

УДК 622.363.1/2:622.831.3

М.Н. Тавостин, А.Е. Кошелев

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИДА ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАМЕННОЙ СОЛИ

Представлены экспериментальные исследования каменной соли. Данные исследования проводились для решения практических задач по проектированию, строительству и эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ), создаваемых в каменной соли. Результаты исследований показали, что при предварительном гидростатическом сжатии и последующем испытании прочность образцов возрастает, по сравнению со стандартным методом (ГОСТ 21153.8-88) на 10 - 15%.

Ключевые слова: подземные хранилища газа, горные породы, каменная соль, напряженное состояние горных пород, гидростатическое сжатие.

Семинар № 3

Tavostin M.N., Koshelev A.E. INFLUENCE OF THE VOLUMETRIC STRESS TYPE ON THE ROCK SALT MECHANICAL PROPERTIES

The paper includes laboratory testing of the rock salt. Such investigations were made for solving such practical problems as designing, construction and exploitation of the underground gas storages (UGS) in salt caverns. Results of investigations had shown, that in testing after hydrostatical preload strength had increased on 10-15% in comparison with standard test [GOST 21153.8-88].

Key words: underground storehouses of gas, rocks, stone salt, tension of rocks, hydrostatic compression.

Горные породы, в том числе каменная соль, в условиях естественного залегания находятся в напряженном состоянии, возникающем в результате действия различных факторов: гравитационных и тектонических сил, давления флюидов (жидкостей и газов) насыщающих породы. Наиболее характерным видом напряженного состояния породного

массива на глубине является объемное сжатие [1].

Вид и условия сжатия могут в той или иной мере влиять на прочностные и деформационные характеристики соляных пород. Традиционные экспериментальные исследования прочности при объемном нагружении, которые регламентированы ГОСТ 21153.8-88 [2], не отражают процессов изменения напряженно-деформированного состояния породного массива на большой глубине. Начальные условия при данных испытаниях больше применимы к инженерным изысканиям устойчивости сооружений, которые постепенно нагружаются под собственным весом, например фундаменты или опоры.

Породный массив вокруг горных выработок, создаваемых на большой глубине, имеет начальное достаточно высокое давление вышележащей породной толщи, которое складывается из вертикальной σ_1 и горизонтальных σ_2 , σ_3 напряжений. При создании горной выработки происходит уменьшение одной или двух составляющих,

что приводит к увеличению девиаторной составляющей ($\sigma_1 - \sigma_3$), которая и может быть причиной критического состояния устойчивости выработки.

Экспериментальные исследования каменной соли проводились для решения практических задач проектирования, строительства и эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ), создаваемых в солях.

В качестве исследуемого материала использовалась каменная соль Рассошинского месторождения Волгоградской области. Исследования проводились на образцах цилиндрической формы диаметром 35 мм, высотой 70 мм;

Эксперименты выполнялись на установке УКС, которая позволяет проводить испытания при объемном напряженном состоянии.

Нагружение образцов горной породы в установке УКС осуществлялось по схеме Кармана при сочетании напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$. В процессе испытаний нагрузки создавались следующим образом (рисунок 1): осевое напряжение σ_1 создавалось в результате давления поршнями цилиндра на торец образца; боковое напряжение $\sigma_2 = \sigma_3$ давлением масла на боковую поверхность образца. При испытаниях образцы имели специальную гидроизоляционную оболочку для исключения влияния действующих нагрузок друг на друга.

Установка УКС позволяет в процессе эксперимента непрерывно измерять продольную ϵ_1 поперечные ϵ_2, ϵ_3 деформации и напряжения $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ при использовании информационно-измерительного комплекса АСУ-Тест.

Всего было испытано тринадцать образцов. Эксперименты проводились по двум схемам нагружения:

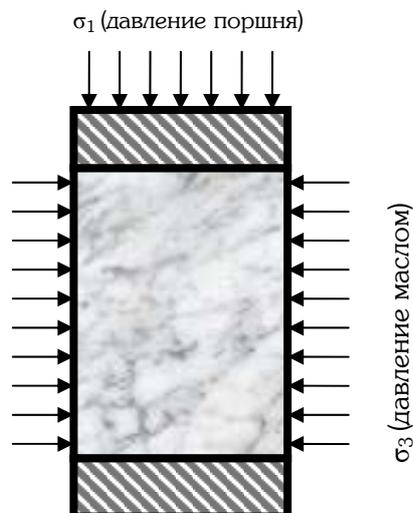


Рис. 1. Схема нагружения цилиндрического образца в установке УКС

с предварительным боковым обжатием и последующим увеличением осевой нагрузки до разрушения;

с предварительным гидростатическим обжатием и последующим понижением боковой нагрузки до разрушения.

Испытания по первой схеме проводились согласно ГОСТ 21153.8-88, который предусматривает испытания при различных значениях $\sigma_3 = \text{const}$ и последующее увеличение осевой нагрузки до разрушения. По данной схеме было испытано шесть образцов. Порядок испытания схематически представлен на рис. 2.

Для получения достоверных сведений о механических свойствах пород исследования желательно проводить, моделируя условия создания подземных выработок в породном массиве. Руководствуясь этими соображениями, проводились испытания по второй схеме. Образец обжимался с равной скоростью со всех сторон ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) до достижения напряжённого состояния $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 2\gamma h$,

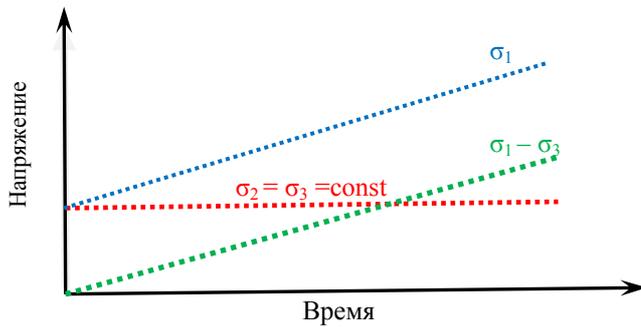


Рис. 2. Схема нагружения образца с боковым обжатием при классической постановке эксперимента (схема Кармана)

строены полные диаграммы деформирования некоторых (1г, 5е-2 - вторая схема нагружения; 4д, 4е-1

где γ – объемный вес вышележащих горных пород, h – глубина заложения ПХГ.

Далее, понижая боковое давление с постоянной скоростью и поддерживая осевую нагрузку неизменной, увеличивали девиаторную составляющую нагрузки ($\sigma_1 - \sigma_3$) вплоть до разрушения. При таком виде испытаний ответственным моментом является определение значения σ_3 в момент разрушения. Это возможно только при непрерывной регистрации значений напряжений в процессе эксперимента. При данной схеме было испытано семь образцов. Схематически порядок испытания представлен на рис. 3.

По результатам испытаний по-

первая схема нагружения) образцов $(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$, представленные на рис. 4. Результаты остальных испытаний представлены ниже, в таблице, где приведены значения напряжений σ_1 и σ_3 , при которых произошло разрушение образцов.

Примем в качестве условия предельного состояния (разрушения) образцов прямолинейную огибающую предельных кругов Мора в пространстве трех главных напряжений в виде:

$$\sigma_i = c + \operatorname{tg} \rho \cdot \sigma_{cp}, \quad (1)$$

где

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

- интенсивность напряжений в образце на момент его разрушения;

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) -$$

соответствующее среднее напряжение; c и ρ - сцепление и угол внутреннего трения каменной соли в образце в пространстве трех главных напряжений, определяемые по результатам испытаний.

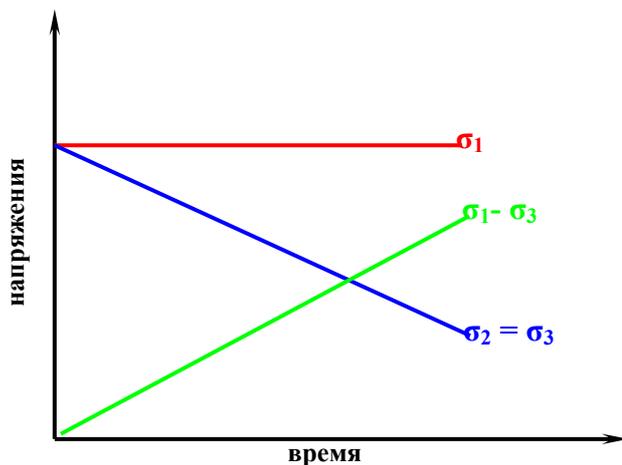


Рис. 3. Последовательность приложения нагрузок при испытаниях по схеме Кармана с предварительным гидростатическим сжатием и последующим снижением σ_3

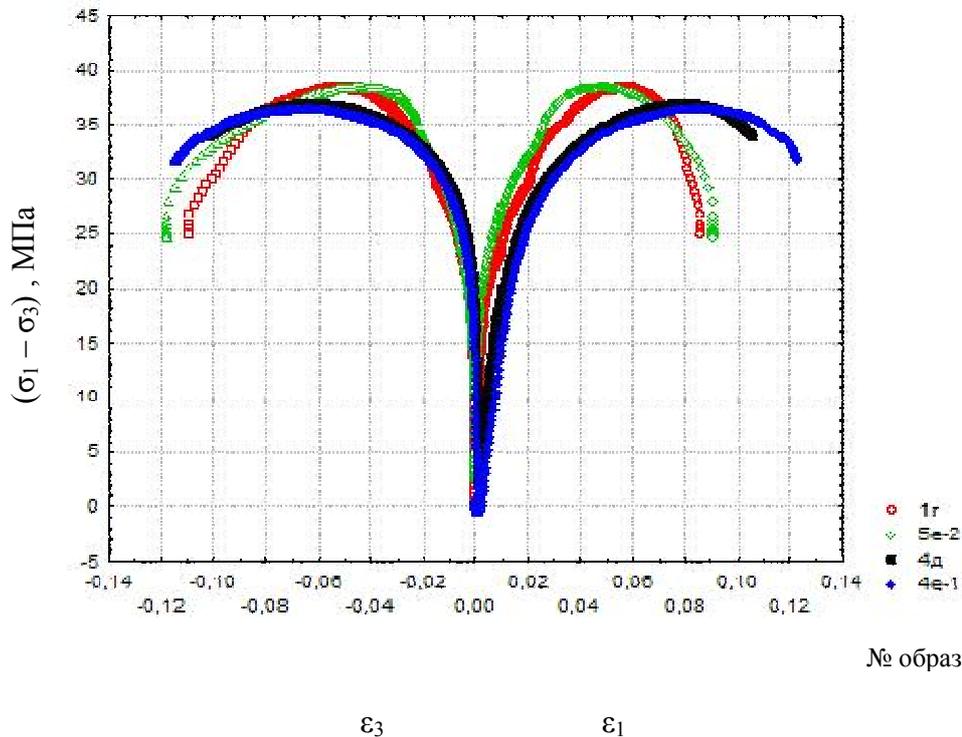


Рис. 4. Полная диаграмма деформирования образцов

Испытания по первой схеме				
№ образца	σ_1 , МПа	$\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	Среднее, МПа
5а	31	1	30	11
5в-2	32,5	1	31,5	11,5
4д	39	2	37	14,3
4е-1	38,5	2	36,5	14,2
4г-1	42	3	39	16
2д-1	41,2	3	38,2	15,7
Испытания по второй схеме				
4е-2	37,8	1,7	36,1	15,7
1г	40,6	2,4	38,2	15,1
3в	37,6	0,9	36,7	13,1
2б-2	42	2	40	15,3
5е-2	41	2,7	38,3	15,5
1а-2	40,4	2,4	38	15,1
5 в-1	44,6	3,4	41,2	17,1

На рис. 5 приведены паспорта прочности каменной соли Россошинской площади, построенных методом регрессионного анализа по данным таблицы с использованием уравнения

(1). Для образцов испытанных по первой схеме $c = 13.0$ МПа и $tg \rho = 1.57$ при коэффициенте корреляции Пирсона $r = 0.98$:

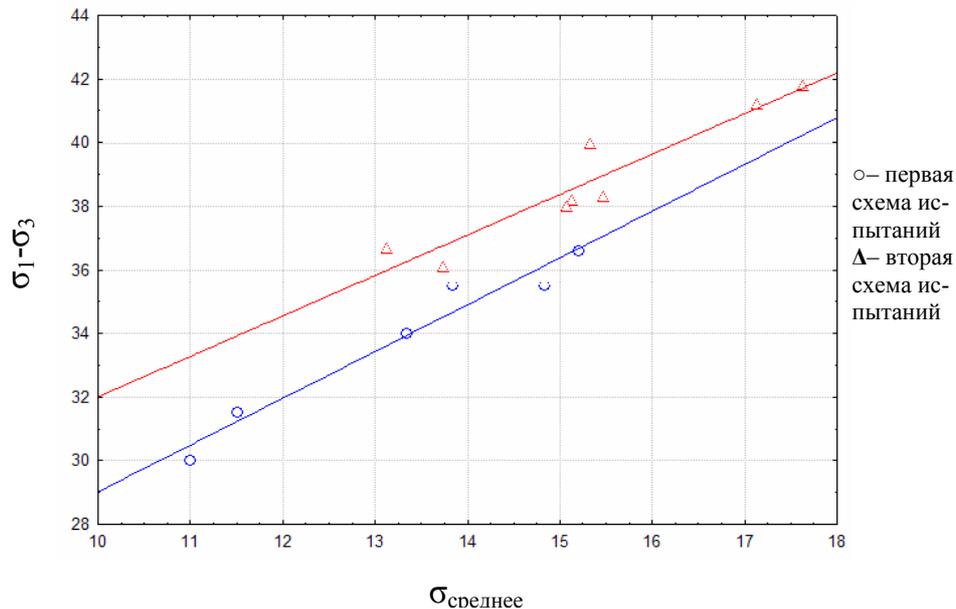


Рис. 5. Сопоставление результатов испытаний образцов при объёмном напряжённом состоянии по двум схемам нагружения

$$\sigma_i = 13.0 + 1.57 \cdot \sigma_{cp}.$$

Для образцов испытанных по второй схеме нагружения с предварительным гидростатическим обжатием и последующим снижением боковых давлений при постоянном осевом $c = 19.6$ МПа и $tg \rho = 1.25$ при коэффициенте корреляции Пирсона $r = 0.93$:

$$\sigma_i = 19.6 + 1.25 \cdot \sigma_{cp}.$$

Результаты исследований показывают, что при предварительном гидростатическом сжатии прочность об-

разцов выше, чем при стандартном методе испытаний на 10 - 15%. Данное обстоятельство можно объяснить относительно большим уплотнением образцов перед увеличением девиаторной составляющей, приводящей к разрушению образцов. Отсюда следует вывод о необходимости перехода от стандартных методов испытаний к методу испытаний с предварительным гидростатическим обжатием, который адекватно отражает условия нагружения горных пород в массиве при сооружении горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: «Наука», 2001, 343 с.
2. ГОСТ СССР. Породы горные. Метод определения предела прочности при объёмном сжатии // ГОСТ 21153.8-88. Госкомитет СССР по стандартам. –М. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Тавостин М.Н. – кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Изучение механических свойств горных пород и материалов», Подземгазпром,
 Кошелев А.Е. – студент, geomeh62@yandex.ru; sasha-gnom@mail.ru, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia

