

УДК 622.831.1

**ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ  
КВАЗИПЛАСТИЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

*И.Л. Паньков, В.А. Асанов, А.А. Ударцев, В.С. Кузьминых*

Приведены результаты использования испытательного оборудования при изучении деформирования и разрушения квазипластичных соляных пород в условиях одноосного и объемного сжатия, прямого растяжения, сдвиге со сжатием.

*Ключевые слова:* соляные породы; одноосное и объемное сжатие; прямое растяжение; сдвиг со сжатием.

---

**PRACTICE OF TEST FACILITIES USAGE DURING RESEARCHES  
ON DEFORMATION AND FAILURE OF QUASIPLASTIC ROCKS  
IN LABORATORY CONDITIONS**

*I.L. Pankov, V.A. Asanov, A.A. Udarcev, V.S. Kuzminyh*

It is shown the results of test facilities usage during researches on deformation and failure of quasiplastic rocks under uniaxial and three-dimensional compression, straight tension and shift with compression conditions.

*Keywords:* salt rocks; uniaxial and three-dimensional compression; straight tension; shift with compression.

Одной из основных задач безопасной разработки полезных ископаемых в условиях Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей является исключение условий образования водопроницающих трещин водоупорного целика, отделяющего продуктивные отработываемые пласты от вышележащих водоносных горизонтов. Комплекс защитных мер, направленных на минимизацию деформаций в водозащитной толще, обусловленных ее прогибом, предполагает проведение геомеханических исследований [1], базирующихся на экспериментальных данных, полученных при различных режимах и схемах нагружения горных пород. В этой связи изучение особенностей деформирования и разрушения соляных пород является важной составной частью геомеханического обоснования безопасных условий ведения горных работ.

Исследования проводили на соляных породах Верхнекамского месторождения, представленных каменной солью, сильвинитом и карналлитом. Эксперименты выполняли по схемам одноосного сжатия (электромеханический пресс Zwick/Z250 и гидравлический пресс ToniNORM 2041), одноосного растяжения (электромеханическая универсальная

испытательная машина Zwick/050), объемного сжатия по схеме Кармана (стабилметрический испытательный комплекс MTS-815), а также сдвига со сжатием (сдвиговой испытательный комплекс MTS-816) (рисунок 1). В процессе испытания варьировали размеры образцов, соотношения их высоты к ширине, величину бокового и вертикального давления.

Все эксперименты проводили с построением полных диаграмм деформирования, используемых для определения комплекса механических параметров: предела прочности ( $\sigma_{np}$ ), разрушающей деформация ( $\epsilon_{np}$ ), предела остаточной прочности ( $\sigma_{ост}$ ), касательного модуля деформации ( $D_y$ ), секущего модуля деформации ( $D_{np}$ ), модуля спада ( $M$ ), общей энергоёмкости деформирования ( $W$ ). Схема определения механических показателей приведена на рисунке 2.

Эксперименты по влиянию формы образца проводили на электромеханическом прессе Zwick/Z250 (максимальное усилие – 250 кН), (рисунок 1, а). По результатам испытаний соляных образцов (каменная соль, сильвинит, карналлит) различной высоты получены зависимости изменения



Рисунок 1 – Проведение испытаний горных пород: а – электромеханический пресс Zwick/Z250; б – гидравлический пресс ToniNORM 2041; в – электромеханическая универсальная испытательная машина Zwick/050; г – стабилометрический испытательный комплекс MTS-815; д – сдвиговой испытательный комплекс MTS-816

прочностных, деформационных, жесткостных и энергоемкостных параметров квазипластичных пород в зависимости от соотношения высоты ( $h$ )

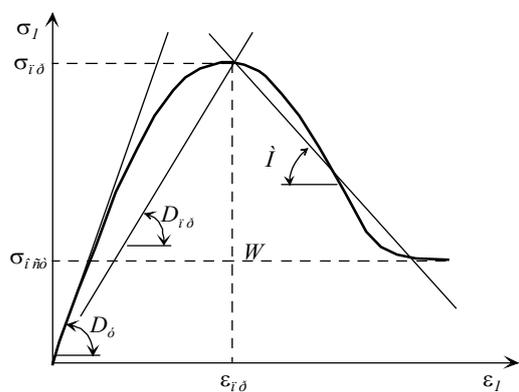


Рисунок 2 – Схема определения показателей деформирования

и ширины ( $d$ ) образца [2]. Анализ результатов показал, что с уменьшением высоты образцов наблюдается увеличение прочности, разрушающей деформации, общей энергоемкости деформирования и уменьшение модуля деформации с модулем спада. Общий вид эмпирических зависимостей:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{np} &= X_1 + X_2 \left( \frac{h}{d} \right)^{-1}, \\
 \varepsilon_{np} &= X_3 \left( \frac{h}{d} \right)^{-1}, \\
 D_y &= X_4 \frac{h}{d}, \\
 M &= X_5 \frac{h}{d} + X_6 \left( \frac{h}{d} \right)^2, \\
 W &= X_7 \left( \frac{h}{d} \right)^{-2},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Таблица 1 – Значения коэффициентов показателей деформирования соляных пород

$X_1, МПа$	$X_2, МПа$	$X_3, \%$	$X_4, ГПа$	$X_5, ГПа$	$X_6, ГПа$	$X_7, МДж/м^3$
4,1÷15,7	7,9÷11,2	0,9÷5,1	1,4÷1,7	0,04÷0,5	0,03÷0,43	0,1÷1,9

Таблица 2 – Осредненные результаты определения параметров деформирования соляных пород при прямом растяжении

$\sigma_{np}, МПа$	$\varepsilon_{np}$	$D_{np}, ГПа$	$D_y, ГПа$	$M, ГПа$	$W, МДж/м^3$
Параллельно слоистости					
1,2	0,0011	1,1	1,5	0,9	0,0022
Перпендикулярно слоистости					
0,7	0,0008	0,9	1,3	0,9	0,0008

где  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$  – коэффициенты эмпирических зависимостей (таблица 1).

Для исследования влияния масштабного фактора на прочностные и деформационные показатели выполнен комплекс лабораторных экспериментов на кубических образцах различной величины, изготовленных по “упорядоченной схеме”, позволяющей увязывать влияние структурно-текстурного строения пород на образцы различного размера. Исследования проводили на электромеханическом прессе Zwick/Z250 и гидравлическом прессе ToniNORM (максимальное усилие – 5000 кН) (рисунок 1, б). Анализ полученных результатов позволил установить, что для квазипластичных соляных пород (сильвинит и большинство разновидностей каменной соли) основным является масштабный эффект 2-го рода, механизм которого заключается в образовании деструктивного высокопластичного поверхностного слоя при изготовлении образцов [3]. Получены аналитические зависимости, описывающие изменение механических показателей призматического образца от его размеров и исходных свойств пород в массиве:

$$\begin{aligned}
 D_y &= D_y^{масс} \frac{h((d - 2l_y)^2(n - 1) + d^2)}{n(2l_y(d - 2l_y)^2(n - 1) + d^2h)}, \\
 \sigma_{np} &= \sigma_{np}^{масс} \frac{d^2 + (d - 2l_{np})^2(n - 1)}{nd^2}, \\
 \varepsilon_{np} &= \varepsilon_{np}^{масс} \frac{h + 2l_{np}(n - 1)}{h}, \\
 D_{np} &= D_{np}^{масс} \frac{h(d^2 + (d - 2l_{np})^2(n - 1))}{nd^2(h + 2l_{np}(n - 1))}, \\
 W &= W^{масс} \frac{(h + 2l_{запр1}(n - 1))(d^2 + (d - 2l_{запр1})^2(n - 1))}{nd^2h}, \\
 M &= M^{масс} \frac{h((d - 2l_{запр2})^2(n - 1) + d^2)}{n(2l_{запр2}(d - 2l_{запр2})^2(n - 1) + d^2h)},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $l_y, l_{np}, l_{запр1}, l_{запр2}$  – толщина деструктивного поверхностного слоя на начальном, предельном и за предельных участках деформирования;  $n$  – коэффициент деструкции (разупрочнения).

По результатам сопоставительного анализа экспериментальных и теоретических исследований проведена оценка изменения толщины деструктивного слоя в процессе деформирования образцов квазипластичных пород.

Эксперимент при прямом растяжении проводили на прямоугольных образцах соляных пород (сильвинит, каменная соль) размером 250×50×50 мм, которые выпиливали из породных монолитов в направлении, как параллельном, так и перпендикулярном естественному залеганию слоев. Для испытаний использовали универсальную электромеханическую машину Zwick/050 (максимальное усилие – 50 кН), позволяющую фиксировать металлические матрицы с зацементированным в них образцом в механических захватах (рисунок 1, в). Построение полных диаграмм деформирования на растяжение проводили по результатам измерения продольных (осевых) деформаций поверхности образца с помощью трех выносных высокоточных датчиков консольного типа, располагаемых по схеме равностороннего треугольника. Результаты определения параметров деформирования при растяжении соляных пород приведены в таблице 2.

Для изучения влияния фактора объемного нагружения элементов несущих подземных конструкций выполнено исследование закономерностей деформирования и разрушения образцов каменной соли и сильвинита соляных пород при различных уровнях бокового давления. Испытания проводили на стабилометрическом испытательном комплексе MTS-815 (вертикальное усилие – 1600 кН, боковое давление – 70 МПа) (рисунок 1, г). В рамках данной задачи выполнено исследование закономерностей деформирования и разрушения образцов каменной соли и сильвинита соляных пород при боковом

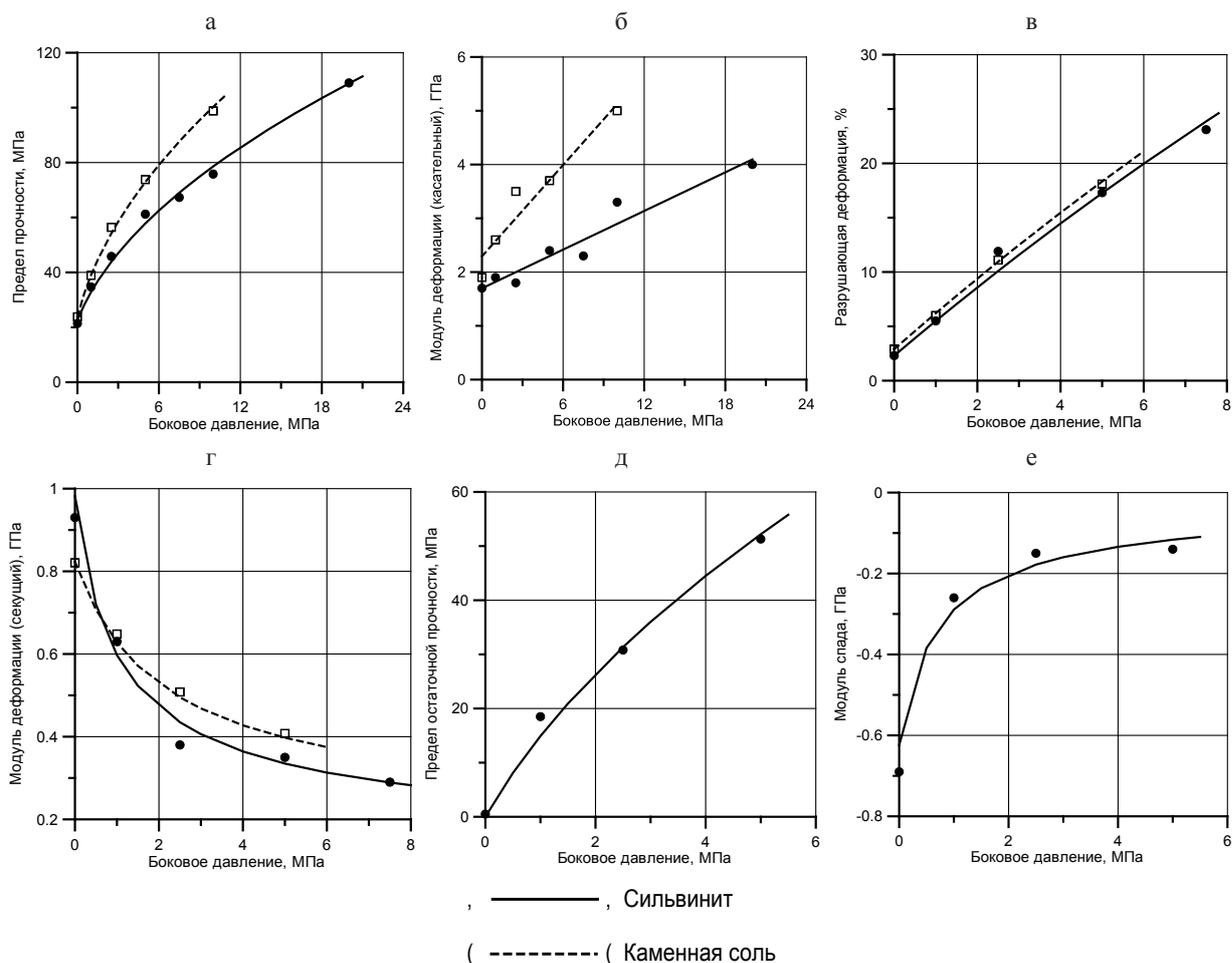


Рисунок 3 – Характер изменения параметров деформирования соляных пород от величины бокового давления: а – предел прочности; б – касательный модуль деформации; в – разрушающая деформация; г – секущий модуль деформации; д – предел остаточной прочности; е – модуль спада

давления: 0; 1,0; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 и 20,0 МПа. По результатам экспериментальных исследований построены эмпирические зависимости изменения прочностных и деформационных параметров от величины бокового давления (рисунок 3).

В целом, для большинства исследуемых прочностных и деформационных параметров (исключение составляют секущий модуль деформации и модуль спада) отмечалось увеличение их абсолютных значений с повышением бокового давления.

Для оценки состояния тонкослойной соляной толщи, проводили эксперименты на сдвиг со сжатием соляных пород по разделяющим глинистым контактам, являющихся наиболее «слабым» элементом строения соляного массива. Исследования проводили на сдвиговом испытательном комплексе MTS-816 (вертикальное усилие в режиме сжатия –

500 кН; максимальное сдвиговое усилие – 260 кН) (рисунок 1, д).

При проведении лабораторных испытаний была отработана технология подготовки (отбор, цементирование) и методика испытаний соляных образцов с тонким глинистым контактом. Выполнена оценка предельно допустимого нормального усилия, при котором происходит скалывание неровностей контакта вследствие сдвига [4].

На основе полученных данных построены паспорта пиковой и остаточной прочности, а также паспорт, характеризующий величину сдвигового усилия, при котором начинается процесс деформирования по поверхности ослабления. Зависимости прочностных параметров контактов от величины нормального напряжения имеют следующий вид [5]:

$$\begin{aligned}\tau_p(\sigma) &= C_p + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi_p; \\ \tau_*(\sigma) &= \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi_*; \\ \tau_n(\sigma) &= \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi_n,\end{aligned}\quad (3)$$

где  $C_p = \tau(0)$  – коэффициент сцепления контакта;  $\phi_p$  и  $\phi_*$  – углы трения пиковой и остаточной прочности контакта;  $\phi_n$  – угол трения, характеризующий начало процесса деформирования. Для тонкого глинистого прослоя полученные значения  $C_p$ ,  $\phi_p$ ,  $\phi_*$ ,  $\phi_n$  лежат в диапазонах:  $C_p = 0,3 \div 0,8$  МПа;  $\phi_p = 55^\circ \div 60^\circ$ ;  $\phi_* = 45^\circ \div 48^\circ$ ;  $\phi_n = 35^\circ \div 40^\circ$ .

Деформационные показатели (смещения на пределе пиковой и остаточной прочности) в первом приближении могут быть приняты постоянными и не зависящими от нормального усилия.

Результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований предназначены для параметрического обеспечения геомеханических расчетов параметров камерной системы разработки Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей.

#### Литература

1. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. СПб., 2008.
2. Барях А.А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учебное пособие / А.А. Барях, В.А. Асанов, И.Л. Паньков. Пермь: изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 199 с.
3. Паньков И.Л. Изучение механизма масштабного эффекта при сжатии квазипластичных соляных пород / И.Л. Паньков // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13. Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. С. 111–113.
4. Patton F.D. Multiple modes of shear failure in rock / F.D. Patton // Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech. Lisbon. 1966. № 1. P. 509–513.
5. Паньков И.Л. Моделирование процесса сдвига по глинистому прослою при различных скоростях нагружения / И.Л. Паньков, В.В. Аникин // Тр. межд. конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. С. 133–138.