что чем ниже ранг структурно-тектонического блока, тем меньше эффект ослабления интегральной проч-

ности крепости породы, слагающей этот блок, за счет менее значимого вклада петрогенетических трещин или тектонических разломов.

Например, в СТБ не выше 7 ранга петрогенетическая трещина имеет размер от мкм до мм, а тектонические разломы в СТБ более высокого ранга — характерный размер уже см и более. Причем в протогеологическом состоянии в петрогенетических трещинах присутствуют межмолекулярные силы взаимодействия, которые после техногенного (взрывного) воздействия либо ослабляются, либо исчезают.

В тектонических разломах такие силы отсутствуют изначально. Сами разломы после воздействия также ослабляются, что приводит к интегральному снижению крепости скального массива в целом или отдельного СТБ.

Естественно, что с увеличением интенсивности техногенного воздействия, должен наблюдаться рост показателя степени затухания массовой скорости волны сжатия для конкретного ранга СТБ.

Предлагаемый подход позволяет адекватно интерпретировать перенос данных, полученных в лабораторных экспериментах, на натурные условия карье-

ров блочного камня и глубоких рудников. В частности, удельный расход ВВ в реальных условиях карьеров и рудников будет относительно выше, чем в лабораторных экспериментах.

Выводы

1. Обоснован блочный подход к установлению зависимости показателя степени затухания массовой скорости волны сжатия от ранга СТБ. Предложено минимальные значения показателя степени затухания массовой скорости волны сжатия назвать «протогеологическими».

2. В первом приближении установлена зависимость показателя степени затухания от ранга СТБ. Показатель степени затухания массовой скорости волны сжатия возрастает с увеличением ранга СТБ. Для прочих идентичных условий по рагу СТБ показатель степени затухания массовой скорости волны сжатия тем выше, чем более интенсивному техногенному воздействию был ранее подвержен данный СТБ.

3. Предлагаемый подход позволяет адекватно интерпретировать перенос данных, полученных в лабораторных экспериментах, на натурные условия карьеров блочного камня и глубоких рудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутузов Б. Н. Справочник взрывника. — М.: Недра, 1988.
2. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности. — М.: Изд-во «Горная книга», МГГУ, 2008. — С. 57—92.
3. Кутузов Б. Н. Взрывные работы. Учебник. — М.: Недра, 1988. — 383 с.
4. Адушкин В. В., Сливак А. А. Подземные взрывы. Институт динамики геосфер РАН. — М.: Наука, 2007. — 579 с.
5. Шемякин Е. И. Сейсмический эффект мощного подземного взрыва // Взрывное дело. — 2004. — № 94/51. — С. 10—21.
6. Куликов В. И., Эткин М. Б. Сейсмическое действие Камбаратинского взрыва // Взрывное дело. — 2013. — № 110/67. — С. 147—164.
7. Teller E. et al. The constructive uses of nuclear explosives. N.Y.: McGraw—Hill, 1968, 320 p.
8. Murphy J. R. Seismic source function and magnitude determination for underground nuclear detonations // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1981. Vol. 71. no 1, pp. 223—248.
9. Higgins G. H., Butkovich T. R. Effect of water content, yield, medium and depth of burst on cavitru radii. 1967. 26 p.
10. Садовский М. А. Естественная кусковатость горных пород // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829—831.

11. Садовский М. А., Кочарян Г. Г., Родионов В. Н. О механике блочного горного массива // Доклады АН СССР. — 1988. — Т. 301. — № 2. — С. 306–307.
12. Кочарян Г. Г., Спивак А. А. Деформирование блочных массивов скальных пород. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.
13. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Бригадин И. В., Краснов С. А. К вопросу о механизме разрушения прочных скальных пород подземным взрывом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 7. — С. 345–349.
14. Бенедик А. Л. Геофизика горных массивов. — М.: Наука, 1995.
15. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Математические модели деформирования грунтов. — Киев: Наукова думка, 1990. — С. 32–75.
16. Артемов В. А. Исследование и разработка параметров буровзрывных работ при уступной отбойки известняков на выработанное пространство, заполненное водой. Автореферат канд. дисс. — Л., 1987. — 25 с.
17. Артемов В. А., Виноградов Ю. И., Виноградова Е. Ю. и др. Влияние соотношения глубины заложения заряда и массы ВВ на параметры сейсмозврывных волн в ближней зоне взрыва // Взрывное дело. — 2009. — № 101/58. — С. 303–307.
18. Артемов В. А., Виноградов Ю. И., Густов С. В. Исследование сейсмобезопасных условий производства буровзрывных работ вблизи действующего газопровода // Взрывное дело. — 2010. — № 103/60. — С. 256–267.
19. Федосеев А. А. Кандидатская диссертация. — СПбГУ, 2014.
20. Щербич С. В. Оценка сейсмического воздействия в условиях проведения опытного взрыва при подготовке перекрытия р. Вахш методом направленного взрыва // Взрывное дело. — 2007. — № 98/55. — С. 143–149.
21. Werth G., Randolph Ph. The Salmon seismic experiment // J. Geophys. Res. 1966. Vol. 71, no 14, pp. 3405–3413. **ТАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Бригадин Иван Владимирович*¹ — кандидат технических наук, научный консультант, старший научный сотрудник, e-mail: IvanBrigadin2008@yandex.ru,

*Возгрин Роман Александрович*¹ — кандидат технических наук, ведущий специалист,

*Кудрявцев Артем Андреевич*¹ — специалист,

Николашин Сергей Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, СПб Университет ГПС МЧС России, e-mail: nicolashins_65@mail.ru.

¹ ООО «Промстройвзрыв».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 77–83.

I.V. Brigadin, R.A. Vozgrin, A.A. Kudryavtsev, S.Yu. Nikolashin

THE LAW OF CHANGE IN THE MASS VELOCITY ATTENUATION COEFFICIENT UNDER BLASTING IN HARD ROCK MASS

It has been validated that block structure of hard rock mass should be taken into account when selecting attenuation coefficient of mass velocity of compression wave. Using such approach to rock mass structure and based on the analysis of data on experimental underground blasts, the law of change in the attenuation coefficient of maximum mass velocity of compression wave depending on the structural rank of a tectonic rock block has been set in the first approximation. Physically, this law means that rock blocks of lower rank are weakened more slightly than in the higher rank tectonic blocks, owing to minor contribution of petrogenetic fractures or fault. It is suggested to introduce a new notion of “protogeological attenuation coefficient” as the minimum possible value for hard rocks never subjected to geophysical of anthropogenic impact. In case that the whole rock mass or

a tectonic block inside the rock mass has been subjected to any impact, weakening disproportionately grows. The proposed approach allows relevant data transmission from lab-scale experiments to full-scale conditions of surface and deep underground mines.

Key words: attenuation coefficient, block-structured rock mass, compression wave, underground blast, mass velocity, hard rock, powder factor.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-77-83

AUTHORS

*Brigadin I.V.*¹, Candidate of Technical Sciences, Scientific Adviser,

Senior Researcher, e-mail: IvanBrigadin2008@yandex.ru,

*Vozgrin R.A.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

*Kudryavzev A.A.*¹, Researcher

Nikolashin S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emergency of Russia,

196105, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: nicolashins_65@mail.ru,

¹ Promstroyvzryv Ltd., 190031, Saint Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Kutuzov B. N. *Spravochnik vzryvnika* (Shot-firer's manual), Moscow, Nedra, 1988.
2. Kutuzov B. N. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot*. Ch. 2. *Vzryvnye raboty v gornom dele i promyshlennosti* (Methods of blasting. Part 2. Blasting in mining and in industry), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», MGGU, 2008, pp. 57–92.
3. Kutuzov B. N. *Vzryvnye raboty*. Uchebnik (Blasting. Textbook), Moscow, Nedra, 1988, 383 p.
4. Adushkin V. V., Spivak A. A. *Podzemnye vzryvy. Institut dinamiki geosfer RAN* (Underground blasts. Institute of Dynamics of Geospheres, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences), Moscow, Nauka, 2007, 579 p.
5. Shemyakin E. I. *Vzryvnoe delo*. 2004, no 94/51, pp. 10–21.
6. Kulikov V. I., Etkin M. B. *Vzryvnoe delo*. 2013, no 110/67, pp. 147–164.
7. Teller E. et al. *The constructive uses of nuclear explosives*. N.Y., McGraw–Hill, 1968, 320 p.
8. Murphy J. R. Seismic source function and magnitude determination for underground nuclear detonations. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1981. Vol. 71. no 1, pp. 223–248.
9. Higgins G. H., Butkovich T. R. *Effect of water content, yield, medium and depth of burst on cavitruradii*. 1967. 26 p.
10. Sadovaliy M. A. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1979, vol. 247, no 4, pp. 829–831.
11. Sadovaliy M. A., Kocharyan G. G., Rodionov V. N. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1988, vol. 301, no 2, pp. 306–307.
12. Kocharyan G. G., Spivak A. A. *Deformirovanie blochnykh massivov skal'nykh porod* (Deformation of block-structured hard rock mass), Moscow, IKTs «Akademkniga», 2003.
13. Adushkin V. V., Kocharyan G. G., Brigadin I. V., Krasnov S. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 7, pp. 345–349.
14. Benedik A. L. *Geofizika gornykh massivov* (Geophysics of rock mass), Moscow, Nauka, 1995.
15. Zamyshlyayev B. V., Evterev L. S. *Matematicheskie modeli deformirovaniya gruntov* (Mathematical models of soil deformation), Kiev, Naukova dumka, 1990, pp. 32–75.
16. Artemov V. A. *Issledovanie i razrabotka parametrov burovzryvnykh rabot pri ustupnoy otboyki izvestnyakov na vyrabotannoe prostranstvo, zapolnennoe vodoy* (Исследование и разработка параметров буровзрывных работ при уступной отбойки известняков на выработанное пространство, заполненное водой), Candidate's thesis, Leningrad, 1987, 25 p.
17. Artemov V. A., Vinogradov Yu. I., Vinogradova E. Yu. *Vzryvnoe delo*. 2009, no 101/58, pp. 303–307.
18. Artemov V. A., Vinogradov Yu. I., Gustov S. V. *Vzryvnoe delo*. 2010, no 103/60, pp. 256–267.
19. Fedoseev A. A. Candidate's thesis, SPbGGU, 2014.
20. Shcherbich S. V. *Vzryvnoe delo*. 2007, no 98/55, pp. 143–149.
21. Werth G., Randolph Ph. The Salmon seismic experiment. *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71, no 14, pp. 3405–3413.