

УДК 622.611:534

*Н.А. Пустовойтова****О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТНОГО РАЗРЕЗА МАССИВА В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНО-АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ***

Семинар № 2

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на устойчивость горных выработок является степень неоднородности структуры и свойств массива в околорыботочном пространстве, т.е. наличие литологических границ, пластов пород, обладающих различными физико-механическими свойствами, включений, трещин, полостей, нарушений, зон повышенного напряжения или разгрузки. Показателем степени неоднородности можно считать изменение плотности пород по глубине [1]. На сегодняшний день наиболее распространенным методом получения информации о плотности остается керновое бурение [2] с дальнейшими лабораторными испытаниями на образцах, объем которых должен быть представителен для характеристики горной породы как элементарного объема массива. Кроме того, данный метод является трудоемким, дорогостоящим и не всегда позволяет получить исчерпывающую информацию. К основным причинам различия свойств горных пород в образцах и массиве следует отнести: генетические, выражающиеся через петрографическую неоднородность, трещиноватость, газо- и водонасыщенность, поровое давление, напряженное состояние; механические, обусловленные способом приложения нагрузки, скоростью приложения нагрузки, характером контактов, энергоемкостью системы; технологические, зависящие от способа подготовки образцов или используемого объема массива и качества обработки поверхностей обнажения [3]. В отличие от косвенных методов, испытания на образцах не позволяют отслеживать изменение состояния массива во времени. Кроме того, при бурении происходит дальнейшее разрушительное воздействие на массив.

В связи с этим для изучения свойств и состояния горных пород в массиве перспективно

применение геофизических методов, обеспечивающих высокую информативность, эффективность и безопасность. Одним из таких методов является резонансный акустический метод [4], главными технологическими преимуществами которого являются оперативность и возможность проведения измерений непосредственно из выработок при одностороннем доступе к контролируемому участку массива. Суть резонансного метода заключается в регистрации и анализе спектра отклика исследуемой кровли на ударное возбуждение.

До настоящего времени резонансный метод использовался для выявления границ раздела в окружающем выработку массиве, связанных с особенностями его строения и наличием протяженных структурных неоднородностей. Для прогноза устойчивости выработок и принятия обоснованных технологических решений по их поддержанию указанной информации оказывается недостаточно. Как показывает анализ, ее необходимо дополнять сведениями о плотностном разрезе, поскольку относительно быстрое пространственное изменение плотности в области отражающих границ является важнейшим признаком наличия зон нарушенности и контактного ослабления. В связи с этим актуальной является задача развития резонансного акустического метода интроскопии массива горных пород в направлении повышения его информативности за счет получения информации о плотностном разрезе. В [5] при участии автора было теоретически показано, что решение этой задачи возможно за счет использования специально разработанных нетрадиционных алгоритмов обработки спектра отклика кровли на ударное воздействие. В рамках настоящей работы рассматриваются результаты экспериментальной проверки возможности построения плотностного разреза в окрестностях выработки.

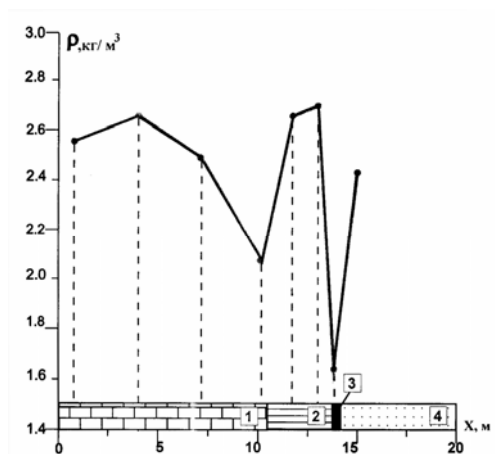


Рис. 1. Изменение плотности горных пород по глубине в функции от расстояния до свободной поверхности кровли выработки на участке 1: 1 - известняк; 2 - глинистый сланец; 3 - угольный пласт; 4 - песчаник

Эксперименты проводились в условиях угольной шахты предприятия ОАО «Ростов-уголь» Шахтинско-Несветаевского района. Испытания проводились на двух участках с существенно разной степенью нарушенности. При этом контроль фактической плотности сводился к анализу данных кернового бурения. Результаты определения плотности на образцах осуществлялось лабораторными методами, согласно [5]. Обработка сейсмограмм производилась согласно предложенной в работе [6], методике обработки акустического сигнала, позволяющей получить информацию о плотностном разрезе на расстоянии порядка 15 м от выработки.

На рисунках приведены примеры результатов расчетов распределения плотности по глубине на первом и втором исследуемых участках, соответственно. Здесь же представлены геологические колонки, полученные по результатам кернового бурения на этих участках.

На участке 1 непосредственная кровля представлена глинистым сланцем мощностью 11,0 м, основная – глинистым сланцем мощностью 4,0 м, а подошва пласта – песчаником мощностью более 10,0 м. На участке 2 мощность непосредственной кровли 1-го угольного пласта (аргиллит) – 7,4 м, а основной (известняк) – 3,0 м, далее слой аргиллита мощностью 4,5, второй угольный пласт и подошва – песчаник мощностью > 5,0 м.

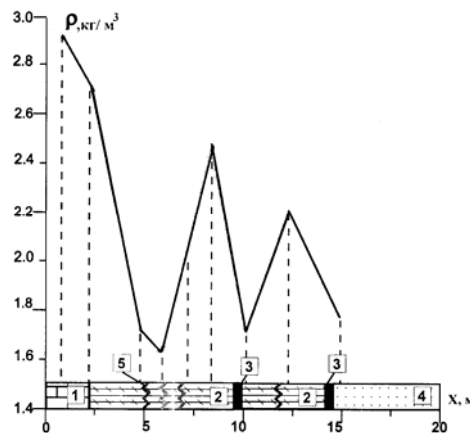


Рис. 2. Изменение плотности горных пород по глубине в функции от расстояния до свободной поверхности кровли выработки на участке 2: 1 - известняк; 2 - аргиллит; 3 - угольный пласт; 4 - песчаник; 5 - зоны нарушенности

Согласно лабораторным данным плотности пород на исследуемых участках составляют: для известняка –  $2,84 - 2,90 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , для глинистого сланца –  $2,66 - 2,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , для аргиллита –  $2,67 - 2,70 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , для песчаника –  $2,65 - 2,67 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , для угля –  $1,67 - 1,69 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Как видно из представленных на рис. 1 и 2 результатов полученные графики достаточно точно отображают изменение плотности по глубине по мере удаления от поверхности. На участке 1 резкое снижение плотности соответствует границам между пластами. На рис. 2 минимумы плотности соответствуют зонам трещиноватости, которые могут являться наиболее вероятными поверхностями обрушения. Такая зона находится в интервале 3,6–6,2 м. Границы пластов также соответствуют минимумам графика с некоторой погрешностью. Степень погрешности определения значения плотности возрастает при наличии трещин или других нарушений.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально подтверждена возможность реализации предлагаемого варианта резонансного метода, отличающегося от традиционного только характером обработки полученного отклика на ударное воздействие и при этом позволяющего получить важную для практики прогноза состояния кровли информацию о распределении плотности по глубине.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямицкий В.С. Контроль процессов горного производства Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1989.
2. Рогинский В.М. Проведение горно-разведочных выработок. Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1987.
3. Курленя М.В., Миренков В.Е. Методы расчета подземных сооружений. – Новосибирск: Наука, 1986.
4. Молев М.Д. Геофизическое прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угольных пластов. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000.
5. ГОСТ 21153.0-75 - Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний.
6. Загорский Л.С., Шкуратник В.Л., Пустовойтова Н.А. Повышение информативности резонансного акустического метода определения свойств массива горных пород. ФТПРПИ, № 4, Новосибирск, Сибирское отделение РАН, 2004.

---

### Коротко об авторах

Пустовойтова Наталья Александровна – ведущий инженер, ОАО «Проектно-изыскательский институт транспортного строительства МОСГИПРОТРАНС», г. Москва.



---

© В.Ю. Дагаев, 2005

УДК 622.831

**В.Ю. Дагаев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЕМКОСТНОГО ЗОНДА  
ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ  
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Семинар № 2

**П**ри проведении исследований состояния массива в горнотехнологических процессах возникает задача достаточно точно определения координат мерительного инструмента, погруженного в скважину. Сложность задачи заключается в необходимости проведения указанных измерений достаточно оперативно в реальных условиях шахты или другой подземной выработки.

Указанная задача обычно решается путем ручного или автоматического подсчета количества определенных меток, предварительно на-

несенных на подающую штангу, проходящих через горловину шпура в процессе погружения.

Более эффективным представляется путь прямого измерения глубины погружения инструмента в шпур с помощью емкостных методов уровнеметрии. Подобный глубиномер должен измерять электрическую емкость между металлической подающей штангой и стенками шпура.

Основными источниками погрешностей рассматриваемого метода следует считать широкий диапазон электрофизических характеристик массива, формирующего стенки шпура, и

возможные изгибы подающей штанги, приводящие к несоосности шпура и штанги. Первая проблема устраняется применением достаточно тонких подающих штанг [1] или начальной калибровкой. Вторую проблему рассмотрим подробно.

Электрическая емкость цилиндрического конденсатора с учетом несоосности определяется выражением [2]:

$$C(a, R1, R2, L) := \frac{1}{2} \cdot \left( \operatorname{acosh} \left( \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{2 \cdot R1 \cdot R2} \right) \right)^{-1} \cdot L$$

где R1 - радиус шпура; R2 - радиус штанги; a - расстояние между осями шпура и штанги (a < R1 -

**Рис. 3. Зависимость чувствительности измерительной системы к величине радиуса подающей штанги**

R2); L - глубина погружения штанги в шпур.

Зависимость емкости цилиндрического конденсатора от величины несоосности показана на рис. 1.

Как следует из графика, емкость исследуемого конденсатора резко нарастает по мере приближения поверхности штанги достаточно близко к стенке шпура. При несоосностях менее 50 %, эта зависимость довольно слабая.

С целью более подробного исследования задачи составим функцию Q(a, R1, R2, L) как отношение относительной чувствительности к изменению величины несоосности (паразитный сигнал) к относительной чувствительности к

изменениям информационного параметра - глубины погружения штанги в шпур.

Чувствительности измерительной системы к изменениям какого - либо параметра определяются соответствующими производными:

$$\frac{d}{da} C(a, R1, R2, L) \rightarrow \frac{4}{a \cosh \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2} \right)^2} L^2 \times$$

$$\times \frac{a}{R1R2 \left( 2 \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2} - 4 \right)^{\frac{1}{2}} \left( 2 \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2} + 4 \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{d}{dL} C(a, R1, R2, L) \rightarrow \frac{1}{2a \cosh \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2} \right)^2}$$

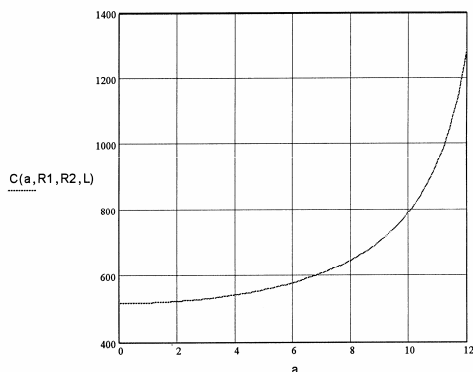
тогда:

$$Q(a, R1, R2, L) := \frac{\frac{d}{da} C(a, R1, R2, L)}{R1} \cdot \left( \frac{\frac{d}{dL} C(a, R1, R2, L)}{L} \right)$$

**Рис. 1. Зависимость емкости "стенки шпура - поверхность штанги" от величины несоосности. Конструктивные размеры в мм:**

R1 := 21 L := 100( R2 := 8

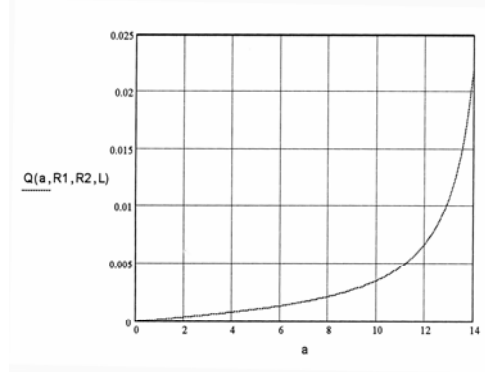
a := 0, 0.1.. [(R1 - R2) - 1]



**Рис. 2. Зависимость отношения паразитного параметра к информационному в функции величины несоосности:**

R1 := 21 R2 := 6

L := 1 a := 0, 0.1.. [(R1 - R2) - 1]



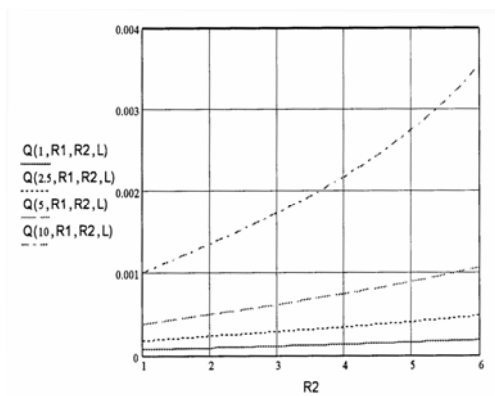
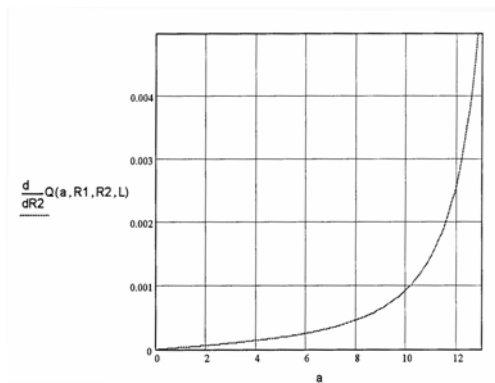


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности измерения глубины погружения подающей штанги в шпур в функции радиуса штанги при четырех значениях несоосности 1, 2,5, 5, 10 мм:  $R1 := 21$   $R2 := 1, 1.1.. 6$

$$Q(a, R1, R2, L) \rightarrow \frac{4}{a \cosh\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2}\right)} L^2 \times$$

$$\times \frac{a}{R1^2 R2 \left(2 \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2} - 4\right)^{\frac{1}{2}} \left(2 \frac{R1^2 + R2^2 - a^2}{R1R2} + 4\right)^{\frac{1}{2}}}$$

График полученной функции в указанном ниже диапазоне изменений величины несоосности показан на рис. 2.

Из графика следует, что погрешность от смещения оси подающей штанги в заданных условиях остается менее 0.5% вплоть до величины смещений до 80% от радиуса шпура.

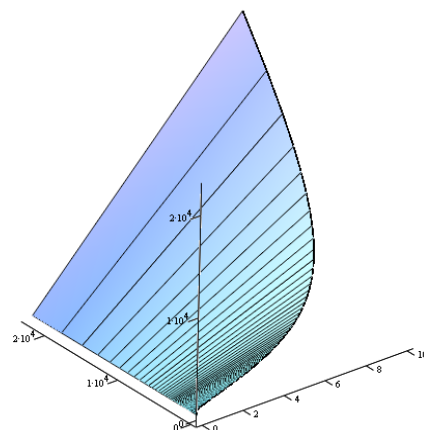


Рис. 5. Зависимость величины функции  $Q$  от величины несоосности и радиуса подающей штанги в трехмерном виде

Указанная погрешность значительно нарастает в непосредственной близости поверхности штанги от стенки шпура. Для исключения этого явления целесообразно покрыть подающую штангу полимерным материалом, толщиной порядка 1–2 мм, как это было предложено в [1].

Представляет значительный интерес оценка требований к основному конструктивному параметру - радиусу подающей штанги. Составим функцию чувствительности измерительной системы к вариациям радиуса подающей штанги, вычислив соответствующую производную. График полученной функции показан на рис. 3.

Из анализа графика следует, что величина радиуса штанги существенна лишь при больших отклонениях оси штанги от оси шпура.

Исследуем подробнее зависимость функции качества измерительной системы от радиуса подающей штанги, приняв его за независимую переменную. Соответствующий график для четырех значений величины несоосности показан на рис. 4.

На рис. 5 показана зависимость величины  $Q$  от радиуса подающей штанги  $R2$  и величины несоосности  $a$  в трехмерном виде.

Из приведенных графиков следует, что при малых значениях величины несоосности, качество системы практически не зависит от радиуса подающей штанги. Величина радиуса подающей штанги становится существенной лишь при значительных отклонениях оси штанги от оси шпура. Однако и в этих услови-

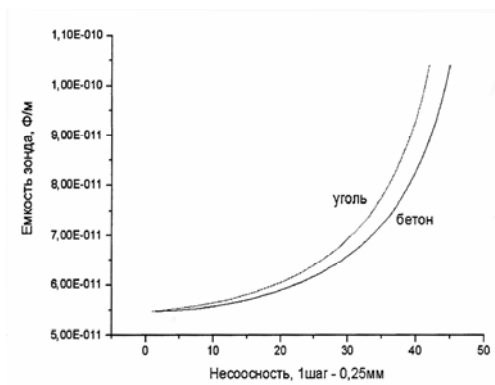


Рис. 6. Зависимости емкости «штанга – стенки шпура» от величины несоосности для двух сред для штанги, имеющей диэлектрическое покрытие

являясь эта зависимость достаточно слабая и ей можно пренебречь. Другими словами, радиус штанги следует выбирать из других соображений, например, из соображений механической прочности.

С целью количественных оценок погрешностей исследуемого метода было проведено моделирование измерительной системы средствами программы "ELCUT".

Радиус шпура принимался равным 21 мм, радиус подающей штанги - 9,5 мм по покрытию, толщина покрытия - 1 мм, его диэлектрическая проницаемость - 3. График расчетного значения электрической емкости штанги относительно стенок шпура в зависимости от величины несоосности для мас-

сива с диэлектрическими характеристиками угля и бетона представлен на рис. 6

Из результатов моделирования следует:

Величина емкости штанги в этих условиях составляет величину 60,5 пФ/м.

Емкость штанги при ее касании стенки шпура по всей длине составляет 123 пФ/м. Относительная погрешность, связанная с плотным прилеганием штанги к стенке шпура по всей длине, - порядка 50 %. Погрешность порядка 1 % возникает при длине участка касания около 15 см.

При проведении скважинных измерений емкостным методом следует учитывать наличие соединительного кабеля в шпуре, как правило, располагающегося рядом с подающей штангой. Учет наличия в шпуре кабеля с заземленным экраном, диаметром 6 мм приводит к увеличению емкости штанги на 5 пФ/м, что создает дополнительную погрешность около 10 %, однако эта погрешность устраняется путем начальной калибровки измерительной системы, или размещением кабеля во внутренней полости штанги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапивин А.М. Автоматизированный контроль и управление уровнем жидких и сыпучих материалов на основе диэлькометрического метода измерения. Кандидатская диссертация. МГТУ, 2003.
2. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Сборник задач по электродинамике. - М. Наука 1976.

#### Коротко об авторах

Дагаев Ю.В. – аспирант, кафедра «Физико-технический контроль процессов горного производства», Московский государственный горный университет.



© А.Ю. Бауков, С.В. Павлов,  
2005

А.Ю. Бауков, С.В. Павлов

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ ПЛАСТИН  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПТИМИЗАЦИИ  
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Семинар № 2

**Н**есмотря на то, что виброакустический метод неразрушающего контроля в настоящее время находит все большее практическое применение в самых различных областях техники [1], его теоретические основы недостаточно развиты. Вследствие этого при реализации данного метода имеют место сложности во время интерпретации результатов экспериментальных исследований, что связано в ряде случаев с методическими ошибками, возникающими при проведении измерений на различных технических объектах. В особенности данные проблемы возникают при изучении многослойных структур, так как в этом случае спектр виброакустического импульса при наличии внутренних дефектов конструкций различного масштаба имеет весьма сложную структуру и идентификация соответствующих спектральных выбросов в общем спектре представляет значительную проблему [2].

С целью оптимизации методики реализации виброакустического контроля слоистых структур было проведено компьютерное моделирование колебаний упругих пластин как в их свободном состоянии, так и лежащих на упругом основании. В связи с тем, что для корректировки методики виброакустического контроля достаточны качественные результаты, при проведении исследований применялось приближенное моделирование процессов изгибных колебаний упругих пластин, а так же использовалась простейшая модель упругого основания.

Так согласно общей теории колебательных систем с распределенными параметрами [3] при возбуждении упругой пластины гармонической внешней силой  $F(t) = F_0 e^{j\omega t}$  изгибные колебания пластины на ее основных модах номера  $\nu$  можно представить как сумму коле-

баний осцилляторов с одной степенью свободы с эквивалентными параметрами, резонансные частоты которых соответствуют частотам изгибных мод пластины  $f_\nu$ . При этом колебательная скорость пластины на  $\nu$ -й моде определяется

$$\xi_\nu = \frac{F_0}{R_\nu^* + jM_\nu^* + \frac{1}{j\omega K_\nu^*}},$$

(1)

где  $M_\nu^*$ ,  $K_\nu^*$ ,  $R_\nu^*$  - эквивалентные масса, податливость и сопротивление системы на  $\nu$ -й моде, конкретные выражения для которых можно найти в работе [3].

В качестве модели упругого основания может быть выбрана модель Г.Б. Муравского [4], в которой ее эквивалентные колебательные параметры: жесткость основания  $C$  и сопротивление основания  $\mu$  при гармонических колебаниях могут достаточно просто определяться упругими характеристиками реального основания:

$$C = 1,53 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \frac{E_0}{1 - \sigma_0^2};$$

$$\mu = \frac{0,478 \sqrt{(1 + \sigma_0)(3 - 2\sigma_0)}}{(1 - \sigma_0^2)} \cdot S \cdot \sqrt{\rho_0 E_0},$$

(2)

где  $E_0$ ,  $\rho_0$ ,  $\sigma_0$  - модуль Юнга, плотность и коэффициент Пуассона материала основания;  $S$  - площадь пластины, соприкасающейся с основанием.

Тогда с учетом правила составления эквивалентных схем колебательных систем модуль колебательной скорости центра пластины, лежащей на упругом основании, при возбуждении ее на текущей частоте силы  $\omega$  для пер-

вой изгибной моды пластины  $\omega_{11} = \omega_1$  определяется следующим образом:

$$|\xi_{loc}| = \frac{F_0}{\sqrt{\left[\omega^2 \cdot \eta \cdot \frac{M_1^*}{\omega^2} + \mu\right]^2 + \omega^2 \left[1 - \frac{1 + C \cdot K_1^*}{\omega^2 \cdot K_1^* \cdot M_1^*}\right]^2}}, \quad (3)$$

где  $\eta$  - коэффициент потерь материала пластины;  $M_1^*$ ,  $K_1^*$  - эквивалентные масса и податливость пластины на первой моде.

Тогда степень ослабления амплитуды колебательной скорости пластины вследствие эффекта демпфирования ее изгибных колебаний для первой моды определится коэффициентом демпфирования

$$d = \frac{|\xi_1|}{|\xi_{loc}|}. \quad (4)$$

Так как в широкой практике контроля применяется импульсный вариант виброакустического метода, необходимо исследовать колебательные процессы в случае ударного воздействия на упругую пластину. Общее решение такой задачи, особенно для пластины, лежащей на упругом основании, чрезвычайно сложно, поэтому был применен стандартный спектральный метод, заключающийся в расчете модуля спектральной плотности отклика объекта на ударное воздействие.

Так модуль спектральной плотности отклика определялся

$$|N(f)| = |M(f)| \cdot |S(f)|, \quad (5)$$

где  $|S(f)|$  - модуль спектра ударного импульса  $F(t)$ ;  $|M(f)|$  - модуль амплитудно-частотной характеристики объекта в случае колебаний пластины в свободном состоянии или на упругом основании.

В качестве ударного импульса силы, согласно теории Герца [5], была выбрана функция

$$F(t) = \begin{cases} A \sin \frac{\pi t}{\tau} \text{ нпу} & 0 \leq t \leq \tau; \\ 0 \text{ нпу} & t > \tau, \end{cases} \quad (6)$$

модуль спектральной плотности которой имеет вид:

$$|S(\omega)| = \frac{2A\tau}{\pi} \frac{\cos \frac{\omega\tau}{2}}{1 - \left(\frac{2}{\pi} \frac{\omega\tau}{2}\right)^2}, \quad (7)$$

где  $\tau$  - длительность импульса соударения ударной системы с объектом, зависящая от приведенной массы соударяющихся тел  $m$ , от их относительной скорости движения  $V_0$ , от упругих характеристик тел и радиусов кривизны соударяющихся поверхностей.

В связи с тем, что экспериментально при реализации данного метода измерение виброакустического импульса производят как электродинамическими сейсмоприемниками, так и пьезоэлектрическими аксельрометрами, имеет определенный интерес исследование не только колебательной скорости изгибных колебаний пластины, но и ее колебательного ускорения в случае ударного воздействия на пластину. Для этого по полученному значению спектральной плотности  $|N(f)|$  с использованием обратного преобразования Фурье вычислялся отклик на ударное воздействие  $V(t)$  и с помощью процедуры дифференцирования определялось колебательное ускорение пластины  $a(t)$  и далее с помощью прямого преобразования Фурье рассчитывался модуль спектральной плотности колебательного ускорения виброакустического импульса  $|S_a(t)|$ .

По результатам таких вычислений, выполненных для свободных пластин и пластин, лежащих на основании, определялись коэффициенты демпфирования, полученные по временным функциям отклика объекта исследования  $d_A^i$  и по спектральным характеристикам откликов на максимуме модуля спектральной плотности -  $d_s^i$ .

С целью выбора оптимальных режимов исследования многослойных объектов с внутренними расслоениями отдельных слоев конструкции компьютерное моделирование выполнялось для двух типов упругих пластин с геометрическими размерами, характерными для реальных строительных объектов: 1) 1,5x1x0,23 м; 2) 0,2x0,2x0,1 м. В качестве материала упругой пластины был выбран бетон с соответствующими средними характеристиками:



$$E = 1,225 \cdot 10^{10} \frac{H}{M^2}; \sigma = 0,17;$$

$$\rho = 2,45 \cdot 10^3 \frac{KZ}{M^3}; \eta = 0,261$$

При изучении особенностей изгибных колебаний пластины в процессе моделирования величина коэффициента потерь уменьшалась на порядок ( $\eta_1 = 0,0261$ ). Упругие эквивалентные характеристики основания были выбраны как типичные для консолидированного грунтового основания:

$$E_{oc} = 8,18 \cdot 10^7 \frac{H}{M^2}; \sigma_0 = 0,34; \rho_0 = 1,65 \cdot 10^3 \frac{KZ}{M^3}.$$

Для возможности изучения влияния на степень демпфирования изгибных колебаний пластины свойств основания, эквивалентный упругий модуль основания при моделировании выбирался равным:

$$E_{01} = 8,18 \cdot 10^7 \frac{H}{M^2}; E_{02} = 8,18 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2};$$

$$E_{03} = 8,18 \cdot 10^{10} \frac{H}{M^2}$$

Изменение характера ударного возбуждения упругой пластины учитывалось путем варьирования в процессе моделирования длительности ударного импульса, которая принимала следующие значения:

$$\tau_1 = 0,1c; \tau_2 = 0,01c; \tau_3 = 0,004c; \tau_4 = 0,001c;$$

$$\tau_5 = 0,0001c; \tau_6 = 0,0005c$$

В случае детализации получаемых результатов для величины  $\tau_i$  выбирались промежуточные значения.

Компьютерное моделирование выполнялось в среде Mathcad, версия 2001 двумя способами: а) способом ранжированных переменных при аналитическом задании модуля спектральной плотности ударного импульса согласно выражению (7); б) способом цифровой обработки с помощью быстрого прямого и обратного преобразования Фурье с использованием соответствующих операторов  $fft(p)$  и  $ifft(SP)$  при аналитическом задании функции ударного воздействия в виде (6). В обоих случаях ударное воздействие характеризовалось единичной амплитудой. Результаты расчетов выводились в виде графиков функциональных зависимостей. Для упрощения расчетов собственных частот изгибных коле-

баний пластин на различных модах в качестве граничных условий был выбран случай прямоугольной пластины, свободно опертой по контуру. Амплитудно-частотные характеристики колебательных систем  $|M(f)|$  рассчитывались согласно выражениям (1) и (3) для конкретных параметров системы в каждом варианте процесса моделирования.

В результате таких исследований, во-первых, было получено количественное и качественное подтверждение общих закономерностей изгибных колебаний пластин в свободном состоянии и при демпфировании этих колебаний упругим основанием. Так расчет динамических характеристик процесса изгибных колебаний пластин на четырех первых модах

$$( \quad \nu = 1 \rightarrow \omega_{11}; \nu = 2 \rightarrow \omega_{12}; \nu = 3 \rightarrow \omega_{21}; \nu = 4 \rightarrow \omega_{22} )$$

позволил сделать вывод о правомерности проведения дельнейших исследований только для основной моды пластины ( $\nu = 1 \rightarrow \omega_{11}$ ). Это объясняется тем, что, как показали расчеты, амплитуда непрерывных изгибных колебаний на основной моде  $f_{11}$  не менее чем на порядок выше амплитуды колебаний на каждой последующей моде. Кроме того амплитуды спектральных составляющих отклика пластины на ударное воздействие в свободном состоянии и пластины, лежащей на упругом основании, на частоте основной моды от полутора до двух порядков превышают аналогичные амплитуды спектральной плотности виброимпульса на последующих модах. И, наконец, коэффициент демпфирования изгибных колебаний пластины основанием на основной моде примерно в 5 раз больше, чем на модах с более высокими номерами.

Изменение параметров затухания в материале пластины  $\eta$  так же дает результаты, соответствующие классическим эффектам. Так изменение величины  $\eta$  от 0,261 до 0,0261 у пластины первого типоразмера при  $\tau = 0,004c$  приводит к увеличению амплитуды колебаний пластины на резонансной частоте в 5,3 раза и к значительному уменьшению ширины полосы пропускания резонансного выброса (в 8,85 раза). Также наблюдается увеличение в 1,31 раза амплитуды спектральной плотности виброимпульса в случае пластины, лежащей на упругом основании ( $E_0 = 8,18 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$ ).

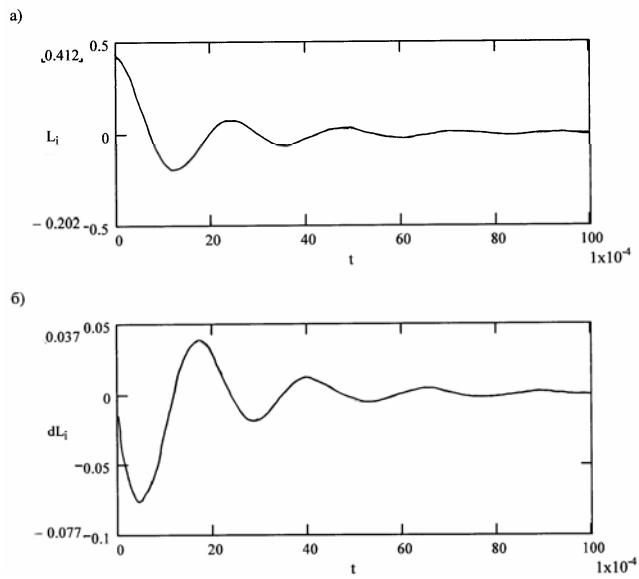


Рис. 1. Спектральная плотность виброимпульса для колебательной скорости пластины №1 ( $\tau = 0,004$  с): а) – в свободном состоянии; б) – лежащей на упругом основании ( $E_0 = 8,18 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$ )

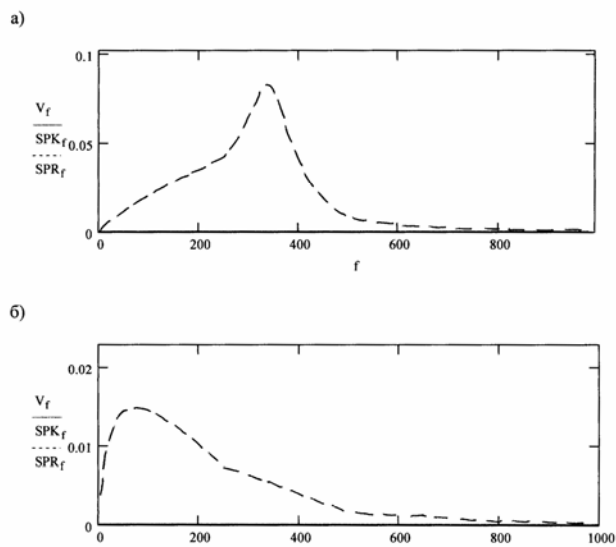


Рис. 2. Осциллограмма виброакустического отклика пластины в свободном состоянии для колебательной скорости (а) и колебательного ускорения (б)

При этом имеет место перемещение максимума спектра в область низких частот на 200 процентов. И, наконец, почти на порядок увеличивается коэффициент демпфирования на собственной частоте  $f_{11}$ .

Совместное изучение процессов демпфирования колебаний пластины с размерами  $1,5 \times 1,0 \times 0,23$  м упругим основанием, проведенное для колебательной скорости пластины и колебательного ускорения показало, что оценка коэффициента демпфирования по этим двум характеристикам достаточно равноценна. Однако коэффициент демпфирования, рассчитанный на основании спектральной плотности виброимпульса на частотах максимума обоих спектров (рис. 1) по колебательному ускорению ( $ddS$ ) превышает аналогичный коэффициент демпфирования для колебательной скорости  $dS$ . Причем чем более жесткое основание, тем выше указанная разница относительных значений  $\alpha_i = \frac{ddS_i}{dS_i}$ .

Отношение коэффициентов демпфирования по ускорению и скорости, определяемых на частоте  $f_i$  собственной моды пластины в свободном состоянии  $\beta = \frac{ddS_{f_i}}{dS_{f_i}}$  примерно одинаково и

в этом случае коэффициент демпфирования по скорости несколько превышает коэффициент демпфирования по ускорению.

Аналогичная оценка для коэффициента демпфирования, определяемого на основании первых максимумов амплитуды виброимпульсов колебательных скорости  $dA$  и ускорения  $dda$  (рис. 2) не выявила однозначной закономерности, как в преды-

$f_{11}, \Gamma y$	$E_0, \frac{H}{M^2}$	$\tau$	$\eta$	$dS$	$ddS$	$\alpha$	$dS_{f_1}$	$ddS_{f_1}$	$\beta$	$dA$	$ddA$	$\alpha A$
339	$8,18 \cdot 10^7$	0,004	0,261	2,63	3,46	1,31	5,421	5,256	0,969	1,391	2,42	1,74
339	$8,18 \cdot 10^8$	0,004	0,261	5,75	8,8	1,53	39,5	25,6	0,647	3,92	7,11	1,81
339	$8,18 \cdot 10^{10}$	0,004	0,261	17,04	30,29	1,78	55,35	55,12	0,996	12,29	2,59	0,21

дущих случаях. Пример результатов таких расчетов представлен в таблице.

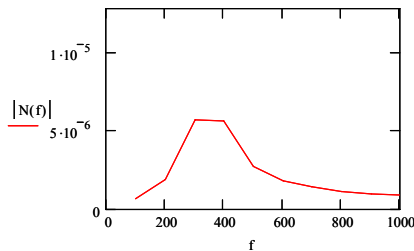
Значительный интерес при выборе оптимальных условий проведения контроля, особенно в случае многослойных конструкций, представляют исследования особенностей возбуждения изгибных колебаний пластины. С этой целью для пластин с двумя указанными типоразмерами были проведены расчеты спектров откликов на ударное воздействие при различной длительности ударного импульса  $\tau$ . Так для пластины с первым типоразмером  $\tau$  при расчетах изменялась от 0,1 с до 0,0001 с. Примеры зависимости спектра отклика на ударное воздействие для свободно колеблющейся пластины  $S_N(f)$  и для пластины на упругом основании ( $E_0 = 8,18 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$ )  $S_H(f)$  для импульсов с  $\tau = 0,0001; 0,001; 0,01$  с представлены на рис. 4 и 5.

Из представленных примеров спектрограмм виброимпульсов видно, что несмотря на то, что для всех смоделированных условий возбуждения частотная зависимость коэффици-

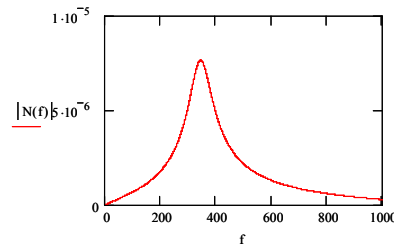
циента демпфирования  $d(f)$  совершенно одинаковая (рис. 5), характер спектров виброимпульсов различный. В большинстве случаев спектры имеют сложный вид и в них из-за причин наличия дополнительных спектральных выбросов весьма трудно выделить основной максимум, по величине которого согласно методики виброакустического контроля производится выявление наличия дефектов. Кроме того и амплитуда основных максимумов спектральной плотности виброимпульса различна и зависит от величины  $\tau$ .

Исходя из указанных особенностей зависимости  $S_N(f)$  и  $S_H(f)$  от  $\tau$  с целью оптимизации процессов виброакустических измерений для каждого характерного контролируемого объекта может быть выбран оптимальный режим возбуждения конструкции, при котором в спектре отклика наблюдается единственный основной амплитудный выброс и его величина, по-возможности, максимальна. Так для рассмотренного примера объекта таким оптимальным режимом является возбуждение при величине  $\tau = 0,001$  с.

а)



б)



в)

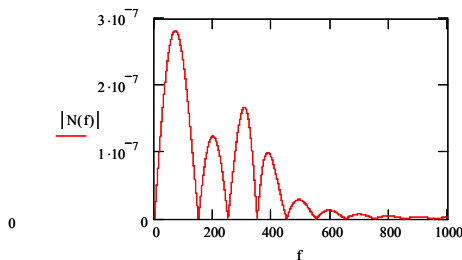


Рис. 3. Спектральная плотность виброакустического отклика пластины (1,5x1,0x0,23 м) в свободном состоянии: а)  $\tau = 0,0001$ ; б)  $\tau = 0,001$ ; в)  $\tau = 0,01$

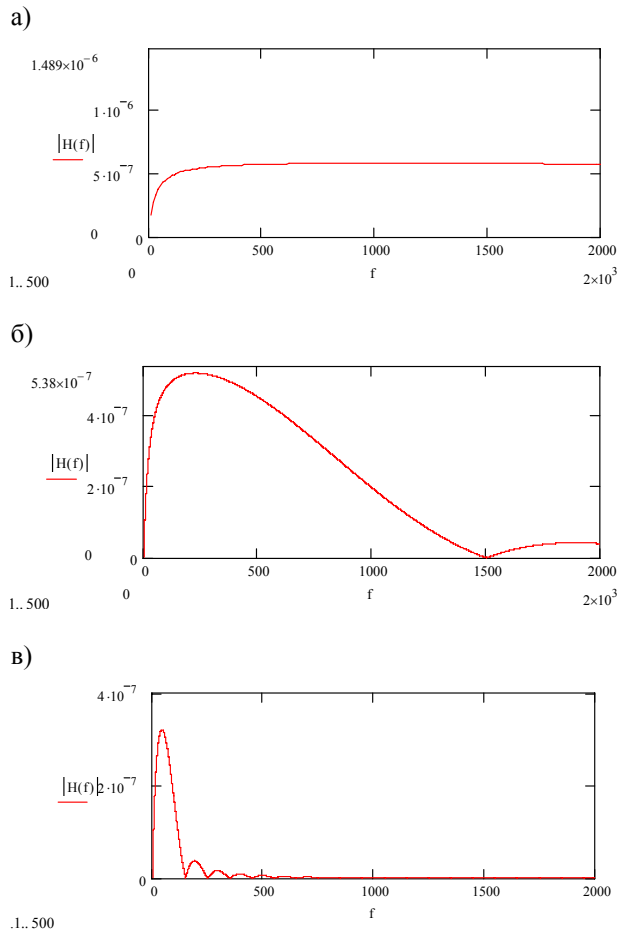


Рис. 4. Спектральная плотность виброакустического отклика пластины ( $1,5 \times 1,0 \times 0,23$  м), лежащей на упругом основании ( $E_0 = 8,18 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$ ): а)  $\tau = 0,0001$ ; б)  $\tau = 0,001$ ; в)  $\tau = 0,01$

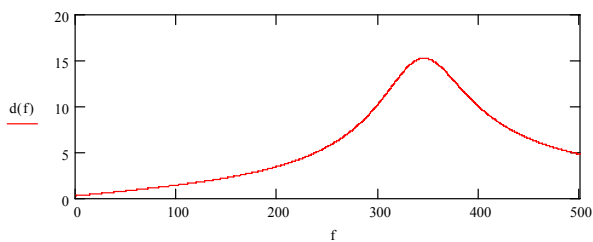


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента демпфирования для пластины ( $1,5 \times 1,0 \times 0,23$  м), лежащей на упругом основании ( $E_0 = 8,18 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$ )

Аналогичное моделирование колебательных процессов было проведено и для пластины с размерами  $0,2 \times 0,2 \times 0,1$  м, характерными для типичных внутренних расслоений исследуемых слоистых конструкций. При этом наблюдаются те же закономерности, что и в предыдущем случае. Однако для тонких расслоений отсутствие дополнительных максимумов в спектре виброимпульса наблюдается при  $\tau \geq 0,0001$  с. Кроме того, здесь более ярко выражена зависимость амплитуды максимума спектральной плотности виброимпульсов от  $\tau$ . Оптимальной величиной  $\tau$  для таких расслоений, исходя из приведенных выше требований, может быть выбрана величина  $\tau = 0,00005$  с, что значительно превышает оптимальную величину  $\tau$  при возбуждении толстых плит.

Отсюда следует практический вывод о необходимости при проведении виброакустического контроля многослойных конструкций использования ударных систем, создающих возбуждающие импульсы с различной величиной их длительности, что может быть реально достигнуто вариацией параметров ударной системы, представленных в выражении (7).

В заключение необходимо отметить, что полученные в результате компьютерного моделирования количественные соотношения хорошо согласуются с результатами модельных экспериментальных исследований [2], о также с интуитивными методическими выводами, сделанными при натурных экспериментальных обследованиях строительных объектов с использованием виброакустического метода контроля [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков А.Ю. Виброакустический метод неразрушающего контроля слоистых структур и конструкций объектов подземного строительства. Доклад на XV сессии РАО. Нижний Новгород. – Сборник трудов XV сессии Российского Акустического общества, 2004.
2. Бауков Ю.Н., Павлов С.В., Бауков А.Ю. Экспериментальные исследования изгибных колебаний упругих пластин применительно к оптимизации виброакустического метода контроля. // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, 2004, №4.
3. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971.
4. Ямщиков В.С., Бауков Ю.Н., Сидоров Е.Е. Горная геофизика. Виброакустический метод. – М.: МГИ, 1991.
5. Гольдсмит Р. Удар. – М.: Мир, 1965.
6. Бауков А.Ю. Практический опыт применения виброакустического метода при неразрушающем контроле слоистых конструкций подземного городского строительства. // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, 2004, №6.

### **Коротко об авторах**

Бауков А.Ю. – аспирант,  
Павлов С.В. – студент,  
Московский государственный горный университет.



© А.С. Вознесенский, Д.В. Тамарин,  
М.Н. Тавостин, В.В. Набатов,  
Е.Н. Коновалов, 2005

УДК 621.37:534:622.363.51

**А.С. Вознесенский, Д.В. Тамарин, М.Н. Тавостин,  
В.В. Набатов, Е.Н. Коновалов**

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ГИПСЕ ПРИ ЕГО ДЕФОРМИРОВАНИИ**

Семинар № 2

Введение

**В** настоящее время наибольшее внимание при деформировании и нагружении горных пород уделяется таким эмиссионным процессам, как акустическая эмиссия (АЭ) и естественное электромагнитное излучение (ЕЭМИ). Гипс является уникальной горной породой с высоким диэлектрическими свойствами, тангенс угла диэлектрических потерь мал (0,05

и менее) и диэлектрическая проницаемость около 6. Как показывают натурные исследования, естественное электромагнитное излучение в гипсе связано с процессами трещинообразования и может характеризовать степень устойчивости, а также процессы разрушения в целиках и кровле подземных гипсовых месторождений.

\*Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-1467.2003.5)

**Рис. 1. Торцы образцов гипса, на которых производились испытания**



Однако для правильной интерпретации результатов таких измерений необходимо установить взаимосвязи электромагнитных сигналов с механическими характеристиками (нагрузками и деформациями) горных пород, стадиями деформирования, а также с параметрами акустической эмиссии. Совместное использование этих явлений позволит дать более полную картину и повысить достоверность прогноза устойчивости конструктивных элементов системы разработки.

В данной работе осуществляется установление закономерностей изменения АЭ и ЕЭМИ при деформировании и нагружении образцов гипсосодержащих пород в лабораторных условиях.

1. Образцы, установки для нагружения и регистрационные системы

В данной работе проводились эксперименты на образцах гипса Новососковского месторождения. Диаметр образцов 40-42 мм, высота 80 мм. Внешний вид двух торцов представлен на рис. 1. Здесь можно отметить немонолитный характер строения, что характеризует склонность к образованию породных блоков при деформировании.

При работе использовались следующие установки:

1. Пресс EU100, камера всестороннего сжатия (стабилометр) БУ21. Камера позволяет проводить испытания образцов горных пород при одноосном и сложном напряженном состояниях.

2. Система «Прочность» (МГГУ - ООО

«Подземгазпром»), регистрирующая осевую и боковую нагрузки на образец, его продольные и поперечные деформации. Кроме того, она позволяет регистрировать ААЭ в полосе частот  $\Delta F=20$  кГц – 1 МГц.

3. Многоканальная система A-Line 32D («Интерюнис»),  $\Delta F=30$  кГц-500 кГц, регистрирует:

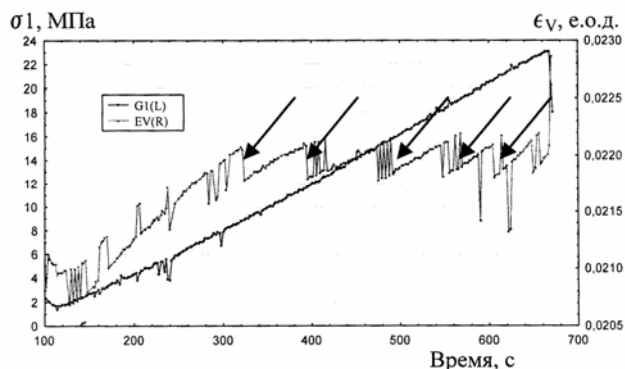
- полный сигнал АЭ объемом 5000 отсчетов каждый;
- ААЭ;
- амплитуду сигнала АЭ в уровнях АЦП и дБ по отношению к 1 мкВ входного сигнала;
- энергию сигнала АЭ в дБ;
- суммарную АЭ (суммарное количество актов АЭ от начала регистрации);
- другие параметры АЭ.

В процессе испытаний производится запись указанных величин на диски компьютеров. Обработка показаний производится после испытаний. Для обработки используется программное обеспечение, написанное в среде Mathcad, а также ряд специализированных прикладных компьютерных программ.

2. Порядок проведения испытаний и результаты

Испытание образца гипса проводилось при многоканальной регистрации АЭ и ЭМИ двумя системами. Система «Прочность» регистрировала параметры нагружения и деформирования образца. Система «A-Line 32 D» регистрировала АЭ по двум каналам (номера 2 и 3),

причем первый датчик располо-



**Рис. 2. Зависимость объемной деформации и осевых напряжений от времени**

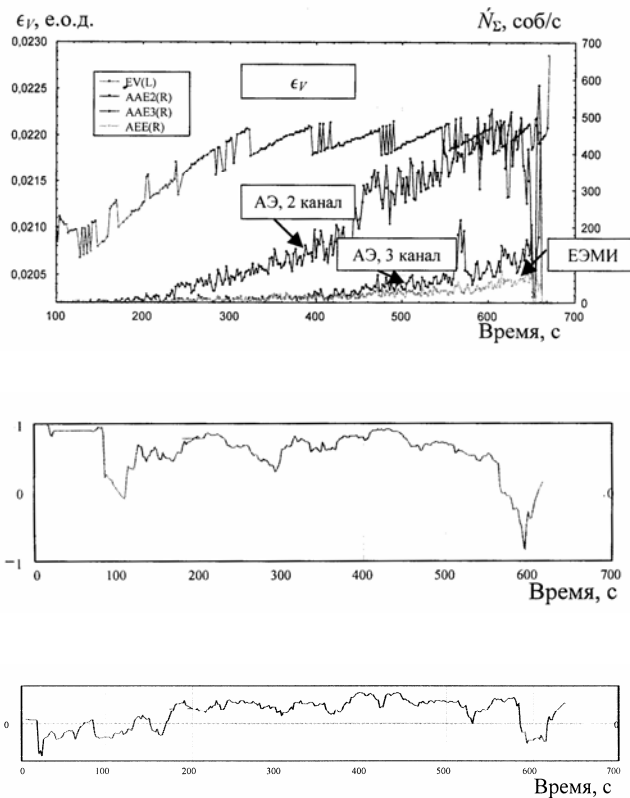


Рис. 3. Зависимость объемной деформации и активности эмиссии от времени

Рис. 4. Коэффициент корреляции между 2 и 3 каналом акустической эмиссии в зависимости от времени наблюдения

Рис. 5. Коэффициент корреляции между активностью эмиссионных процессов, зарегистрированных первым каналом АЭ и ЭМИ

Такой характер деформирования обусловлен отмеченной ранее структурой строения пород и проявляется себя при одноосном деформировании без бокового давления.

Для получения полной кривой деформирования необходимо производить испытания в условиях всестороннего сжатия, однако одноосные испытания тоже позволяют получить ряд зависимостей и характеристик. При этом режиме нагружения напряженное состояние близко к тому, которое испытывают породы в краевой части массива на контуре обнажения, что позволяет использовать такие результаты для интерпретации результатов натуральных измерений, полученных непосредственно в выработках.

### 3. Анализ полученных результатов

По графикам, изображенным на рисунке 3, можно отметить, что в целом изменения AAЭ по второму и третьему каналу близки друг другу.

В процессе увеличения нагрузки на первых стадиях наблюдается возрастание AAЭ. Такой характер изменения этой величины наблюдается вплоть до 600 с. Начиная с этого момента, происходит переход к противоположному изменению AAЭ, регистрируемой верхним и нижним преобразователями, для верхнего преобразователя наблюдается уменьшение, а для нижнего – ее увеличение.

Это может быть объяснено тем, что монолитная структура подвергается делению на отдельные блоки, воспринимающие нагрузку раздельно друг от друга. При этом в определенные моменты нагрузку воспринимает и разрушается один блок, а в другие – другой. Если

жен на верхней крышке, осуществляющей давление на верхнюю грань образца, а второй – на нижней. Датчик ЭМИ размещался непосредственно на образце, и его показания регистрировались по каналу №4. Опыт проводился при одноосном нагружении образца.

Ниже на графиках представлены результаты испытаний образца гипса при одноосном сжатии без бокового давления. На рис. 2 изображены зависимости изменения нагрузки (осевых напряжений) и объемной деформации образца. Эти графики являются основными при описании хода эксперимента и позволяют устанавливать стадии деформирования.

Как следует из рис. 2, при линейном возрастании нагрузки деформации по мере нарастания демонстрируют скачкообразные сбросы (на рисунке отмечены наклонными стрелками). Это может быть объяснено образованием и сдвижением породных блоков в осевом направлении, что не дает образцу расширяться в стороны.

на первых стадиях наблюдается высокая степень связи процессов регистрируемых в разных частях образца, то при приближении к разрушению наблюдается ослабление этой связи и противоположный характер изменения процессов в разных областях.

Степень и характер связи процессов ААЭ по второму и третьему каналу могут быть оценены с помощью коэффициента корреляции (рис. 4), характеризующего степень линейной связи между величинами.

В зоне запредельного деформирования после момента времени 570 с наблюдаются отрицательные значения коэффициента корреляции, что характеризует противоположное изменение ААЭ.

При его положительных и достаточно больших по величине значениях коэффициента корреляции можно сделать вывод о хаотической стадии процесса разрушения, связанного с увеличивающейся нагрузкой. При этом процессы разрушения происходят одинаково в разных областях, и эти области одинаково воспринимают нагрузку. При отрицательных значениях коэффициента корреляции можно сделать вывод о кластеризации процессов разрушения в определенных областях. Снижение интенсивности процесса разрушения в одной области будет сопровождаться его увеличением в другой.

Переход коэффициента корреляции в отрицательную область говорит о том, что образец разломился на части, и теперь каждая из них работает как отдельный объект.

На рис. 3 представлен также результат измерения ЕЭМИ. Механизм образования электромагнитной эмиссии связан с преобразованием накопленной упругой энергии в другие виды. Методические трудности при осуществлении лабораторных экспериментов по регистрации электромагнитной эмиссии нагруженных образцов горных пород связаны с необходимостью тщательной экранировки образцов от внешних электромагнитных помех. Вычисления коэффициента корреляции ААЭ и активности ЕЭМИ дают картину, изображенную на рис. 5.

Эксперимент показал, что гипс склонен к электромагнитному излучению при нагружении и деформировании. На графике рис. 3 видны участки роста ЭМИ и участки его стабилизации. Это объясняется процессами разрушения в зонах локального напряжения. Максимум уровня эмиссии соответствует моменту деформации перед разрушением образца.

#### Выводы

1. Лабораторные исследования показали, что гипс склонен к электромагнитной эмиссии при нагружении.

2. Данные испытания позволяют сделать вывод о высокой информативности данных методов на различных стадиях деформирования.

3. Установлено, что стадия запредельного деформирования сопровождается пространственным перемещением области разрушения; это проявляется в неодинаковом изменении активности акустической эмиссии по регистрационным каналам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский А.С., Набатов В.В. Оценка трещинообразования в массиве с гипсосодержащими породами методом регистрации электромагнитного излучения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2003, №3, с. 3-12.

2. Вознесенский А.С., Набатов Вяч. В., Набатов Вл. В. Методика оценки напряженно-деформированного состояния массива пород методом регистрации электромагнитного излучения // Известия вузов Горный журнал. 2004, №5, с. 16-23.

#### Коротко об авторах

Вознесенский Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор,  
Тамарин Денис Владимирович – аспирант,  
Набатов Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, ст. преподаватель  
Московский государственный горный университет.

Тавостин Михаил Николаевич – кандидат технических наук, зав. лаб. ООО «Подземгазпром»,  
Коновалов Евгений Николаевич – главный инженер шахты ОАО «Гипс Кнауф Новомосковск».



Г.А. Воронов

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ  
ХРАНИЛИЩ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Семинар № 2

## Введение

**Н**а территории России имеется большое количество соленосных бассейнов, которые могут быть использованы для сооружения бесшахтных резервуаров способом растворения каменной соли через буровые скважины. Особенностью таких подземных резервуаров является длительный срок их эксплуатации, отсутствие крепления, большой объём и сложная форма контура, значительная глубина заложения. Принятие адекватных проектных решений по проблеме длительной устойчивости подземных резервуаров в соляных отложениях при их строительстве и эксплуатации осложняется особенностями механического поведения каменной соли, склонной к проявлению реологических свойств, в зависимости от вида напряженного состояния и величин действующих в приконтурном массиве напряжений. Отраслевые нормативные документы, регламентирующие проектирование подземных резервуаров, не содержат чётких рекомендаций по учёту влияния напряженного состояния на прочностные и реологические свойства каменной соли и длительную устойчивость этих резервуаров. Поэтому оценка устойчивости данных подземных выработок является важной задачей при их возведении и эксплуатации.

## Основная часть

В [1] проведена оценка устойчивости породного массива методом математического моделирования. Напряженно-деформированное состояние в окрестности выработок определяется из решения соответствующих задач механики горных пород от действия постоянных и временных (длительных, кратковременных, особых) нагрузок при установленных уравнениях состояния.

К постоянным нагрузкам относятся: горное давление и давление подземных вод. Величина горного давления определяется с учетом дан-

ных инженерно-геологических изысканий на площадке. При отсутствии тектонических напряжений в породном массиве горное давление допускается определять по весу вышележащих пород. При определении расчетных нагрузок в расчете выработки-ёмкости на устойчивость учитывается коэффициент надежности по нагрузке. Коэффициент надежности по ответственности принимается равным единице согласно ГОСТ 27751-88.

Расчет устойчивости подземных выработок-ёмкостей как правило выполняется при наиболее неблагоприятных сочетаниях нагрузок.

При выполнении ограничений на размер целика, изложенных выше, допустимо рассматривать осесимметричную задачу.

Максимально допустимый пролет выработки  $L$  определяется по формуле

$$L = \sqrt[3]{\frac{V_{adm}}{\alpha} \left( \frac{\sigma_i^\infty}{\rho_r g H - P_{min}} \right)^\omega}, \quad (1)$$

где  $V_{adm}$  - допустимый объём ОЗД в окрестности кровли, на основании опыта эксплуатации подземных хранилищ принимается  $V_{adm} = 700 \text{ м}^3$ ;  $\sigma_i^\infty$  - интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу длительной прочности, МПа;  $\alpha$ ,  $\omega$  - безразмерные параметры;  $P_{min}$  - минимальное эксплуатационное давление, МПа;  $\rho_r$  - усредненная плотность пород, залегающих выше кровли выработки-ёмкости,  $\text{кг/м}^3$ .

Максимальное давление продукта согласно СП 34-106-98 определяется из соображений предотвращения гидроразрыва пород по формуле

$$P_{max} = k g \rho_r H, \quad (2)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий геологическое строение массива каменной соли, прини-

маемый равным 0,7 - 0,9; Н - глубина заложения башмака основной обсадной колонны, м;

Минимально допускаемое давление на уровне кровли выработки-ёмкости, создаваемое в резервуаре продуктом, определяется по условию предотвращения разрушения выработки-ёмкости в течение всего периода эксплуатации.

$$P_{\min} = \rho_r g H - \frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_i^{\infty} \quad (3)$$

где Н – глубина заложения кровли выработки, м.

Задача решалась методом конечных элементов (МКЭ).

В результате расчетов были определены все компоненты тензоров напряжений и деформаций в центрах всех конечных элементов.

Затем полученные значения были сопоставлены с предельно допустимыми величинами, задаваемыми принятыми критериями устойчивости.

В ряде работ института ООО «Подземгазпром» оценивается влияние циклического режима эксплуатации подземных хранилищ и скорости закачки газа на устойчивость подземных выработок-ёмкостей. При выполнении численных расчетов принималось, что необратимые деформации накапливаются при отборе газа из резервуара и его эксплуатации при минимальном противодавлении, а при заполнении резервуара в приконтурном слое массива реализуются деформации упругого восстановления. Таким образом, предполагалось, что реологические процессы, приводящие к потере устойчивости выработки-ёмкости и необратимому изменению ее геометрического объема, реально происходят в течение 17–25 лет, а не в течение всего 50-летнего срока эксплуатации хранилища. Более того, при расчетах учитывалось изменение интенсивности реологических процессов (снижение прочности и деформируемости каменной соли) в зависимости от продолжительности нагружения приконтурного слоя соляного массива, определяемой продолжительностью эксплуатации резервуара при буферном давлении.

При расчете устойчивости в качестве уравнения состояния использовались уравнения вида [2]:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_i'} = \frac{c}{(c-1)} \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i'} \left[ 1 - \frac{1}{n} \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i'} \right)^{c-1} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_v = K \varepsilon_v - \frac{\sigma_i^n}{m}; \quad (5)$$

$$\text{Здесь } C = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i^{\infty}}{G \varepsilon_i^{\infty}}}; \quad (6)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}; K = \frac{E}{1-2\nu};$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$\sigma_v = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3;$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2};$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3;$$

$\sigma_i$  - интенсивность касательных напряжений;

$\sigma_i'$  - интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу прочности при заданной сумме главных напряжений  $\sigma_v$  и времени эксплуатации хранилища  $t$ ;

$\sigma_i' = \varepsilon_i' G \frac{c-1}{c}$ ;  $\varepsilon_i$  - интенсивность необратимой

деформации сдвига;  $\varepsilon_i'$  - интенсивность деформации сдвига при  $\sigma_i = \sigma_i^{\infty}$  и времени эксплуатации хранилища  $t$ ;

$$\varepsilon_i' = \left( \frac{G}{c g_t} \right)^{\frac{1}{c-1}}; \quad (7)$$

$$\text{где } g_t = g (1 - \exp(-\alpha t^{\delta})); \quad (8)$$

$$g = \frac{G}{c \left[ \frac{c \sigma_i^{\infty}}{G(c-1)} \right]^{c-1}}; \quad (9)$$

$\sigma_i^{\infty}$  - интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу длительной прочности при заданной сумме главных напряжений  $\sigma_v$ ;  $\varepsilon_i^{\infty}$  - интенсивность деформации сдвига при  $\sigma_i = \sigma_i^{\infty}$  и бесконечно большом значении времени;  $\varepsilon_v$  - необратимая объемная деформация;  $E$  - модуль деформации;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $m, n, a, \delta, p, \beta$  - безразмерные параметры, характеризующие деформируемость пород во времени;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - необратимые деформации.

Таблица 1

**Прочностные и деформационные характеристики каменной соли для расчета устойчивости подземной выработки-емкости**

Прочность на одноосное сжатие $\sigma_c$ , МПа	Модуль деформации E, МПа	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Модуль сдвига G, МПа	Модуль деформации E, МПа
32.5	12460	0,12	5600	16400

Модуль деформации E и коэффициент Пуассона  $\nu$  (табл. 1) определялись по результатам испытаний образцов каменной соли на одноосное сжатие при их нагрузке и разгрузке в соответствии с рис. 1.

Реологические параметры определялись по результатам испытаний образцов каменной соли на одноосную ползучесть. Реологические характеристики каменной соли представлены в табл. 2.

Задача решалась методом конечных элементов (МКЭ) с применением программного комплекса «Оценка устойчивости подземных резервуаров» Версия 1.0, разработанного в ООО «Подземгазпром».

В результате расчетов были определены все компоненты тензоров напряжений и деформаций в центрах всех конечных элементов. На основании этих данных в окрестности контура находится некоторая область, где  $\varepsilon_i > \varepsilon_i^\infty$ , т.е. где деформации превышают предельные значения. Такая область называется областью запределного деформирования (ОЗД). Затем полученные значения сопоставлялись с предельно допустимыми величинами, задаваемыми принятыми критериями устойчивости.

С целью оценки влияния скорости закачки хранимого продукта на устойчивость подземных выработок - емкостей выполнялись расчеты напряженно-деформированного состояния

Таблица 2

**Реологические параметры каменной соли**

$\alpha$	$\delta$	c	$\sigma_i^\infty$ , МПа	g, МПа
1.3	0.180	1.01	13,6	5586

при различных значениях буферного давления.

Таблица 3

**Реологические параметры каменной соли**

Скорость нагружения $\dot{\varepsilon}$ , МПа/с	$\sigma_i^\infty$ , МПа		$\dot{\varepsilon}$	$\eta_i$ , МПа	$\eta_v$ , МПа
	при одноосной ползучести	при трехосной ползучести			
1	7,5	13,6	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$4,4 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{11}$
$10^{-4}$	11,2	20,3	$3,23 \cdot 10^{-9}$		

При расчетах влияния скорости закачки продукта на устойчивость выработки в качестве уравнения состояния использовались уравнения вида [3]:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_i^\infty} = \frac{c}{c-1} \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^\infty} \left[ 1 - \frac{1}{c} \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^\infty} \right)^{c-1} \left( 1 - \exp(-at^\delta) \right) \right] \quad (10)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{\eta_v}, \quad (11)$$

где  $c = \frac{1}{1 - \sigma_i^\infty / (\dot{\varepsilon} \eta_i)}$ ;  $\sigma_i$  - интенсивность ка-

сательных напряжений;  $\sigma_i^\infty$  - интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу ползучести при заданной сумме главных напряжений  $\sigma_v$ ;  $\dot{\varepsilon}$  - интенсивность скорости деформаций сдвига;  $\dot{\varepsilon}^\infty$  - интенсивность скорости деформаций сдвига при  $\sigma_i = \sigma_i^\infty$ ;  $\alpha, \delta, \eta_i$  - параметры уравнения;  $\eta_v$  - коэффициент объемной вязкости; t - время.

Параметры уравнения состояния определялись из экспериментальных исследований каменной соли площади Туз - Гелю скв. UGS - 2, разновидность X<sub>m</sub>, и представлены в табл. 3.

В результате расчетов определились все компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций в центрах всех конечных элементов. На основании этих данных в окрестности контура находится некоторая область (ОЗД), где

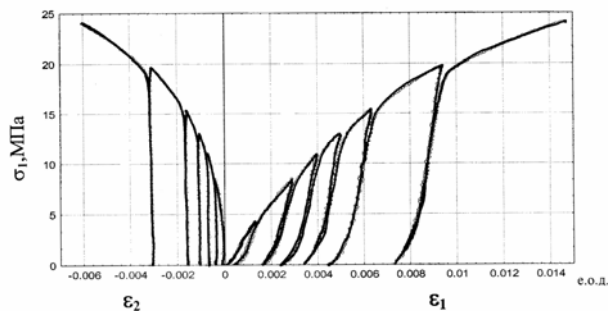


Рис. 1. Деформирование каменной соли с целью определения параметров уравнения состояния для расчета устойчивости выработки – емкости

$\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2$ , т.е. где скорости деформации превышают предельные значения. Затем полученные значения были сопоставлены с предельно допустимыми величинами, задаваемыми принятыми критериями устойчивости.

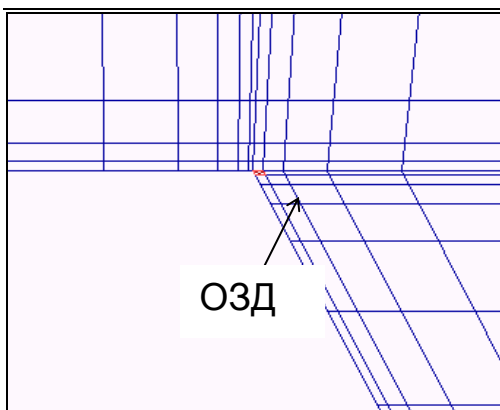
Было получено, что во всех рассмотренных случаях выработка устойчива. Однако при быстрой закачке газа в выработку-емкость при  $P_a = 7$  МПа в окрестности кровли выработки наблюдается ОЗД, хотя ее размеры не выходят за рамки критерия устойчивости (рис. 2).

Во всех других случаях ОЗД в окрестности кровли выработки не наблюдается.

Также в результате проведенных расчетов было получено, что скорость конвергенции выработки при быстрой закачке газа выше по сравнению со скоростью конвергенции при более медленной закачке продукта (рис. 3)

Таким образом, результаты выполненных

Рис. 2. Область запредельного деформирования в окрестности кровли выработки при  $P_{min} = 7$  МПа



исследований свидетельствовали о том, что более медленная закачка продукта обеспечивает большую устойчивость подземного хранилища и приводит к снижению скорости конвергенции в течение всего периода закачки.

#### Заключение

Проблемы устойчивости подземных хранилищ в соляных отложениях начали активно изучаться с начала 60-х годов. Это связано с появлением компьютеров второго поколения и активным использованием численных методов расчета для решения геомеханических задач.

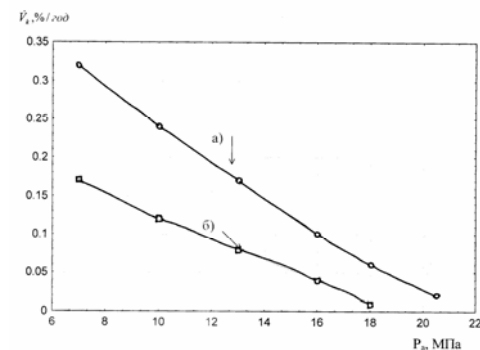
На сегодняшний день имеются проблемы с воссозданием именно тех нагрузок, которым подвержена порода в подземных условиях. Кроме того, отсутствуют модели поведения массива соли при возведении и эксплуатации подземных хранилищ. Наиболее

Рис. 3. Изменение скорости конвергенции в зависимости от буферного давления при различной скорости закачки продукта: а) 1 МПа/с; б) 10<sup>-4</sup> МПа/с

близки к описанию этих явлений, модели зарубежных ученых.

Утверждается, что главными направлениями развития в этой области будут:

- создание новой аппаратной базы,
- разработка новых моделей, описывающих поведение каменной соли в сложных



условиях,

- выработка новых методик определения параметров устойчивости выработок.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тавостин М.Н.* Обоснование и разработка методов определения реологических параметров каменной соли для оценки устойчивости подземных хранилищ. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2001.

2. *Shafarenko, E.M., Tavostin M.N.* et al. Stability of Underground Cavities in Rock Salts, Solution Mining Research Inst., Spring Meeting, Cracow, 1997.

3. *Shafarenko, E.M., Zhuravleva, T.Y.* Deformation of Underground Deep Cavities in Rock Salts at Their Long-Term Operation. - In: Proceedings of the Sixth Annual International Conference. Las Vegas, Nevada, 1995.

---

#### Коротко об авторах

*Воронов Г.А.* – студент, Московский государственный горный университет.



---

© В.И. Шейнин, Д.И. Блохин, 2005

УДК 622.83

*В.И. Шейнин, Д.И. Блохин*

**ИНФРАКРАСНАЯ ДИАГНОСТИКА ОТКЛИКА  
ГЕОМАТЕРИАЛОВ НА НАГРУЖЕНИЯ,  
МОДЕЛИРУЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХАРАКТЕРНЫХ  
ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ\***

Семинар № 2

Современное горное производство характеризуется воздействием на геологическую среду различных техногенных источников, индуцирующих возникновение и протекание в массиве сложных механических процессов. К таким источникам относятся, например, взрывы, искусственные «посадки» кровли и т.п., а также вибрации, создаваемые при работе мощных машин и механизмов [1]. Для достоверного контроля и прогноза геодинамических процессов, протекающих в услови-

ях таких воздействий, наиболее эффективно использование экспериментальных методик, в основу которых положены физические модели, однозначно связывающие регистрируемые физические параметры с определяемыми вариациями механических величин.

В настоящем сообщении приводятся основные идеи методики идентификации процессов упругого деформирования геоматериалов по результатам измерений мощности инфракрасного излучения с их поверхности и описы-

---

\*Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 03-05-64447)

ваются экспериментальные результаты, обобщающие эффективность этой методики при режимах изменения напряжений во времени, имитирующих характерные техногенные воздействия. При разработке методики учитывалось, что наиболее распространенные и, вместе с тем, весьма опасными для геотехнических сооружений, являются процессы, имеющие характер механических колебаний с частотным диапазоном 0,5-20 Гц [1, 2].

Известно [3], что приращение первого инварианта тензора напряжений  $\Delta\Pi$  при отсутствии теплообмена вызывает приращение температуры в точке среды  $\Delta T_a = A_m T_0 \Delta\Pi$ , где  $T_0$  - начальная абсолютная температура;  $A_m = \alpha / \rho C_p$ ;  $\alpha$  - коэффициент расширения;  $\rho$  - плотность материала. При таком режиме деформирования вариации температуры  $\delta T_a(t)$  во времени  $t$  подобны (с коэффициентом подобия  $A_m T_0$ ) функции  $\delta\Pi(t)$ :

$$\delta T_a(t) = A_m T_0 \delta\Pi(t) \quad (1)$$

Возможность получения информации о  $\delta\Pi(t)$  по измерениям  $\delta T_a(t)$  представляется очевидной, однако ее реализация для геоматериалов затруднена тем, что значения  $\delta T_a(t)$  имеют порядок 0,001 К. Кроме того, условия реальных геомеханических и геофизических экспериментов не позволяют использовать стандартные методы температурных измерений, особенно при измерениях в грунтах. Эти трудности в исследованиях, выполненных в НИИОСП им. Н.М. Герсванова [4-6 и др.], преодолеваются путем разработки инфракрасной (ИК-) техники измерений малых вариаций температуры.

В основе указанной техники измерений лежит известная зависимость мощности инфракрасного (ИК) излучения с поверхности тела от ее температуры  $W(T) = \varepsilon_r \omega T^4$  ( $\varepsilon_r < 1$  — коэффициент излучательной способности,  $\omega$  - постоянная Стефана — Больцмана) [7, 8]. Преобразовав  $W(T(t))$  в зависимость  $\delta W(t) = W(T(t)) - W(T_0)$ , линеаризуя соответствующие  $T_a(t)$  вариации  $\delta W_a(t) = W_a(T(t))$  с учетом малости  $\delta T(t)/T_0$ , и обозначая  $A_c = 4\varepsilon_r \omega T_0^3$ , получим

$$\delta W_a(t) = A_c \delta T_a(t) / T_0 = A_c A_m \delta\Pi(t) \quad (2)$$

т.е.  $\delta W_a(t)$  и  $\delta\Pi(t)$  подобны. Вследствие теплообмена при неадиабатическом режиме деформирования и постоянстве  $T_0$  вместо (1) имеем для вариаций температуры  $\delta T(t)$  уравнение:

$$\delta T(t) = \delta_a T(t) + \delta_h T(t) = A_m \delta\Pi(t) T_0 + \delta_h T(t) \quad (3)$$

где  $\delta_h T(t) = \delta_h (T(t) - T_0)$  - изменение температуры, необходимое для восстановления теплового равновесия, нарушенного деформированием. Из (2), (3) следует:

$$\delta W(t) = A_c A_m \delta\Pi(t) + A_c \delta_h T(t) / T_0 \quad (4)$$

Предполагая пропорциональность вариаций результатов ИК-измерений, выполняемых без аппаратных погрешностей,  $\delta U_e(t)$  вариациям  $\delta W(t)$  с коэффициентом  $A_r$ , зависящим от параметров аппаратуры, и используя (3) и (4), получаем для функции  $\delta U(t)$ , описывающей результаты ИК-измерений при отсутствии внешних тепловых воздействий,

$$\delta U(t) = \delta U_e(t) + \varepsilon(t) = \delta U_a(t) + \delta U_h(t) + \varepsilon(t) = A \delta\Pi(t) + A_r A_c \delta_h T(t) / T_0 + \varepsilon(t) \quad (5)$$

В соотношениях (5),  $\delta U_a(t)$  и  $\delta U_h(t)$  - слагаемые  $\delta U_e(t)$ , соответствующие слагаемым  $\delta_a T(t)$  и  $\delta_h T(t)$  в (3),  $A = A_m A_c A_r$ , а слагаемое  $\varepsilon(t)$  отражает наличие аппаратных шумов в функции  $\delta U(t)$ , описывающей результаты ИК-измерений при отсутствии внешних тепловых воздействий.

В условиях, когда напряжения меняются во времени достаточно быстро, можно не учитывать функцию  $\delta_h T(t)$  и ограничиться анализом данных измерений в предположении квазиадиабатичности, и тогда достаточно просто можно определить функцию  $\delta\Pi(t)$  по экспериментальной зависимости  $\delta U(t)$ . Для обоснования данного предположения и выявления возможностей его применения для диагностики динамических процессов в геоматериалах проводились серии экспериментов, в которых образцы горных пород подвергались квазипериодическим и ударным воздействиям с частотным диапазоном, лежащим в интервале 0,5...5 Гц. Генерация таких воздействий осуществлялась с помощью маятникового нагрузочного устройства, специально сконструированного на основе стенда для испытания грунтов. Изменения напряжений в образце регистрировались как с помощью ИК-радиометра, так и с исполь-

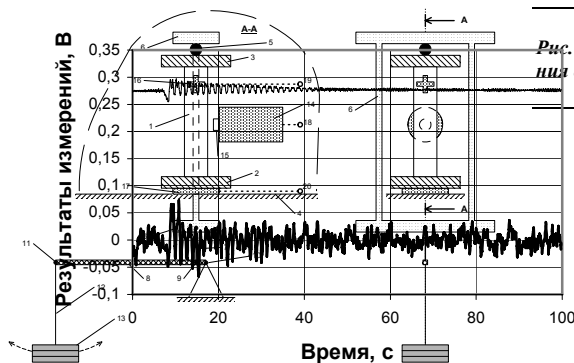


Рис. 1. Схема испытательного стенда и расположения датчиков

зованием стандартных тензометрических датчиков, служащих для контрольных (эталонных) измерений вариаций напряжений [5, 9].

В качестве первичного приемника потока инфракрасного излучения в описываемых измерениях использовался промышленно выпускаемый детектор РТН-31, который представляет собой термобатарю, составленную из последовательно соединенных высокочувствительных термопар, нанесенных на плату методом вакуумного напыления и работает на основе преобразования энергии потока теплового излучения, падающего на приемную площадку термоэлемента в термо-ЭДС, пропорциональную величине потока излучения.

На рис. 1 показана схема устройства для нагружения экспериментального образца, который представлял собой мраморный стержень высотой  $\approx 16$  см и прямоугольным сечением  $\approx 17$  см<sup>2</sup>, и расположение измерительных датчиков. Нагружение образца осуществлялось в условиях одноосного сжатия. Образец 1 расположен между нижней неподвижной 2 и верхней подвижной 3 жесткими пластинками грузозачного устройства. Пластина 2 опирается на поверхность 4 стенда. Нагрузку на пластинку 3 передается через центрирующую шариковую опору 5 от верхней переключной траверсы 6. К нижней переключной траверсы прикреплен трос 7, нижний конец которого закреплен на рычажной штанге 8 в точке 9. Расстояние от точки 9 до неподвижной оси 10 рычага  $L_1 = 3$  см, а расстояние от оси 10 до точки 11 подвешивания на штанге 8 стержня 12 с грузом 13 –  $L_2 = 41$  см, т.е. коэффициент передачи усилия рычажным механизмом  $L_2/L_1 = 13,7$ . Вес груза 13 в разных опытах составлял от 150 до 300Н. Изменения вертикального усилия в точке 11 обеспечиваются колебаниями «физического маятника» (груз 13 на конце «нити» 12) близи

вертикального положения равновесия. Указанное усилие преобразуется, через рычаг 8, трос 7 и траверсу 6, в сжимающее усилие, приложенное к образцу. Колебания инициируются начальным отклонением стержня 12 от вертикальной оси. Амплитуда усилия «управляется» изменением веса груза и начального отклонения «маятника». Варьируя положение груза 13 на стержне 12, можно менять основной период колебаний маятника и, тем самым, период изменений нагрузки во времени. В случае ударного нагружения, генерация механического воздействия осуществлялась путем сбрасывания груза массой 8 кг на плиту, подвешенную на тросе, передающем нагрузку на образец через рычажный механизм.

Датчик ИК-излучения 14 с приемным окном 15 устанавливался примерно в середине высоты образца на расстоянии (1–1,5) см от его поверхности. Для контрольных измерений вариаций напряжений в образце между пластиной 2, на которую опирается образец, и плитой 4 устанавливался тензометрический элемент 17 (месдоза).

Реализованные с помощью описанного экспериментального стенда, изменения напряженного состояния образца горной породы независимо фиксировались измерительными датчиками, сигналы с которых после усиления и «оцифровки» регистрировались ЭВМ в режиме реального времени. Другая схема контрольных измерений [5] основана на использовании тензодатчиков 16, наклеенных на поверхность образца. В [5] показана эквивалентность указанных двух способов контрольных измерений.

Характерные записи значений выходных сигналов, получаемых в результате прохождения первичного сигнала с ИК-радиометра  $V_w(t)$  и от тензометра  $V_m(t)$  через измерительно-вычислительный тракт, показаны на рис. 2. Графики зависимостей  $V_w(t)$  и  $V_m(t)$  отражают реакцию исследуемой среды (образца мрамора), на нестационарное периодическое воздействие в условиях одноосного сжатия.

При обработке экспериментальных зависимостей учитывалось, что в записи данных ИК-измерений, кроме низкочастотной составляющей

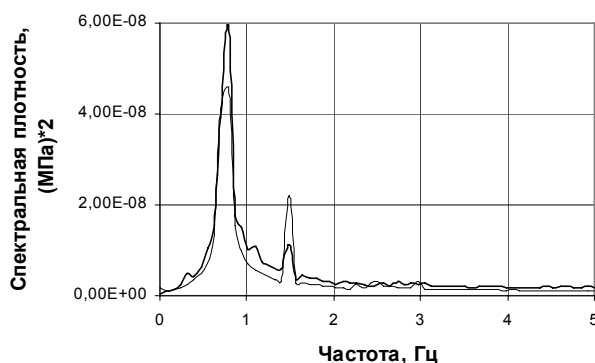


Рис. 2. Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов тензометрии (мессдозы) ( $V_m(t)$ ) и ИК-радиометрии ( $V_w(t)$ )

$A_{w\Pi} = A$  и  $A_{m\Pi}$  перехода от вариаций выходных сигналов  $\Delta V_w$  и  $\Delta V_m$  (В) к вариациям  $\Delta\Pi$  (МПа). С использованием значений  $A_{w\Pi}$  и  $A_{m\Pi}$  вычислялись вариации:

$$\delta\Pi_w(t) = U_w(t) \times (A_{w\Pi})^{-1},$$

$$\delta\Pi_m(t) = U_m(t) \times (A_{m\Pi})^{-1}. \quad (7)$$

Сравнение зависимостей напряжений от времени, определенных на основе сигнала ИК-радиометра, с зависимостями, полученными на основе данных тензометрических измерений, производилось с учетом результатов вычисления оценок их вероятностных характеристик. При этом, в соответствии с рекомендациями [10], выполнялась коррекция обрабатываемых временных последовательностей с учетом их существенной нестационарности.

На рис. 3 показаны графики определенных после упомянутой корректировки исходных записей оценок зависящих от частоты  $\nu$  спектральных плотностей  $H_{\Pi_w}(\nu)$  и  $H_{\Pi_m}(\nu)$  соответствующих зависимостей  $\delta\Pi_w(t)$  и  $\delta\Pi_m(t)$ . Видно, что спектральные плотности  $H_{\Pi_w}(\nu)$  и  $H_{\Pi_m}(\nu)$  весьма схожи между собой. Примерно такая же "сходимость" вероятностных характеристик обнаруживается и в других проведенных опытах.

При непосредственном сравнении зависимостей  $\delta\Pi_w(t)$  и  $\delta\Pi_m(t)$  учитывался временной сдвиг  $\tau_0$  выходного сигнала с ИК-радиометра, вызываемый инерционностью первичного преобразователя и определяемый по графику взаимной корреляционной функции этих записей [10]. Графики, изображенные на рис. 4, иллюстрируют "идентичность" функций  $\delta\Pi_m(t)$  и  $\delta\Pi_w(t + \tau_0)$ , полученной после учета указанной поправки.

Из рис. 4 видно, что различие между графиками оценок вариаций напряженного состояния, полученными по двум экспериментальным методикам, несущественно. Это наряду со сравнением, приведенным на рис. 3, оз-

щей, связанной с изменениями нагрузки, может содержаться составляющая, вызываемая изменениями внешних тепловых условий во время опыта и представляющая собой, по существу, низкочастотный шум. Такие низкочастотные составляющие  $F_w(t)$  и  $F_m(t)$  функций  $V_w(t)$  и  $V_m(t)$  выделялись с использованием стандартных процедур статистической фильтрации случайных процессов [10]. При дальнейшем анализе данных измерений вместо  $V_w(t)$  и  $V_m(t)$  рассматривались функции  $U_w(t) = V_w(t) - F_w(t)$ ,  $U_m(t) = V_m(t) - F_m(t)$ , (6)

практически не зависящие от низкочастотных составляющих и имеющие нулевые средние значения.

Для вычисления оценок изменений во времени первого инварианта тензора напряжений  $\delta\Pi_w(t)$  и  $\delta\Pi_m(t)$  (МПа) соответственно по зависимостям  $U_w(t)$  и  $U_m(t)$  использовались переходные коэффициенты, величины которых определялись по данным тарировки выходных показаний каналов ИК-радиометра  $\Delta V_w$  и тензометрических датчиков  $\Delta V_m$  по изменениям суммы главных напряжений  $\Delta\Pi$  в образце, проводившейся перед каждой серией экспериментов. Для этого к образцу прикладывались ступенчатые нагрузки  $\Delta P_{tar}$ , величина которых определялась по показаниям эталонного динамометра, установленного между мессдозой и плитой пресса. При этом для каждого  $\Delta\Pi_{tar}$  измерялись «скачки» уровней выходных сигналов радиометра  $\Delta V_{w_{tar}}$  и мессдозы  $\Delta V_{m_{tar}}$ . Затем осреднением величин  $\Delta V_{w_{tar}} / \Delta\Pi_{tar}$  и  $\Delta V_{m_{tar}} / \Delta\Pi_{tar}$  оценивались коэффициенты



начает, что используемая аппаратура и разработанный алгоритм анализа записей ИК-радиометрических измерений в принципе позволяет идентифицировать по таким записям процессы упругого деформирования в геоматериалах, происходящие при нестационарных периодических воздействиях. Аналогичные результаты получены и для режимов ударного нагружения образцов горных пород [6].

Наиболее очевидное преимущество предлагаемой методики перед используемыми в геомеханике схемами диагностики изменений напряжений – бесконтактность, а, при усовершенствовании аппаратуры, – и дистанционность измерений. Другое преимущество, существенное при сравнении ИК-радиометрии с другими методиками «физического» геомониторинга, например, методами акустической или электромагнитной эмиссии, – простота и однозначность физической модели, связывающей вариации механических величин и результатов измерений. Особенность данных ИК-измерений в том, что они явным образом «отслеживают» по величине и знаку вариации во времени хотя бы одного параметра тензора напряжений – его первого инварианта.

С другой стороны, то, что с помощью ИК-измерений можно оценивать вариации только этого скалярного параметра, – несомненное ограничение возможностей методики. Но следует учитывать, что измерения выполняются на границе тела, а задание суммы главных напряжений  $\Pi$  в точке границы часто равносильно полному заданию тензора напряжений в этой точке. В любом случае значение  $\Pi$  в характерной точке на границе упругого тела – существенная информация при решении соответствующей «обратной» задачи, а в некоторых схемах это значение позволяет оценить полную

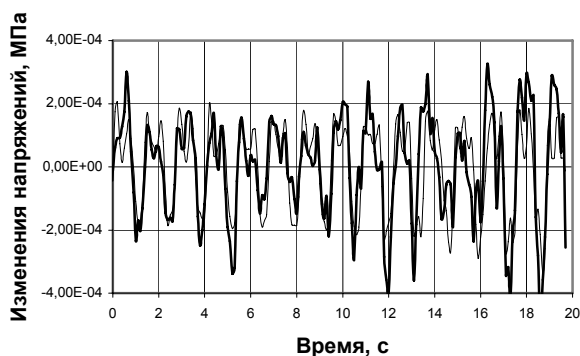


Рис. 3. Спектральные плотности вариаций напряжений  $\delta \Pi_m(t)$  и  $\delta \Pi_w(t)$ , по данным тензометрии ( $H_{\Pi_m}(\nu)$ ) и ИК-радиометрии ( $H_{\Pi_w}(\nu)$ ), МПа<sup>2</sup>

картину напряжений в представляющей интерес области в окрестности такой точки. Например, используя решение известной задачи теории упругости о напряжениях на торце полубесконечной цилиндрической полости в упругом пространстве и определив значение  $\Pi$  на забое скважины в массиве, можно (в принимаемых чаще всего в прикладной геомеханике предположениях о связи горизонтальных и вертикальных напряжений «на бесконечности» через коэффициент бокового давления), оценить напряженное состояние в окрестности этого забоя. Таким же образом, используя для каждого момента времени решение аналогичной задачи о действии «на бесконечности» горизонтального напряжения  $\sigma_x$ , получим возможность, через определенную с помощью ИК-измерений зависимость  $\delta \Pi(t)$  на забое скважины, оценить зависимость от времени напряжения  $\delta \sigma_x(t)$  на фронте горизонтальной сейсмической волны.

Другое ограничение методики – требование «квазиadiaбатичности», делающее невозможным ее использование для диагностики медленно протекающих, например, тектонических процессов. С другой стороны, полученные результаты показывают, что для периодических изменений напряженного состояния во времени с частотами порядка одного герца и пространственного масштаба деформаций, сравнимого с размерами испытанного образца, условие квазиadiaбатичности выполняется даже при свободном теплообмене с окружающей средой. Поскольку при увеличении характерного размера области скорость теплообмена падает [5], то при

Рис. 4. Данные определений вариаций напряжений (МПа) по записям сигналов с тензометров ( $\delta \Pi_m(t)$ ) и ИК-радиометра ( $\delta \Pi_w(t + \tau_0)$ )

наблюдениях на образцах больших размеров или, тем более, в забое скважины в массиве, предположение о «квазиadiaбатичности» процесса деформирования может приниматься с еще большей обоснованностью. То же самое относится к измерениям при более высоких частотах изменений напряжений. При наблюдениях в скважине существенным фактором, повышающим достоверность оценок вариаций напряжений, окажется также уменьшение ко-

эффициента теплопередачи из-за ограничения конвективного теплообмена.

Полученные результаты показывают перспективность использования ИК-диагностики в схемах геомеханического и геофизического мониторинга в качестве чувствительного, и, притом, бесконтактного, индикатора происходящих в массиве механических процессов, обусловленных техногенными факторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов. - М.: Эдиториал УРСС. 1999.
2. *Капустян Н.К.* Городские агломерации – катализаторы геодинамических процессов // Оценка и управление природными рисками / Материалы Общероссийской конференции "Риск – 2000". – М.: Анкил. 2000. С. 106-111.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. - М.: ГИФМЛ. 1965.
4. *Sheinin V.I., Levin B.W., Motovilov E.A.* Infrared diagnostics of stress variations in rock: the possibilities for monitoring preliminary mechanical processes in the earth's crust // Earthquake Prediction Researches. 1997. V6. No. 1. P. 138-147.
5. *Шейнин В.И., Левин Б.В., Мотовилов Э.А., Морозов А.А., Фаворов А.В.* Диагностика периодических изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // Известия РАН, Физика Земли. 2001. №4. С. 24-30.
6. *Левин Б.В., Шейнин В.И., Блохин Д.И., Фаворов А.В.* Инфракрасная диагностика отклика геоматериалов на импульсные и ударные нагрузки // ДАН. 2004. Т. 395. № 6, С. 822-824.
7. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. 1967.
8. *Крикунцов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио. 1978.
9. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах // Под ред. Е.И. Шемякина. – Новосибирск: Наука. 1975.
10. *Хаттон Л., Уорддингтон М., Мейкин Дж.* Обработка сейсмических данных. Теория и практика. - М.: Мир. 1989.

### Коротко об авторах

*Шейнин Владимир Исаакович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией НИИОСП им. Н.М. Герсеванова.  
*Блохин Дмитрий Иванович* – ст. преподаватель кафедры физики Московский государственный горный университет.

