

При вскрытии горными работами карналлита рекомендуется использование для затопления насыщенных рассолов по *MgCl*.

После затопления рудника исключается вероятность поступления в шахту вод из водоносных горизонтов. В случае отсутствия вскрытия пластов карналлитовых пород, склонных к высокой интенсивности выщелачивания, как правило, в долгосрочной перспективе не прогнозируется образование провалов, вызванных размытием вышележащих пород. Результаты маркшейдерских измерений оседаний земной поверхности свидетельствуют о снижении их скорости после затопления рудника вследствие формирования гидравлического подпора рассолов в выработанном пространстве. Неотъемлемым элементом ликвидации рудника является долгосрочный комплексный мониторинг процессов, сопровождающих затопление горных выработок [1]. Его реализация позволяет минимизировать негативные воздействия ликвидации на окружающую среду.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Евсеев А.В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №9. – С.5-29.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2019.4.6

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ВОЛЬФРАМОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНЫЙ КАТПАР ПРИ ОБЪЕМНОМ НАГРУЖЕНИИ

В.С. КУЗЬМИНЫХ

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Проведены испытания горных пород месторождения «Северный Катпар» (Казахстан) на объемное сжатие. Испытания проводились на сервогидравлическом испытательном комплексе «MTS-815» при постоянном боковом давлении составляющем 2,5, 5,0 и 10,0 МПа с построением полных диаграмм деформирования. По результатам испытаний получены параметры паспорта прочности Кулона-Мора – сцепление и угол внутреннего трения.

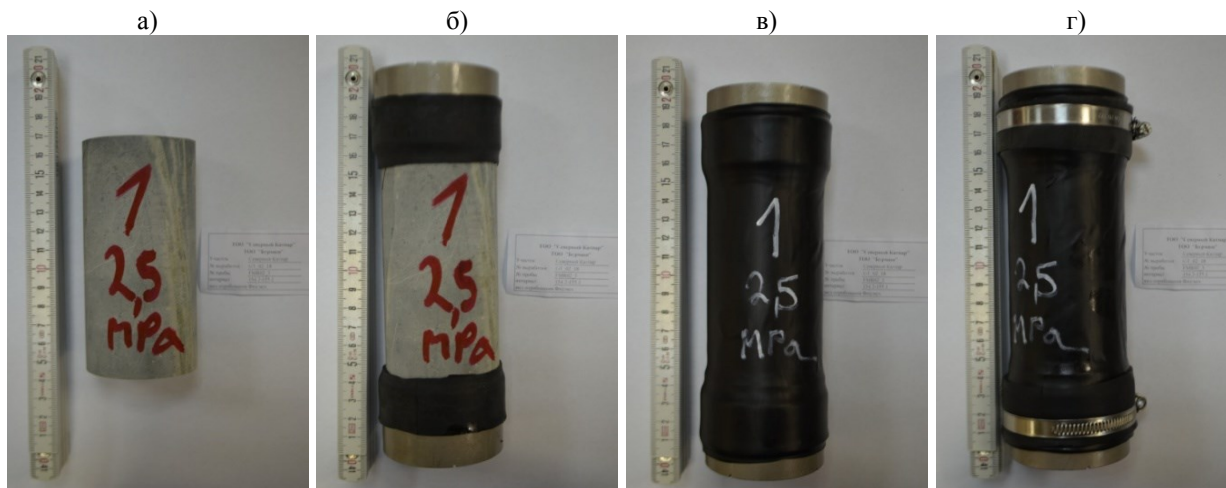
**Ключевые слова:** Горная порода, паспорт прочности, объемное сжатие, диаграмма деформирования.

Месторождение Северный Катпар расположено в республике Казахстан. По результатам геологической разведки запасы месторождения составляют порядка 90 тыс. тонн вольфрама и 13 тыс. тонн молибдена. Так как продуктивные пласты залегают близко к дневной поверхности их отработку целесообразно осуществлять открытым способом. Вследствие недостаточной изученности комплекса инженерно-геологических, гидрогеологических и технологических факторов при отработке месторождения одной из основных проблем является устойчивость бортов карьера, для оценки которой необходима информация по физико-механическим свойствам, слоистости, трещиноватости и проявлению ползучести в горных породах. Из перечисленных показателей определяющими являются угол внутреннего трения и величина сцепления.

С целью получения геомеханических параметров оценки устойчивости бортов карьера проведен комплекс экспериментальных исследований горных пород в условиях объемного сжатия. Исследуемые породы представлены диоритами, алевролитами, алевропесчаниками, а также мраморизованными известняками, имеющими слабую, умеренную и сильную трещиноватость с прослойками глины и прожилками гидро-

окислов железа. Испытания на объемное сжатие проводилось на образцах, изготовленных из 18 проб керна отобранных при выбуривании 8 разведочных скважин. Глубина отбора проб составляла  $24,7 \div 338,5$  м.

Изготовление образцов заключалось в торцевании проб на алмазном отрезном станке Labotom-3 (фирма Struers) с применением промывочной жидкости. Изготовленные образцы имели высоту 120 мм и диаметр 60 мм. Перед испытанием образец помещался в специальную манжету из термоусадочной трубки, защищающую его от проникновения масла. Порядок герметизации образца показан на рис. 1.



**Рис. 1.** Порядок герметизации образца горной породы при объемном сжатии:

- а – цилиндрический образец; б – фиксация металлических оправок на торцах образца; в – герметизация образца термоусадочной трубкой; г – дополнительное уплотнение термоусадочной трубки стягивающими хомутами



**Рис. 2.** Испытательный комплекс «MTS-815»

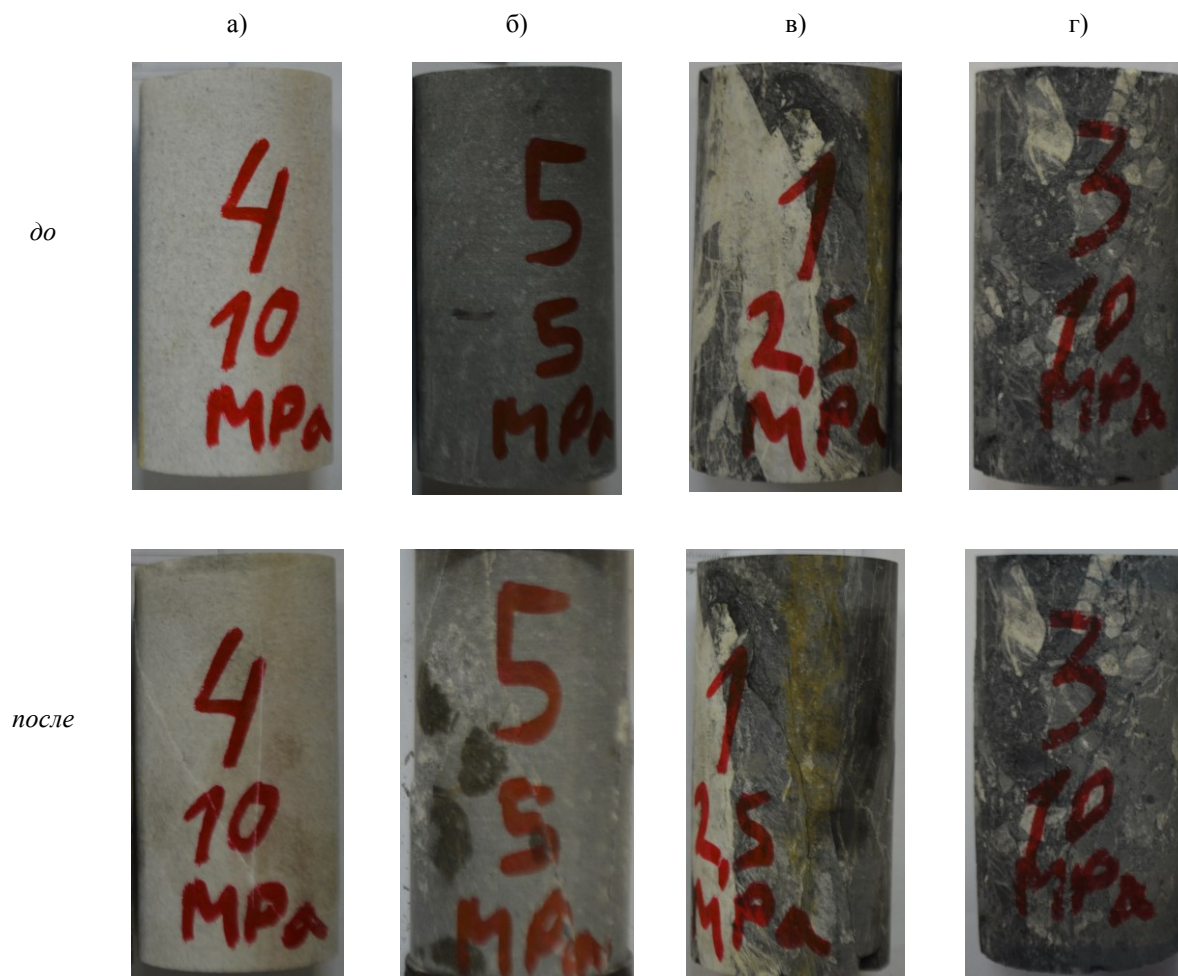
Определение физико-механических свойств горных пород осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТа РФ [1] и стандартом Международного общества механики горных пород (IRSM) [2]. Испытания проводились на сервогидравлическом испытательном комплексе «MTS-815» (рис. 2), представляющем собой жесткую нагружающую раму (максимальное осевое усилие – 1500 кН) и ячейку (камеру) объемного нагружения (максимальное давление – 80 МПа, максимальный диаметр образцов – 100 мм). Комплекс оснащен универсальным программным обеспечением «MultiPurpose TestWare», позволяющий изменять режимы и условия эксперимента в достаточно широком диапазоне. Изучение процесса деформирования образцов при объёмном нагружении проводилось по схеме Кармана:

$$(\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3 \geq 0).$$

После установки подготовленного образца в объемную камеру проводилось его нагружение рабочей жидкостью равносторонним боковым

давлением до заданного фиксированного значения. Далее осуществлялось нагружение образца вертикальной нагрузкой  $\sigma_1$  со скоростью деформирования 1 мм/мин при постоянных значениях бокового давления  $\sigma_2 = \sigma_3$ , составляющем 2,5, 5,0 и 10,0 МПа.

В процессе испытания происходит автоматическая запись результатов эксперимента: осевого усилия и продольной деформации. Эксперимент проводился до разрушения образца (рис.3), т.е. до перехода диаграммы на запредельную стадию деформирования [3] .

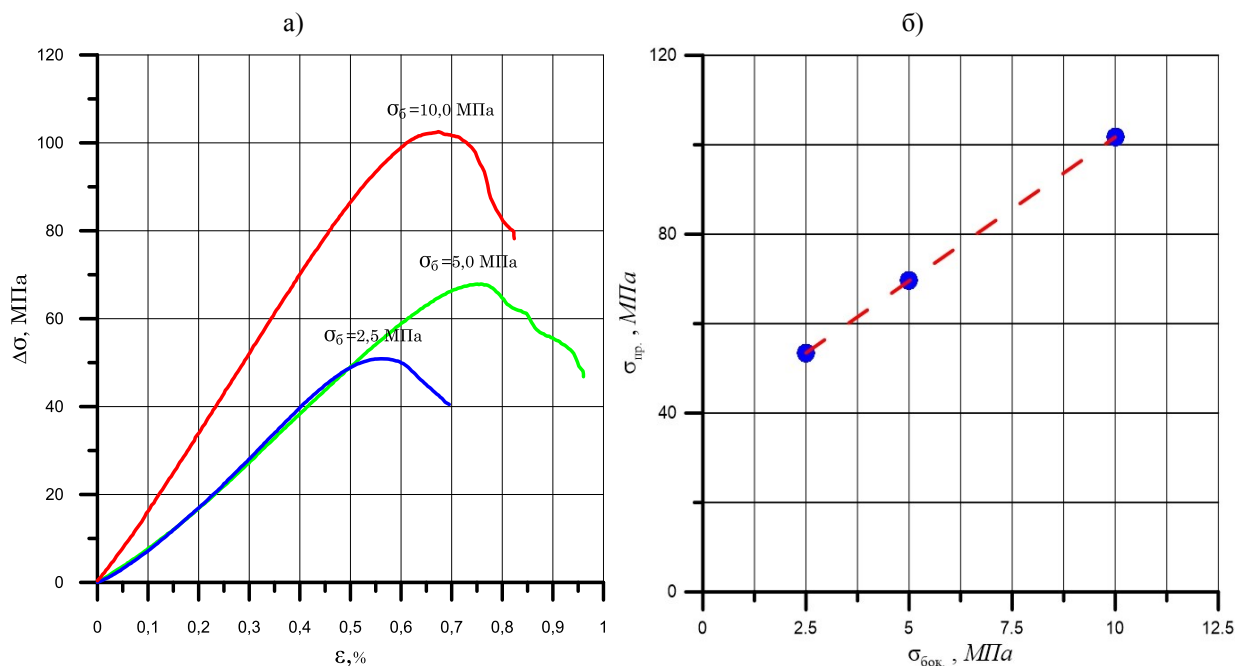


**Рис. 3.** Фотография образцов до и после испытания:  
(а – мраморизованный известняк; б - диорит; в - алевропесчаник; г - алевролит )

По результатам экспериментов строились полные диаграммы деформирования в координатах « $\Delta\sigma \div \epsilon_1$ », пример которых, для различных боковых давлений приведен на рис.4а, при этом величина эффективных напряжений ( $\Delta\sigma$ ) определялась согласно формуле:

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 . \quad (1)$$

Полученные диаграммы деформирования использовались для определения предела прочности ( $\sigma_{пр}$ ) горной породы при заданном боковом давлении. По результатам строились линейные зависимости влияния бокового давления на предел прочности (рис. 4б).



**Рис. 4.** Использование диаграмм деформирования (а) горных пород на объемное сжатие при построении зависимости (б) влияния бокового давления на предел прочности (На примере пробы №17, скважина – № 8)

Построенная по результатам экспериментов на объемное сжатие линейная эмпирическая зависимость (рис. 4б), описывается уравнением:

$$\sigma_{пр} = A + B\sigma_{\delta}, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – параметры, определяемые экспериментально.

Переход от параметров уравнения, описывающей влияния бокового давления на предел прочности при объемном сжатии к параметрам линейного паспорта прочности Кулона-Мора производился по формулам:

угол внутреннего трения

$$\varphi = \arcsin \frac{B-1}{B+1}, \quad (3)$$

сцепление

$$C = \frac{A}{B-1} \cdot \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{B-1}{B+1} \right). \quad (4)$$

Параметры линейной аппроксимации влияния бокового давления на предел прочности, сцепление и угол внутреннего трения приведены в табл. 1.

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить параметры паспорта Кулона-Мора горных пород 18 проб отобранных из керна 8 геологоразведочных скважин. Выявлен достаточно широкий общий интервал изменения предела прочности испытанных образцов, составляющий: 29,6 ÷ 370,9 МПа ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 2,5$  МПа), 40,5 ÷ 430,0 МПа ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 5,0$  МПа), 56,7 ÷ 316,7 МПа ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 10,0$  МПа). Различие прочности объясняется значительной неоднородностью состава и строения исследуемых пород, в основном связанном с наличием разноориентированных трещин, а также естественной дисперсией свойств пород, взятых с различных глубин. Разброс прочностных свойств пород обуславливает значительную вариацию показателей паспорта

прочности Кулона-Мора – сцепление и угол внутреннего трения. Угол внутреннего трения мраморизованных известняков находится в интервале 25,3÷58,9 град., диоритов – 33,8÷56,0 град., алевролитов и алевропесчаников – 36,3÷56,3 град. Величина сцепления мраморизованных известняков изменялась в интервале 9,7÷32,2 МПа, диоритов – 7,1÷26,2 МПа, алевролитов и алевропесчаников – 5,0÷15,1 МПа. При этом изменение величины сцепления мраморизованных известняков напрямую зависит от степени их трещиноватости – для сильно трещиноватых среднее значение сцепления составило 9,8 МПа, для умеренно трещиноватых – 23,5 МПа, а для слабо трещиноватых – 25,1 МПа.

Таблица 1

Результаты эксперимента на объемное сжатие образцов горных пород месторождения «Северный Катпар»

№ скважины	Характеристика породы	№ пробы	A, МПа	B	φ, град	C, МПа
1	Мраморизованные известняки (с прожилками гидро-кисла железа)	1	78,3	2,5	25,3	24,8
		2	72,1	12,9	58,9	10,0
2	Диориты	3	151,4	9,3	53,7	24,8
		4	97,9	3,5	33,8	26,2
		5	112,3	7,5	49,9	20,5
		6	46,4	10,7	56,0	7,1
		7	93,7	4,2	38,0	22,9
3	Мраморизованные известняки (умеренно трещиноватые)	8	80,0	2,9	29,2	23,5
4	Мраморизованные известняки (слабо трещиноватые)	9	100,6	4,6	40,0	23,5
		10	107,9	2,8	28,3	32,2
		11	112,3	8,1	51,3	19,7
5	Мраморизованные известняки (с прослойками глины)	12	78,9	6,8	48,1	15,1
6	Алевропесчаники	13	34,7	8,0	51,1	6,1
7	Алевролиты	14	19,9	3,9	36,3	5,0
		15	76,6	10,9	56,3	11,6
8	Мраморизованные известняки (сильно трещиноватые)	16	61,1	4,7	40,5	14,1
		17	32,5	8,7	52,6	5,5
		18	50,4	6,7	47,8	9,7

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-05-00371 А.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 17 с.
- Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version // International journal of rock mechanics and mining science and geomechanics abstracts. – 1983. – V. 20, № 6. – P. 285-290.
- Паньков И.Л., Морозов И.А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 510-519. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.510.