

М.Н. Тавостин, А.Е. Кошелев, Ю.В. Осипов

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАМЕННОЙ СОЛИ С УЧЕТОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВСЕСТОРОННЕГО НАГРУЖЕНИЯ

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 модули деформации и упругости, коэффициент Пуассона, а также прочность образцов возрастает значительно возрастает, по сравнению со стандартными методами исследований. Получены уравнения, которые можно использовать при определении модуля упругости и коэффициента Пуассона каменной соли в сложном напряженном состоянии, зная лишь значения определенные при одноосном сжатии.

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

При постановке экспериментальных исследований для определения модуля деформации, модуля упругости, коэффициента Пуассона, а также объемной прочности в лабораторных условиях, как правило, не учитывают того сложного напряженного состояния, при котором породный образец находился в массиве. Эксперименты, проведение которых регламентируют ГОСТы [1, 2], осуществляют либо в режиме одноосного нагружения или при напряженных состояниях не учитывающих начального поля напряжений в массиве, что можно объяснить достаточно сложным и трудоемким определением деформаций породных образцов в сложном напряженном состоянии. Данные, полученные таким образом, не отражают реальных деформационных и прочностных характеристик породных образцов в массиве, так как при извлечении из массива происходит разгрузка и переход образца в напряженное состояние, не соответствующее его

сложному напряженному состоянию в породном массиве.

В данной работе приведены экспериментальные исследования по определению деформационных и прочностных свойств породных образцов каменной соли при влиянии того поля напряжений при котором породные образцы залежали в массиве горных пород. Экспериментальные исследования проводились в Исследовательском лабораторном центре ООО «Газпром геотехнологии». Температурный режим был в пределах 20–24 °С.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из кернового материала Романовской площади Калининградской области скважины 3т с глубины 900–1000 м, а также Россошинской площади Волгоградской области скважины 3т с глубины 1050–1170 м. Образцы из имеющегося кернового материала изготавливались согласно ГОСТам [1, 2] методом выбуривания на буровом станке и вытачивания на токарном станке с

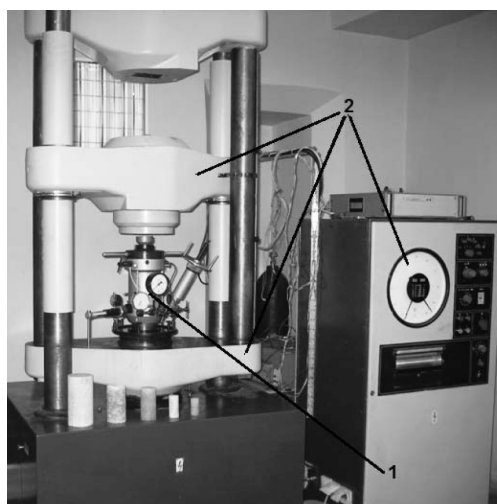


Рис. 1. Камера БВ-21 (1); пресс EU-100 (2)

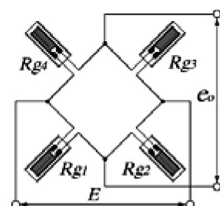
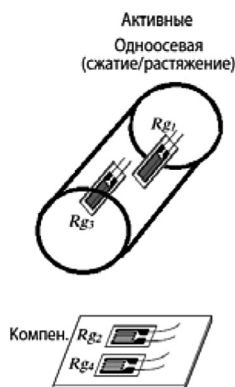
соотношением диаметра к высоте 1 к 2. Пример изготовленного образца представлен на рис. 1. Высота образцов составляла 80 мм, диаметр 40 мм, а средняя плотность 2,17 г/см³. Всего было испытано 80 образцов.

Экспериментальные исследования осуществлялись в камере запредельного деформирования БВ-21 (конструкция ВНИМИ), которая размещалась на гидравлическом прессе EU-100 (рис. 1). Камера БВ-21 позволяет в процессе эксперимента непрерывно

измерять продольную ε_1 , поперечные деформации ε_2 , ε_3 и напряжения σ_1 , $\sigma_2 = \sigma_3$ при использовании информационно-измерительного комплекса АС-Test.

Первоначальным этапом определялись деформационные свойства. Экспериментальное определение модулей деформации и модулей упругости в сложном напряженном состоянии является достаточно сложной и трудоемкой задачей. С целью получения объективной картины деформирования испытуемых образцов был опробован метод аппликации тензорезистивных датчиков непосредственно на боковую поверхность образцов. Как следствие половину времени для проведения эксперимента на одном образце занимает его подготовка к испытаниям. Фотография, подготовленного к эксперименту образца, представлена на рис. 2.

На одном и том же образце определялись деформационные характеристики в режиме одноосного сжатия и в сложном напряженном состоянии. При проведении экспериментов образец имел специальную резиновую изоляционную оболочку, обеспечивающую экранирование образца от рабочей жидкости (масла). Последо-



$$\varepsilon_0 = \frac{2E_0}{K_s E}$$

K_s : коэффициент чувствительности

ε_0 : деформация

E : питание моста

E_0 : выходное напряж.

$Rg1, Rg3$:

деформация: ε_0

$Rg2, Rg4$:

деформация: 0

Рис. 2. Схема формирования мостового соединения на примере образца 112/2 (Рассошенская площадь) с приклеенными и распаянными тензорезисторами

вательность циклов приложения нагрузки к образцам производилась по различным схемам нагружения. Неизменным в схемах нагружения является следующее (рис. 3):

- нагрузка образца только в режиме одноосного сжатия в упругой зоне и последующая разгрузка (участки 1 рис. 3);

- образец обжимался гидростатическим давлением, т.е. со всех сторон компонентами напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (рис. 3, участки 2). Далее образец выстаивался при гидростатическом сжатии в течение времени, при котором происходила стабилизация показаний датчиков. Наглядно это показано на участке 3 рис. 3. Считая данное значение условно равным 0, или фоновым по отношению к последующему осевому нагружению, производится деформирование образца до такого значения осевого давления, чтобы разность между фоновым и фактическим составляла такое же, как и в режиме одноосного нагружения без гидростатического сжатия (без разрушения), т.е. происходит нагружение образца по классической схеме Кармана $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Максимальное значение гидростатического сжатия вычислялось по формуле:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \rho \cdot g \cdot h,$$

где ρ – плотность вышележащих горных пород, кг/м^3 ; h – глубина извлечения по-

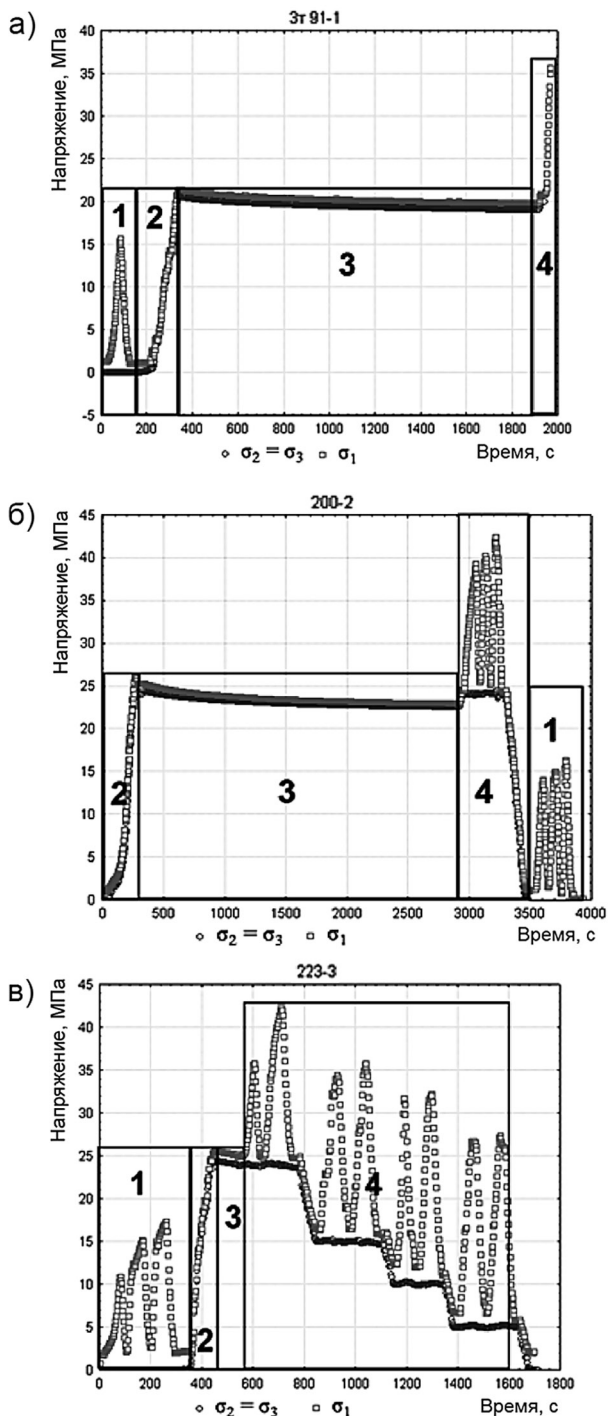


Рис. 3. Последовательность циклов нагружения образцов: а) 91-1 (Калининградская область), б), в) – 200-2 и 223-3 (Волгоградская область)

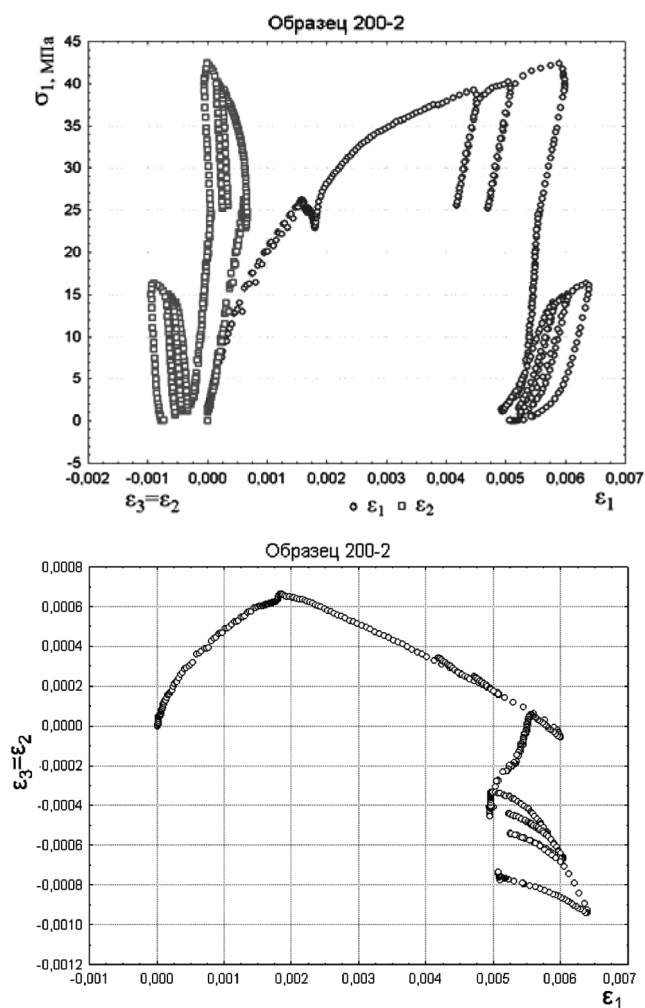


Рис. 4. Полная диаграмма деформирования образца 200-2 (верхний) и график зависимости поперечных деформаций от продольных (нижний)

Таблица 1

Модули деформации породных образцов каменной соли

№ образца	E_a , МПа	E_a' , МПа
Зт67-1-с(3)	4099	12 954
Зт86-1	11 019	–
Зт91-1-с(5)	6366	12 187
Зт92-1-с(3)	8268	14 288
Зт100-2-с(3)	12 408	22 906
Зт109-2-с(5)	11 150	24 566
Зт122-3-с(3)	16 831	26 126
$E_{\text{ср.}}$, МПа	10 020	18 838

родного образца, м; g – ускорение свободного падения;

- далее происходило равнозначное понижение гидростатического давления, т.е. значение $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ было меньшим, чем предыдущее. Понижение гидростатического давления производилось на определенное значение, заданное в начале эксперимента или в зависимости от поведения образца в ходе эксперимента. Далее производилось нагружение образца осевым давлением как описано выше. Наглядно это показано на участке 4 рис. 3.

Для испытанных образцов строились полные диаграммы деформирования $\sigma_1 = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ и $\varepsilon_2 = f(\varepsilon_1)$ (рис. 4). Коэффициент Пуассона определялся при обработке графика $\varepsilon_3 = f(\varepsilon_1)$, а модуль упругости – при обработке графика зависимости $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$. Значение модуля упругости образца и коэффициента Пуассона рассчитывается как среднее арифметическое по циклам «разгрузка» при заданном цикле приложения нагрузок.

Таблица 2

Зависимость модуля упругости от бокового сжатия

	№ образца	$\sigma_2 = \sigma_3$, МПа					
		0	5	10	15	20	24
Модуль упругости E_y , МПа	56-1	28 535	33 232	34 002	34 328		
	100	23 101	31 390	33 192		33 356	
	223-3	28 976	31 700	32 969	33 544		35 184
	78-1	24 608	25 079	28 356	29 990	33 580	
	84-2	27 395	31 391				
	223-2	30 794				33 580	36 167
	112-1	29 831					37 554
	112-2	29 675					38 004
	200-2	26 756					35 861
	217-1	32 249					38 622
	223-1						34 618
	77-2	31 460					38 306
$E_{y_{cp}}$, МПа	28 489	30 558	32 130	32 621	33 505	36 789	
СКО, МПа	2829	3157	2555	2312	129	1524	
Коэффициент вариации, %	9,9	10,3	8,0	7,1	0,4	4,1	

Таблица 3

Зависимость коэффициента Пуассона от бокового сжатия

	№ образца	$\sigma_2 = \sigma_3$, МПа					
		0	5	10	15	20	24
Коэффициент Пуассона ν	56-1	0,212	0,234	0,233	0,240		
	100	0,229	0,256	0,261		0,270	
	78-1	0,193	0,194	0,219	0,234	0,247	
	84-2	0,237	0,240				
	223-2	0,204				0,245	0,259
	112-1	0,204					0,238
	112-2	0,283					0,289
	200-2	0,182					0,255
	217-1	0,184					0,229
	223-1						0,258
	77-2	0,143					0,239
ν_{cp}	0,207	0,231	0,238	0,237	0,254	0,252	
СКО	0,037	0,026	0,021	0,004	0,014	0,020	
Коэффициент вариации, %	18,102	11,410	8,998	1,790	5,469	7,850	

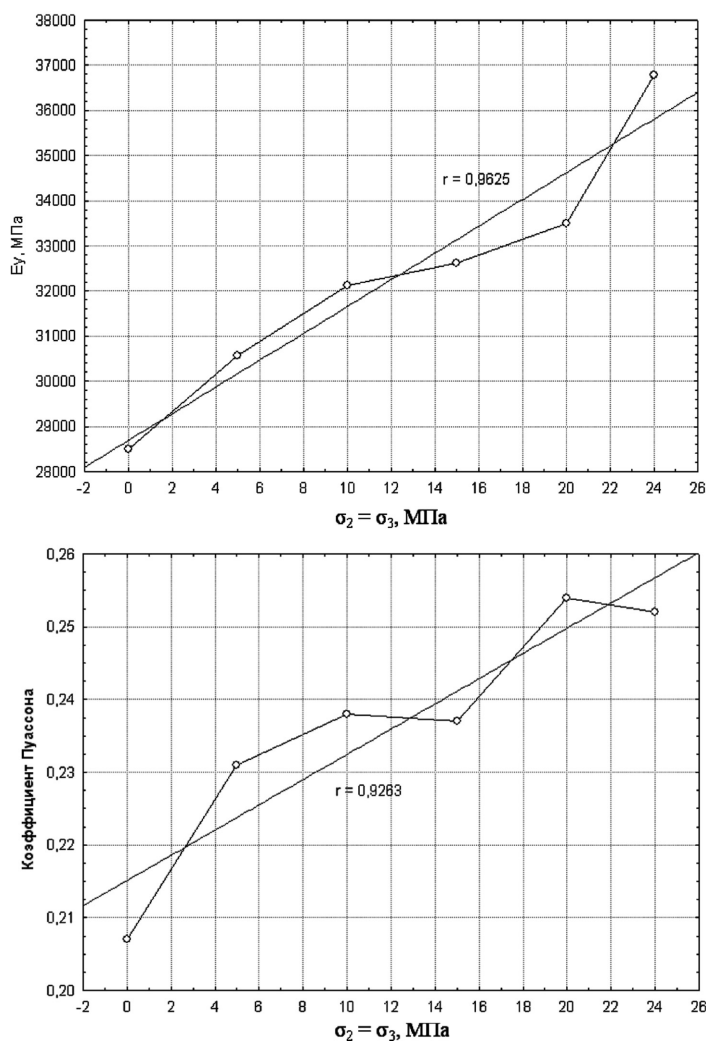


Рис. 5. Зависимость модуля упругости (левый график) и коэффициента Пуассона (правый график) от бокового давления

Полученные значения модулей деформации представлены в табл. 1. Значение модуля упругости и коэффициента Пуассона в зависимости от бокового обжатия приведены в табл. 2 и 3.

Графическая зависимость значений модуля упругости и коэффициента Пуассона от бокового обжатия представлена на рис. 5. Уравнение для аппроксимирующей прямой зависимости $E_y = f(\sigma_3)$ следующее:

$$E_y = f(\sigma_3) = 28\,689 + 296 \cdot \sigma_3 \quad (1)$$

Уравнение для аппроксимирующей прямой зависимости $\nu = f(\sigma_3)$ следующее:

$$\nu = f(\sigma_3) = 0,215 + 0,0017 \cdot \sigma_3 \quad (2)$$

После установления закономерности однозначного влияния начального гидростатического сжатия на деформационные свойства породных образцов каменной соли, исследовались за-

кономерности влияния данного поля на прочностные свойства породных образцов, с целью сравнительного анализа построенных паспортов прочности при различных схемах приложения нагрузки.

Последовательность приложения нагрузки к образцам производилась по двум различным схемам нагружения.

1. Первая схема нагружения осуществлялась согласно ГОСТ [2]. Режим испытаний образцов заключается в создании предварительного гидростатического давления до заданного бокового напряжения, а затем, при поддержании бокового напряжения постоянным, образец нагружается осевым давлением. Схематически график нагружения и разрушения представлен на рис. 6.

2. Вторая схема нагружения заключалась в том, что образец обжимался гидростатическим давлением, т.е. со всех сторон компонентами главных напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (рис. 7, участок 1). Максимальное значение гидростатического сжатия вычислялось по формуле:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \rho \cdot g \cdot h,$$

где ρ – плотность вышележащих горных пород, кг/м³; h – глубина извлечения породного образца, м; g – ускорение свободного падения.

Далее образец выстаивался при гидростатическом сжатии в течение времени, при котором происходила стабилизация показаний датчиков, измеряющих нагрузки. Затем боковое давление понижалось на определенную величину (заданную вначале эксперимента) и поддерживалось постоянным, пока образец не разрушится. Осевая нагрузка на образце в этот же промежуток времени повышалась вплоть до разрушения.

По результатам произведенных испытаний образцов по двум схемам нагружения определялись предельные

значения осевой нагрузки, а так же величина бокового давления, при котором произошло разрушение образца. По полученным данным строились паспорта прочности при двух схемах нагружения. Результаты построения паспортов прочности представлены на рис. 9–10.

Анализируя полученные данные видно, что значение модуля деформации возрастает до 90%; значение модуля упругости – до 30%; коэффициента Пуассона – до 30%; значение объемной прочности – до 9% по сравнению со стандартными методами испытаний. Следовательно, необходим переход от стандартных методов испытаний к методу испытаний с предварительным гидростатическим сжатием, а также необходимо дальнейшее

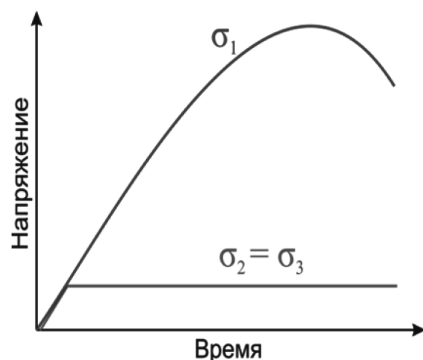


Рис. 6. Схема нагружения образца по ГОСТ 21153.8-88

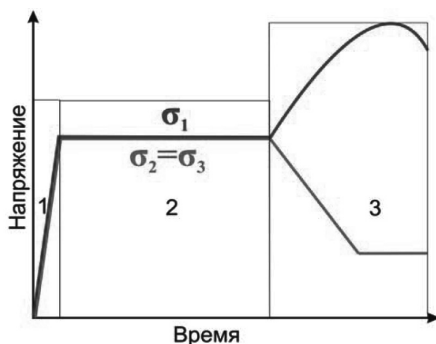


Рис. 7. Последовательность нагружения образцов в экспериментах при начальном гидростатическом сжатии по II схеме

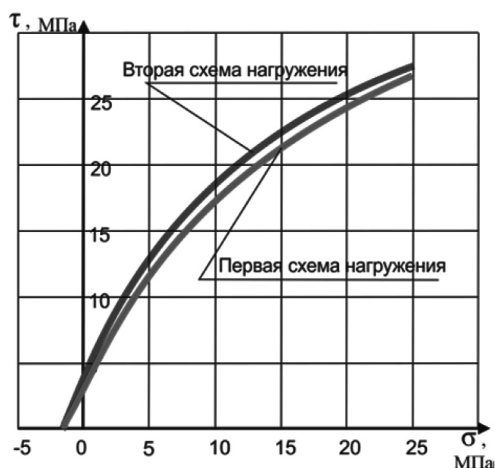


Рис. 8. Сравнение паспортов прочности образцов скважины 3т Россошинской площади Волгоградской области, испытанных по двум схемам нагружения

изучение влияния поля напряжений, при котором находился породный образец в массиве на его физико-механические свойства. Полученные уравнения (1), (2) можно использовать

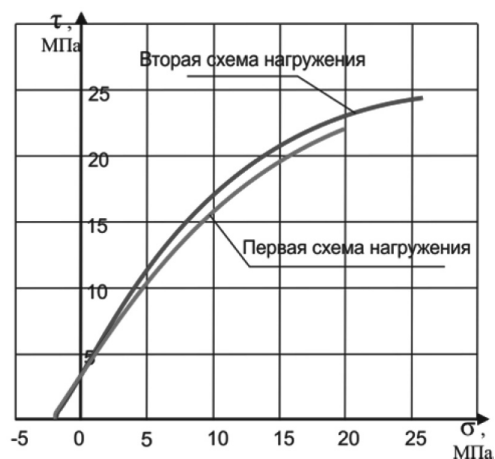


Рис. 9. Сравнение паспортов прочности образцов скважины 3т Романовской площади Калининградской области, испытанных по двум схемам нагружения

при определении модуля упругости и коэффициента Пуассона каменной соли в сложном напряженном состоянии, зная лишь значения определенные при одноосном сжатии.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тавостин Михаил Николаевич – доцент, МГИ НИТУ «МИСиС»,
начальник ИЛЦ ООО «Газпром геотехнологии»,

Кошелев Александр Евгеньевич – научный сотрудник, ИЛЦ ООО «Газпром геотехнологии»,

Осипов Юхання Владимирович – младший научный сотрудник,
ИЛЦ ООО «Газпром геотехнологии».

UDC 622.831

STUDY OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK SALT WITH THE TENTATIVE COMPREHENSIVE LOADING

Tavostin M.N., Assistant Professor, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Head of Research and Testing Center of LLC «Gazprom geotechnology», Moscow, Russia,
Koshelev A.E., Researcher, Research and Testing Center of LLC «Gazprom geotechnology», Moscow, Russia,
Osipov Yu.V., Junior Researcher, Research and Testing Center of LLC «Gazprom geotechnology», Moscow, Russia.

The paper presents experimental investigations of rock salt. These studies were carried out for the solution of practical tasks of design, construction and operation of underground gas storages (UGS), created in rock salt. The results showed that pre hydrostatic compression and subsequent testing of the deformation modules and modulus Poisson's ratio, and the strength of samples increases significantly increased in comparison with standard methods of research. Equations are obtained that can be used when determining the elastic modulus and Poisson's ratio of rock salt in complex stress state, knowing only the values defined under uniaxial compression.

Key words: underground gas storage, rock, rock-salt, stressed state of the rocks, hydrostatic compression.