

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. А. Садовский, В. Н. Костюченко, О затухании сейсмических волн взрыва в массиве горных пород, *Докл. АН СССР*, 1988, том 301, номер 6, 1344–1347

<https://www.mathnet.ru/dan48365>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.80

22 мая 2025 г., 02:43:08



Резкое различие между пределами прочности на сжатие и растяжение горных пород объясняется различным характером разрушения этих твердых тел при растяжении и сжатии [11].

Таким образом, удельная энергия атомизации связана с упругими свойствами и механической прочностью породообразующих минералов и горных пород.

Институт сейсмологии
Академии наук КиргССР, Фрунзе

Поступило
22 V 1987

ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. М.: Недра, 1985. 288 с.
2. Урусов В.С. Энергетическая кристаллохимия М.: Наука, 1975. 355 с.
3. Журков С.Н. — ФТТ, 1983, т. 25, № 10, с. 3119–3129.
4. Орлов А.Н. В кн.: Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1984, с. 594–595.
5. Мамыров Э. — Геохимия, 1986, № 12, с. 1726–1735.
6. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела, М.: Мир, 1979, т. 2. 422 с.
7. Кусов А.А. — ФТТ, 1979, т. 21, № 10, с. 3095–3099.
8. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1984. 455 с.
9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых, М.: Недра, 1984. 455 с.
10. Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н. — ДАН, 1972, т. 207, № 3, с. 580–582.
11. Якунов Л.Н., Хаврошия О.Б., Цыпиков В.В. — ДАН, 1978, т. 238, № 2, с. 303–305.

УДК 550.341

ГЕОФИЗИКА

Академик М.А. САДОВСКИЙ, В.Н. КОСТЮЧЕНКО

О ЗАТУХАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ВЗРЫВА В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

В сейсмологии для описания изменения амплитуды сейсмических колебаний с расстоянием R широко используется степенная зависимость вида

$$(1) \quad A = B/R^n.$$

При подземных взрывах такая зависимость часто применяется при обработке экспериментальных результатов, причем для оценки сейсмической опасности и ряда других задач обычно используется максимальная скорость колебания грунта v_m [1, 2]. Показатель степени n и коэффициент B зависят от вида взрыва и свойств горных пород. Естественно, что при таком описании так или иначе усредняется влияние границ блоков, т.е. отдельных трещин или разломов разного масштаба.

Однако при более детальном анализе экспериментального материала это влияние удастся выделить. В качестве примера приведем результаты измерения горизонтальной скорости движения горной породы, полученные при подземном взрыве в граните. На рис. 1 представлены записи приборов, установленных в горизонтальной штольне на различных расстояниях от взрыва. Для удобства сопоставления эти записи приведены к единому масштабу времени (отсчет с момента прихода продольной волны), амплитуды умножены на соответствующее расстояние. С помощью такой процедуры в первом приближении учтено сферическое расхождение продольной волны взрыва. Отметим, что влияние второго члена в известном выражении для сферической волны, как показывают оценки, в основной части записи невелико.

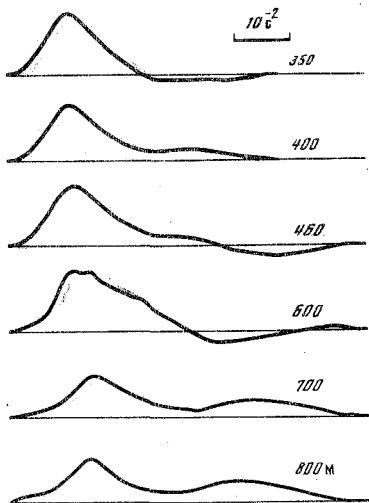


Рис. 1

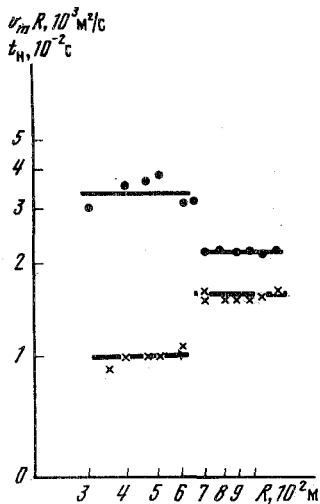


Рис. 2

Из рис. 1 видно, что на расстояниях 350, 400 и 460 м эпюра волны мало меняется с расстоянием, однако на расстояниях 700 и 800 м заметно изменение в амплитуде, увеличение времени нарастания скорости до максимума (t_N) и увеличение продолжительности положительной фазы. Указанные изменения хорошо видны на рис. 2, где точками показаны значения $v_m R$, а крестиками — t_N .

Отметим, что в районе 600–700 м по данным геологического обследования через массив проходил круто падающий разлом. Для оценки влияния разлома на проходящую продольную волну взрыва воспользуемся следующей простой схемой. Будем считать, что разлом или трещина представляет собой достаточно протяженное плоское образование, толщина которого l_T мала по сравнению с длиной волны и заполнена менее жестким материалом по сравнению с основным массивом. Предполагая, что волна падает нормально к поверхности разлома, используем квазистатическое приближение при описании деформации заполнителя [3]. В этом случае нормальное напряжение по обеим сторонам разлома будет одинаково и равно относительному изменению толщины разлома, умноженному на жесткость вещества в разломе, т.е. $\rho_T c_T^2$; ρ_T — плотность, c_T — скорость волн, положительными считаются сжимающие напряжения.

Приравнявая суммарное напряжение в падающей ($\sigma_0 = \rho c v_0$) и отраженной ($\sigma_2 = -\rho c v_2$) волнах напряжению в прошедшей волне ($\sigma_1 = \delta c v_1$) и учитывая, что изменение толщины разлома равно разности смещения его границ, получим уравнение для скорости в прошедшей волне v_1 :

$$(2) \quad \theta \frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 = v_0.$$

Здесь v_0 — скорость в падающей волне,

$$\theta = \frac{l_T \gamma}{2c}, \quad \gamma = \frac{\rho c^2}{\rho_T c_T^2},$$

c — скорость распространения продольной волны в основном массиве, ρ — его плотность. Отраженная волна определяется из уравнения

$$(3) \quad v_2 = v_0 - v_1.$$

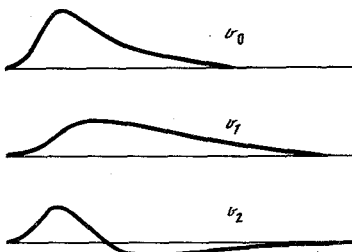


Рис. 3

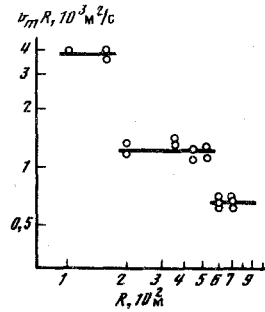


Рис. 4

Решение уравнения (2) записывается в виде

$$(4) \quad v_1 = e^{-x} \int_0^x v_0(x) e^x dx, \quad x = t/\theta.$$

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты вычисления v_1 и v_2 для исходной зависимости v_0 , принятой близкой к зарегистрированной приборами при описанном выше взрыве (рис. 1). Для удобства сопоставления выбран одинаковый масштаб. Характерное время $\theta = 10^{-2}$ с, при этом, как и в опыте, амплитуда прошедшей волны в 1,5 раза меньше падающей, а время нарастания t_H увеличилось примерно до $1,5 \cdot 10^{-2}$ с. Отметим, что отраженная волна v_2 имеет более острую и короткую положительную фазу и довольно продолжительную отрицательную фазу. При наложении отраженной волны суммарная скорость может быть больше, чем в падающей, а напряжения и деформации меньше.

На рис. 4 приведены результаты измерения максимальной скорости в продольной волне при другом взрыве в граните. В этом опыте хорошо прослеживаются три отдельных горизонтальных участка, на которых величина $v_m R$ практически не меняется (т.е. $v_m \sim 1/R$). По размаху скачков можно оценить характерное время θ для двух разломов, такая оценка дала близкие к указанному ранее значения ($\theta \approx 10^{-2}$ с).

Зная θ и ориентировочно l_T (~ 1 м), оценим γ , т.е. относительную жесткость разлома или трещины: $\gamma = 2c\theta/l_T = 10^2$ ($c = 5$ км/с). Поскольку $\rho c^2 = 10^5$ МПа, $\rho_T c_T^2 = 10^3$ МПа, что при $\rho_T = 2 \cdot 10^3$ дает $c_T = 700$ м/с. Таким образом, по своим механическим свойствам материал, заполняющий разлом, близок к плотному песку или гравиям. Можно, по-видимому, считать, что заполнители такой жесткости характерны для небольших разломов или крупных трещин, расположенных на сравнительно небольших глубинах (десятки и сотни метров). Следует ожидать, что жесткость заполнителя более мощных и глубоких разломов будет больше.

Для оценки можно воспользоваться результатами, полученными при взрывах на р. Бурлыкья [4], где установлено, что при прохождении продольной волны взрыва через мощный Талассо-Ферганский разлом амплитуда уменьшилась в 3–4 раза. Период колебаний в группе продольной волны составлял 0,2–0,3 с, скорость распространения $c = 5$ км/с. Для оценки параметров этого разлома воспользуемся формулами, полученными в [3], согласно которым изменение амплитуды гармонических колебаний с периодом T при прохождении через разлом равно $\sqrt{1+q^2}$, где $q = \pi l_T \gamma / Tc$. Полагая, что мощность разлома составляет $l_T = 10^2$ м, при $q = 3$ и $T = 0,2$ с получим $\gamma = 10$, т.е. $\rho_T c_T^2 = 10^4$ МПа и $c_T = 2 \cdot 10^3$ м/с. Оценка характерного времени для этого разлома дает $\theta = 0,1$ с.

Установленный диапазон значений γ ($10 \leq \gamma \leq 10^2$) можно считать типичным для массивов горных пород, поскольку при меньших значениях γ сильно снижается

контрастность разлома или трещины, а большие значения γ соответствуют нереально мягким естественным геоматериалам. Отметим в связи с этим, что зияющие, т.е. не заполненные, трещины здесь не рассматриваются, так же как и запаянные или залеченные.

Продольная волна по мере удаления от центра взрыва встречает на своем пути трещины различного размера. Естественно, что могут быть участки, на которых трещины расположены довольно часто. В этих случаях будут наблюдаться заметное затухание волны по амплитуде и увеличение с расстоянием как времени нарастания, так и продолжительной фазы. При этом показатель степени n в формуле (1) может быть заметно большим единицы. Могут так же встречаться участки (см., например, рис. 4), где затухание волны происходит только из-за сферического расхождения ($n = 1$).

Здесь следует отметить одно существенное обстоятельство, которое необходимо учитывать при сравнении взрывов разного масштаба. На практике диапазон расстояний, на котором определяется зависимость типа (1), изменяется обычно в соответствии с геометрическим подобием. При этом для взрывов небольших зарядов с малым периодом излучаемых волн T существенное значение имеют сравнительно небольшие трещины с малым значением θ ($q \sim \theta/T$), а крупные трещины в этих случаях обычно стараются исключить при постановке наблюдений. При больших взрывах мелкие трещины не играют заметной роли, однако при соответствующем увеличении масштаба необходимо учитывать наличие более крупных трещин.

Таким образом, с изменением масштаба взрыва соответственно меняется характерный размер трещин, определяющих закон затухания волны. В результате для ближней зоны взрыва (скорости колебаний $v_m > 10$ см/с) показатель n в формуле (1) изменяется в среднем в небольших пределах ($n = 1,5-2$), а при изменении мощности взрыва в довольно широких пределах в первом, хотя и грубом приближении сохраняется геометрическое подобие для основных параметров волн [2]. На больших расстояниях, как правило, такое подобие не сохраняется. Особенно это заметно при анализе периодов волн, которые очень слабо зависят от мощности взрыва. Для этих расстояний определяющую роль в затухании сейсмических волн взрыва играет характерный для данного массива горных пород набор трещин и разломов. При этом существенное значение будет иметь иерархия в размерах блоков и разделяющих их трещин [5]. Этой иерархии должен соответствовать набор характерных времен θ .

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
25 IV 1988

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946, с. 29.
2. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.; Л.: Недра, 1971, с. 221.
3. Костюченко В.Н. — ДАН, 1985, т. 285, № 2, с. 315–318.
4. Султанов Д.Д., Люкэ Е.И., Кузнецов О.П. Взрывное дело, 1980, № 82/39, с.38–50.
5. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987, с. 100.