

Влияние параметров рэлеевской модели затухания упругих волн на характеристики сейсмограмм и акустическую добротность массива горных пород

М. Н. Красилов*

Горный институт (МГИ) НИТУ МИСИС. Россия, 119991 Москва, Ленинский проспект, д. 6
(Статья поступила 05.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Проведено компьютерное моделирование распространения упругих волн от взрыва при подземной обработке массива гипсосодержащих пород для различных значений параметра β_{dK} рэлеевской модели, характеризующего затухание, пропорциональное частоте. Получен график зависимости акустической добротности от β_{dK} , который показывает, что при увеличении β_{dK} акустическая добротность массива горных пород снижается. Из-за того, что изменению β_{dK} на 2 порядка соответствует изменение добротности на 30%, указанная зависимость может быть использована только для качественной оценки изменения акустической добротности массива горных пород во времени. Количественная оценка может быть произведена только после введения необходимых корректировок.

PACS: 43.35.+d, 91.60.Lj

УДК: 534.286.2: 534.283.2: 620.111.3: 620.178.3

Ключевые слова: акустическая добротность, затухание, взрыв, целик, сейсмограмма.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в последние десятилетия, проблема создания неразрушающего метода оценки прочности горных пород остается актуальной и до сегодняшнего дня. Как показано в ряде публикаций по результатам экспериментов, проводимых на образцах горных пород, одним из путей решения этой проблемы является использование зависимостей между акустической добротностью и прочностью [1–4]. Если на образцах пород добротность оценивается с помощью стоячих упругих волн, образующихся между параллельными сторонами образцов, то в массиве горных пород возбуждение стоячих волн проблематично, и поэтому необходима разработка методов оценки акустической добротности в натуральных условиях. Одним из таких методов является оценка добротности по коде сейсмодолны, зарегистрированной на достаточно большом удалении от источника. В данной статье рассматривается возможность оценки добротности горных пород в массиве на примере ленточных целиков камерно-столбовой системы разработки с взрывной отбойкой гипсового камня в шахте ООО «Кнауф Гипс Новомосковск».

1. ОПИСАНИЕ РЭЛЕЕВСКОЙ МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В рэлеевской модели затухания коэффициент потерь зависит от двух слагаемых, первое из которых убывает обратно пропорционально с ростом частоты, а второе возрастает прямо пропорционально с ее увеличением согласно (1)

$$\eta = \frac{\alpha_{dM}}{2\pi f} + \beta_{dK} 2\pi f, \quad (1)$$

где α_{dM} имеет размерность Гц, а β_{dK} — с.

Рядом исследований установлено, что для горных пород величина коэффициента затухания в достаточно широком диапазоне пропорциональна частоте, поэтому при использовании рэлеевской модели затухания коэффициент α_{dM} , как правило, принимается равным нулю, и рассматривается только коэффициент β_{dK} [5].

Для пород Новомосковского месторождения гипса при исследованиях на образцах получены значения β_{dK} в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-6} с. При компьютерном моделировании сейсмодолн от взрывов β_{dK} задавалось в диапазоне от 10^{-7} до 5×10^{-6} с, так как из-за наличия трещин и других неоднородностей в массиве горных пород затухание упругих волн может быть значительно больше, чем в монолитных образцах.

2. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Моделирование методом конечных элементов производилось в системе Comsol Multiphysics. Расчетная модель распространения волн от взрыва в массиве горных пород была составлена применительно к шахте Новомосковского месторождения гипса и состояла из массива горных пород и четырех выработок с протяженностями от 300 до 450 м. Размеры модели были выбраны из условия, чтобы время прихода упругих волн, отраженных от стенок, ограничивающих модель, было бы больше длительности моделируемого сигнала. В самой протяженной выработке находится шпур, на стенки которого задавалось давление газов при взрыве. Формула, которая описывает давление газов на стенки шпура при взрыве, была взята из одного из примеров, приведенных в технической документации на систему Comsol Multiphysics.

*E-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru

Форма взрывного импульса представляется затухающей синусоидой и описывается выражением

$$P_b = P_0 \cdot \exp\left(-\gamma \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{1 + \frac{t_0}{t}}\right),$$

где P_0 — амплитуда давления газов в скважине при взрыве, Па;

$$P_0 = 140 \cdot 10^6 \cdot Q^{\frac{2}{3}}, \text{ Па,}$$

Q — масса заряда ВВ, кг; t_0 — параметр, определяющий длительность нагружения

$$t_0 = 0,81 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{\frac{1}{3}} \text{ с,}$$

γ — параметр затухания колебательного процесса, $\gamma = 1,86$.

Регистрация сейсмических сигналов взрыва производилась на стенке целика. На рис. 1 приведен пример модельной сейсмограммы при заданном коэффициенте $\beta_{дК}$, равном 1×10^{-5} с.

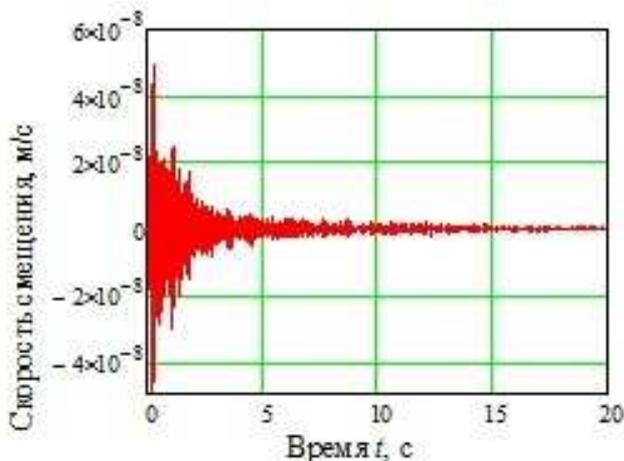


Рис. 1: Пример модельной сейсмограммы

Обработка сигнала для определения добротности массива горных пород производилась по методике анализа коды сейсмосигнала, изложенной в [6]. Выделение коды сигнала заключалось в обрезке сейсмограммы в момент времени большем, чем удвоенное время пробега S -волны от источника до места регистрации. В данном случае это время составляет 5 с (рис. 2).

Далее коду сигнала подвергали фильтрации с центральной частотой $f = 15$ Гц, которая соответствует частоте максимума спектра коды сигнала.

Для определения акустической добротности массива горных пород на сейсмограмме были определены значения максимумов амплитуд коды сигнала, а также значения времени, соответствующие этим максимумам.

На рис. 3 показан пример расчета добротности массива горных пород.

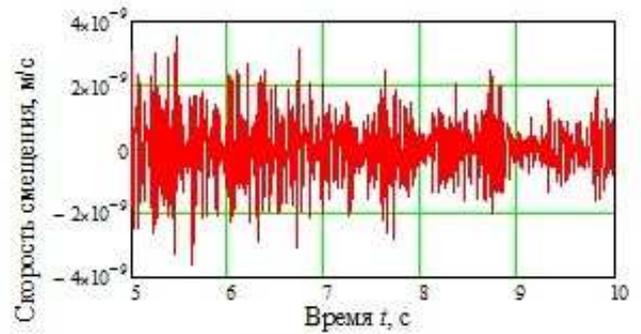


Рис. 2: Коды сигнала

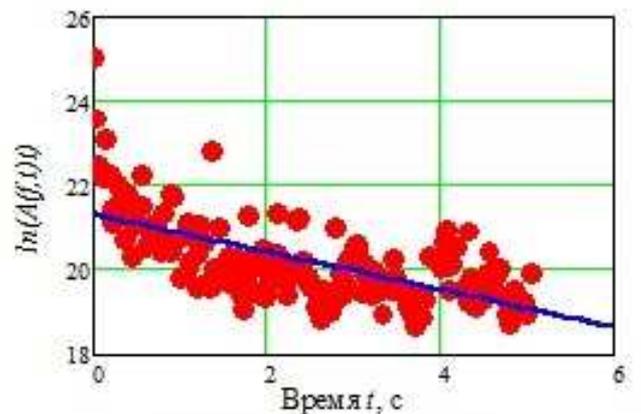


Рис. 3: Пример расчета добротности

Точками показаны измеренные значения амплитуд колебаний, а линией — лучшее линейное приближение зависимости $\ln(A(f, t) \cdot t) = 21,3 - 0,44 \cdot t$. Наклон графика, построенного во временной шкале, определяет значение Q для рассматриваемой частоты f . Акустическая добротность рассчитывалась по формуле (2), она являлась целью данной работы

$$Q = -\frac{\pi \cdot f}{b}, \quad (2)$$

где f — центральная частота спектра при фильтрации; b — коэффициент линейной зависимости $\ln(A(f, t) \cdot t)$, отвечающий за наклон графика.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет компьютерной модели массива горных пород с различными значениями коэффициента $\beta_{дК}$ позволил построить график зависимости акустической добротности Q от $\beta_{дК}$ (рис. 4). Из него следует, что при увеличении $\beta_{дК}$ акустическая добротность массива горных пород снижается. Также следует заметить, что существенному изменению значения $\beta_{дК}$ на 2 порядка

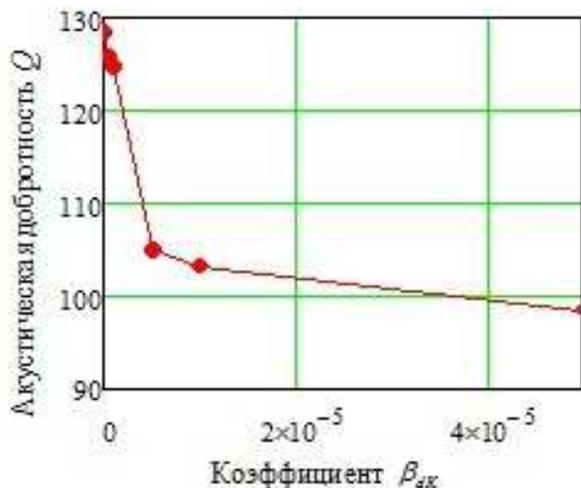


Рис. 4: График зависимости акустической добротности от β_{aK}

соответствует изменению акустической добротности на 30%. Это говорит о том, что данная зависимость мо-

жет быть использована только для качественной оценки акустической добротности во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средствами компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов была получена зависимость между акустической добротностью Q и коэффициентом β_{aK} рэлеевской модели, характеризующего линейное увеличение затухания с ростом частоты. В полученной зависимости проявляется закономерность снижения акустической добротности при увеличении коэффициента β_{aK} . При этом изменению коэффициента β_{aK} на 2 порядка соответствует изменение добротности лишь на величину около 30%. Отсюда следует вывод, что указанная зависимость может быть использована только для качественной оценки акустической добротности массива горных пород. Количественная оценка может быть произведена только после введения необходимых корректировок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00570 а).

- [1] Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N., Osipov Yu. V. *Int. J. Fatigue*. 2017. **97**. P. 70.
- [2] Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. *Int. J. Fatigue*. 2016. **84**. P. 53.
- [3] Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N. *J. Min. Sci.* 2015. **51**, N 1. P. 23.

- [4] Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. *Int. J. Fatigue*. 2015. **77**. P. 186.
- [5] Вознесенский А. С. Компьютерные методы в научных исследованиях. М.: МГГУ, 2014.
- [6] Добрынина А. А., Чечельницкий В. В., Саньков В. А. *Геология и геофизика*. 2011. **52**, № 5. С. 712.

Influence of the Rayleigh model parameters of elastic waves attenuation on characteristics of seismographic records and acoustic quality factor of the rock massif

M. N. Krasilov

¹Mining Institute of the National University of Science & Technology «MISiS». Moscow, 119991, Russia
E-mail: nv4@mail.ru

Computer simulation of elastic waves propagation from explosion source in case of underground mining in a gypsum rock massif for different parameter β_{aK} of Rayleigh model characterizing attenuation, proportional to frequency is carried out. The diagram of dependence of acoustic quality factor versus β_{aK} shows that in case of increase in attenuation acoustic quality factor of a rock massif decreases. β_{aK} change on 2 orders corresponds to change the quality factor of Gypsum rock for 30%. Thus the specified dependence can be used only for qualitative estimate of acoustic quality factor changes of rock massif in time. The quantitative assessment can be made only after necessary adjustments.

PACS: 43.35.+d, 91.60.Lj.

Keywords: acoustic quality factor, attenuation, explosion, pillar, seismogram.

Received 05 July 2017.

Сведения об авторе

Красилов Максим Николаевич — аспирант; тел.: (499) 230-25-93; e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru.