

УДК 622.381.3

**В.А. Асанов, В.М. Жигалкин, И.Л. Паньков,
О.М. Усольцева, П.А. Цой, А.В. Евсеев**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ ОБЪЕМНОМ НАГРУЖЕНИИ ***

Семинар № 4

Массив горных пород, вмещающих конструктивные элементы системы разработки, находится в объемно-напряженном состоянии, которое существенно изменяется в процессе ведения горных работ. При этом, характер деформирования пород зависит как от величины действующих в массиве напряжений, так и от накопленных неупругих деформаций. Это хорошо иллюстрируется результатами построения теоретических диаграмм, основанных на энергетическом представлении о накоплении повреждений [1]. Необходимость оценки поведения горных пород при объемном нагружении продиктована широким спектром теоретических и практических задач, возникающих при геомеханическом анализе состояния подработанного массива, в частности, оценки опасности затопления калийных рудников.

Изучение параметров деформирования в условиях объемного сжатия проводилось на образцах соляных пород цилиндрической формы (диаметр $d=38$ мм, высота $h=76$ мм), представленных пестрым сильвинитом

(пласт Б) и каменной солью (подстилающая толща) Верхнекамского калийного месторождения. С целью минимизации разброса результатов эксперимента изготовление образцов каждой серии производилось из единого породного монолита. Исследования выполнялись на испытательном комплексе¹ (рис. 1), состоящем из сервогидравлического прессы Instron 8802 (максимальное усилие 350 кН), поддерживающего «жесткий» режим нагружения, камеры объемного сжатия (максимальное давление 40 МПа), оснащенной датчиками для измерения нагрузок и деформаций образца, а также многоканальной тензометрической станцией. Комплекс обеспечивал автоматическую запись результатов эксперимента в память компьютера в режиме реального времени. Начальное задание бокового давления производилось пропорционально осевой нагрузке. Объемные испытания осуществлялись по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) при следующих уровнях бокового давления: 0; 1,0; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 20 МПа (сильвинит) и 0; 1,0; 2,5;

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-96019 р_урал_a) и Интеграционного проекта УрО РАН № 05-11-04.

¹Экспериментальные исследования проводились на оборудовании центра коллективного пользования «Физико-механические свойства материалов и горных пород» СО РАН

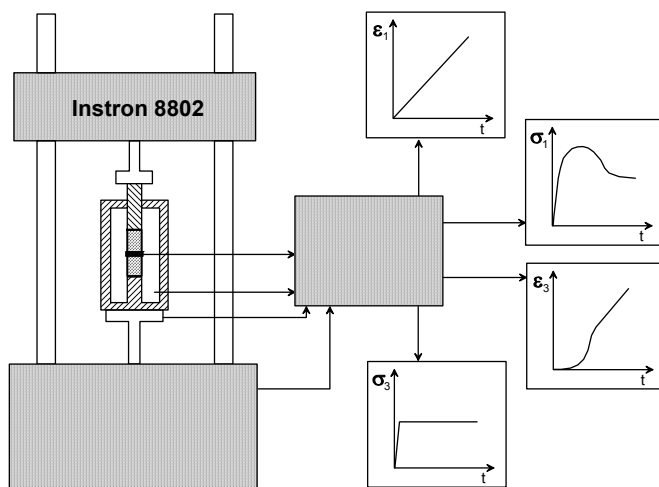
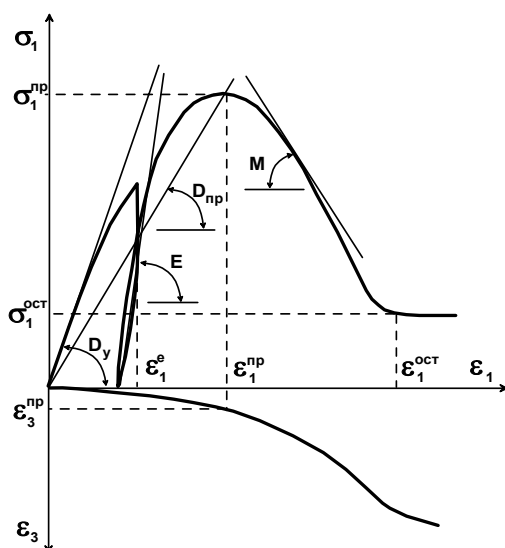


Рис. 1. Схема проведения экспериментов

Рис. 2. Схема определения параметров деформирования



прочности ($\sigma_1^{ост}$), деформация на пределе остаточной прочности ($\varepsilon_1^{ост}$), поперечная деформация на пределе прочности (ε_2^{np}), модуль упругости (E), касательный модуль деформации (D_y), секущий модуль деформации ($D_{пр}$), модуль спада (M).

Следует отметить, что при боковом давлении, превышающем 5 МПа, при выходе образца на стадию разупрочнения (в момент образования магистральных трещин), как правило, происходил разрыв резиновой манжеты. При этом масло под давлением проникало в поры образца, что приводило к его «квазихрупкому» разрушению.

5,0; 10 МПа (каменная соль). От проникновения масла в поры и трещины образец защищался резиновой манжетой.

Обработка диаграмм нагружения велась по методикам, изложенным в работах [2, 3]. Схема определения параметров приведена на рис. 2.

В процессе исследования определялись следующие параметры: предел прочности (σ_1^{np}), разрушающая деформация (ε_1^{np}), остаточный предел

разрушения. Данное обстоятельство ограничило получение запредельных характеристик при давлении, превышающем 5 МПа. Для определения модуля упругости при испытании образцов каменной соли производилась разгрузка образца, также осуществлявшаяся при постоянном боковом давлении. Диаграммы деформирования образцов представлены на рис. 3 (сильвинит) и рис. 4 (каменная соль).

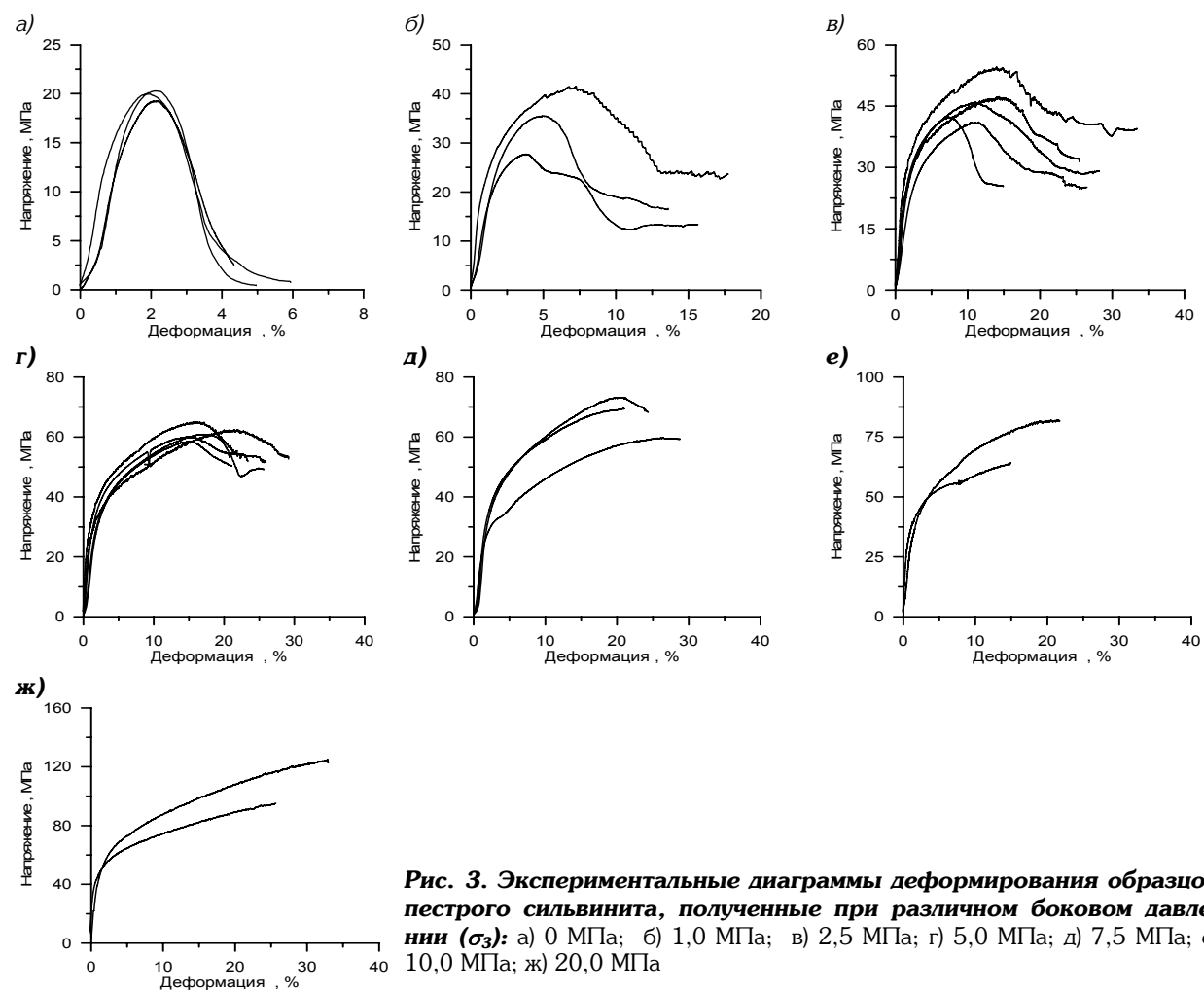


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы деформирования образцов пестрого сальвинита, полученные при различном боковом давлении (σ_z): а) 0 МПа; б) 1,0 МПа; в) 2,5 МПа; г) 5,0 МПа; д) 7,5 МПа; е) 10,0 МПа; ж) 20,0 МПа

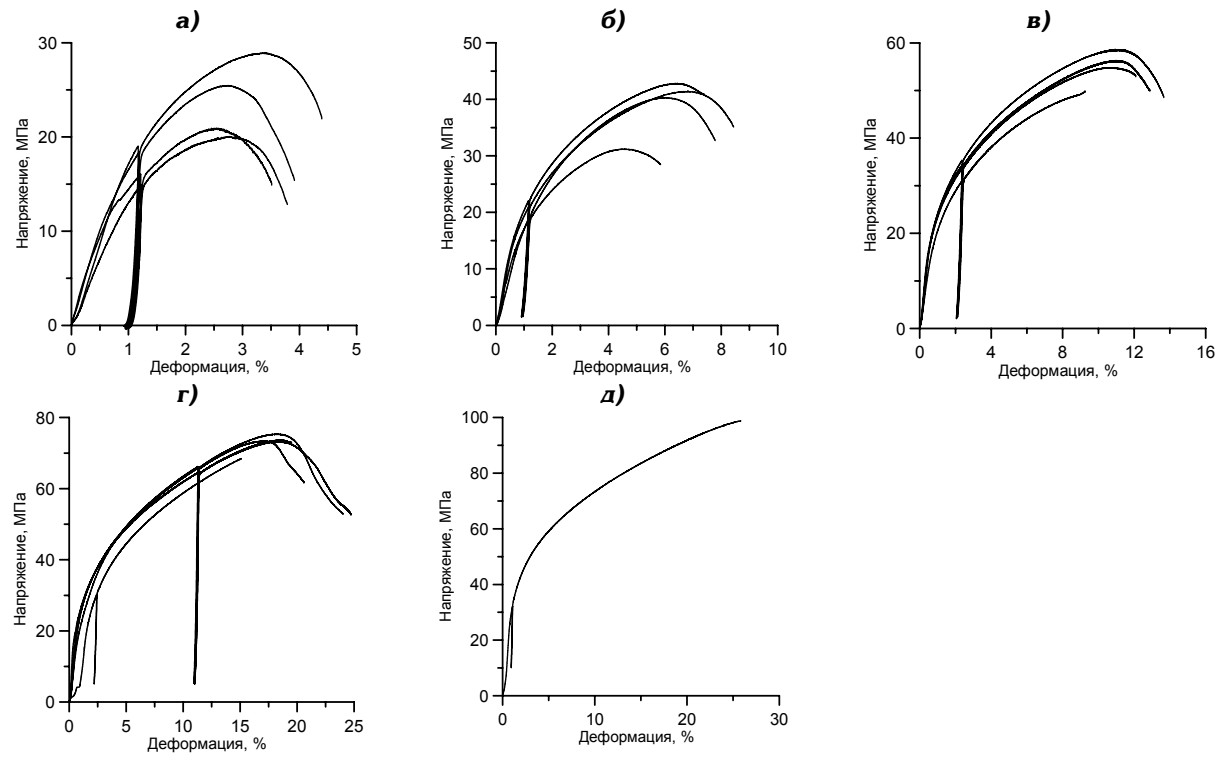
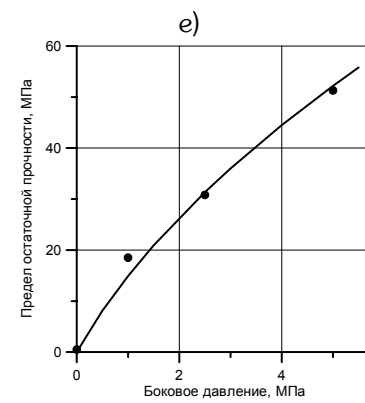
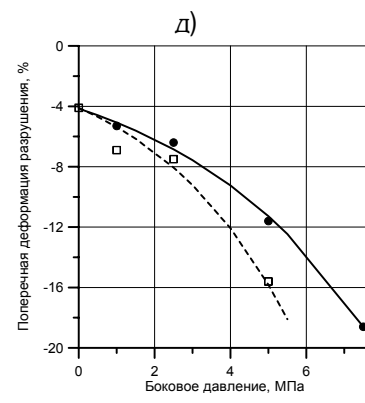
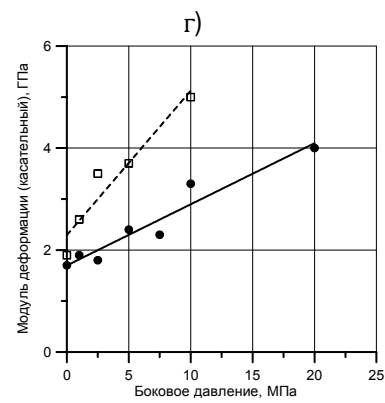
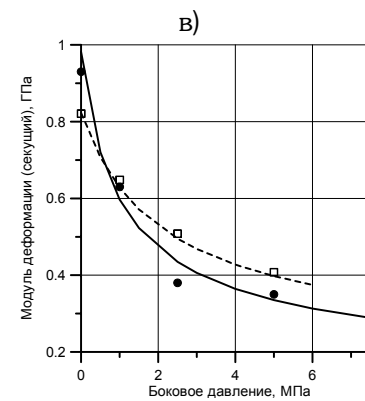
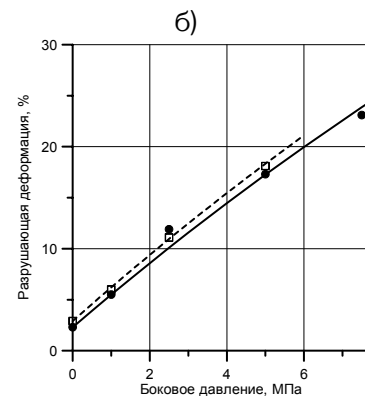
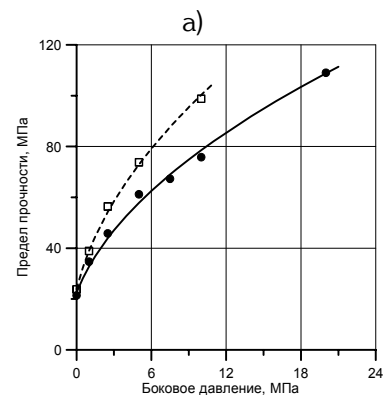


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы деформирования образцов каменной соли, полученные при различном боковом давлении (σ_3): а) 0 МПа; б) 1,0 МПа; в) 2,5 МПа; г) 5,0 МПа; д) 10,0 МПа



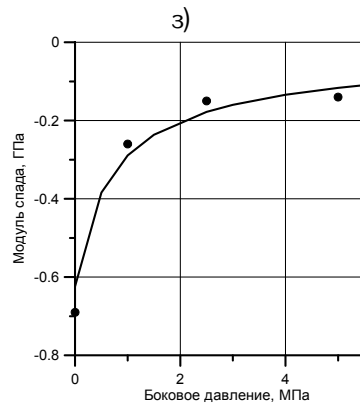
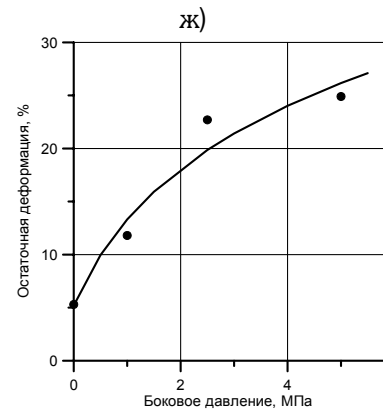


Рис. 5. Влияние величины бокового давления на характер изменения параметров деформирования сальвинита и каменной соли: а) предела прочности; б) разрушающей деформации; в) секущего модуля деформации; г) касательного модуля деформации на пределе прочности; д) поперечной деформации на пределе прочности; е) остаточного предела прочности; ж) деформации на остаточной прочности; з) модуля спада;

— Сильвинит
 - - - Каменная соль

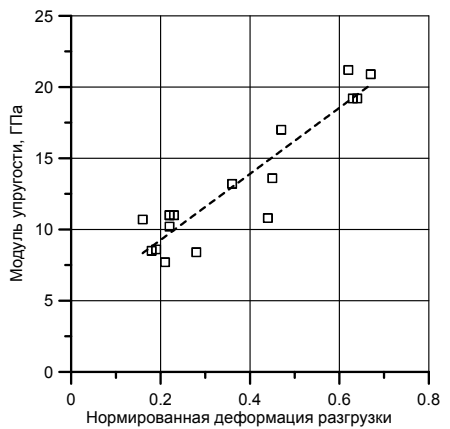


Рис. 6. Характер изменения модуля упругости каменной соли от нормированной деформации разгрузки

Анализ результатов показал, что отличие одноосного сжатия от объемного нагружения заключается, в первую очередь, в появлении на диаграмме деформирования ветви остаточной прочности, что обусловлено влиянием бокового давления на дезинтегрированные в процессе трещинообразования частицы образца. Также при переходе от одноосного к объемному сжатию происходил резкий рост несущей способности образца (рис. 3, а, б и рис. 4, а, б). При дальнейшем увеличении бокового давления рост несущей способности образца происходил менее интенсивно.

Под воздействием сжимающих усилий образец претерпевал значительные пластические изменения (извлеченные образцы, не перешедшие в стадию разупрочнения, имели характерную бочкообразную форму), что, вследствие конструктивных особенностей камеры трехосного сжатия, ограничило возможность измерения больших продольных деформаций (до 30 – 35%).

Изменение средних значений параметров деформирования образцов в зависимости от величины бокового давления приведено на рис. 5.

Сравнение полученных зависимостей показало, что при одинаковом боковом давлении прочность каменной соли на 20–25 % выше аналогичного показателя для сильвинита. Изменение максимальной несущей способности (σ_1^{np}) образца (рис. 5, а) достаточно хорошо описывается кривой, близкой к параболической огибающей.

Влияние бокового давления на величину разрушающей деформации (ε_1^{np}) в интервале 0 - 8 МПа, с достаточной степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью

(рис. 5, б). При этом, деформационные характеристики для сильвинита и каменной соли практически совпадают.

При увеличении бокового давления также наблюдается возрастание касательного модуля упругости (D_y), определяемого по начальному (линейному) участку диаграммы деформирования (рис. 5, г). Несмотря на большой разброс полученных результатов, достаточно четко прослеживается линейный характер изменения данного модуля от бокового давления. При этом, для каменной соли полученная характеристика изменяется более интенсивно (в 1,5 – 2 раза), чем для сильвинита.

Результаты определения величины поперечной деформации (ε_2^{np}) в момент достижения образцами предела прочности показаны на рис. 5, д. Характер изменения от бокового давления близок к параболической зависимости. Для образцов каменной соли наблюдалась более высокая степень разуплотнения, чем для сильвинита, что объясняется их более высокой хрупкостью разрушения.

С увеличением бокового давления наблюдается возрастание предела остаточной прочности (σ_1^{ocm}), а также деформации (ε_1^{ocm}), соответствующей данному прочностному параметру (рис. 5, е). При этом, интенсивность роста деформации остаточной прочности существенно снижается с тенденцией ее выхода на асимптоту.

В целом, для большинства исследуемых прочностных и деформационных параметров отмечается увеличение их абсолютных значений с повышением бокового давления. Исключение составляют секущий модуль деформации (D_{np}) и модуль спада (M) для ко-

торых имеет место резкое снижение численных показателей при изменении давления от 0 до 2 МПа с последующей тенденцией выхода на асимптоту (рис. 5, в и рис. 5, з).

Оценка влияния бокового давления на величину модуля упругости не позволила выявить однозначной зависимости. В этой связи, был проведен анализ влияния на данный параметр нормированной деформации разгрузки, определяемой как отношение деформации, при которой производится разгрузка образца (ε_1^e) рис. 2, к

величине разрушающей деформации (ε_1^{np}). Полученные данные приведены на рис. 6.

Исследования показали, что наблюдается возрастание модуля упругости с увеличением нормированной деформации разгрузки. Это объясняется тем, что предложенный нормированный аргумент характеризует текущую поврежденность образца горной породы под действием сжимающих усилий, отражающую нарушение упругих связей ее минерального скелета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Паньков И.Л., Асанов В.А., Аникин В.В.* Изучение характера неупругого деформирования сильвинита при объемном нагружении/ Физика горных пород: Сб. научных трудов по материалам симпозиума "Неделя горняка-2006" (Тематическое приложение к Горному информационно-аналитическому бюллетеню), - М.: Издательство МГТУ, 2006, с. 96-103.

2. *Прочность и деформируемость горных пород* / Ю.М. Карташов, Г.В. Матвеев, Г.А. Михеев, А.Б. Фадеев. - М.: Недра, 1979, 269 с.

3. *Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г.* Экспериментальная физика и механика горных пород. - СПб.: Наука, 2001.- 343 с. **VIAS**

Коротко об авторах

Асанов В.А., Жигалкин В.М., Паньков И.Л., Усольцева О.М., Цой П.А., Евсеев А.В. – ГИ УрО РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *С.А. Гончаров*.

