

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.53.77.002

УДК 622. 011. 4; 622. 023

© Р.З. Камалян, С.Р. Камалян, Н.С. Нестерова, 2023

Р.З. КАМАЛЯН

д-р техн. наук, проф.,
профессор кафедры
Российский университет кооперации,
г. Краснодар
e-mail: kasarub@gmail.com

С.Р. КАМАЛЯН

канд. техн. наук
зав. отделом Южного
межрегионального
управление охраны ПАО «Газпром»,
г. Краснодар
e-mail: kasarub@gmail.com

Н. С. НЕСТЕРОВА

канд. техн. наук
доцент кафедры
ИМСИТ, г. Краснодар
nnnnnn46@mail.ru

О ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И НЕКОТОРЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Для повышения эффективности разрушения и экскавации энергией взрыва горных пород необходимы детальные исследования физических процессов, протекающих в среде.

В работе рассмотрены результаты многих достаточно известных исследований. Однако, несмотря на значимость этих работ, до сих пор, к примеру, невозможно определить границу энергии взрыва, для которого гранулометрический состав взрывной массы является правильным.

Большие проблемы связаны также с определением массы заряда. Описаны недостатки существующих формул, отмечены пути улучшения.

Ключевые слова: ГОРНАЯ ПОРОДА, РАЗРУШЕНИЕ, ВЗРЫВ, ДЕФОРМАЦИИ, НАПРЯЖЕНИЕ, ДРОБЛЕНИЕ, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ.

В горном деле задачей взрыва является получение заданной кусковатости, выпуска горной массы при подземных взрывах, перемещение взорванной массы на определенной расстоянии [1–3].

Решение проблемы облегчается, если есть сведения о процессах, имеющих место при

разрушении горных пород. Обычно задача решается эмпирически с проведением лабораторных, опытно и опытно-промышленных взрывов [4, 5].

Наиболее важным направлением экспериментальных исследований является фактическое измерение деформаций или же их при-

ращений в горных породах в зависимости от напряжений. Важным моментом в этих исследованиях является так называемое дилатансионное предразрушение [6]. Это означает, что в горных породах начало трещинообразования происходит при напряжении меньшем, иногда значительно [7], от максимально выдерживаемого конкретной породой. В породах, которые в естественных условиях претерпели значительные деформации или структурные изменения, образование трещин начинается с очень малых напряжений и продолжается почти непрерывно [8].

Помимо дилатансионных эффектов, связанных с развитием системы трещин предразрушения, в пористых горных породах происходит изменение порового пространства [9]. Таким образом, процесс разрушения включает в себя как предразрушение, выход на поверхность разрушения, так и неконтролируемый в условиях эксперимента процесс постразрушения, приводящий, собственно, к разрушению.

В хрупких горных породах зарождение и развитие трещин, их смещение и ветвление могут приводить к различной картине окончательного разрушения. Исследованиями было установлено, что под действием ударных волн переход материала от исходного состояния к хрупкому разрушению происходит в узком слое, который движется по веществу в виде фронта разрушения [10].

Представления о движущемся фронте разрушения, на котором достигается критическое напряжение и за которым среда разбита множеством радиальных трещин, были развиты в [11]. Идея, что фронт волны разрушения является ударной волной, также высказана многими, однако общая формулировка, объединяющая все эти предложения, представлена в [12–14]. Причем в этих работах учтена возможность сдвигового разрушения с использованием за фронтом последнего условия пластичности Треска.

В этом случае, если критическими для процесса являются величины напряжений или некоторая их предельная комбинация, то скорость фронта разрушения должна опреде-

ляться фазовой скоростью реализации этих параметров в поле взрывного движения. Если же критическим является условие Гриффитса, то скорость фронта разрушения может быть равной скорости Рэлея. Однако разрушение по Гриффитсу не может оказывать определяющее влияние на главные проявления взрыва, в частности на размеры зон необратимых деформаций. Такая ситуация, по-видимому, объясняется тем, что в общем энергетическом балансе взрыва доля энергии, расходуемой на собственно разрушение, оказывается ничтожной и, как показывают оценки [12, 15], составляет для горных пород около 0,5–2 % от полной энергии взрыва. Однако это не исключает того, что степень дробления массива (по крайней мере на фронте разрушения) будет регулироваться гриффитовским механизмом разрушения, и тогда по этому параметру возможны отклонения от закона геометрического подобия. Например, в [16] размер блока дробления связан с амплитудой напряжения в волне сжатия и поверхностной энергией разрушения. Показано, что размер образующегося при разрушении куска будет обратно пропорционален квадрату амплитуды напряжения, если длина волны сжатия достаточно велика. В [17] показано, что средний размер куска в объеме взрывной массы не будет зависеть от масштаба взрыва.

В [18] полагается, что основное дробление происходит внутри области, охваченной волной сжатия. Там, где достигаются наибольшие деформации, получено, что средний размер куска в объеме разрушения будет возрастать пропорционально энергии взрыва в степени одна треть, т. е. энергетическое подобие. Такой же вывод сделан в [19]. Если при взрыве могут быть реализованы оба механизма дробления, то суммарный гранулометрический состав взорванной массы с увеличением энергии взрыва сначала будет изменяться (средний размер куска будет возрастать), а затем должен оставаться неизменным. Основная трудность при составлении проекта производства буровзрывных работ связана с определением массы взрывчатого вещества (ВВ). Существует ряд формул [20] которые исполь-

зуются для расчета необходимой массы заряда.

Действие заряда, в зависимости от того, насколько он удалён от обнажённой поверхности среды, может проявиться как в самой среде, так и на обнажённой поверхности среды, или только в самой среде без изменения ее поверхности. Первое действие принято называть наружным. Внутреннее действие взрыва заряда в неограниченной среде принято характеризовать величиной радиуса R разрушения, который зависит от: величины заряда ($ВВ$), плотности заряжания, свойств $ВВ$ (его работоспособности), сопротивлению среды раздавливанию, скалыванию и дроблению, обусловленной силой сцепления частиц среды между собой.

Радиус разрушения, получаемый при взрывах зарядов одной и той же величины, из одного и того же $ВВ$, при одинаковой плотности заряжания, но помещённых в различных по сопротивляемости средах, будет различным по величине. Заряды, различающиеся по величине, свойствами $ВВ$ и плотностью заря-

жания, взрывающиеся в одинаковой среде, будут так же отличаться различной величиной радиусов разрушения.

Существующие расчётные формулы можно представить в виде:

$$Q=kf(n). \quad (1)$$

В (1) Q — масса заряда, k — некая экспериментально определяемая величина, интегрально учитывающая свойства среды, $f(n)$ — функция показателя взрыва, n — показатель действия взрыва.

В основном формулы (1) отличаются видом функции показателя взрыва. На рис. 1 приведены графики зависимости радиуса разрушения R от показателя действия взрыва. Как видно из рисунка, радиус действия взрыва R одного и того же по величине заряда $ВВ$ есть величина переменная, зависящая от показателя n . С уменьшением величины показателя действия взрыва значение радиуса разрушения возрастает и наоборот (рис. 1).

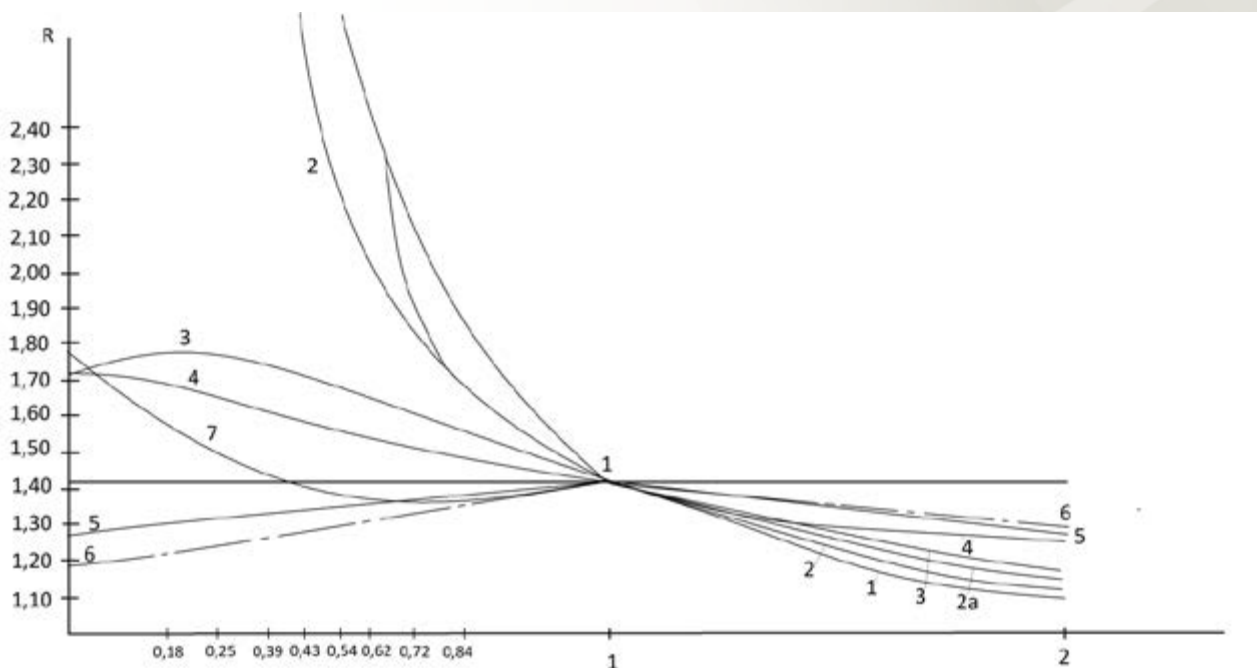


Рис. 1 Зависимость радиуса действия заряда R от величины показателя действия взрыва n :
 1. $f(n)=n^3$; 2. $f(n)=(0,09+0,91n)^3$; 3. $f(n)=0,2+0,8n^3$; 4. $f(n)=(\sqrt{(n^2+1)}-0,41)^3$; 5. $f(n)=0,4+0,6n^3$; 6. $f(n)=0,5+0,5n^3$;
 7. $f(n)=(0,57+0,43n)^3$

Анализ опытов позволил установить, что разрушение среды при взрыве заряда внутреннего действия происходит во всех направлениях от его поверхности концентри-

ческими сферами. Увеличение массы заряда сопровождается соответствующим увеличением радиуса сферы разрушения среды. При значительном увеличении массы заряда ра-

диус сферы разрушения в направлении к обнаженной поверхности возрастает, а вглубь массива уменьшается.

Сферы измельчения и уменьшения заряда внутреннего действия в десятки раз меньше сферы разрушения заряда равной массы наружного действия. Столь большое различие происходит потому, что среда при зарядах внутреннего действия разрушается от сжимающих усилий, а при зарядах наружного действия разрушающими являются растягивающие и скалывающие усилия, которые во много раз меньше сопротивления сжатию. При увеличении массы заряда радиус разрушения среды в сторону свободной поверх-

ности больше радиуса в направлении вглубь массива, потому что отрезок времени, в течении которого действует давление газов ВВ, в этом случае больше. Радиус разрушения среды зарядом предельного внутреннего действия в скальной породе не достигает свободной поверхности.

В табл. 1 приведены числовые значения для некоторых $f(n)$ при различных $n = R/W$. Как видно из таблицы, совпадение имеет место при $n = 1$, в остальных случаях заметный разброс значений, местами существенный. Особенно четко просматривается это разброс в зависимости $f(n)$ от линии наименьшего сопротивления (ЛНС) W (рис. 2).

Числовые значения для некоторых $f(n)$ при различных $n = R/W$

Таблица 1

Номера формул	$f(n)$	Значение n						
		0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3,0
I	$(\sqrt{n^2+1}-0,41)^3$	0,355	0,59	1,0	2,70	6,09	11,89	20,85
II	$0,2+0,8n^3$	0,30	0,54	1,0	2,90	6,60	12,71	21,80
III	$\left(\frac{n^2+\sqrt{1+n^2}}{1+\sqrt{1+n^2}}\right)^3$	0,269	0,59	1,0	2,70	6,09	11,89	20,85
IV	n^3	0,125	0,42	1,0	3,38	8,00	15,63	27,0
V	$0,4+0,6n^3$	0,480	0,65	1,0	2,43	5,20	9,78	16,60
VI	$0,5+0,5n^3$	0,560	0,71	1,0	2,19	4,50	8,31	14,00
VII	$(0,57+0,43n)^3$	0,49	0,73	1,0	3,08	6,97	13,23	22,43
VIII	$(0,09+0,91n)^3$	0,485	0,73	1,0	3,09	6,98	13,93	22,44

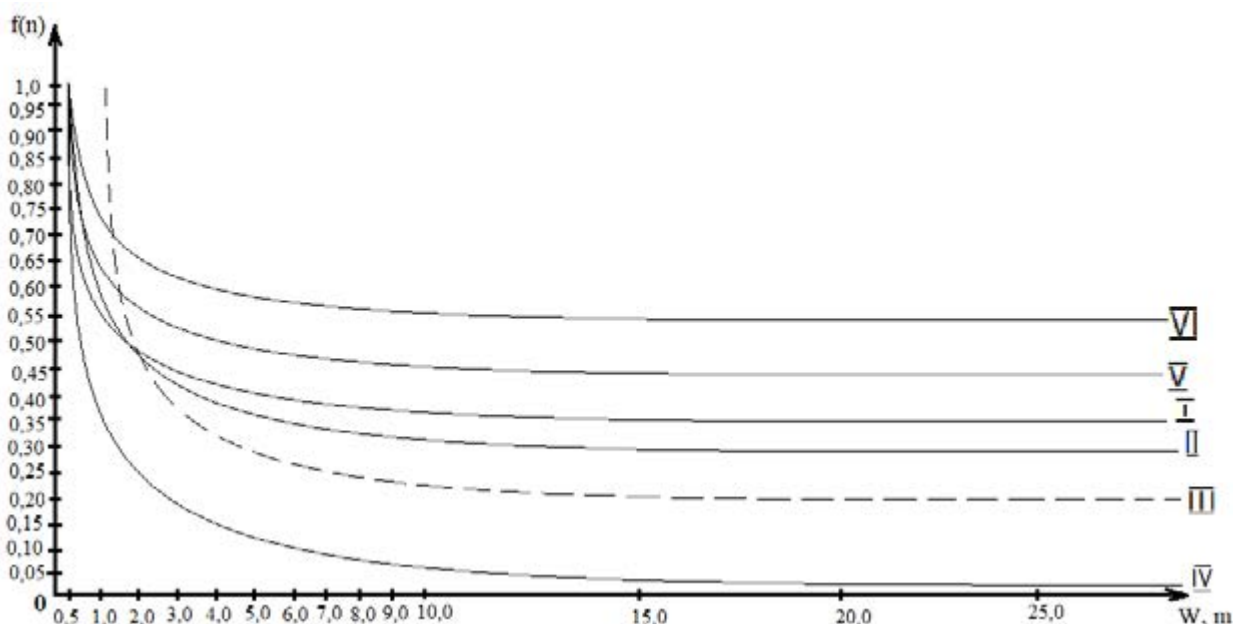


Рис. 2. Зависимость функции показателя действия взрыва $f(n)$ от ЛНС W

Заметим, что во всех приведённых формулах не принят во внимание характер разрушения горной породы после взрыва, т. е. кусковатость. Учтена лишь глубина заложения заряда W или показатель действия взрыва. Попытка учета сделана в формуле, где функция показателя действия взрыва представлена в виде [20]

$$f(n) = 1,43 \cdot W^{0,44}. \quad (2)$$

Зависимость функции (2) от ЛНС W при размере среднего куска 70,75 и 79,6 мм [21], которая в отличие от других имеет возрастающий вид, приведена на рис. 3.

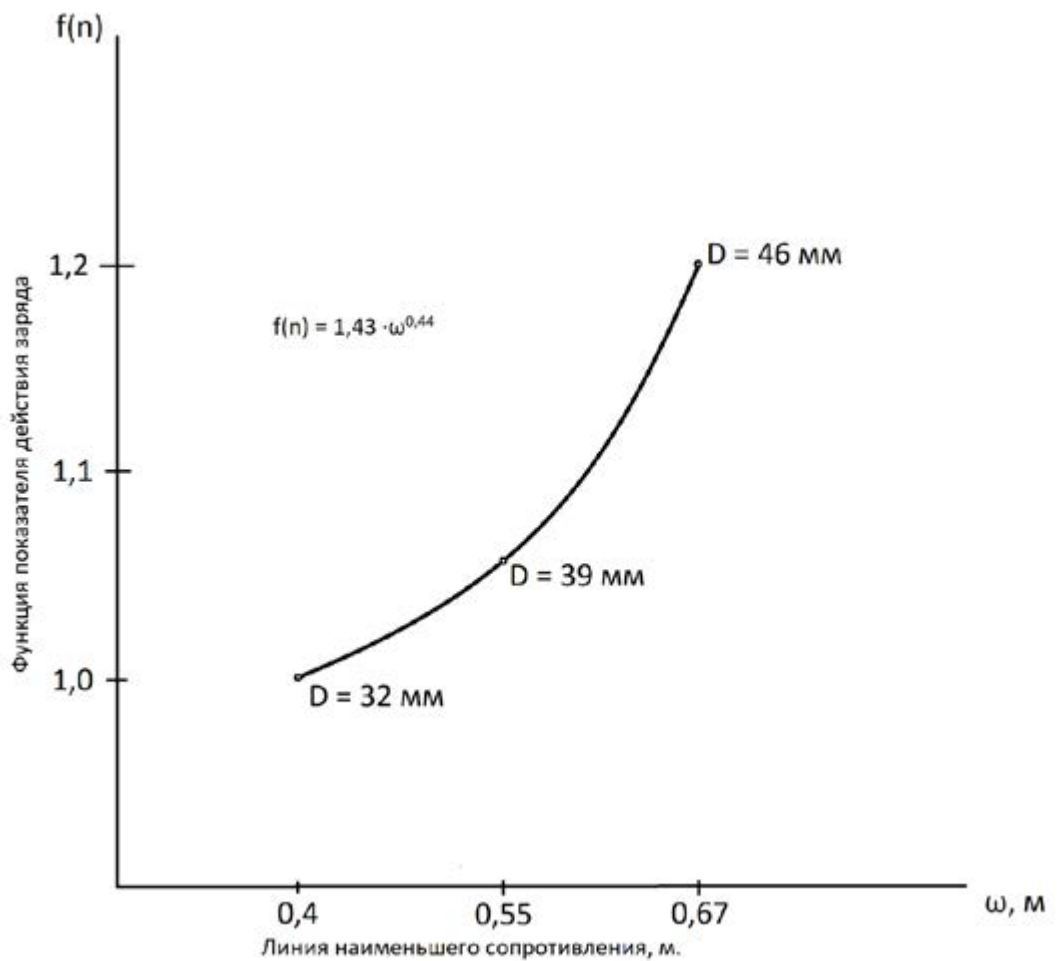


Рис. 3. Зависимость функции $f(n)$ от W при размере среднего куска $d_{cp} = 70, 75$ и $79,6$ мм

Подчеркнем, что кроме рассмотренных, существует много исследований, посвящённых действию взрыва в твёрдой среде. Однако какова граница энергии взрыва, для которого гранулометрический состав взорванной массы является предельным, не зависящим от масштаба взрыва, в настоящее время указать трудно.

Анализ методов получения расчетных формул [20] показывает, что вся динамика процесса из рассмотрения выпадает. Исследования кинематических параметров взры-

ва в сочетании с начальными и конечными данными может помочь в создании быстрых и достаточно надёжных методов расчёта. Получение новых сведений о взрыве позволит глубже узнать само явление и, возможно, поновому подойти к построению практических методов расчёта.

Более перспективны расчётные методы с использованием вычислительной техники, позволяющие в пределах определённого числа параметров отыскивать оптимальные варианты. Успешность этого метода высока

при использовании математических моделей, описывающих физико-механические процессы при взрыве заряда ВВ в различных грунтах и горных породах.

Конечным результатом такого описания должны быть расчётные модели, достаточно ясные для практической деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миндели Э.О. Разрушение горных пород. М.: Недра, 1975. 600 с.
2. Носков В.Ф., Комащенко В.И., Жабин Н.И. Буровзрывные работы на открытых и подземных разработках. М.: Недра, 1982. 320 с.
3. Мосинц В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.
4. Миндели Э.О., Кусов Н.Ф., Корнеев А.А., Марцинкевич А.А. Комплексное исследование действия взрыва в горных породах. М.: Недра, 1978. 253 с.
5. Лабораторные и практические работы по разрушению горных пород взрывом. М.: Недра, 1981. 255 с.
6. Crouch S.L. Experimental determination of volumetric strain in failed rock // International Journal Rock Mechanics and Mining Science. 1970. Vol. 7. No. 6. P. 589–603.
7. Кунтыш М.Ф. Особенности процесса деформирования и разрушения горных пород / Исследования прочности и деформируемости горных пород. М.: Недра, 1973. С. 16–30.
8. Тимашевская И.С. Изменение типа разрушения образцов горных пород в зависимости от напряженного состояния, времени и температуры / Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. Тбилиси, 1974. С. 281–283.
9. Райс Дж.Р. Об устойчивости дилатансионного упрочнения насыщенных скальных массивов / Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С. 195–209.
10. Цветков В.М., Сизов И.А., Сырников Н.М. О механизме дробления твердой среды взрывом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1977. № 6. С. 48–56.
11. Корявов В.П. Некоторые представления о зоне и фронте трещин // Доклады Академии наук СССР. 1962. Т. 114. № 6. С. 1266–1268.
12. Григорян С.С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // Прикладная математика и механика. 1967. Т. 31. Вып. 4. С. 643–669.
13. Багдасарян А.Б. Расчет действия взрыва в хрупкой горной породе. Случай разрушения с образованием трещин отрыва // Прикладная механика и техническая физика. 1970. № 3. С. 89–97.
14. Багдасарян А.Б. Расчет действия взрыва в хрупкой горной породе (разрушение, раздавливание, образование трещин скола и отрыва) // Прикладная механика и техническая физика. 1970. № 5. С. 104–120.
15. Долгов К.А. О затратах энергии на дробление горной породы / Механизм разрушения горных пород взрывом. Киев: Наукова думка, 1971. С. 58–61.
16. Баренблатт Г.И. О некоторых оценках для удельной поверхности трещин, образующихся при динамическом воздействии на твердое тело // Прикладная механика и техническая физика. 1964. № 4. С. 75–77.
17. Родионов В.Н. О подобии процесса дробления при взрывах разного масштаба / Механика разрушения горных пород взрывом. Киев: Наукова думка, 1971. С. 3–8.
18. Власов О.Е., Смирнов С.В. Основы расчета дробления горных пород действием взрыва. М.: АН СССР, 1962. 104 с.
19. Григорян С.С. Две задачи механики разрушения / Нерешенные задачи механики и прикладной математики. М.: МГУ, 1977. С. 63–67.

20. Камалян Р.З., Анализ расчетных формул по определению массы сосредоточенных и линейно-распределенных зарядов / Технический отчет лаборатории моделирования взрывов треста Средазспецстрой. Ташкент, 1976. 58 с.

21. Камалян Р.З., Камалян С.Р., Нестерова Н.С. Об оценке гранулометрического состава при динамическом разрушении горных пород // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 3. С. 17–25.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.53.77.002

UDC 622.011. 4; 622.023

© R.Z. Kamalyan, S.R. Kamalyan, N.S. Nesterova, 2023

R.Z. KAMALYAN

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor of Department
Russian University of Cooperation, Krasnodar
e-mail: kasarub@gmail.com

S.R. KAMALYAN

Candidate of Engineering Sciences,
Head of the Department of the Southern Interregional Security Department
PJSC «Gazprom», Krasnodar
e-mail: kasarub@gmail.com

N.S. NESTEROVA

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor
IMIT, Krasnodar
e-mail: nnnnnnn46@mail.ru

ON PHYSICAL PROCESSES AND SOME EXPERIMENTAL RESULTS OF ROCK DESTRUCTION

To increase the efficiency of destruction and excavation with the energy of rock explosion, detailed studies of physical processes occurring in the environment are required.

The work considers the results of many well-known studies. However, despite the significance of these works, until now, for example, it is impossible to determine the boundary of the explosion energy for which the particle size distribution of the explosive mass is correct.

Large problems are also associated with determining the mass of the charge. Disadvantages of existing formulas are described; improvement paths are noted.

Keywords: ROCK, DESTRUCTION, EXPLOSION, DEFORMATIONS, STRESS, CRUSHING, GRANULOMETRIC COMPOSITION.

REFERENCE

1. Mindeli E.O. Destruction of rocks. M.: Nedra, 1975. 600 p. [In Russ.].
2. Noskov V.F., Komashchenko V.I., Zhabin N.I. Drilling and blasting operations at open and underground mines. M.: Nedra, 1982. 320 p. [In Russ.].
3. Mosints V.N., Abramov A.V. Destruction of fractured and disturbed rocks. M.: Nedra, 1982. 248 p. [In Russ.].

4. Mindeli E.O., Kusov N.F., Korneev A.A., Martsinkevich A.A. Complex investigation of explosion action in rocks. M.: Nedra, 1978. 253 p. [In Russ.].
5. Laboratory and practical work on the destruction of rocks by explosion. M.: Nedra, 1981. 255 p. [In Russ.].
6. Crouch S.L. Experimental determination of volumetric strain in failed rock // International Journal Rock Mechanics and Mining Science. 1970. Vol. 7. No. 6. P. 589–603.
7. Kuntyshev M.F. Features of the process of deformation and destruction of rocks / Studies of strength and deformability of rocks. M.: Nedra, 1973. P. 16–30. [In Russ.].
8. Timashevskaya I.S. Changing the type of destruction of rock samples depending on the stress state, time and temperature / Physical properties of rocks and minerals at high pressures and temperatures. Tbilisi, 1974. P. 281–283. [In Russ.].
9. Rice J.R. On the stability of dilatation hardening of saturated rock massifs / Defining laws of soil mechanics. M.: Mir, 1975. P. 195–209. [In Russ.].
10. Tsvetkov V.M., Sizov I.A., Syrnikov N.M. On the mechanism of crushing a solid medium by explosion // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh]. 1977. No. 6. P. 48–56. [In Russ.].
11. Koryavov V.P. Some ideas about the zone and the front of cracks // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1962. Vol. 114. No. 6. P. 1266–1268. [In Russ.].
12. Grigoryan S.S. Some questions of the mathematical theory of deformation and destruction of solid rocks // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 1967. Vol. 31. Issue 4. P. 643–669. [In Russ.].
13. Bagdasaryan A.B. Calculation of the effect of an explosion in a brittle rock. The case of destruction with the formation of separation cracks // Applied mechanics and technical physics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 1970. No. 3. P. 89–97. [In Russ.].
14. Bagdasaryan A.B. Calculation of the effect of an explosion in a brittle rock (destruction, crushing, formation of cracks of chipping and separation) // Applied Mechanics and technical physics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 1970. No. 5. P. 104–120. [In Russ.].
15. Dolgov K.A. About energy costs for crushing rock / The mechanism of destruction of rocks by explosion. Kiev: Naukova Dumka, 1971. P. 58–61. [In Russ.].
16. Barenblatt G.I. On some estimates for the specific surface of cracks formed by dynamic action on a solid // Applied Mechanics and technical Physics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 1964. No. 4. P. 75–77. [In Russ.].
17. Rodionov V.N. On the similarity of the crushing process in explosions of different scales / Mechanics of rock destruction by explosion. Kiev: Naukova dumka, 1971. P. 3–8. [In Russ.].
18. Vlasov O.E., Smirnov S.V. Fundamentals of calculating the crushing of rocks by the action of an explosion. M.: USSR Academy of Sciences, 1962. 104 p. [In Russ.].
19. Grigoryan S.S. Two problems of fracture mechanics / Unsolved problems of mechanics and applied mathematics. M.: MSU, 1977. P. 63–67. [In Russ.].
20. Kamalyan R.Z., Analysis of calculation formulas for determining the mass of concentrated and linearly distributed charges / Technical Report of the Explosion Modeling Laboratory of the Sredazspetsstroy Trust. Tashkent, 1976. 58 p. [In Russ.].
21. Kamalyan R.Z., Kamalyan S.R., Nesterova N.S. On the assessment of the granulometric composition in the dynamic destruction of rocks // Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2022. No. 3. P. 17–25. [In Russ.].