

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.15.77.002

УДК 622.235. 5: 622.32

© Р. З. Камалян, С. Р. Камалян, Н. С. Нестерова, 2024

### Р. З. КАМАЛЯН

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

### С. Р. КАМАЛЯН

канд. физ.-мат. 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  
e-mail: nnnnnnn46@mail.ru

## К МЕХАНИЗМУ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ГАЗАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

*Дан анализ развития трещин в горных породах газами высокой энергии (ГВЭ), образующихся при детонации заряда взрывчатого вещества.*

*Поставлена задача математического моделирования процесса захвата газов высокой энергии горной породой. Определено время сорбционного захвата ГВЭ породой.*

*Показано, что процесс сорбционного захвата газов высокой энергии является положительным фактором, облегчающим трещинообразование в породе за счет ее абсорбционного разупрочнения*

Ключевые слова: ТРЕЩИНА, ПРОЧНОСТЬ, АБСОРБЦИЯ, РАЗУПРОЧНЕНИЕ, ПОРОДА.

Вопрос об образовании и развитии трещин в прочной среде при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) представляется весьма важным по следующим соображениям. Во-первых, завершение процесса трещинообразования в прочной среде означает, по существу, окончание разрушения массива, который затем разбрасывается силой давления взрывных газов.

Зная о продолжительности процесса развития трещин под действием взрыва, можно

более обоснованно судить о механизме разрушения пород при различных схемах взрывания.

Во-вторых, существуют различные мнения по вопросу образования трещин под действием взрыва и о характере развития их во времени.

Однако, и в том и другом случае предполагается, что развитие трещин основано на силовом характере воздействия ГВЭ (продуктов детонации). Иными словами, с точки зрения

механики разрушения процесс трещинообразования взрывом от момента возникновения начального давления в зарядной камере и до момента сдвижения пород рассматривается главным образом как результат развития естественных макро- и микротрещин с последующим окончательным нарушением сплошности массива за счет расклинивающего (силового) эффекта расширяющихся продуктов взрывчатого превращения.

Однако благодаря быстротечности и высокой температуре процессов взрывчатого превращения имеет место и процесс интенсивного теплообмена между продуктами взрыва и горной породой. В известных исследованиях [1, 2] его относят к необратимым потерям энергии взрывчатого превращения, существенно снижающим полезное действие ГВЭ по разрушению горных пород. Но, если тепловые потери действительно являются необратимыми, снижающими КПД газов высокой энергии, то данное утверждение относительно массообмена (сорбционного захвата ГВЭ горными породами) не является очевидным в случае трещинообразования. В самом деле, известно, что под воздействием абсорбционно-активной среды [3, 4], каковой являются ГВЭ, происходит снижение прочности твердого тела, в том числе и горных пород. В связи с этим можно полагать, что для процесса трещинообразования газами высокой энергии снижение прочности породы является положительным фактором. Однако для такого предположения необходимо уточнение одного, очень существенного фактора, а именно: времени захвата и взаимодействия с минеральным веществом горных пород газов высокой энергии и его сопоставление со временем расклинивающего эффекта. Действительно, снижение прочности твердого тела под воздействием абсорбционно-активной среды, представляющей собой процесс перехода вещества из одного состояния в другое, которое, как известно, осуществляется не мгновенно, а за время, зависящее от величин энергии активации тела, уровня нагружения и температуры. Имеющиеся исследования посвящены, в основном, вопросу

количественного определения сорбционного захвата газов горными породами [5, 6]. Относительно времени захвата (абсорбции ГВЭ на свободных поверхностях микро- и макротрещин) и, тем более, времени взаимодействия ГВЭ с минеральным веществом, приводящим к разупрочнению среды, данные не приводятся, хотя в работе [6] со ссылкой на [7] отмечается, что процесс захвата протекает практически мгновенно.

Очевидно, что решением данной задачи (определение временных факторов) может существенно изменить наши представления о механизме трещинообразования в горной породе, что, в свою очередь, позволит изменить представления о механизме разрушения твердых сред. Ниже сделана попытка оценить время сорбционного захвата газов высокой энергии горными породами.

Будем считать, что отношение числа молекул газа, захваченных за единицу времени, к общему числу молекул является постоянной величиной, зависящей только от вида молекул и породы. Назовем это отношение вероятностью захвата молекул газа горной породой.

Пусть к некоторому моменту времени  $t$  количество захваченных молекул равно  $N(t)$ . В момент времени  $t+dt$  это число составит  $N(t+dt)$ . Таким образом, число молекул газа, захваченных за промежуток  $dt$ , составит:

$$N(t) - N(t+dt) = -dN$$

Разделив долю  $(-\frac{dN}{N})$  захваченных молекул на время  $dt$ , получим вероятность захвата:

$$w = -\frac{dN}{Ndt} \quad \text{или} \quad \frac{dN}{dt} = -wN. \quad (1)$$

Из (1) следует, что вероятность захвата  $w$  имеет размерность  $1/c$ .

Начальные условия:  $N = N_0$  при  $t = t_0$ . Решив уравнение (1), получим:

$$N(t) = N_0 \exp(-wt). \quad (2)$$

Определим конкретный вид вероятности захвата  $w$ . Количество ударов в единицу времени на единицу поверхности в соответствии с молекулярной физикой [8] равно  $n\bar{u}/n$  где  $\bar{u}$  — средняя скорость,  $n = \frac{N}{V}$  — плотность

молекул. Так как все сорбционные процессы характеризуются больцмановским множителем  $\exp(-E/kT)$  [8], то скорость убывания общего числа молекул в начальной стадии процесса представится в виде:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N\bar{w}}{4V} S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $S$  – поверхность контакта газов с породой,  $V$  – объем,  $T$  – температура взрыва,  $E$  – энергетический сорбционный барьер,  $k$  – постоянная Больцмана.

Сопоставив (3) и (1), получим для вероятности  $w$  следующее выражение:

$$w = \frac{S\bar{w}}{4V} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right).$$

Найдем теперь среднее время захвата породой молекул газа данного взрывчатого вещества.

Выше было показано, что за время от  $t$  до  $t+dt$  оказываются захваченными примерно  $-dN = wNdt$  молекул. Однако среди взятых в начальный момент времени  $t=0$  молекул газа взрывчатого вещества имеются группы молекул с разными временами захвата. Чтобы найти среднее время захвата, надо умножить время захвата каждой группы на число молекул в этой группе, сложить эти величины для всех групп и поделить на общее число молекул во всех группах. В результате всех этих операций получим:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} twNdt}{\int_0^{\infty} wNdt}. \quad (4)$$

Подставим в (4) выражение (2) для  $N$ :

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} twN_0 \exp(-wt) dt}{\int_0^{\infty} wN_0 \exp(-wt) dt}. \quad (5)$$

Числитель дроби в правой части (5) интегрируется по частям [9]. Опуская промежуточные выкладки, запишем:

$$wN_0 \int_0^{\infty} t \exp(-wt) dt = \frac{N_0}{w}$$

Из знаменателя имеем:

$$wN_0 \int_0^{\infty} \exp(-wt) dt = N_0$$

Окончательно для среднего времени захвата получим:

$$\tau = \frac{N_0}{wN_0} = \frac{1}{w}.$$

То есть среднее время захвата молекул газа породой в точности равно величине, обратной вероятности захвата, что позволяет решение основного уравнения представить в виде:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Оценим время захвата молекул газа породой. Пусть взрывчатое вещество имеет форму цилиндра. Тогда

$$\frac{V}{S} = \frac{\pi R^2 l}{\pi R^2} = l,$$

где  $R$  и  $l$  соответственно радиус и длина заряда.

Величина  $\bar{w}$  имеет порядок скорости звука в продуктах детонации, а последняя равна скорости детонации [2]. Соотношение  $E/k$  имеет порядок  $1000k$ , а  $T$  достигает  $3000-5000k$  [2].

При значениях параметров больцмановского множителя:

$$\exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \sim 1.$$

Таким образом, можно считать, что время захвата молекул газа породой приблизительно равно времени детонации заряда, то есть  $\tau = \frac{l}{D}$ . В частности, для заряда длиной  $l=0,5$  м и скоростью детонации  $D=7000-8000$  м/с время захвата составит  $(7-6) \cdot 10^{-5}$  с, что значительно меньше времени трещинообразования при силовом воздействии продуктов детонации на горную породу [10].

Отсюда можно сделать вывод, что процесс трещинообразования происходит не только за счет силового воздействия ГВЭ на горную породу, но одновременно имеет место и адсорбционное разупрочнение пород, облегчающее развитие трещин.

И в заключение отметим, что изучение закономерностей трещинообразования, установление скоростей распространения трещин и продолжительности процесса разрушения в зоне действия заряда в зависимости от свойств и структурных особенностей горных пород, а также взаимного расположения зарядов ВВ и других факторов, является необходимой предпосылкой для установления рациональных условий взрывания и более полного использования энергии взрыва.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов В. Н. К вопросу о повышении эффективности взрыва в твердой среде. М., 1962. 30 с.
2. Физика взрыва. М., 1975. 704 с.
3. Перцов Н. В. Механизмы действия поверхностно-активных веществ при разрушении материалов // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. 1986. Вып. 18. С. 5–11.
4. Кусов Н. Ф., Эдельштейн О. А., Шоболова Л. П. Применение абсорбционно-активных сред для понижения сопротивляемости горных пород разрушению // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. 1986. Вып. 18. С. 11–17.
5. Дудырев А. Н., Шутова М. И. Исследование абсорбции ядовитых газов на кварцевой пыли // Взрывное дело. 1970. № 68/25. С. 47–53.
6. Дудырев А. Н., Оборин В. В., Ильина И. М., Решетова В. А. К вопросу десорбции ядовитых газов рудничной пылью // Взрывное дело. 1970. № 68/25. С. 53–64.
7. Busek Behno. Über das Lohundäre Aufteren giftiger Gase in Grubenwettern unter Besonderer. «Berücksichtigung ron sptions Norgangen. «Bergahademic», 1966. 18. № 7.
8. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М., 1981. 398 с.
9. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. М., 1978. Т. 1. 456 с.
10. Мосинец В. Н., Абрамов А. В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М., 1982. 248 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.15.77.002

UDC 622.235. 5: 622.32

© R. Z. Kamalyan, S. R. Kamalyan, N. S. Nesterova, 2024

### 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 Physical and Mathematical 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: nnnnnn46@mail.ru

## TO MECHANISM OF FORMATION OF CRACKS IN ROCKS BY HIGH ENERGY GASES

*An analysis of the development of cracks in rocks by high-energy gases (HVE) formed during detonation of an explosive charge is given.*

*The task of mathematical modeling of the process of capturing high-energy gases by rock is set. The time of GWE sorption capture by the rock was determined.*

*It has been shown that the process of sorption capture of high energy gases is a positive factor facilitating crack formation in the rock due to its absorption softening*

Keywords: CRACK, STRENGTH, ABSORPTION, SOFTENING, ROCK.

#### REFERENCES

1. Rodionov V N. On the issue of increasing the efficiency of an explosion in a solid medium. M., 1962. 30 p. [In Russ.].
2. Physics of explosion. M., 1975. 704 p. [In Russ.].
3. Pertsov N. V. Mechanisms of action of surfactants in the destruction of materials // Physico-chemical mechanics and lyophilicity of dispersed systems [Fiziko-khimicheskaya mekhanika i liofilnost dispersnykh sistem]. 1986. Issue 18. P. 5–11. [In Russ.].
4. Kusov N. F., Edelstein O. A., Shobolova L. P. The use of adsorption-active media to reduce the resistance of rocks to destruction // Physico-chemical mechanics and lyophilicity of dispersed systems [Fiziko-khimicheskaya mekhanika i liofilnost dispersnykh sistem]. 1986. Issue 18. P. 11–17. [In Russ.].
5. Dudyrev A. N., Shutova M. I. Investigation of the absorption of toxic gases on quartz dust // Explosion technology [Vzryvnoye delo]. 1970. No. 68/25. P. 47–53. [In Russ.].
6. Dudyrev A. N., Oborin V. V., Ilyina I. M., Reshetova V. A. On the issue of desorption of toxic gases by mine dust // Explosion technology [Vzryvnoye delo]. 1970. No. 68/25. P. 53–64. [In Russ.].
7. Busek Behno. Über das Lohundäre Aufteren giftiger Gase in Grubenwettern unter Besonderer. «Berücksichtigung ron soptions Norgangen. «Bergahademic», 1966. Vol. 18. No. 7.
8. Matveev A. N. Molecular physics. M., 1981. 398 p. [In Russ.].
9. Piskunov N. S. Differential and integral calculus. M., 1978. Vol. 1. 456 p.
10. Mosinets V. N., Abramov A. V. Destruction of fractured and disturbed rocks. M., 1982. 248 p.