

УДК 624.07:620.179:622.83:534.8

**Е.А. Вознесенский**

## **УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИМПАКТ-ОТКЛИКА АНКЕРНОЙ КРЕПИ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Рассмотрены результаты физического натурного моделирования отклика анкерной крепи на ударное воздействие с целью ее диагностики. Произведен учет характеристик преобразователей, дано описание модели, приведены результаты распознавания вида грунта и глубины погружения анкера по спектральным характеристикам, а также установлены закономерности и выведены уравнения множественной регрессии*

*Ключевые слова: анкерная крепь, горные породы, массив, контроль, удар, отклик, спектральный анализ, устойчивость пород, физическое моделирование.*

Семинар № 19

---

**А**нкерная крепь широко применяется как в подземном строительстве, так и на горных предприятиях, осуществляющих добычу полезных ископаемых подземным способом. Диагностика анкерной крепи была и остается важным элементом при обеспечении устойчивости массива горных пород. В [1–4] обоснован способ диагностики анкерной крепи, основанный на анализе отклика на ударное воздействие по торцу анкера. При этом анализируются спектральные характеристики такого отклика, на основании которых делается заключение о качестве контакта анкера с укрепляемым массивом, а также о величине нагрузки анкера.

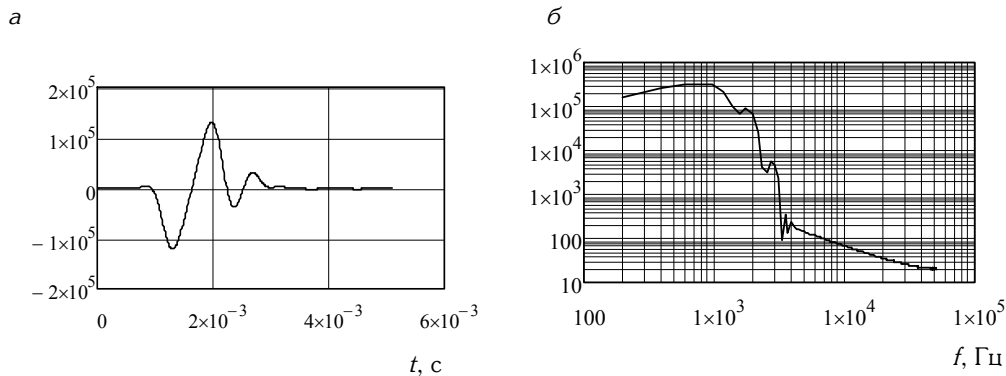
Для правильной интерпретации результатов необходимо вывести основные закономерности, характеризующие степень сцепления анкера с массивом. В [5] эта задача решается на основе лабораторного физического моделирования. Показано, что использование в качестве информативных параметров среднеквадратических значений амплитуд сигналов от-

кликов, вычисленных в нескольких спектральных полосах, позволяет распознать схему сцепления анкера с массивом. В [6–7] проводится компьютерное моделирование. В данной работе эта задача решается на основе натурного физического моделирования.

### **1. Учет характеристик преобразователей**

Проведение натуральных модельных экспериментов производилось с использованием стандартной аппаратуры ИДС-1, выпускаемой ООО «Логис».

Форма и спектр регистрируемых сигналов в значительной степени зависит от преобразователей. В данной работе используются преобразователи GS-20DX. Для оценки характеристик преобразователей выбрана методика регистрации отклика на импульсное воздействие, вызванное тестовым ударом небольшим твердым предметом (стальным шариком) по чувствительной поверхности преобразователя. При этом считается, что длительность удара значительно



**Рис. 1. Графики сигнала (а) и его спектра (б) ударного воздействия при вертикальном расположении преобразователя GS-20DX и направлении выводов вверх**

меньше времени реакции преобразователя. После записи сигналов вычисляется их спектр, характеризующий АЧХ преобразователя.

Снимались характеристик в двух положениях при вертикальном и горизонтальном положении оси преобразователя. Частота дискретизации 96 кГц, количество отсчетов 2048, из которых затем вырезались выборки требуемой длины. Максимальная частота цифрового фильтра 2 кГц.

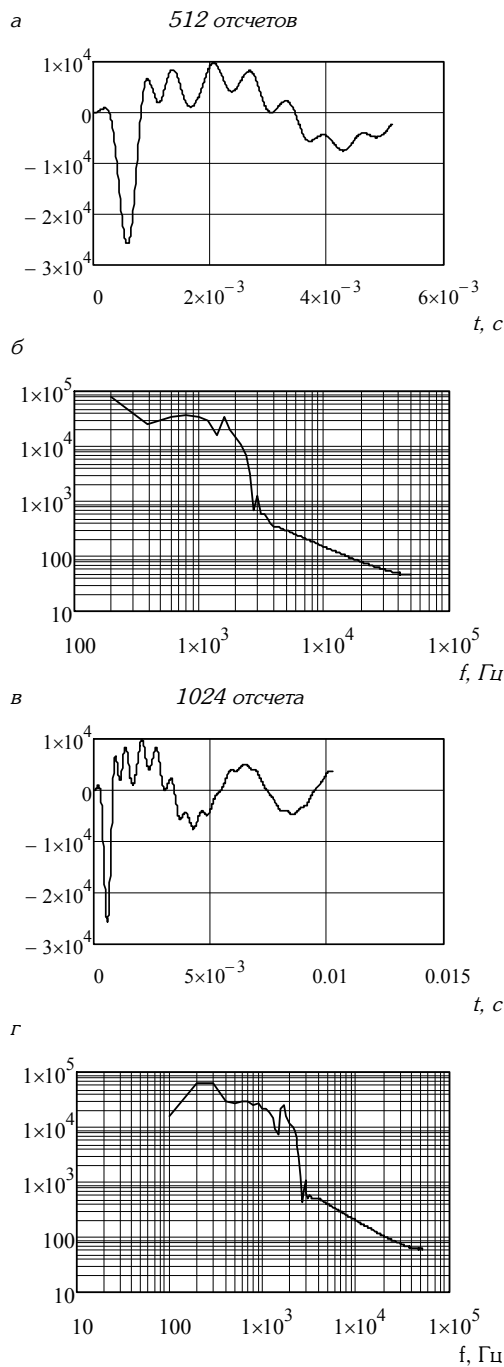
На рис. 1 представлены графики сигнала (рис. 1, а) и спектра, полученного по выборке из 512 отсчетов (рис. 1, б) при вертикальном положении оси преобразователя, когда электрические выводы направлены вверх.

Как следует из графиков на рис. 1, на частоте 1 кГц и ее гармониках (2, 3 кГц) наблюдаются максимумы, приводящие к появлению волнообразных форм на реальных сигналах.

На рис. 2 представлены графики зависимостей сигналов (рис. 2, а, в) и спектров (рис. 2, б, г), полученных при горизонтальном расположении преобразователей. Для более подробной оценки спектров в области нижних частот, был произведен рас-

чет не только при 512 отсчетах, соответствующих длительности сигнала 5 мс, но и при 1024 отсчетах, дающих длительность 10 мс. При этом разрешающая способность по частоте, равная обратной величине от длительности, составляет 200 Гц и 100 Гц соответственно. Последнее значение дает возможность увидеть, что максимум спектральной плотности находится на частотах 200–300 Гц, в то время как спектр, полученный при 512 отсчетах, демонстрирует подъем на участке 200–300 Гц, и неясно, максимум это, или подъем будет происходить и далее. При этом истинный максимум смещен в область еще более низких частот, но в силу недостаточной разрешающей способности не виден.

Таким образом, оценочный анализ спектров ударных импульсных характеристик, и, соответственно, АЧХ преобразователей, позволяет сделать вывод, что в сигнале, зарегистрированном на реальных объектах, могут встречаться волнообразные формы с частотами около 200-300 Гц и 1000, 2000 Гц, что будет обусловлено не свойствами объекта, а характеристиками преобразователей.



**Рис. 2.** Графики сигнала (а, в) и его спектра (б, г) ударного импульсного воздействия при горизонтальном расположении преобразователя GS-20DX

## 2. Описание натурального эксперимента

При физическом моделировании выбор моделей осуществлялся, исходя из практических соображений. На рис. 3 показана схема физической модели, на которой регистрировались сигналы.

Модель представляет собой анкер длиной 1,50 м и диаметром 22 мм. В процессе испытаний стальной стержень, имитирующий анкер, забивался в грунт моделируя различную длину контакта с массивом. Преобразователь располагался на части торца стержня, как показано на рис. 3. Удары проводились по свободной части торца. Другие варианты размещения преобразователя не давали стабильных и отчетливых результатов.

Были проведены две серии измерений:

в первой серии производились измерения в суглинках и песках при погружениях 0,5 м и 1,3 м;

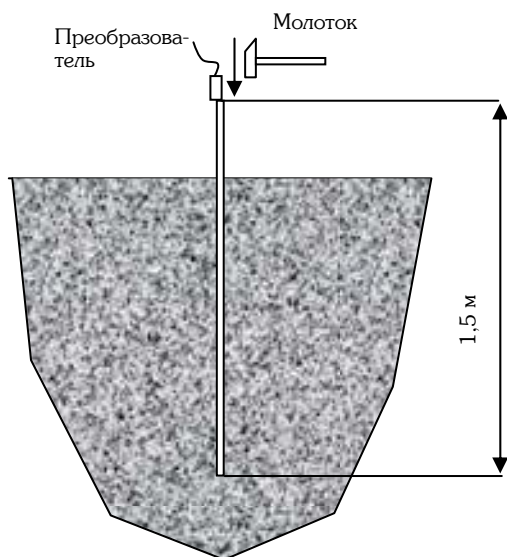
во второй серии стальной стержень забивался в грунт, начиная с 0,20 м и заканчивая 1,40 м погружения анкера с шагом 0,20 м.

## 3. Распознавание вида грунта и глубины погружения анкера

Рассматриваемый способ испытаний может быть использован для определения параметров или вида грунта. При этом показания будут также зависеть от глубины погружения зонда.

На рис. 4 представлен пример спектра сигнала, зарегистрированного при размещении преобразователя на торце анкера, при этом тестовые удары наносятся по свободной части площадки рядом с преобразователем. На этом рисунке показаны полосы, в которых производится вычисление среднеквадратического значения амплитуд спектральных составляющих.

В таблице эти значения приведены в численном виде.



**Рис. 3. Схема физической модели, на которой регистрировались сигналы**

где  $\bar{A}_j$  - среднеквадратическое значение амплитуды в  $j$ -той полосе частот;  $A_{i,j}$  - амплитуда  $i$ -той составляющей в  $j$ -той полосе частот;  $n_j$  - количество спектральных составляющих, попадающих в  $j$ -тую полосу частот.

Полученные среднеквадратические значения амплитуд спектральных составляющих могут быть использованы либо для распознавания типа пород, либо для получения уравнения регрессионной зависимости, связывающей какой-либо физический параметр (например, плотность или модуль упругости) с этими значениями.

На рис. 5 показано распределение экспериментальных точек, определяемых среднеквадратическими значениями амплитуд в первой и пятой спектральных полосах.

Как следует из диаграммы на рис. 5, даже использование в качестве информативных параметров лишь двух амплитуд  $A_1$  и  $A_5$ , позволяет достаточно четко проследивать разделение сигналов на кластеры.

При распознавании по программе распознавания образов multieff [8] этих четырех случаев при количестве сигналов 30-32 в каждом классе вероятность правильного распознавания равна 100 %.

#### **4. Установление закономерностей и уравнения множественной регрессии**

Для расчета спектров были выбраны реализации вибрационных откликов объемом 1024 отсчета при частоте дискретизации 96 кГц. Длительность каждой реализации составляет 9,8 мс. На каждой глубине погружения анкера было зарегистрировано

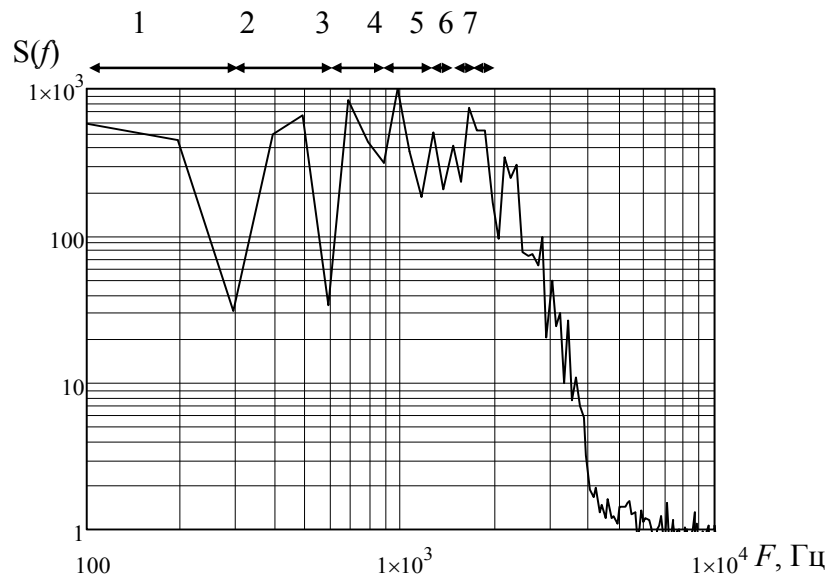
#### **Граничные значения полос спектра**

	0	1
0	100	300
1	300	600
2	600	900
3	900	$1.3 \cdot 10^3$
4	$1.3 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^3$
5	$1.6 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^3$
6	$1.8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$

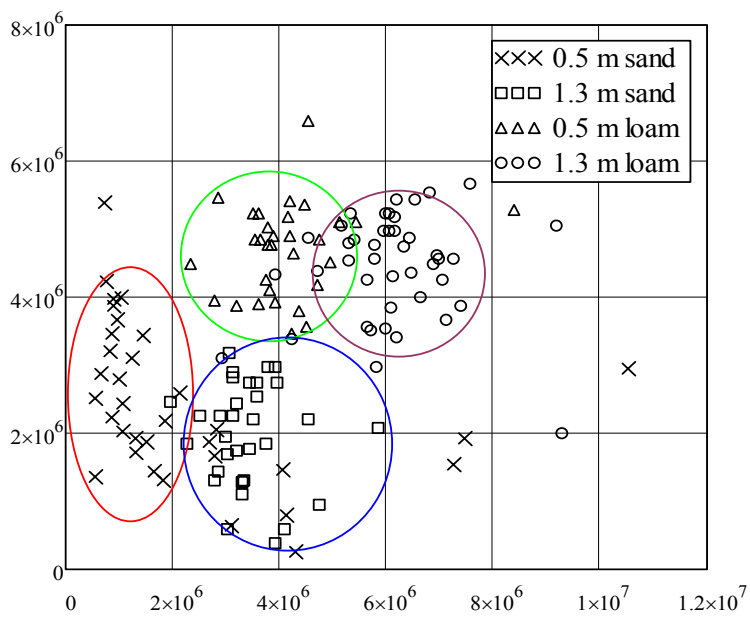
Граничные значения полос спектра, в которых определяются среднеквадратические величины амплитуд спектральных составляющих представлены в таблице.

При обработке данных производится выделение спектральных составляющих, попадающих в определенную полосу, и рассчитываются среднеквадратические значения по соответствующей формуле

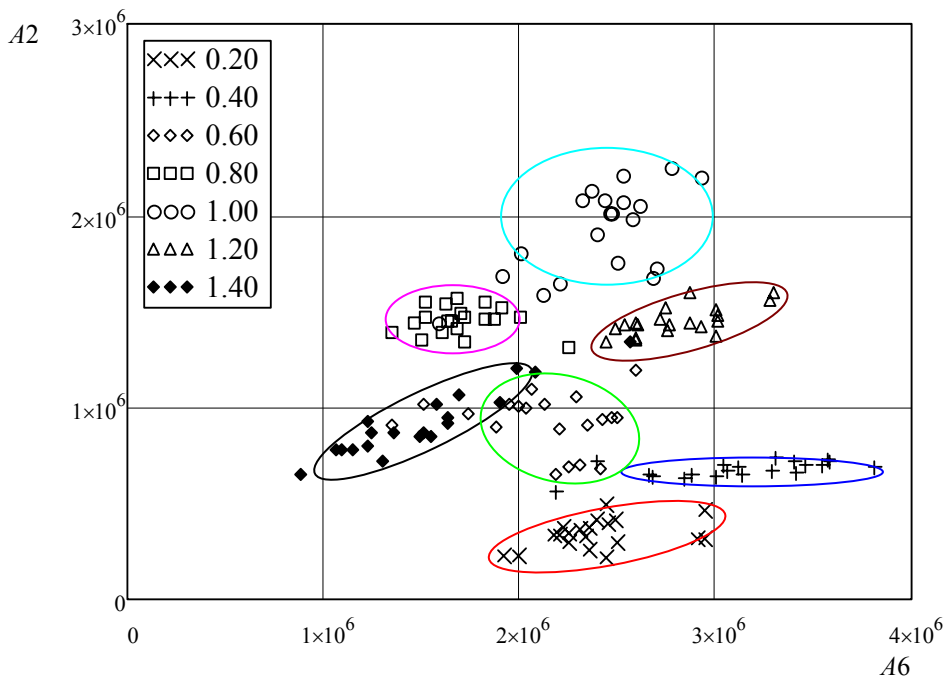
$$\bar{A}_j = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} A_{i,j}^2},$$



**Рис. 4. Спектр одного из сигналов и полосы, в которых вычисляются средне-квадратические значения амплитуд спектральных составляющих**



**Рис. 5. Распределение точек, характеризующих сигналы, на плоскости в координатах  $A_1 - A_5$  для различных случаев погружения стержней в песок (sand) и суглинков (loam)**



**Рис. 6. Распределения точек, характеризующих различные глубины погружения анкера в грунт, построенные по среднеквадратическим значениям амплитуд во второй и шестой частотных полосах**

по 20 реализаций сигналов. По каждой реализации вычислялись спектры, а по ним – 7 среднеквадратических значений соответствующих семи частотным полосам. После этого для наглядности представления результатов произведено построение точек на плоскости, координатами которых являются среднеквадратические амплитуды во второй и шестой частотных полосах. Результаты такого построения представлены на рис. 6.

Даже при использовании только двух информативных параметров можно достичь хорошую дифференциацию показаний, соответствующих определенным глубинам погружения анкера в грунт.

Выведено уравнение множественной регрессии, позволяющее по результатам измерения определить глу-

бину погружения анкера (т.е. длину контакта анкера с массивом).

$$h = 1,083 - 1,948 \cdot \bar{A}_1 - 1,806 \cdot \bar{A}_2 - 0,166 \cdot \bar{A}_3 + 17,721 \cdot \bar{A}_4 - 7,790 \cdot \bar{A}_5 + 0,820 \cdot \bar{A}_6 + 2,420 \cdot \bar{A}_7$$

где  $h$  – глубина погружения анкера, м;  $\bar{A}_j$  – среднее значение амплитуды в  $j$ -той полосе частот.

Поскольку зависимость линейная, качество аппроксимации оценивается коэффициентом множественной корреляции, значение которого в данном случае равно  $R = 0,96$ .

Как показывает анализ, общей определенной картины не выявляется. Это связано с тем, что спектры не нормированы, и здесь сказывается влияние увеличения затухания сигнала при увеличении глубины. Более достоверные выводы можно получить, рас-

смагивая нормированные спектры.

Уравнение множественной линейной регрессии для нормированных спектров имеет вид

$$h = 0,938 - 1,150 \cdot \bar{A}_1 - 0,168 \cdot \bar{A}_2 + 0,302 \cdot \bar{A}_3 + 0,756 \cdot \bar{A}_4 + 0,791 \cdot \bar{A}_5 - 2,106 \cdot \bar{A}_6 + 2,319 \cdot \bar{A}_7.$$

Значение коэффициента множественной корреляции равно  $R = 0,90$ .

При этом анализ зависимостей амплитуд показал, что при увеличении глубины, спектры сдвигаются в область более высоких частот.

### **Выводы**

В результате физического моделирования вибрационного отклика на ударное воздействие на анкер установлено, что при увеличении глубины погружения анкера в массив пород происходит смещение спектра в область более высоких частот. Полученные регрессионные уравнения позволяют рассчитать глубину погружения анкера по амплитудам спектральных составляющих отклика анкера на ударное воздействие.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вознесенский Е.А. Контроль штанговой крепи импакт-методом // ГИАБ. – № 4, 2006. – С. 111–115.
2. Вознесенский Е.А. Контроль штанговой крепи кровли подземных горных выработок // В сб.: Труды научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле». РГГУ им. С Орджоникидзе, 23–24 марта 2006 г. М.: РГГУ, 2006. – С. 170.
3. Вознесенский Е.А. Идентификация дефектных анкеров подземных выработок путем анализа акустического отклика // Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2007. – С. 365–369.
4. Захаров В.Н., Палкин А.Б., Вознесенский Е.А. Диагностика анкерной крепи методами спектрального анализа // ГИАБ, № 1, 2008. – с. 174–177.
5. Захаров В.Н., Вознесенский Е.А. Диагностика штанговой крепи кровли выработок путем спектрального анализа акустического отклика // В сб. Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. Т.1. – М.: ГЕОС, 2006. – с. 283–287.
6. Вознесенский Е.А. Моделирование волновых процессов в анкерной крепи // Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2008. – с. 273–277.
7. Вознесенский Е.А., Гишкелок И.А. Компьютерное моделирование диагностики анкерной крепи // ГИАБ, № 11, 2008. – с. 99–103.
8. Вознесенский А.С., Вознесенский В.А. Информационные критерии качества распознавания состояния объектов и выбор параметров для его осуществления // Информационные технологии, 1995, № 5. – с. 35–39.

**ГИАБ**

### **Коротко об авторе**

Вознесенский Е.А. – студент 6-го курса кафедры Физико-технического контроля горного производства Московского государственного горного университета, ftkr@mail.ru  
Moscow State Mining University, Russia

