ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(10):16-28
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД ГРЕМЯЧИНСКОГО И ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

И.А. Морозов[1], А.А. Ударцев[2], И.Л. Паньков[2]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[2] Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: udartsev@mi-perm.ru

Аннотация: Исследования физико-механических свойств горных пород являются неотъемлемой составляющей эффективной и безопасной добычи полезных ископаемых. Это особенно актуально для Гремячинского месторождения калийных солей, на котором идет строительство первого рудника. Целью работы является исследование характера деформирования соляных пород Гремячинского месторождения в лабораторных условиях при одноосном и объемном сжатии в режиме условно-мгновенного нагружения и одноосного длительного нагружения. Для сопоставления деформационных свойств проводились лабораторные испытания пород Верхнекамского месторождения калийных солей. Представлены результаты исследования соляных пород при мгновенных испытаниях и проанализировано влияние величины бокового давления на значения следующих механических показателей: предела прочности, секущего модуля деформации, секущего модуля спада, деформации на остаточном пределе прочности. Установлено, что соляные породы Гремячинского и Верхнекамского месторождений имеют схожие значения указанных механических параметров. Выявлены некоторые различия в характере деформирования пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений. Установлено, что испытанные соляные породы Гремячинского месторождения обладают более низкими скоростями установившейся ползучести и соответственно более высоким пределом длительной прочности. Полученные результаты могут представлять интерес для специалистов в области строительства подземных сооружений в соляных породах.

Ключевые слова: соляные породы, предел прочности, модуль деформации, предел длительной прочности, ползучесть, одноосное сжатие, объемное сжатие, сильвинит.

Благодарность: Работа выполнена в рамках госзадания № НИОКТР АААА-А18-118040690032-2, а также при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-45-590004.

Для цитирования: *Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л.* Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 16–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

Laboratory deformation testing of salt rocks from the Gremyachinsk and Upper Kama deposits

I.A. Morozov[1], A.A. Udarcev[2], I.L. Pankov[2]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
[2] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: udartsev@mi-perm.ru

© И.А. Морозов, А.А. Ударцев, И.Л. Паньков. 2020.

Abstract: Investigation of physical and mechanical properties of rocks is an integral component of safe and efficient mineral mining. Such investigations are of special concern in construction of Gremyachinsk potash mine. This study aims to investigate deformation of Gremaychinsk salt rocks in uniaxial and triaxial compression testing under conditionally instantaneous and long-term loading. For the comparison of deformation characteristics, laboratory testing involved potash salt from the Upper Kama deposit. The instantaneous test data of salt rocks are presented, and the effect of the side pressure value on the mechanical characteristics of ultimate strength, secant modulus of deformation, secant modulus of relaxation and deformation at retained ultimate strength is analyzed. It is found that Gremychinsk and Upper Kama salt rocks have similar values of the listed mechanical characteristics. The deformation behavior of Gremyachinsk and Upper Kama salt rocks is different. Gremyachinsk salt rocks feature lower rate and stationary creep and, thus, higher long-term ultimate strength. The obtained results can be of interest to practitioners in construction of underground mines in salt rocks.

Key words: salt rocks, ultimate strength, deformation modulus, ultimate long-term strength, creep, uniaxial compression, triaxial compression, sylvinite.

Acknowledgements: The study was carried out under State Contract No. NIOKTR AAAA-A18-118040690032-2, and was supported by the Russian Foundation for Basic Research and by the Perm Krai, Project No. 19-45-590004.

For citation: Morozov I.A., Udarcev A.A., Pankov I.L. Laboratory deformation testing of salt rocks from the Gremyachinsk and Upper Kama deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):16-28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

Ведение

Месторождения калийных солей являются основными источниками сырья для производства калийных удобрений. Россия традиционно занимает одну из лидирующих позиций по поставкам хлористого калия на мировой рынок [1, 2]. На территории страны с 1934 г. активно разрабатывается Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС), расположенное на северо-востоке Пермского края в районе городов Березники и Соликамска. Разработку ведут несколькими рудниками, одним из ведущих производителей калия является ПАО «Уралкалий», глубина залегания промышленных пластов не превышает 500 м [3].

С 2010 г. идет строительство калийного комбината на территории Гремячинского месторождения калийных солей (ГМКС) в пределах Котельниковского района Волгоградской области. Разработку ведет организация ООО «ЕвроХим-Волга-Калий», продуктивный сильвинитовый пласт залегает на глубине 1100—1300 м, вмещающие породы представлены карналлитом и каменной солью [3].

В связи с отсутствием практического опыта разработки ГМКС достаточно актуальными являются исследования, направленные на изучение характера деформирования пород промышленного пласта в лабораторных условиях. Комплекс необходимых исследований соляных пород, согласно строительным нормам и правилам [4], должен включать не только мгновенные, но и длительные испытания, что объясняется применением камерной системы разработки месторождений с оставлением поддерживающих междукамерных целиков на продуктивном пласте, работающих в режиме ползучести [5, 6].

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа деформирования соляных пород ГМКС и ВКМКС в лабораторных условиях.

Методика проведения исследования

Для проведения исследований было изготовлено 33 сильвинитовых образца из керна подземных геологоразведочных скважин ГМКС и 28 образцов полосчатого сильвинита из породного монолита, отобранного на руднике СКРУ-3 ВКМКС. Подготовка образцов осуществлялась на отрезном станке с алмазным диском без использования промывочной жидкости. Изготовленные образцы имели призматическую форму 35×35×70 мм. На рис. 1 представлены фотографии сильвинитовых образцов, подготовленных для испытания.

Часть изготовленных образцов была испытана при условно-мгновенном одноосном и объемном сжатии. Эксперименты на объемное сжатие выполнялись по схеме Кармана [7], что предполагает постепенное увеличение осевой нагрузки вплоть до разрушения образца при постоянном уровне бокового давления ($\sigma_2 = \sigma_3$). Для сильвинита ГМКС исследования проводились с боковым давлением равным 0; 5 и 7,5 МПа, а для пород ВКМКС 0; 2,5 и 5 МПа, в среднем было испытанно по 5 образцов для каждой серии.

Все условно-мгновенные испытания по определению прочностных и деформационных характеристик соляных пород проводились в жестком режиме нагружения с постоянной скоростью деформирования — 1 мм/мин согласно требованиям ГОСТа [8, 9] и в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [10, 11]. Эксперименты на одноосное сжатие выполнялись на электромеханическом прессе Zwick/Z250 (рис. 2, *а*) с предельной нагрузкой — 250 кН, на объемное сжатие — с применением сервогидравлической испытательной машины MTS-815 (рис. 2, *б*) с предельной нагрузкой — 1600 кН. Жесткость экспериментального оборудования позволяла проводить испытания соляных пород в режиме контролируемой деформации. Продолжительность эксперимента на условно-мгновенное сжатие составляла от 5 до 15 мин.

Длительные испытания выполнялись в режиме одноосной ползучести. Эксперименты проводились при нескольких уровнях вертикальной нагрузки: степень нагружения варьировалась в интервале 0,3÷0,8 от мгновенного предела прочности. Продолжительность экспериментов составляла до 35 сут.

Испытания проводились на гидравлических реологических установках с максимальным усилием 150 кН (рис. 2, *в*), постоянство нагрузки в которых обеспечивается за счет контроля давления масла в гидравлической системе. Конструкция каждого реологического пресса позволяла проводить испытания при одинаковой осевой нагрузке одновременно до трех образцов. Измерение продольных деформаций каждого образца осуществлялось двумя индикаторами

а) б)

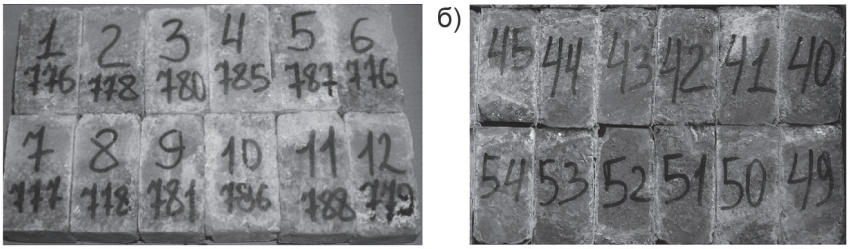

Рис. 1. Фотографии образцов сильвинита для лабораторных исследований: ГМКС (а); ВКМКС (б)
Fig. 1. The silvinite specimen photos for laboratory tests: a — the Gremyachinskoe deposit; b — the Verkhnekamskoe deposit

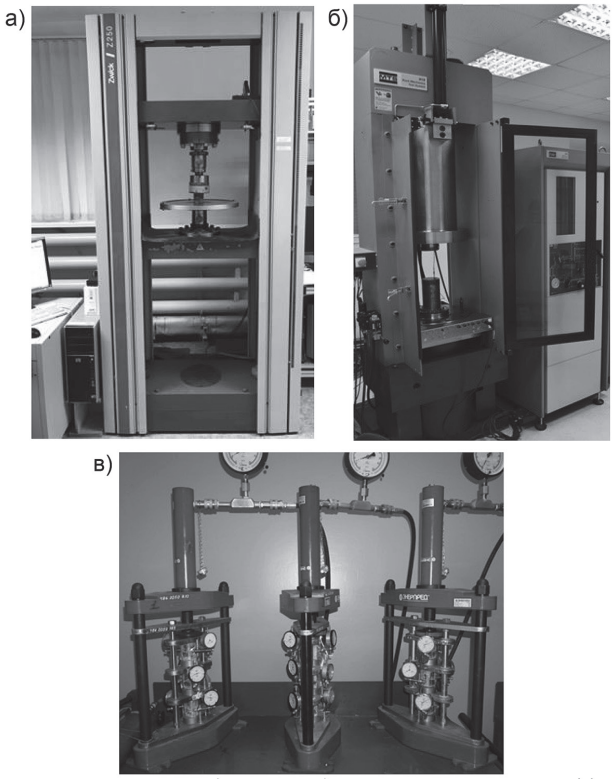

Рис. 2. Экспериментальное оборудование: электромеханический пресс Zwick/Z250 (а); сервогидравлическая испытательная машина MTS-815 (б); реологические установки на одноосную ползучесть (в)
Fig. 2. Experimental equipment: a — Zwick/Z250 electromechanical press; b — MT-815 servo-hydraulic testing machine; v — rheological equipment for the uniaxial creep experiments

часового типа с ценой деления 0,01 мм, располагаемых симметрично относительно оси образца. Отсчеты по деформации брались в первые сутки испытания через 20 мин, 1 ч, 3 ч после начала эксперимента. На вторые сутки замеры деформации проводились два раза с интервалом в 12 ч. В последующем контроль деформаций осуществлялся один раз в сутки. На стадии установившейся ползучести деформации регистрировались раз в 3 — 5 сут.

По результатам экспериментов на условно-мгновенное сжатие определялся следующий комплекс механических показателей (рис. 3, *а*) в соответствии с методикой, представленной в [12]: предел прочности ($\sigma_1^{str.}$, МПа), секущий модуль деформации (*D*, ГПа), секущий модуль спада (*M*, ГПа), деформация ($\varepsilon_1^{res.}$) на остаточном пределе прочности ($\sigma_1^{res.}$, МПа). Также по методике [11] определялись параметры критерия прочности Кулона: коэффициент сцепления (*C*, МПа), угол внутреннего трения (φ, град.).

Обработка результатов длительных испытаний заключалась в построении кривых ползучести (рис. 3, *б*), определении скорости установившейся ползучести ($\dot{\varepsilon}_1^{BC}$), построении кривых длительной прочности и определении предела длительной прочности (МПа).

Согласно работам [13, 14] под пределом длительной прочности при одноосном сжатии понимается максимальное сжимающее напряжение, при котором

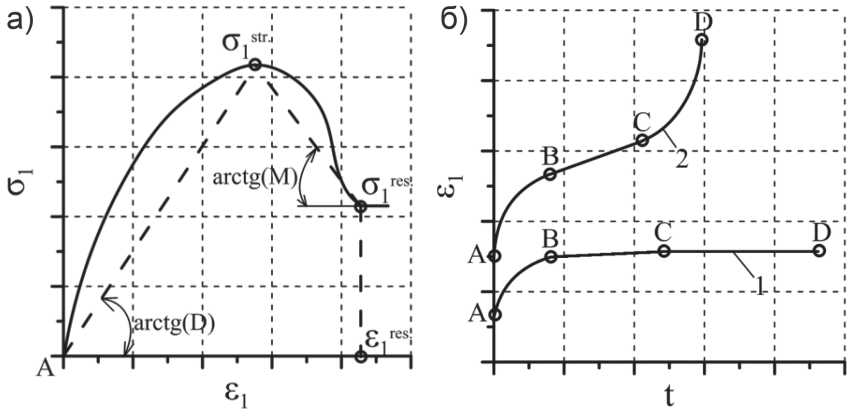

Рис. 3. Обработка результатов экспериментов: схема к определению прочностных и деформационных характеристик при условно-мгновенном сжатии соляного образца (а); характерные кривые ползучести соляных пород (б); 1 — затухающая ползучесть, 2 — прогрессирующая ползучесть

Fig. 3. Result processing of experiments: a — the definition scheme of strength and deformation characteristics under conditional-instant loading of salt specimen; b — the typical creep curves of salt rocks; 1 — fading creep, 2 — progressive creep

деформационные процессы в горных породах протекают без разрушения в интервале времени, стремящемся к бесконечности, поэтому коэффициентом длительной прочности будем называть отношение предела длительной прочности к условно-мгновенному пределу прочности.

В зависимости от величины приложенной нагрузки деформация ползучести либо стремится к некоторой постоянной величине (рис. 3, *б*, кривая *1*), либо неограниченно возрастает вплоть до разрушения (рис. 3, *б*, кривая *2*). Если к образцу приложена нагрузка, не превышающая предел длительной прочности, то скорость деформирования на участке *CD* стремится к нулю (затухающая ползучесть), и разрушения образца не происходит. Если к образцу приложена нагрузка, превосходящая предел длительной прочности, то скорость деформирования на участке *CD* постоянно увеличивается (прогрессирующая ползучесть), что приводит к разрушению образца [14].

Традиционный прямой способ построения графика длительной прочности по семейству кривых ползучести, полученных при различных уровнях нагружения, иллюстрируется в работе [12], при этом асимптота графика характеризует предел длительной прочности горных пород.

Скорость установившейся ползучести ($\dot{\varepsilon}_1^{BC}$) определялась на линейном участке *BC* кривых ползучести (рис. 3, *б*).

Результаты исследования

По экспериментальным данным условно-мгновенного сжатия строились полные диаграммы деформирования (рис. 4), по которым в дальнейшем определялись механические параметры. Результаты мгновенных испытаний сильвинита ГМКС и сильвинита ВКМКС в зависимости от уровня бокового давления ($\sigma_2 = \sigma_3$) представлены в табл. 1.

По методике [11] получены параметры критерия прочности Кулона для сильвинитовых образцов ГМКС и ВКМКС: коэффициент сцепления — 3,5 МПа и 4,1 МПа, угол внутреннего трения — 48° и 47° соответственно.

Характерные кривые ползучести, полученные по результатам длительных ис-

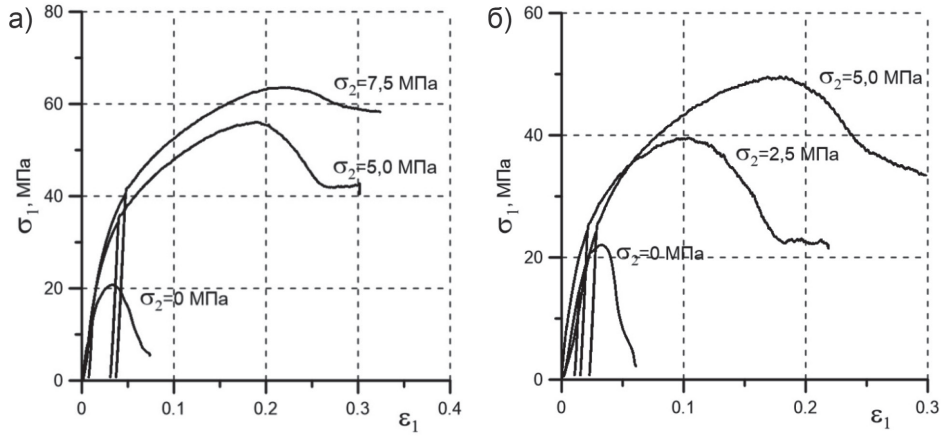

Рис. 4. Пример диаграмм деформирования при различных боковых давлениях: ГМКС (а); ВКМКС (б)
Fig. 4. Examples of the stress-strain relationships under the different confining pressures: a — the Gremyachinskoe deposit; b — the Verkhnekamskoe deposit

Таблица 1

Результаты условно-мгновенных испытаний образцов сильвинита ГМКС и ВКМКС
The conditional-instant test results of sylvite specimens of the Gremyachinskoe and Verkhnekamskoe deposits

$\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	$\sigma_1^{str.}$, МПа		*D*, ГПа		*M*, ГПа		$\varepsilon_1^{res.}$	
	ГМКС	ВКМКС	ГМКС	ВКМКС	ГМКС	ВКМКС	ГМКС	ВКМКС
0	17,2±3,2	19,2±2,6	0,72±0,11	0,72±0,16	0,36±0,11	0,33±0,06	0,044±0,04	0,058±0,011
2,5	—	40,0±1,4	—	0,40±0,11	—	0,26±0,07	—	0,145±0,028
5	56,5±4,5	51,6±4,7	0,34±0,07	0,30±0,11	0,27±0,07	0,22±0,08	0,212±0,055	0,234±0,057
7	61,5±5,4	—	0,28±0,07	—	0,23±0,07	—	0,275±0,086	—
Результаты представлены при надежности 0,8.								

пытаний сильвинитовых образцов ГМКС и ВКМКС, представлены на рис. 5, *а* и 5, *б*.

Результаты определения скорости установившейся ползучести сильвинита ($\dot{\varepsilon}_1^{BC}$) приведены в табл. 2.

Построение кривых длительной прочности образцов сильвинита для различных условий нагружения проводилось по результатам экспериментов на прямую ползучесть по схеме, приведенной работе [12]. В тоже время необходимо отметить, что одной из особенностей длительного деформирования соляных пород при постоянной нагрузке является слабо выраженный переход, разделя-

Таблица 2

Скорости установившейся ползучести образцов сильвинита ГМКС и ВКМКС
The stable creep rate of sylvite specimens of the Gremyachinskoe and Verkhnekamskoe deposits

Степень нагружения	$\dot{\varepsilon}_1^{BC}$, 10^{-2} · сут.$^{-1}$	
	ГКМКС	ВКМКС
0,3	0,0047	0,0126
0,4	0,0037	0,0271
0,5	0,0129	0,155
0,6	0,150	0,228
0,7	0,543	1,353
0,8	3,285	3,295

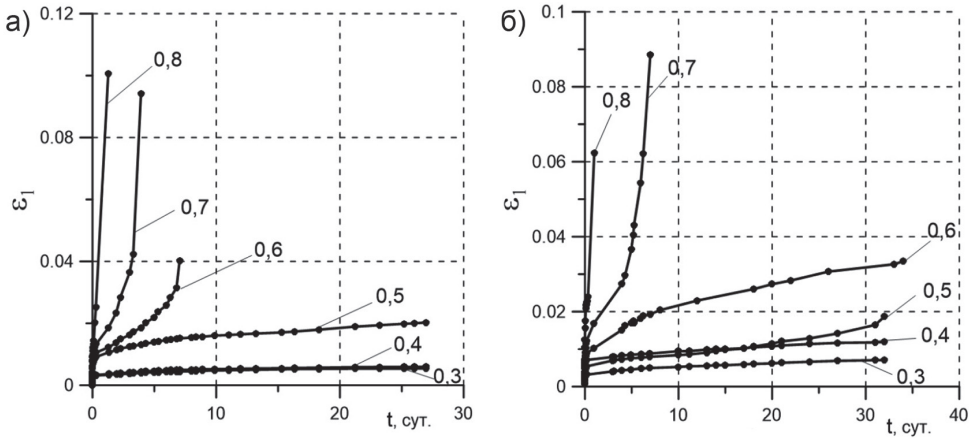

Рис. 5. Пример характерных кривых ползучести сильвинитовых образцов: ГМКС (а); ВКМКС (б); цифрами обозначена степень нагружения образцов

Fig. 5. Examples of typical creep curves of silvinite specimens: a — the Gremyachinskoe deposit; b — the Verkhnekamskoe deposit; numbers are the loading degree of specimens

ющий установившую и прогрессирующую ползучести (стадию разрушения). Данная особенность в ряде случаев значительно усложняет определение точного времени перехода образца на стадию разрушения. С целью оценки времени разрушения образца при ползучести проводилась экстраполяция результатов эксперимента. Как указывается в работе [14], разрушение при ползучести образцов горной породы, вызванной нагрузкой, превышающей предел длительной прочности, происходит при достижении образцом некоторой деформации, постоянной для данной породы. В качестве такого показателя принималась деформация разрушения на пределе остаточной прочности $\varepsilon_1^{res.}$ (см. табл. 1).

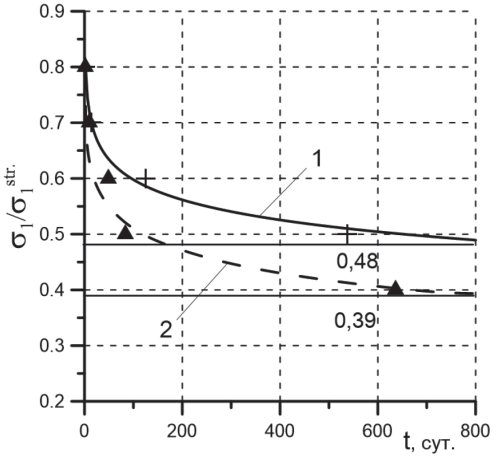

Рис. 6. Кривые длительной прочности сильвинита: 1 — ГМКС; 2 — ВКМКС

Fig. 6. The long-term strength curves of silvinite: 1 — the Gremyachinskoe deposit; 2 — the Verkhnekamskoe deposit

По результатам оценки времени разрушения сильвинитовых образцов ГМКС и ВКМКС строились кривые длительной прочности, асимптота которых соответствовала коэффициенту длительной прочности. На рис. 6 представлена диаграмма «степень нагружения — время до разрушения» сильвинитовых образцов. Сплошными горизонтальными линиями показаны значения коэффициентов длительной прочности образцов соответствующих месторождений. Коэффициент длительной прочности ГМКС — 0,48, ВКМКС — 0,39.

Анализ результатов

По результатам условно-мгновенных испытаний на одноосное и объемное сжатие (табл. 1, боковое давление — 0 и 5 МПа) сильвинитовых образцов

ГМКС и ВКМКС установлено, что полученные значения механических показателей — а именно предел прочности, секущий модуль деформации, секущий модуль спада и деформации на остаточном пределе прочности — совпадают на уровне разброса экспериментальных данных.

На качественном уровне можно отметить, что увеличение уровня бокового давления (табл. 1) для сильвинита ГМКС и ВКМКС приводит к увеличению предела прочности, снижению секущего модуля деформации и секущего модуля спада. С увеличением уровня бокового давления величина деформации на остаточном пределе прочности возрастает. Указанные особенности деформирования соляных пород удовлетворительно согласуются с результатами, представленными в работах [7, 12, 13, 15—18].

По данным табл. 1 отмечено, что при увеличении бокового давления от 0 до 5 МПа происходит возрастание условно-мгновенного предела прочности сильвинита ГМКС и ВКМКС в 2,7—3,3 раза, снижение секущего модуля деформации в 2,1—2,4 раза, снижение секущего модуля спада в 1,3—1,5 раза. При этом с увеличением бокового давления деформации на остаточном пределе прочности возрастают в 4,0—4,8 раза.

Ниже представлены зависимости условно-мгновенного предела прочности $\sigma_1^{str.}$ (рис. 7, *а*), секущего модуля деформации *D* (рис. 7, *б*) и секущего модуля спада *M* (рис. 7, *б*) от уровня бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$.

Представленные на рис. 7 зависимости отражают нелинейный характер изменения рассматриваемых механических показателей сильвинита от уровня бокового давления. При этом с возрастанием уровня бокового давления его влияние на указанные механические показатели существенно снижается.

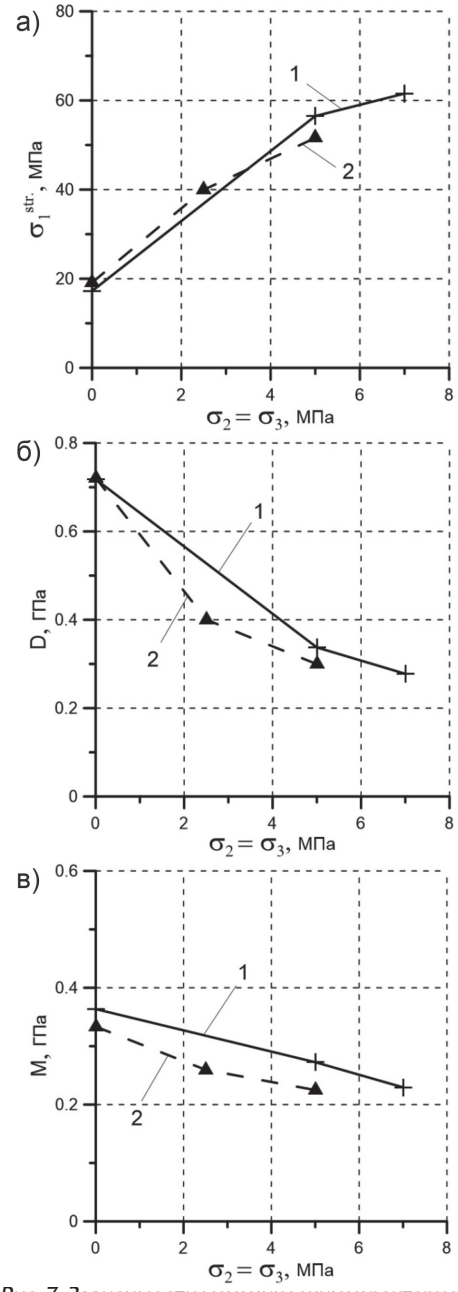

Рис. 7. Зависимости механических характеристик сильвинита от бокового давления: предела прочности (а); секущего модуля деформации (б); секущего модуля спада(в); 1 — ГМКС; 2 — ВКМКС

Fig. 7. Dependences of the mechanical sylvite characteristics from the confining pressure: a — ultimate strength; b — secant deformation modulus; v — secant drop modulus; 1 — the Gremyachinskoe deposit; 2 — the Verkhnekamskoe deposit

По результатам проведенных исследований установлено, что сильвинит ВКМКС обладает в 1,2 раза большим коэффициентом сцепления, чем сильвинит ГМКС, в то время как угол внутреннего трения практически совпадает.

В целом представленные на рис. 5 кривые ползучести отражают особенности деформирования соляных пород при длительном нагружении [19—23]. Необходимо отметить, что деформирование образцов сильвинита ГМКС при степенях нагружения 0,3 и 0,4 (рис. 5, *а*) от мгновенного предела прочности носило затухающий характер. Образцы ВКМКС при степени нагружения 0,3 переходили также в стадию затухающей ползучести, а при уровне нагрузки 0,4 за рассматриваемый промежуток времени деформировались в режиме установившейся ползучести. При степени нагружения 0,5 от предела прочности процесс деформирования образцов ГМКС переходил со стадии неустановившейся ползучести в стадию установившейся с предполагаемой тенденцией выхода на затухающую фазу

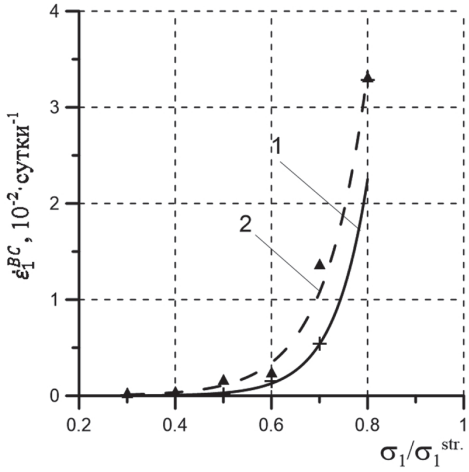

Рис. 8. Влияние степени нагружения на скорость установившейся ползучести сильвинитовых образцов: 1 — ГМКС; 2 — ВКМКС

Fig. 8. Loading degree influence on the steady creep rate of silvinite specimen: 1 — the Gremyachinskoe deposit; 2 — the Verkhnekamskoe deposit

для большинства образцов. Переход на стадию прогрессирующей ползучести за рассматриваемый промежуток времени предполагается только у одного образца. При степени нагружения 0,5 для сильвинитовых образцов ВКМКС наблюдались все три стадии ползучести (рис. 5, *б*): неустановившаяся, установившаяся и прогрессирующая. Практически для всех образцов сильвинита ГМКС и ВКМКС со степенью нагружения 0,6 и выше за рассматриваемый промежуток времени фиксировался переход деформаций на стадию прогрессирующей ползучести. На кривых ползучести сильвинита для обоих месторождений при степенях нагружения более 0,6 фиксировался резкий перегиб, характеризующий выход образца на стадию прогрессирующей ползучести. По результатам анализа скоростей деформирования образцов сильвинита при длительном нагружении (рис. 5, табл. 2) установлено, что скорости установившейся ползучести сильвинита ВКМКС при степенях нагружения от 0,3 до 0,7 превосходят скорости установившейся ползучести сильвинита ГМКС при тех же уровнях нагружения. Стоит отметить, что при степени нагружения 0,4 скорость установившейся ползучести образцов ВКМКС примерно в 7 раз больше, чем скорость деформирования сильвинита ГМКС, а максимальное различие между скоростями пришлось на уровень нагрузки 0,5 от мгновенного предела прочности и составило почти 12 раз. При степени нагружения 0,8 скорости установившейся ползучести практически не отличались для обоих месторождений.

Ниже для обоих месторождений приведены зависимости скорости установившейся ползучести сильвинита $\dot{\varepsilon}_1^{BC}$ от степени нагружения (рис. 8). Аппроксимация экспериментальных данных производилась экспоненциальной функцией, по которым видно, что практически

по всем степеням нагружения скорости установившейся ползучести сильвинита ВКМКС превосходят скорости сильвинита ГМКС.

Анализ кривых длительной прочности (рис. 6) позволил установить следующие значения коэффициентов длительной прочности: для сильвинита ГМКС — 0,48, что соответствует пределу длительной прочности 8,3 МПа; для пород ВКМКС — 0,39 и 7,5 МПа соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что предел длительной прочности сильвинитовых образцов ГМКС и ВКМКС в абсолютных значениях практически совпадает.

Заключение

Проведен комплекс лабораторных исследований по изучению характера деформирования сильвинита ГМКС и ВКМКС, включающие:

- условно-мгновенные испытания на одноосное и объемное сжатие с определением комплекса механических показателей;
- длительные испытания образцов при различных степенях нагружения с определением параметров ползучести солей ГМКС и ВКМКС.

Анализ экспериментальных данных на условно-мгновенное сжатие позволил установить, что показатели физико-механических свойств рассмотренных пород имеют довольно близкие значение. Среди представленных характеристик несколько отличаются значения деформации на остаточном пределе прочности.

Несмотря на близкие значения показателей физико-механических свойств исследованных пород при условно-мгновенном сжатии, для длительного нагружения были выявлены некоторые особенности, свойственные конкретным породам ГМКС или ВКМКС.

Отличительной чертой характера деформирования исследуемых образцов сильвинита ГМКС является более низкая скорость установившейся ползучести практически на всех ступенях нагружения по сравнению с сильвинитом ВКМКС. Коэффициент длительной прочности для пород ГМКС выше и составляет 0,48, а для пород ВКМКС — 0,39.

В ходе исследования прямой связи между значениями показателей физико-механических свойств, полученными по результатам мгновенных и длительных испытаний, выявить не удалось. Указанный факт нуждается в более подробном исследовании.

В связи с высокой трудоемкостью проводимых реологических испытаний и, как следствие, малой экспериментальной выборкой, необходимо отметить приблизительный характер полученных значений коэффициента длительной прочности. Исследования, направленные на изучение деформационных свойств соляных пород при длительном нагружении, необходимо продолжить как в части увеличения статистической выборки реологических параметров в условиях одноосной ползучести, так и в области определения аналогичных характеристик пород при объемной ползучести.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» ПНИПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ciceri D., Manning D.A.C., Allanore A.* Historical and technical developments of potassium resources // Science of the Total Environment. 2015. Vol. 502. Pp. 590—601. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.013.

2. *Dmitrieva D., Ilinova A., Kraslawski A.* Strategic management of the potash industry in Russia // Resources Policy. 2017. Vol. 52. Pp. 81 — 89. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.11.004.

3. *Морозов И. А.* Формирование общих подходов повышения устойчивости капитальных горных выработок в условиях глубоких калийных рудников / Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции, г. Пермь, 7 — 9 ноября 2018 г. Пермь: ПНИПУ, 2018. С. 351 — 353.

4. СП 69.13330.2016. Подземные горные выработки. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.

5. *Паньков И. Л.*, *Асанов В. А.*, *Ударцев А. А.*, *Кузьминых В. С.* Практика использования испытательного оборудования при изучении деформирования и разрушения квазипластичных горных пород в лабораторных условиях // Вестник КРСУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 163 — 167.

6. Agnieszka Maj. Rock-mass movement monitoring system in historical salt mines, using the example of the Bochnia Salt Mine // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. Pp. 496 — 503. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.209.

7. *Ставрогин А. Н.*, *Тарасов Б. Г.* Экспериментальная физика и механика горных пород. СПБ.: Наука, 2001. 343 с.

8. *ГОСТ 21153.2-84* Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 2001. 10 с.

9. *ГОСТ 21153.8-88* Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1988. 17 с.

10. *Bieniawski Z. T.*, *Bernede M. J.* Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. 1979. Vol. 16. No 2. Pp. 138 — 140. DOI: 10.1016/0148-9062(79)91451-7.

11. *Kovari K., Tisa A., Einstein H. H.*, *Franklin J. A.* Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. 1983. Vol. 20. No 6. Pp. 285 — 290. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90598-3.

12. *Барях А. А.*, *Константинова С. А.*, *Асанов В. А.* Деформирование соляных пород. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 203 с.

13. *Боликов В. Е.*, *Константинова С. А.* Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных горных выработок. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 374 с.

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

15. *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.

16. *Artkhonghan K., Sartkaew S., Thongprapha T., Fuenkajorn K.* Effects of stress path on shear strength of a rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 104. Pp. 78 — 83. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.02.014.

17. M*üllera Ch., Frühwirt Th., Haase D., Schlegel R., Konietzky H.* Modeling deformation and damage of rock salt using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 103. Pp. 230 — 241. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.022.

18. *Sriapai T., Walsri Ch., Fuenkajorn K.* True-triaxial compressive strength of Maha Sarakham salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 61. Pp. 256 — 265. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.03.010.

19. *Aditya Singh, Chandan Kumar, Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R.* Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 107. Pp. 243 — 248. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.037.

20. *Wenjing Li, Yanhui Han, Tao Wang, Jiwei Ma* DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 46. Pp. 38 – 46. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.07.013.

21. *Aditya Singh, Chandan Kumar, Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R.* Rheological behaviour of rock salt under uniaxial compression // Procedia Engineering. 2017. Vol. 173. Pp. 639 – 646. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.122.

22. *Ильинов М.Д., Карташов Ю.М.* Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного Института. 2011. Т. 190. С. 207 – 209.

23. *Агеенко В.А.* Исследование реологических свойств каменной соли // Известия Уральского государственного горного университета. 2019. № 53. – С. 115 – 120. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-115-120. ГИАБ

REFERENCES

1. Ciceri D., Manning D.A.C., Allanore A. Historical and technical developments of potassium resources. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 502. Pp. 590 – 601. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.013.

2. Dmitrieva D., Ilinova A., Kraslawski A. Strategic management of the potash industry in Russia. *Resources Policy*. 2017. Vol. 52. Pp. 81 – 89. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.11.004.

3. Morozov I.A. General approaches formation to increase the stability of capital mining operations in deep potash mines. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh. Materialy XI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Problems of development of deposits of hydrocarbon and ore minerals: materials of the XI all-Russian scientific and technical conference], Perm, PNIPU, 2018, pp. 351 – 353. [In Russ].

4. *SP 69.13330.2016. Podzemnye gornye vyrabotki* [Set of rules 69.13330.2016. Underground mining operations], Moscow, Standartinform, 2017, 27 p.

5. Pankov I.L., Asanov V.A., Udarcev A.A., Kuzminyh V.S. Practice of test facilities usage during researches on deformation and failure of quasiplastic rocks in laboratory conditions. *Vestnik Kyrgyzsko-rossiyskogo slavyanskogo universiteta*. 2013, vol. 16, no 1, pp. 163 – 167. [In Russ].

6. Agnieszka Maj. Rock-mass movement monitoring system in historical salt mines, using the example of the Bochnia Salt Mine. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. Pp. 496 – 503. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.209.

7. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. *Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornykh porod* [Experimental physics and mechanics of rocks], Saint-Petersburg, Nauka, 2001, 343 p.

8. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii. GOST 21153.2-84* [Rocks. Determining strength methods under uniaxial compression. State standard 21153.2-84], Moscow, Izd-vo standartov, 2001, 10 p.

9. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri ob"emnom szhatii. GOST 21153.8-88* [Rocks. Determining strength methods under triaxial compression. State standard 21153.8-88], Moscow, Izd-vo standartov, 1988, 17 p.

10. Bieniawski Z.T., Bernede M.J. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. 1979. Vol. 16. No 2. Pp. 138 – 140. DOI: 10.1016/0148-9062(79)91451-7.

11. Kovari K., Tisa A., Einstein H.H., Franklin J.A. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. 1983. Vol. 20. No 6. Pp. 285 – 290. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90598-3.

12. Baryakh A.A., Konstantinova S.A., Asanov V.A. *Deformirovanie solyanykh porod* [Deformation of salt rocks], Yekaterinburg, UrO RAN, 1996, 203 p.

13. Bolikov V.E., Konstantinova S.A. *Prognoz i obespechenie ustoichivosti kapital'nykh gornykh vyrabotok* [Prediction and ensuring the stability of capital mining operations], Ekaterinburg, UrO RAN, 2003, 374 p.

14. Kartashov Yu. M., Matveev B.V., Mikheev G.V., Fadeev A.B. *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* [Rock strength and deformability], Moscow, Nedra, 1979, 269 p.

15. Pan'kov I.L., Morozov I.A.Salt rock deformation under bulk multiple-stage loading. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 510 – 519. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.510.

16. Artkhonghan K., Sartkaew S., Thongprapha T., Fuenkajorn K. Effects of stress path on shear strength of a rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 104. Pp. 78 – 83. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.02.014.

17. Müllera Ch., Frühwirt Th., Haase D., Schlegel R., Konietzky H. Modeling deformation and damage of rock salt using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 103. Pp. 230 – 241. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.022.

18. Sriapai T., Walsri Ch., Fuenkajorn K. True-triaxial compressive strength of Maha Sarakham salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 61. Pp. 256 – 265. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.03.010.

19. Aditya Singh, Chandan Kumar, Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R. Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 107. Pp. 243 – 248. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.037.

20. Wenjing Li, Yanhui Han, Tao Wang, Jiwei Ma DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 46. Pp. 38 – 46. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.07.013.

21. Aditya Singh, Chandan Kumar, Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R. Rheological behaviour of rock salt under uniaxial compression. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173. Pp. 639 – 646. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.122.

22. Ilyinov M.D., Kartashov Yu. M. Qiuck-acting technique for the determination of rheological properties of rocks. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 207 – 209. [In Russ].

23. Ageenko V.A. Study of the rheological properties of salt rock. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2019, no 53, pp. 115 – 120. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-115-120.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Морозов Иван Александрович — аспирант,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Ударцев Артем Александрович[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: udartsev@mi-perm.ru,
Паньков Иван Леонидович[1] — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
[1] Горный институт УрО РАН.
Для контактов: Ударцев А.А., e-mail: udartsev@mi-perm.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.A. Morozov, Graduate Student,
Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia,
A.A. Udarcev[1], Junior Researcher, e-mail: udartsev@mi-perm.ru,
I.L. Pankov[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.
Corresponding author: A.A. Udarcev, e-mail: udartsev@mi-perm.ru.

Получена редакцией 27.03.2020; получена после рецензии 15.04.2020; принята к печати 20.09.2020.
Received by the editors 27.03.2020; received after the review 15.04.2020; accepted for printing 20.09.2020.