

05

Калибровка пьезоэлектрических широкополосных полевых шахтных акустических датчиков и их практическое применение

© Х.Ф. Махмудов, В.Н. Савельев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2024 г.

В окончательной редакции 16 ноября 2024 г.

Принято к публикации 25 декабря 2024 г.

Разработан алгоритм, оптимизирующий использование пьезоэлектрических широкополосных датчиков в натуральных условиях. Измерена амплитуда объемных продольных волн от эталонного источника в лабораторных условиях для определения коэффициента чувствительности пьезоэлектрических широкополосных датчиков. Установлены возможность и целесообразность использования этих датчиков для практического применения в горных выработках. Создан переносное полевое оборудование и адаптировав методы лабораторной калибровки, мы успешно диагностировали отдельные линии стационарной системы акустико-эмиссионного автоматизированного мониторинга подземных сооружений в полевых условиях. Предложен алгоритм действий и обоснован способ адаптации разработанных лабораторных приемов для горных выработок с бетонной обделкой, образующих подземные сооружения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, мониторинг, калибровка, упругая волна.

DOI: 10.61011/JTF.2025.04.60006.26-24

Введение

Изучение параметров упругих волн в различных объектах позволяет оценивать механическую устойчивость и безопасность эксплуатации крупномасштабных подземных сооружений, включая хранилища опасных отходов, туннели и резервуары для сжиженного газа. Эти задачи остаются актуальными и требуют постоянного внимания и развития [1–4].

Основным методом исследования является регистрация и анализ импульсов акустической эмиссии (АЭ), которая широко применяется для изучения начальных стадий процесса разрушения (зарождения и накопления микроскопических трещин) в гетерогенных материалах, таких, как строительные, конструкционные, композиционные материалы [5–9] и горные породы [10–14]. Развитие повреждений при механическом нагружении хрупких гетерогенных тел происходит через постепенное накопление микротрещин, поскольку в таких материалах имеется множество „слабых мест“, прежде всего в межзеренных прослойках [14,15].

Исследование распространения акустического импульса (АИ) в горных породах и бетонах с заданными структурными и механическими характеристиками подробно рассмотрено в работах [16–18]. В примененной методике скорость распространения АИ определяется по первому вступлению сигнала на пьезоэлектрический датчик акустической эмиссии (ДАЭ), регистрирующий импульсы в широком диапазоне частот. Измеренное значение скорости АИ для горной породы и бетонного слоя хорошо согласуется с расчетами на основе известных формул теории упругости (во втором случае, с учетом геометрии слоя).

Для контроля формы акустической волны от эталонного источника использовался метод фотоупругости [19], с помощью которого был определен частотный диапазон и проведена калибровка специальных ДАЭ, разработанных для контроля горных выработок с установкой в скважинах. С помощью аппарата спектрального анализа проводился расчет энергетического баланса во всем передающем тракте „источник АИ–среда распространения АИ–приемник АИ“. Источником излучения акустической волны служило упругое соударение стального шара с поверхностью образца (лабораторные исследования) или с поверхностью элемента подземного сооружения (натурные исследования).

Для оценки возможностей разработанного алгоритма при использовании в натуральных условиях горных выработок также был проведен ряд методических работ [20,21] в соответствии с требованием [22]. Вначале рассматривалось сопоставление результатов расчета координат источников АЭ для двух различных алгоритмов, применявшихся в работах [23–26]. Известно, что точность определения координат источников акустической эмиссии существенно зависит от того, насколько точно задана скорость продольной волны [27]. Поэтому желательно после проведения установки датчиков на исследуемый объект провести его прозвучивание во всех возможных направлениях с целью более точного задания поля скоростей упругих волн. Следует отметить, что эксперименты [27–29], проведенные по нагружению образцов горных пород, показали, что поле скоростей существенно меняется во время нагружения, причем неоднородно в различных направлениях. Одной из возможных причин такого изменения скорости является

открытие или закрытие трещин, ориентированных в каком-либо направлении. В связи с этим периодическое определение поля скоростей упругих волн в различных направлениях в горном массиве при его АЭ контроле приобретает ключевое значение для расчета координат источника АИ.

В рамках настоящей работы такое определение скоростей проводилось для корректной оценки результатов акустико-эмиссионного мониторинга сложного подземного сооружения, расположенного в горном массиве и имеющего бетонную обделку.

1. Определение амплитудно-частотных характеристик полевых пьезоэлектрических акустико-эмиссионных датчиков в лабораторных условиях

Работа проводилась путем сопоставления зарегистрированных сигналов от пьезопленочного датчика (ППД) с эталонными сигналами, полученными методом фотоупругости для идентичных условий возбуждения поля упругих колебаний в эталонном образце. Возбуждение производилось ударом стального шарика диаметром 2.3 mm о поверхность стеклянной призмы 190 × 240 × 240 mm. Метод фотоупругости позволяет регистрировать неискаженную форму сигнала и измерять амплитуду упругих волн в единицах механического напряжения (Pa).

Было установлено, какая часть механической энергии от удара шариком о поверхность призмы расходуется на образование упругой волны, напряжение в которой было зафиксировано, что, в свою очередь, позволило рассчитать энергию в этой волне. Тестовый эксперимент, пример которого приведен на рис. 1, *a*, продемонстрировал возможность корректной регистрации упругой волны ППД, а, следовательно, и калибровки ППД, что даст возможность его применения для исследований в натуральных условиях. В данном случае регистрация ППД производилась без предварительного усиления АИ (рис. 1, *a*). На рис. 1, *b* [19] показан общий вид установки регистрации упругих волн методом фотоупругости, на которой проводились подобные исследования.

Сопоставление амплитуд импульсов для низкочастотной самой быстрой моды S_0 [18] в призме дает коэффициент чувствительности $CS_{pf} = 0.78/62.72 \text{ mV/kPa} = 0.01 \text{ mV/kPa}$ в диапазоне частот 10–30 kHz.

Далее этот результат был использован при калибровке изготовленного скважинного датчика, которая осуществлялась следующим образом. Скважинный датчик ДАЭ и ППД устанавливались на бетонный блок размерами 1000 × 1000 × 1000 mm. На расстоянии 100 mm от места установки датчиков возбуждалась упругая волна с помощью динамического излучателя. Далее сравнивались амплитуды первого вступления от обоих датчиков и определялся коэффициент чувствительности скважинно-

го ДАЭ. Регистрация волн обоими датчиками производилась без предварительного усиления.

На рис. 2 показаны сигналы со скважинного ДАЭ (*a*) и пьезопленочного (*b*) датчиков.

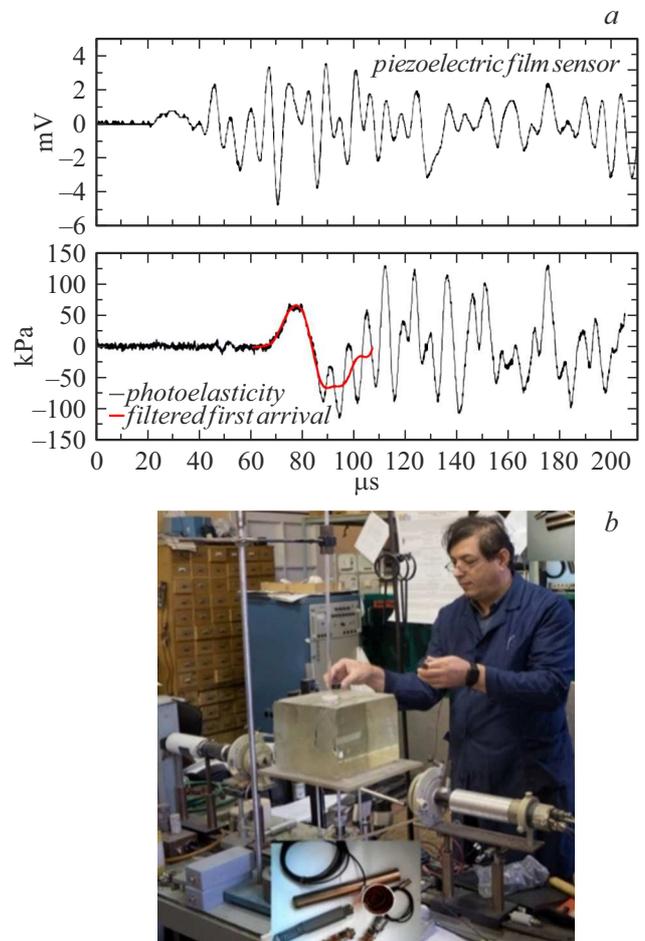


Рис. 1. Сопоставление сигналов с ППД с эталонными сигналами, полученными при регистрации методом фотоупругости (*a*). Фото, общий вид установки при регистрации упругих волн, метод фотоупругости (*b*).

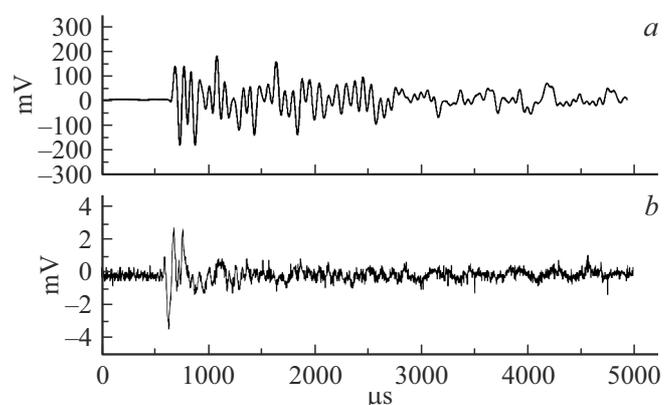


Рис. 2. Калибровка скважинного датчика с помощью эталонного ППД: сигнал, зарегистрированный скважинным ДАЭ (*a*); сигнал, зарегистрированный ППД (*b*).

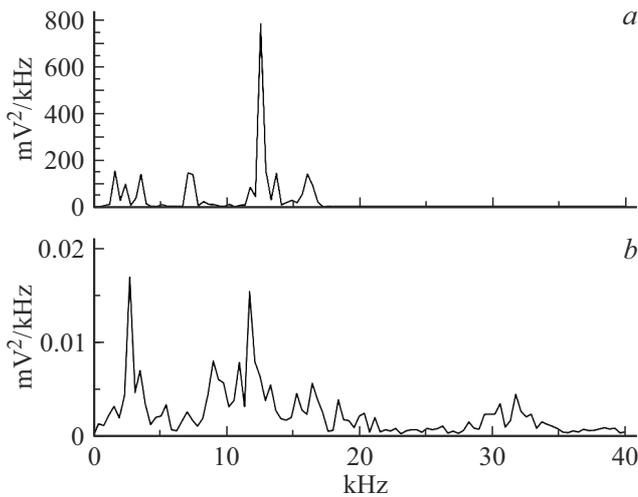


Рис. 3. Спектр сигнала со скважинного ДАЭ (а); спектр сигнала с ППД (b).

На рис. 3 представлены спектры этих сигналов. Частотные диапазоны этих спектров оцениваются медианными частотами, равными 12 kHz для обоих датчиков.

Для оценки чувствительности скважинного датчика применим ранее полученный коэффициент чувствительности для ППД в диапазоне частот 10–30 kHz. Получим

$$\begin{aligned}
 CS_{ws} &= \frac{PV_w}{PV_{pf}} CS_{pf} \\
 &= \frac{134.8 \text{ mV}}{0.94 \text{ mV}} 0.01 \text{ mV/kPa} = 1.4 \text{ mV/kPa},
 \end{aligned}$$

где CS_{ws} — коэффициент преобразования (чувствительности) скважинного датчика, CS_{pf} — коэффициент преобразования ППД, PV_w и PV_{pf} — амплитуды первых вступлений скважинного датчика и ППД соответственно. Определенный таким образом коэффициент чувствительности скважинного датчика для диапазона частот 10–30 kHz составил 1.4 mV/kPa.

В работе [27] приведены измерения акустических свойств бетонной обделки и горного массива в районе одной из скважин, в которой стационарно установлен штатный датчик системы АЭ мониторинга подземных сооружений и сделан анализ скоростей распространения акустических волн в бетонной обделке.

2. Практическое применение скважинных датчиков и анализ форм сигналов отклика бетонной обделки и горного массива на ударное воздействие

Целью измерений являлось изучение акустических свойств при отклике бетонной обделки и горного массива на ударное воздействие. Ударное воздействие производилось стальным шаром массой 4.684 kg непосред-

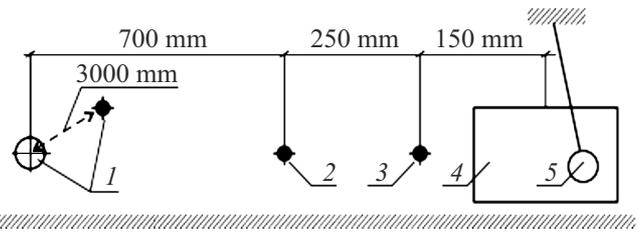


Рис. 4. Схема измерений отклика горного массива на ударное возбуждение стальным шаром непосредственно по бетонной обделке, по плите, прикрепленной к бетонной стенке, по закладной, вделанной в массив горной породы через бетон. 1 — скважина, в которой размещен шахтный датчик на глубине 3 м, 2 — ППД датчик, 3 — запускающий датчик, 4 — места удара (стальная пластина или закладная), 5 — массивный стальной шар.

ственно по бетонной обделке через стальную плиту, прикрепленную к бетонной обделке, а также по закладной, вделанной в бетонную стену. Шар подвешивался как маятник. Регистрация отклика массива производилась с помощью двухканального цифрового запоминающего осциллографа типа АСК, соединенного с ноутбуком. Использовались следующие датчики: канал 1 — ППД датчик, подсоединенный к осциллографу через предварительный усилитель ($K_{gain} = 400$); канал 2 — ДАЭ без предусиления; запуск регистрации осуществлялся с помощью внешнего датчика АЕ100. Характеристики ППД и ДАЭ, измеренные в лабораторных условиях, приведены на рис. 2. Схема измерений в горной выработке (скважина) представлена на рис. 4. Запускающий датчик устанавливался на бетонную обделку на расстоянии 150 mm от места удара, ППД также устанавливался на обделку на расстоянии 400 mm от места удара. Скважинный ДАЭ устанавливался на глубине 3000 mm в горизонтальной скважине, пробуренной перпендикулярно плоскости стенки выработки. Толщина бетонной обделки — 1500 mm. Таким образом, скважинный датчик находился непосредственно в горном массиве. Расстояние скважины от места удара составляло 1100 mm. Контролируемый массив горных пород сложен биотитовыми гнейсами (рис. 5, c).

На рис. 5 представлены типичные сигналы, зарегистрированные ППД, прикрепленным непосредственно к бетонной стене выработки (рис. 5, a), и ДАЭ, помещенным в скважине на глубину 3000 mm в массив (рис. 5, b). Удар производился через стальную плиту, прикрепленную к бетонной стене.

3. Анализ форм сигналов отклика

На рис. 6 представлены кросс-спектр и функция когерентности сигналов отклика от двух последовательных ударов одинаковой энергии: регистрация ППД (рис. 6, a); регистрация скважинным (ДАЭ красный), датчиком в скважине (рис. 6, b).

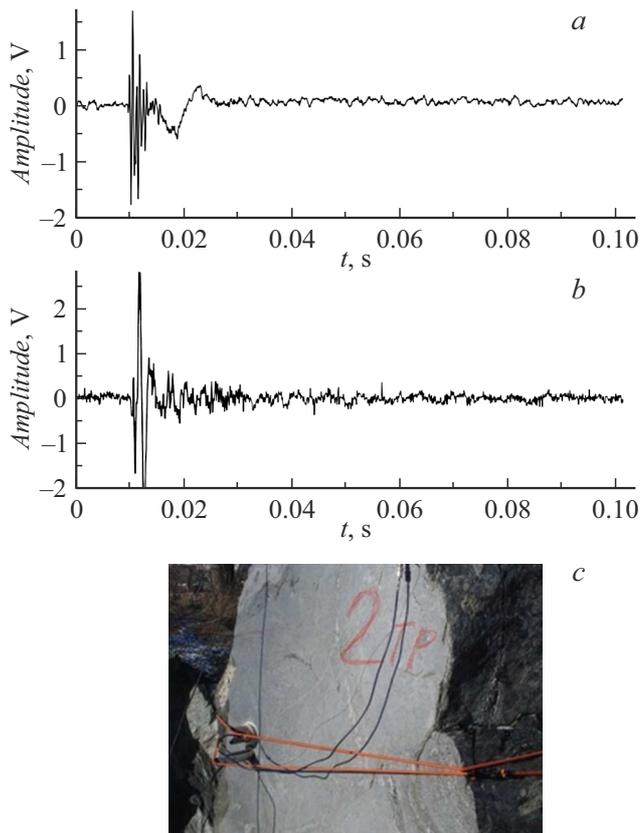


Рис. 5. Формы сигналов датчиков: *a* — установленного на бетонной обделке; *b* — в скважине в массиве горной породы на расстоянии 3200 mm от удара шаром, а также образец (фото) массива горных пород, сложенного биотитовыми гнейсами (*c*).

Из рис. 6, *a* видно, что при возбуждении упругой волны ударом шара по плите, закрепленной на бетонной обделке, акустическая энергия, ППД (черный), сосредоточена в двухчастотных диапазонах — в области 0.2 kHz и в области 1.5 kHz. Энергия, зарегистрированная скважинным датчиком ДАЭ (красный), находящимся в массиве горных пород, аккумулируется в области 0.5 kHz (рис. 6, *b*).

На рис. 7 представлены кросс-спектр и функция когерентности подобных сигналов от двух последовательных ударов одинаковой энергии при ударе шаром по закладной арматуре, проходящей через бетон в массив: регистрация ППД (рис. 7, *a*); регистрация датчиком ДАЭ в скважине (рис. 7, *b*).

Надо отметить, что спектр (рис. 7, *a*) и форма сигнала (рис. 5, *a*) при ударе по закладной арматуре отличаются от спектра и формы сигнала при ударе по плите (рис. 6, *a* и *b* соответственно) с ППД тем, что при ударе по закладной регистрируется только высокочастотная составляющая отклика бетонной обделки в области 1.5 kHz. Соответственно, в этом случае спектр отклика представлен только одним частотным диапазоном (рис. 7, *a*), в отличие от спектра при ударе по плите (рис. 6, *a*), где энергия от удара распределяется по двум

частотным диапазонам. Отклики массива, зарегистрированные скважинным ДАЭ для двух случаев возбуждения (рис. 6, *b* и 7, *b*), по частотному составу практически ничем не различаются — энергия упругих волн аккумулируется в области 0.5 kHz. На рис. 8 представлены кросс-спектр и функция когерентности таких сигналов от двух последовательных ударов одинаковой энергии по стенке горной выработки без бетонной крепи.

Видно, что сигнал и его спектр представлены монохроматическим процессом на частоте 0.8 kHz, и добротность этого процесса в данном случае выше, чем в случае регистрации отклика горного массива в выработке, укрепленной бетонной обделкой (рис. 6, *b*). Из того, что максимальные амплитуды процессов с датчика ДАЭ примерно одинаковы (в районе 2–3 V) для двух случаев проведения измерений (рис. 6, *b*), следует, что контактные условия датчика с породой для обоих случаев сопоставимы. Причиной повышения частоты отклика массива без бетонной крепи (0.8 kHz) по сравнению с первым случаем проведения измерений (0.5 kHz) и увеличение добротности отклика массива горных пород может свидетельствовать о меньшей трещиноватости горного массива в новой горной выработке без бетонной

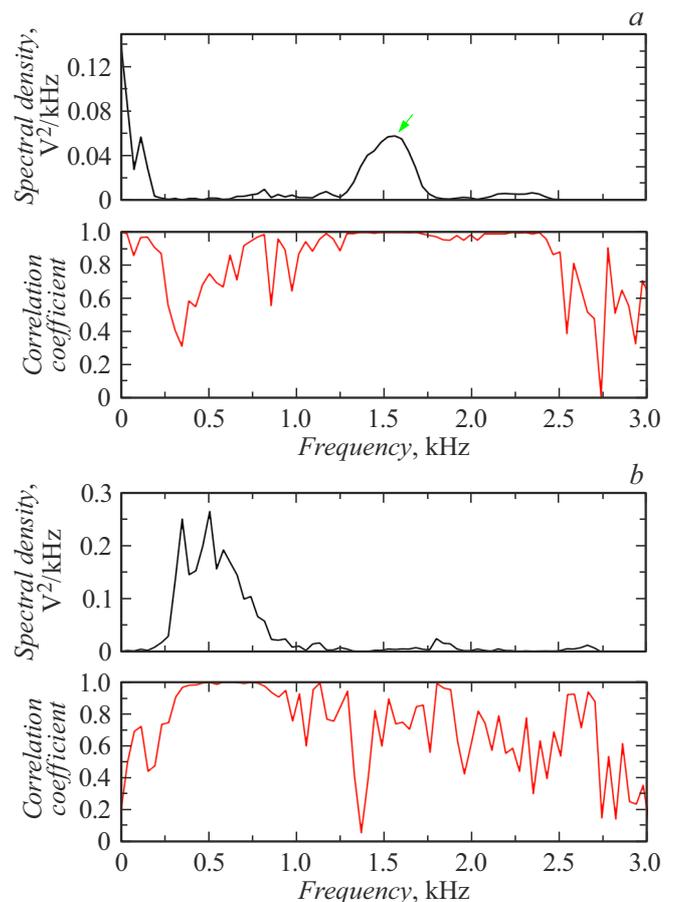


Рис. 6. Кросс-спектр и функция когерентности сигналов от двух последовательных ударов одинаковой энергии по плите: регистрация ППД (*a*); регистрация датчиком ДАЭ в скважине (*b*).

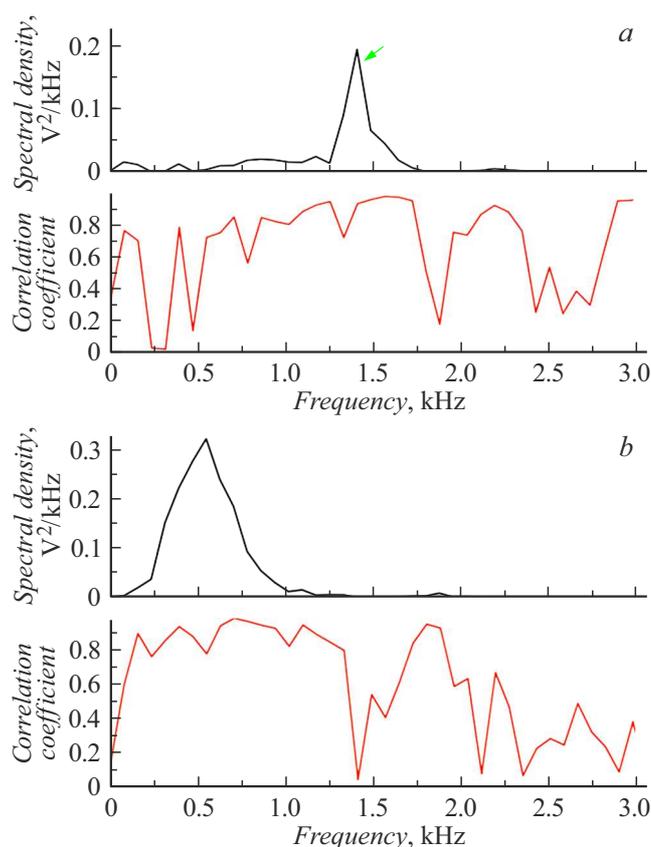


Рис. 7. Кросс-спектр и функция когерентности сигналов от двух последовательных ударов одинаковой энергии по закладной: регистрация ППД (а); регистрация ДАЭ в скважине (б).

креп. Следует отметить, что функция когерентности выявляет еще один значимый пик на частоте в районе 10 kHz (рис. 8). Энергия колебаний на этой частоте незначительна по сравнению с основной частотой процесса (0.8 kHz), как видно из спектра на рис. 8.

Предположительно этот пик может относиться к низкочастотной части спектра собственных колебаний датчика ДАЭ.

4. Обсуждение результатов

Калибровка скважинных датчиков и определение их амплитудно-частотных характеристик в лаборатории и в натурных условиях позволили более точно выполнить предварительное измерение поля скоростей распространения упругих волн в горной породе в районе установки датчика в скважине. Скорость распространения упругой волны колебалась вокруг величины 5318 м/с, что практически совпадает с расчетной скоростью [18]. Для измерения энергии источника 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

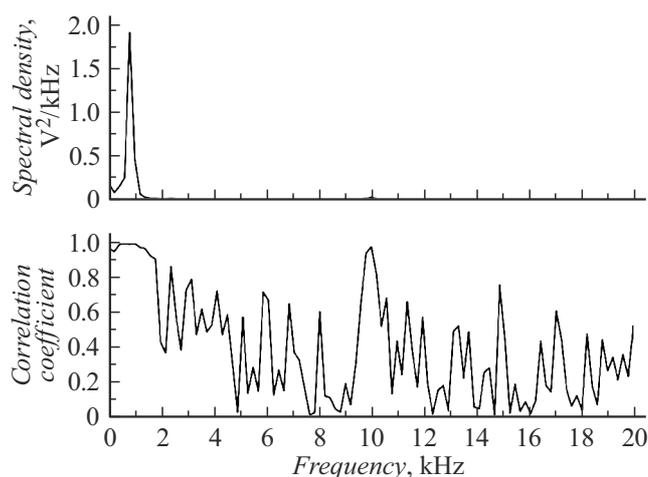


Рис. 8. Кросс-спектр и функция когерентности сигналов от двух последовательных ударов одинаковой энергии по стеке массива без бетонной крепи, зарегистрированных шахтным датчиком в скважине.

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 стеклянной призмы $190 \times 240 \times 240$ mm (передающая среда), напряжения в упругой волне измерялись методом фотоупругости (приемник АИ) [19,28].

Сопоставление двух независимых методов 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 призмы, которая, в свою очередь, обладает практически идеальной передаточной функцией. Был определен также спектральный состав энергии взаимодействия [29].

Для адаптации этой методики на подземных сооружениях был разработан, изготовлен и калиброван для измерения напряжений упругой волны пьезоприемник с линейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне до 30 kHz [18]. Он был размещен в подземном сооружении в районе одной из скважин, в которых стационарно установлены штатные ДАЭ системы АЭ мониторинга. Датчиком было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение массива ударом шара массой $M = 4.684$ kg, 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 [18]. Это связано, во-первых, с тем, что при возбуждении упругой волны путем удара шаром по поверхности выработки соударение не чисто упругое, а сопровождается разрушением породы в месте контакта, на что и идет значительная доля потерянной при соударении

механической энергии шара, а во-вторых, с тем, что неизвестна передаточная функция среды, которая может быть определена после исключения первой причины расхождения результатов. Поэтому для корректной оценки энергии необходимо устранить разрушение массива при его возбуждении ударом шара, например, путем установки закладных деталей. Спектральная плотность возбуждения массива от удара шаром концентрируется в диапазоне 0.7–3.2 kHz [28].

Выводы

Создан алгоритм, который позволяет диагностировать отдельно все линии регистрации АЭ в процессе работы системы АЭ мониторинга, и показана возможность применять скважинные ДАЭ с заданными характеристиками в условиях реального горного массива с бетонной обделкой. Создан канал для передачи данных системы АЭ мониторинга из штатного компьютера в любой другой компьютер (например, ноутбук) для последующего независимого анализа АИ в полевых и в лабораторных условиях. Разработан алгоритм использования широкополосных пьезоэлектрических преобразователей, а также возможность их калибровки в лабораторных и в полевых условиях. Это стало возможным только после создания мобильного устройства, которое можно было использовать как в лабораторных, так и в полевых условиях. Также были разработаны методы оптимизации и регистрации амплитудно-частотных характеристик ДАЭ в полевых условиях. Алгоритм рекомендован для использования при контроле работы и калибровки линий регистрации сигналов системой автоматизированного АЭ мониторинга, особенно в тех случаях, когда при АЭ контроле объекта отсутствует локация источников сигналов. Разработанный алгоритм предоставляет ценные сведения о текущем состоянии объекта, а также устанавливает порядок и объем необходимых регистрируемых параметров сигналов АЭ при акустико-эмиссионном мониторинге элементов подземных конструкций опасного производственного объекта с целью оценки их геомеханической устойчивости и безопасной эксплуатации, что позволяет обнаруживать потенциальные проблемы, существенно снижая погрешность расчетов.

Выбор определяющих параметров, по которым определяется техническое состояние, должен осуществляться по результатам анализа базы данных АЭ мониторинга подземных сооружений, периодического определения поля скоростей распространения упругих волн в контролируемом массиве горных пород и экспертного обследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Решетов, А.К. Аракелян. *Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов* (Чувашский ун-т, Чебоксары, 2010)
- [2] В.И. Иванов, В.А. Барат. *Акустико-эмиссионная диагностика* (Спектр, М., 2017)
- [3] А.А. Аксенов, И.А. Ожиганов, О.А. Исьянов. Горный журн., **9**, 83 (2014).
- [4] E.N. Sher, N.I. Alexandrova, M.V. Aizenberg-Stepanenko, A.G. Chernikov. *J. Min. Sci.*, **43** (6), 20 (2007).
- [5] A.M. Molodets, V.V. Avdonin, A.N. Zhukov, Yu.M. Shulga. *Deformation and Destruction of Mater.*, **9**, 2 (2008).
- [6] А.В. Попов, А.Б. Комлев, Д.Н. Тесля. *Контроль. Диагностика*, **8** (242), 32 (2018).
- [7] G. Su, V. Gang, S. Chai, G. Zhao. *J. Central Southern Univ.*, **27** (10), 2883 (2020). DOI: 10.1007/s11771-020-4516-6
- [8] T.V. Popova, A.E. Mayer, K.V. Khishchenko. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **653**, 012045 (2015).
- [9] K.W. Liu, W. Yuan, Y. Yan, X. Wang. *Symmetry*, **11** (8), 1040 (2019). DOI: 10.3390/sym11081040
- [10] Д.А. Менгель. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журн.), **3–1**, 149 (2020). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-149-160
- [11] В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов, Б.Ц. Манжиков. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, **4**, 29 (2010).
- [12] М.Г. Потанина, В. Смирнов, А. Пономарев, П. Бернар, А.А. Любушин, Ш.П. Шозиев. *Физика Земли*, **2**, 126 (2015).
- [13] S. Stanchits, J. Burghardt, A. Surdi. *Rock Mech. Rock. Eng.*, **48**, 2513 (2015).
- [14] М.Д. Ильинов, Д.Н. Петров, Д.А. Карманский, А.А. Селыхов. *Горные науки и технологии*, **8** (4), 290 (2023). DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150
- [15] C.G. Lacidogna, N. Pugno. *Proc. X Conf. Sound and Vibration* (Stockholm, 7–10 July, 2003)
- [16] В.В. Носов. *Дефектоскопия*, **12**, 24 (2014).
- [17] В.С. Куксенко, Н.Г. Томилин, Х.Ф. Махмудов, А.В. Бенин. *Письма в ЖТФ*, **33** (2), 31 (2007). [V.S. Kuksenko, N.G. Tomilin, Kh.F. Makhmudov, A.V. Benin. *Tech. Phys. Lett.*, **33** (1), 62 (2007). DOI: 10.1134/S1063785007010178]
- [18] В.Н. Савельев, Х.Ф. Махмудов. *ЖТФ*, **90** (1), 143 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19
- [19] В.А. Петров, В.А. Пикулин, А.О. Розанов, В.Н. Савельев, С.А. Станциц. *Способ определения энергии сигнала акустической эмиссии в твердом теле* (Патент Российской Федерации № 2037821, 1995)
- [20] С.П. Быков, К.А. Кузнецов, А.В. Юшин, И.Н. Скрыбиков. *Способ определения расстояния между преобразователем и источником акустической эмиссии* (Патент № 2397490 С2 Российская Федерация, МПК G01N 29/14. Заявитель ОАО „ИркутскНИИХиммаш“)
- [21] С.А. Бехер, Т.В. Сыч. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, **2**, 14 (2016). DOI: 10.17804/2410-9908.2016.2.014-020
- [22] *Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов* (РД 03-300-99. 01.10.1999, 1999)
- [23] А.Ю. Искра, И.Ю. Рассказов, Г.А. Калинов, Ю.И. Болотин. *Горный журн.*, **6**, 72 (2006).

- [24] Г.А. Калинов, И.Ю. Расказов, А.Ю. Искра, Д.А. Куликов, К.О. Харитонов. *Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика*: Сб. тр. XVI сессии Российского акустического общества (ГЕОС, М., 2005), т. 1, с. 351–354.
- [25] А.Ю. Искра, И.Ю. Расказов. *Горный журн.*, **1**, 85 (2007).
- [26] К.Н. Трубецкой, Д.М. Бронников, С.В. Кузнецов, В.А. Трофимов. *Физика Земли*, **7–8**, 78 (1994).
- [27] Х.Ф. Махмудов. *ЖТФ*, **92** (12), 1869 (2022). DOI: 10.21883/0000000000
- [28] Х.Ф. Махмудов, В.Н. Савельев, Д.В. Савельев, В.Н. Медведев, С.Ю. Круглов. *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, Россия, 10–12 апреля 2018), с. 136–37.
- [29] И.П. Щербачев, Х.Ф. Махмудов, А.Е. Чмель. *ЖТФ*, **94** (1), 48 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56900.86-23