

## МОДЕЛЬ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ ОЦЕНКИ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА РАЗВИТИЕМ ПРОЦЕССОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

© Савельев В.Н., Махмудов Х. Ф

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия,  
Санкт-Петербург

E-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Проведено измерение поля скоростей распространения упругих волн в массиве гетерогенных пород. Измерение скорости упругих волн в бетонном слое толщиной  $h = 1500$  mm производились на базе 980 mm. Регистрация моментов времени прихода волны производилась по первому вступлению сигналов. Осуществлено измерение спектрального состава отклика массива гетерогенных пород и бетонной обделки подземных сооружений на возбуждение его ударом шара, спектр сигнала отклика концентрируется в диапазоне 0,7 - 3,2 kHz. Разработан съемный датчик акустического импульса в комплекте с предварительным усилителем с необходимой амплитудно-частотной характеристикой для установки в скважине диаметром 76 mm на закладной детали.

### Введение

В процессе натуральных экспериментов исследованы акустические свойства бетонной обделки и массива гетерогенных пород подземных сооружений ФГУП «ГХК» («Горно-Химический Комбинат» «Росатом» Россия, г. Железнодорожск, Красноярский край), в районе скважины № 5. Испытан разработанный нами датчик регистрации импульсов АЭ для установки в скважинах диаметром 76 mm. По результатам этих экспериментов от организации ФГУП «ГХК» «Росатом» получен акт (№ 212-25-60-01/2379 от 15.05.2018г.) о внедрении (использовании) результатов работы Х. Ф. Махмудова. Выявлены акустические характеристики горных выработок в наиболее типичных узлах, а также рассмотрена модель и математический аппарат для оценки и слежения за развитием процессов проявления горного давления в подземных сооружениях [1]. Установлена возможность обнаружения момента начала формирования очага разрушения в подземных сооружениях [2].

### Выбор частотного диапазона регистрации АЭ и прозвучивание гетерогенного породного массива объекта контроля

Проведено предварительное измерение поля скоростей распространения упругой волны в породе в районе установки датчика в выбранной скважине (Рис 1). Скорость распространения упругой волны составило величину 5318 m/s, что удовлетворительно согласуется с расчетной скоростью (5505 m/s).

Для измерения энергии источника акустического импульса (АИ) в абсолютной шкале единиц (J) по регистрируемым АИ в лабораторных условиях был проведен анализ энергетического баланса "источник АИ" - "передающая среда" - "приемник АИ" с применением аппарата спектрального анализа. В эксперименте измерялась доля механической энергии, затраченной на возбуждение упругой волны, и независимо измерялось напряжение в упругой волне, по которому рассчитывалась энергия волны. Источником излучения волны служило упругое соударение стального шара (источник АИ) с поверхностью стеклянного куба (передающая среда). Напряжения в упругой волне измерялись методом фотоупругости (приемник акустического импульса), работоспособность такого способа определения энергии источника упругих волн защищена патентом 5056107 РФ [3].

Сопоставление двух независимых методов [3] определения энергии упругого взаимодействия дало расхождение результатов менее чем на 20 %. То есть для модельного случая практически вся энергия упругого соударения перешла в энергию упругих колебаний куба, который, в свою очередь, обладает практически идеальной передаточной функцией. Был определен также спектральный состав энергии взаимодействия. Эти результаты позволяют определять как параметры источника сигнала, так и структуру передающей с трансформацией сигнала среду. Для адаптации этой методики на подземных сооружениях ФГУП «ГХК» был разработан, изготовлен и

калиброван для измерения напряжений упругой волны пьезопленочный приемник акустического импульса (ППАИ) с линейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне до 20 kHz [19]. Также разработан и изготовлен съемный датчик акустической эмиссии в комплекте с предварительным усилителем для установки в скважине диаметром 76 mm на закладной детали [1]. (Рис 1., №1, Рис 5., №2). ППАИ был установлен в подземных сооружениях ФГУП "ГХК" в районе скважины №5 (Рис. 1 № 1).

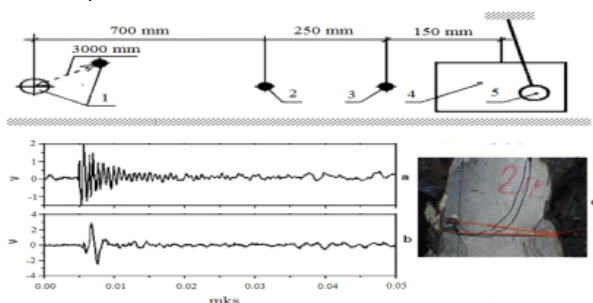


Рисунок 1 (а,b,c)

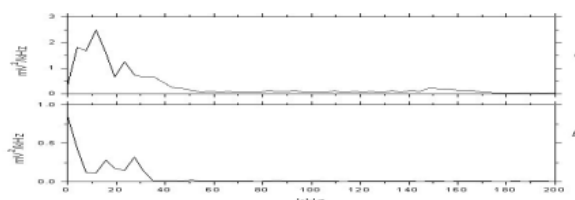


Рисунок 2 (а,b)

Рисунок 1 (а,b,c) - Измерение акустических свойств бетонной обделки и горного массива в районе скважины СГС-5. 1- скважина, в которой размещен шахтный датчик на глубине 3m , 2- пьезопленочный датчик, 3- запускающий датчик, 4- места удара (стальная пластина или закладная), 5- массивный стальной шар а- примеры сигналов, зарегистрированных пьезопленочным датчиком, б- шахтным датчиком, с- фото крепежа контрольного датчика.

Рисунок 2 (а,b) - Спектр сигнала, зарегистрированного в месте действия динамического излучателя с наименьшей энергией, (а); спектр сигнала, зарегистрированного в месте приема на расстоянии 870 mm (от места удара до шахтного датчика Рис 1. (1), (4)) от излучения (б)

Им было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение его ударом шара массой  $M = 4,684 \text{ kg}$  (Рис. 1 №5 ), а также проведена оценка энергии в упругой волне, формируемой от удара шаром. Сопоставление оценки величины упругой энергии (около 0,3 J) с потерей механической энергии при ударе шаром (около 6 J) носит, весьма приближенный характер. Это связано, во-первых, с тем, что при возбуждении упругой волны путем удара шаром по поверхности выработки соударение не чисто упругое (Рис. 2 ), которое сопровождается разрушением породы в месте контакта, на что и идет значительная доля потерянной при соударении механической энергии шара, во-вторых, с тем, что не известна передаточная функция среды, которая может быть определена после исключения первой причины расхождения результатов. Поэтому более корректная оценка энергии производилась путем возбуждения акустического импульса ударом шара, по закладной стальной детали (или стальной пластине) Рис 1, №4. Определенная таким способом спектральная плотность возбуждения массива горных пород от удара шаром концентрируется в диапазоне 0,7 - 3,2 kHz (Рис.2., а, б).

### Акустические свойства бетонной обделки в подземных сооружениях.

Проанализирована возможность метода акустической эмиссии для регистрации трещинообразования и разрушения гетерогенных пород. Измерение скорости упругих волн в бетонном слое толщиной  $h = 1500 \text{ mm}$  производились на базе 980 mm. Регистрация моментов времени прихода волны производилась по первому вступлению сигналов (Рис. 3., а., б).

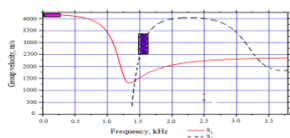


Рисунок 3(а,б)

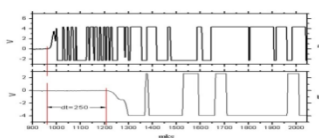


Рисунок 4 (а)

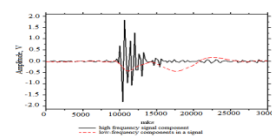


Рисунок 4 (б)

Рисунок 3 (а,б) - Измерение скоростей упругих волн в бетонном слое.  
а- запускаящий датчик, б- датчик на расстоянии 980 mm.

Рисунок 4 (а,б) - Дисперсионные кривые для симметричной Лэмбовской моды  $S_1$  (прерывистая линия) и для симметричной нулевой моды  $S_0$  (сплошная линия), рассчитанные для бетонной обделки толщиной 1500 mm (а), представление этих двух мод на амплитудно-временной плоскости (б)

Согласно данным измерениям скорость в слое бетона равна 3920 m/s. Была произведена также оценка скорости волн в бетоне с помощью расчета модуля упругости  $E_{eff}$  для плоской волны: где  $E$  – модуль Юнга (для бетона он равен 36.1 kPa),  $\nu$  – коэффициент Пуассона (0.22). В результате получили скорость плоской продольной  $c_L$  волны в виде:

$$c_L = \sqrt{E_{eff} / \rho} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность бетона (2200 kg/m<sup>3</sup>). Тогда получаем скорость плоской продольной волны в бетоне  $c_L = 4343$  m/s. Скорость вдоль слоя оказывается меньше скорости плоских волн  $c_L$ . Для определения типа волны, скорость которой соответствует измеренной (3920 m/s), необходимо рассчитать дисперсионные кривые для бетонного слоя  $h = 1500$  mm. Для этого необходимо дополнительно получить скорость сдвиговых волн для бетона. Модуль сдвига  $\mu$  для бетона определялся через модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ , как:  $E = 2\mu(1+\nu) \Rightarrow \mu = E / 2(1+\nu) = 14.8$  kPa. Модуль упругости и коэффициент Пуассона брались из данных о физико-механических свойствах горных пород лаборатории физических проблем разработки пластовых месторождений Горного института им. Плеханова. Скорость сдвиговой  $c_T$  волны в бетоне получим по формуле:

$$c_T = \sqrt{\mu / \rho} \quad (2)$$

и в итоге  $c_T = 2594$  m/s.

На рисунке 4а показаны дисперсионные кривые для симметричной Лэмбовской моды  $S_1$  (прерывистая линия) [4,5], и для симметричной нулевой моды  $S_0$  (сплошная линия). Видно, что зарегистрированная высокочастотная составляющая спектра сигнала (1.25 – 1.75 kHz), Физически эта волна представлена симметричными относительно средней линии бетонного слоя колебаниями сжатия-растяжения. Приблизительно частота  $f_n$  этой волны связана с мощностью слоя по формуле стоячей волны:

$$f_n = \frac{2n-1}{2h} c_L, \text{ где } n = 1. \quad (3)$$

Подставляя значения  $c_L$  и  $h$ , получаем значение  $f_n$ , равное 1.45 kHz, что приблизительно соответствует доминантной частоте высокочастотной составляющей спектра сигнала (1.6 kHz) (Рис.4). Из рисунка 4 а видно, что скорости распространения такой волны лежат в области 3000 m/s (заштрихованный прямоугольник).

Зарегистрированная низкочастотная составляющая спектра сигнала (0 – 0.25 kHz) соответствует нулевой моде  $S_0$ , скорость распространения которой приблизительно равна 4000 m/s (не заштрихованный прямоугольник). Отсюда можно заключить, что регистрируемое первое вступление при измерении скорости распространения сигнала вдоль слоя бетона соответствует моменту прихода нулевой моды  $S_0$ . На рисунке 4 б показана отфильтрованная высокочастотная составляющая (сплошная линия), и низкочастотная составляющая (прерывистая линия).

Таким образом, из рассмотренных случаев возбуждения можно заключить, что в случае действия источника упругих волн непосредственно в бетонной обделке горной выработки, энергия ударного воздействия на горный массив преобразуется в распространяющиеся нормальные волны  $S_0$  и  $S_1$ , обусловленные упругими свойствами бетона и толщиной обделки. Регистрируемое первое вступление при измерении скорости распространения сигнала вдоль слоя бетона соответствует моменту прихода нулевой моды  $S_0$ , скорость в слое бетона, которой равна 3920 м/с.

### Акустические свойства гетерогенного массива

Измерение скоростей упругих волн в массиве горных пород производились на базе 5121мм (Рис. 5 (а)).

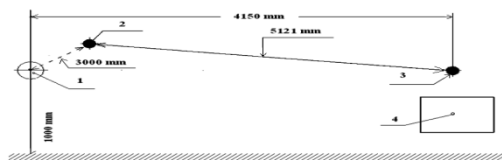


Рисунок 5 (а)

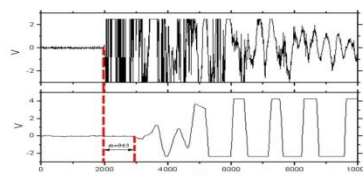


Рисунок 5 (b)

Регистрация моментов времени прихода волны производилась по первому вступлению сигналов. Результаты измерения скоростей упругих волн в массиве горных пород приведены на Рис 5 (b). Измеренная скорость упругих волн в массиве горных пород оказалась равной 5318 м/с. Для проверки соответствия данного значения скорости упругим константам гнейсов, слагающих массив горных пород, оценим скорость приближенно описанным выше способом по формуле (1), где  $\rho$  – плотность пород горного массива, равная 2700 кг/м<sup>3</sup>,  $E$  – модуль Юнга (для гнейсов он равен 60 ÷ 80 кПа),  $\nu$  – коэффициент Пуассона (для гнейсов он равен 0.23 ÷ 0.24). Расчетное значение модуля упругости  $E_{eff}$  для гнейсов равно 82 ГПа. Оценочное значение скорости оказывается равным 5505 м/с, что соответствует приблизительно измеренной скорости.

### Выводы:

Анализ частотного состава АЭ на различных стадиях трещинообразования важен для изучения физики явления потери прочности при разрушении;

- в неповрежденных гетерогенных породах на микроуровне акустические волны излучаются в процессе трещинообразования в зернах гетерогенных пород (0.5 – 2.00 MHz), когда преодолен локальный предел прочности материала.

- в гетерогенных породах с поверхностью ослабленного механического контакта, чем является, например, существующий разлом, акустические волны излучаются при сдвиге вдоль разлома (0.01 – 10 kHz), который начинает распространяться, как только преодолено трение на поверхности.

### Список литературы

- [1] Х.Ф. Махмудов, В. Н. Савельев, Д. В. Савельев, В. Н. Медведев, С. Ю. Круглов. В книге (сборнике): XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 100-летию ФТИ им.А.Ф.Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР А.В. Степанова; Санкт-Петербург, С. 136-137 (2018).
- [2] В.Н. Савельев, А.О. Розанов, Д.В. Савельев, В.Н. Медведев, С.Ю. Круглов, Х.Ф. Махмудов. В сборнике: VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" М. С. 672-673 (2017).
- [3] В.А. Петров, В.А. Пикулин, А.О. Розанов, В.Н. Савельев, С.А. Станчиц. Способ определения энергии сигнала акустической эмиссии в твердом теле.-Патент Российской Федерации № 2037821, 1995.
- [4] А.О. Rozanov , V.N. Savel'ev, S.A. Stanchits. Proceedings of the EAGE 57th Conference and Technical Exhibition, Glasgow, Scotland, B0004 ( 1995).
- [5] А.О. Розанов В.С. Куксенко, В.Н. Савельев, С.А. Станчиц , В.А. Пикулин . Письма в ЖТФ, 19, в.4, С.28-32 (1993).