

УДК 622.831.332

## О ДЕФОРМИРОВАНИИ КВАЗИПЛАСТИЧЕСКИХ СОЛЯНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2011 г.

П.А. Цой, О.М. Усолицева, В.М. Жигалкин

Институт горного дела им. А.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

paveltsoy@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

С целью определения прочностных и деформационных характеристик квазипластичных соляных пород были проведены эксперименты при сложном нагружении по схеме Кармана. Полученные данные использовались для построения определяющих соотношений по математической модели А.И. Чанышева.

*Ключевые слова:* горные породы, прочность, деформация, сложное нагружение, определяющие соотношения.

### Эксперименты на сложное нагружение

Изучение процесса деформирования квазипластичных горных пород при сложном нагружении проводилось на цилиндрических образцах пестрого сильвинита и каменной соли [1]. Диаметр  $d$  образцов – 38 мм, отношение высоты  $h$  к диаметру – 2.0. Испытания выполнялись в камере объемного сжатия, поддерживающей внутреннее давление до 40 МПа.

Осевая нагрузка задавалась с помощью сервогидравлического пресса фирмы Instron (Центр геофизических и геодинамических измерений СО РАН). Перед испытанием образец упаковывался в специальную резиновую оболочку, защищающую его от проникновения масла.

При изучении влияния бокового давления на процесс деформирования квазипластичных горных пород эксперименты выполнялись по схеме нагружения: деформирование образца осевой нагрузкой при постоянном боковом давлении (схема Кармана). Эта схема обоснована тем, что при расчете параметров систем подземной разработки калийных и каменносоляных месторождений в условиях применения закладки представляет интерес исследование объемной прочности и деформации соляных образцов.

Для всех видов экспериментов начальное задание бокового давления производилось пропорционально осевой нагрузке. Нагружение осуществлялось при следующих уровнях бокового давления: 0.0, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 20.0 МПа.

Установлено, что прочностные и деформационные параметры увеличиваются с повышением бокового давления, понижается модуль спада.

### Построение определяющих соотношений по математической модели А.И. Чанышева

На основе данных экспериментов в условиях сложного нагружения построены зависимости «напряжение–деформация» для соляных пород в обобщенных координатах математической модели А.И. Чанышева. На рис. 1 изображены определяющие соотношения  $S_m = S_m(\Theta_m)$  (линейная зависимость) и  $S_l = S_l(\Theta_l)$  (нелинейная зависимость) для образцов каменной соли.

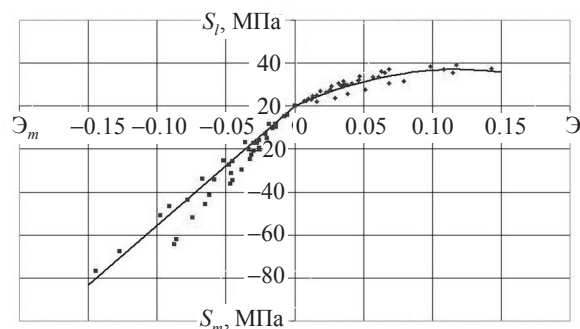


Рис. 1

Теоретические исследования А.И. Чанышева относительно построения определяющих соотношений в упругости, пластичности и области разупрочнения основаны на идее Христиановича – Шемякина о блочной структуре механической модели деформируемого тела. А.И. Чанышев предположил, что модель любого тела состоит из жестких недеформируемых блоков, произвольная деформация которой, включая упругую, есть результат перемещения одних блоков относительно других. Блочная структура характеризуется двумя видами деформаций – простым сдвигом и

простым удлинением, причем каждая из них происходит на контактах блоков. Общая деформация есть сумма указанных. В направлении нормали к площадке контакта возникают упругие деформации (простые удлинения). Пластические деформации (простые сдвиги) рассматриваются как результат преодоления сил трения при движении одних блоков относительно других.

На основе этого представления твердого тела предлагаются следующие определяющие соотношения в упругости, пластичности и запредельной области [2].

В каждой точке программы нагружения тензоры напряжений и деформаций имеют вид:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}, \quad T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix},$$

где ось 1 направлена по образующей образцов; ось 2 совпадает с тангенциальным направлением; ось 3 – с радиальным. Здесь  $\sigma_2 = \sigma_3$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ , то есть из трех компонент каждого из тензоров  $T_{\sigma}$ ,  $T_{\varepsilon}$  независимыми являются только две. Вводятся в рассмотрение следующие единичные тензоры:

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad T_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$T_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

В данном базисе тензоры  $T_{\sigma}$ ,  $T_{\varepsilon}$  имеют координаты:

$$S_1 = (T_{\sigma}, T_1) = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{\sqrt{3}},$$

$$S_2 = (T_{\sigma}, T_2) = \sqrt{\frac{2}{3}}(\sigma_1 - \sigma_2), \quad S_3 = 0,$$

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}{\sqrt{3}}, \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2), \quad \mathcal{E}_3 = 0,$$

где  $(T_{\sigma}, T_{\varepsilon}) = \sigma_{ij}\varepsilon_{ij}$  – скалярное произведение тензоров. Зависимость  $S_1$  от  $\mathcal{E}_1$  – по существу зависимость между средним напряжением и средней деформацией,  $S_2$  от  $\mathcal{E}_2$  – взаимосвязь между интенсивностью касательных напряжений и дефор-

мацией сдвига. Для горных пород они не являются единичными или паспортными зависимостями.

Повернем в плоскости  $S_3 = 0$  ( $\mathcal{E}_3 = 0$ ) базис  $T_1, T_2$  на некоторый угол  $\varphi_*$ . Для новых базисных ортов  $T_m, T_l$  имеем соотношения:

$$T_m = T_1 \cos \varphi_* - T_2 \sin \varphi_*,$$

$$T_l = T_1 \sin \varphi_* + T_2 \cos \varphi_*.$$

В базисе  $T_m, T_l$  тензоры  $T_{\sigma}, T_{\varepsilon}$  имеют координаты:

$$S_m = S_1 \cos \varphi_* - S_2 \sin \varphi_*, \quad S_l = S_1 \sin \varphi_* + S_2 \cos \varphi_*,$$

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_1 \cos \varphi_* - \mathcal{E}_2 \sin \varphi_*,$$

$$\mathcal{E}_l = \mathcal{E}_1 \sin \varphi_* + \mathcal{E}_2 \cos \varphi_*.$$

Путем подбора угла  $\varphi_*$  нужно найти такой базис  $T_m, T_l$  (собственный базис), в котором зависимости между одноименными координатами тензоров  $T_{\sigma}, T_{\varepsilon}$  были бы единичными или паспортными зависимостями для рассматриваемого геоматериала. Это означает, что, проведя всего лишь один опыт, по его данным можно построить две такие зависимости, по которым затем предсказывается поведение горной породы при любых других ее испытаниях. Предполагается, что одна из этих зависимостей носит линейный характер как в упругости и в пластичности, так и в запредельной области деформирования. Пусть это будет зависимость  $S_m = S_m(\mathcal{E}_m)$ , то есть для всех стадий деформирования породы предполагаем, что справедливо соотношение

$$S_m = k\mathcal{E}_m,$$

где  $k$  – постоянная материала. Неизвестными величинами являются угол  $\varphi_*$  и параметр  $k$ . Их значения определяются с помощью метода наименьших квадратов.

*Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта №191, при поддержке РФФИ, грант №07-05-96019.*

#### Список литературы

1. Жигалкин В.М. и др. Деформирование квазипластических соляных горных пород при различных условиях нагружения. Сообщение 2. Закономерности деформирования при трехосном сжатии // ФТПРПИ. 2008. Вып. 1. С. 17–25.
2. Чанышев А.И., Куренкева Б.О. К вопросу построения паспортных зависимостей для горных пород // Проблемы и перспективы развития горных наук: Сб. статей Междунар. конф. Новосибирск, 1–5 ноября 2004. С. 308–312.

**AN EXPERIMENTAL-COMPUTATIONAL TECHNIQUE TO DETERMINE NATURAL FREQUENCIES  
OF A STRUCTURE**

*P.A. Tsoy, O.M. Usoltseva, V.M. Zhigalkin*

For the purpose of estimation of strength and deformation characteristics of quasiplastic rocks, the complex loading tests (according to Karman scheme) were performed. The obtained data were used to construct the constitutive relationships of A.I. Chanyshv's mathematical model.

*Keywords:* rocks, strength, deformation, complex loading, constitutive relationships.