

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 20-45-596011 р_НОЦ_Пермский край
и Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000403-1).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и подрабатываемыми зданиями и сооружениями на калийных рудниках: утв. ОАО «Сильвинит», ОАО «Уралкалий»; согласовано Госгортехнадзор России 26.04.2004 № АС-04-35/336. – СПб, 2004. – 73 с.
2. Технологический регламент по комплексному обеспечению безопасности горных работ и охране недр на рудниках ПАО «Уралкалий»: утв. 16.02.2016, № 253. – 5-е изд.
3. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч. 1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 117 с.
4. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.
5. Барях А.А., Евсеев А.В., Глебова П.А., Васильева Е.Л. Прогноз оседаний земной поверхности по данным измерения деформаций горных выработок // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2023.4.5

ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

В.С. Кузьминых

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье приведены результаты проведения лабораторных испытаний образцов сильвинита с ВКМКС по схеме долговременного приложения растягивающих усилий. Эксперименты реализовывались на универсальной разрывной машине «Zwick Z050» при постоянных величинах прикладываемых нагрузок от 0,4 до 1,2 МПа, длительность опытов составляла от 7 до 14 суток. По итогам проделанных работ получена теоретическая зависимость длительной прочности при растяжении.

Ключевые слова: сильвинит, растягивающее усилие, скорость деформирования, степень нагружения.

В настоящее время для калийных рудников Верхнекамского месторождения весьма важной проблемой является обеспечение безопасных условий ведения работ при добычи полезных ископаемых. При камерной системе разработки, которая применяется на ВКМКС, необходимо уделять особое внимание состоянию кровли горных выработок [1], породы которой, как правило, находятся по действием растягивающих напряжений в течение длительного времени [2, 3]. Поэтому, работы связанные с изучением реологических свойств соляных пород, являются актуальными.

С целью проведения исследования были изготовлены пробы сильвинита призматической формы длиной 250 мм и поперечным сечением 50×50 мм.

Эксперименты проводились на универсальной электромеханической машине «Zwick 050» (максимальное усилие – 50 кН), позволяющей поддерживать постоянное растягивающее усилие с одновременной регистрацией продольных деформаций (рис. 1). Для исключения концевых эффектов, связанных с низкой контактной прочностью солей перед испытанием проводилась подготовка образца, заключавшаяся в его цементации в специальных металлических матрицах [4].

Эксперимент состоял из двух частей. Первая часть заключалась в реализации стадии ползучести при вертикальных нагрузках (σ) 0,4, 0,8 и 1,2 МПа. Период действия растягивающих усилий от 7 до 14 суток. По результатам испытаний по каждому образцу была получена диаграмма деформирования (рис. 2) и определялась скорость установившейся ползучести ($v_{уст}$) на данной стадии.

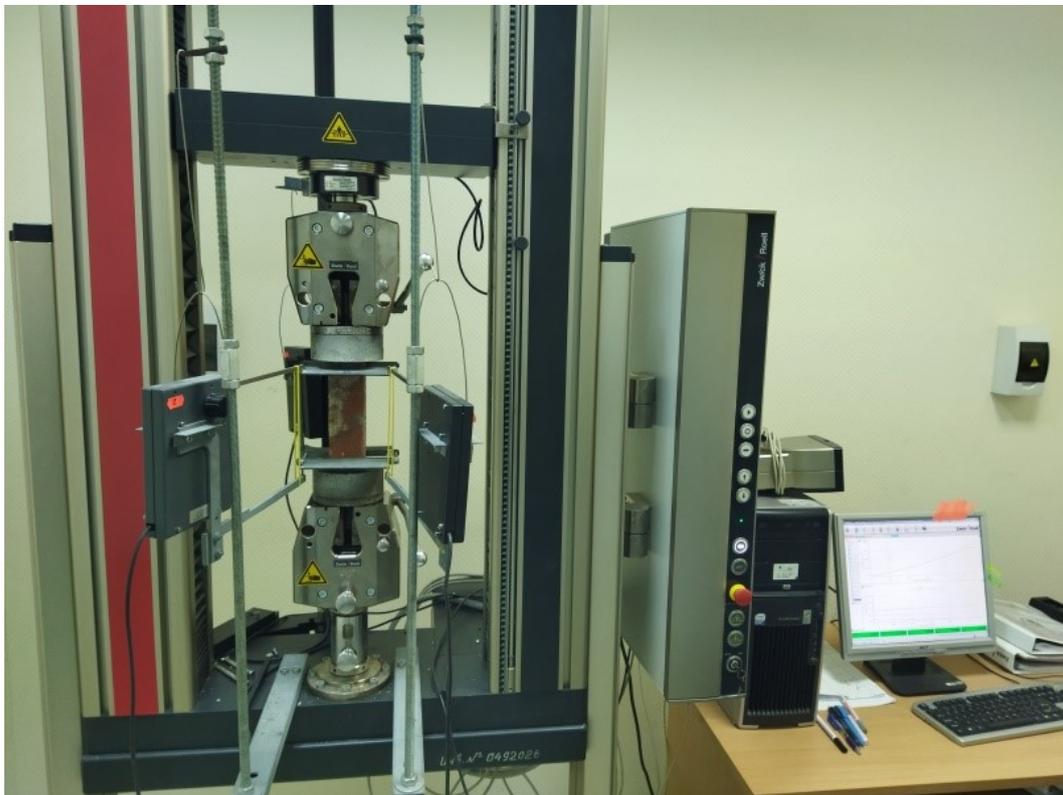


Рис. 1. Внешний вид испытательной машины «Zwick 050»

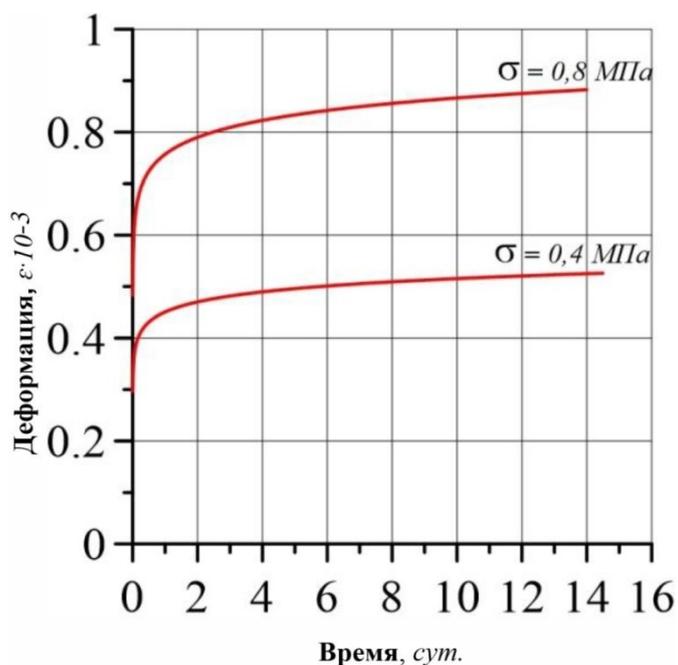


Рис. 2. Диаграммы деформирования по итогам первой части эксперимента

Вторая часть опыта была посвящена нахождению величины «истинной» степени нагружения (σ_0/σ_{np}) путем доведения образца до образования открытой (видимой) трещины на поверхности, что обуславливало его полное разрушение.

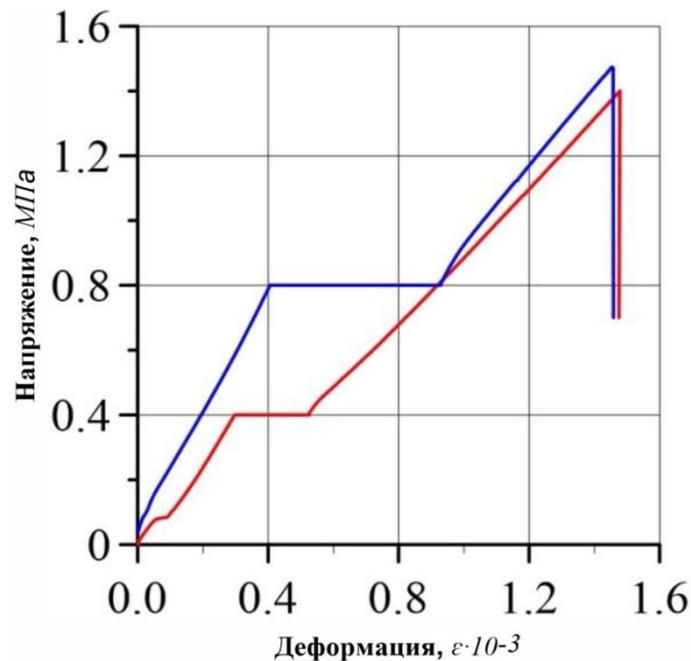


Рис. 3. Вид совмещенных диаграмм

По итогам проведения обеих частей эксперимента для каждого образца был построен график, который совмещал в себе деформационную и прочностную части первой и второй стадии нагружения (рис. 3). При анализе данных диаграмм были получены параметры, которые отображены в табл. 1. Также в таблице приведено оценочное время разрушения (t_*) образца, определяемое по формуле:

$$t_* \approx \frac{\varepsilon_{np} - \varepsilon_{mg}}{v_{уст}} \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты обработки кривых ползучести и совмещенных диаграмм деформирования

№ обр.	σ , МПа	σ_{np} , МПа	σ/σ_{np}	ε_{mg}	ε_{np}	E , ГПа	$v_{уст}$ $\cdot 10^{-10}$, c^{-1}	t_* , сут
1	0,4	1,40	0,29	0,00030	0,00148	0,85	0,38	359
2	0,4	1,42	0,28	0,00017	0,00103	1,19	0,17	590
3	0,8	2,03	0,39	0,00048	0,00178	0,95	0,65	231
4	0,8	1,47	0,54	0,00040	0,00146	0,63	0,86	139
5	1,2	1,97	0,61	0,00040	0,00118	0,75	0,89	104
6	1,2	1,64	0,73	0,00108	0,00162	0,93	0,95	0,65
7	1,2	1,08	0,90	0,00146	0,00294	1,01	2,32	0,74
8	1,2	1,02	0,85	0,00083	0,00107	0,87	1,5	0,19

Полученные результаты использовались для построения зависимости, описывающей влияние степени нагружения на скорость установившейся ползучести (рис. 4).

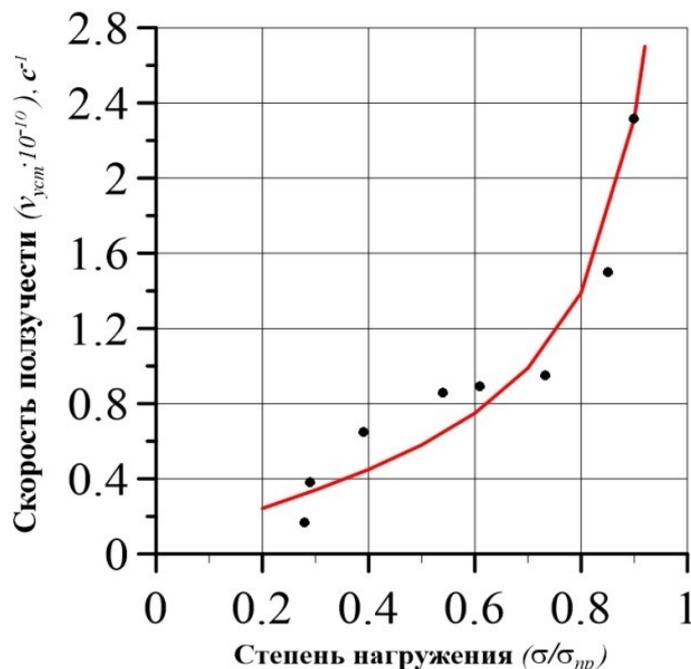


Рис. 4. Зависимость скорости установившейся ползучести от степени нагружения

Вид полученной аппроксимационной зависимости:

$$v_{уст}(\sigma/\sigma_{пр}) \approx 0,58 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{\sigma/\sigma_{пр}}{1 - \sigma/\sigma_{пр}} \right)^{0,63}, c^{-1}. \quad (2)$$

Учитывая, что при растяжении горных пород имеет место линейная связь между напряжениями и деформациями, а также с учетом выражения (2), уравнение (1) переписывается в виде:

$$t_* \approx \frac{\sigma_{пр}}{E} \cdot \frac{1 - \sigma/\sigma_{пр}}{v_{уст}(\sigma/\sigma_{пр})}, \quad (3)$$

Полученное время разрушения использовалось для теоретической оценки коэффициента длительной прочности с помощью уравнения:

$$K(t) = K_{\infty} + \frac{1 - K_{\infty}}{e^{at}}, \quad (4)$$

где K_{∞} — коэффициент длительной прочности, $a = 0,011$ — эмпирический коэффициент.

Для построения кривой длительной прочности использовались осредненные физико-механические показатели на растяжение силвинита, составляющие: $\sigma_{пр} = 1,5$ МПа, $E = 0,9$ ГПа, $\sigma_{\infty} = 0,51$ МПа ($\sigma_{\infty}/\sigma_{пр} = 0,34$), рис. 5.

Дальнейшее развитие данных исследований будет направлено на увеличение статистической выборки при разных уровнях прикладываемой нагрузки для уточнения и корректировки параметров кривой длительной прочности при растяжении.

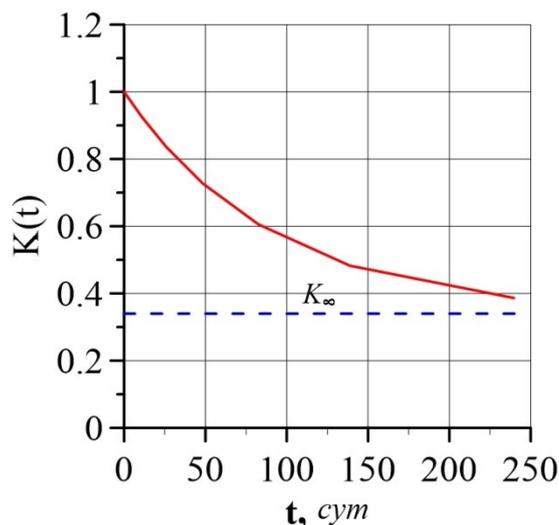


Рис. 5. Кривая длительной прочности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.: ил.
2. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
3. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 272 с.: ил.
4. Паньков И.Л., Гараева Ю.И. Исследование механических свойств соляных пород при растяжении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 154-157.

УДК 622.2

DOI:10.7242/echo.2023.4.6

ОБ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

И.А. Морозов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе приведено описание разработанной и реализованной методом конечных элементов математической модели деформирования вмещающих горные выработки пород для условий глубокого калийного рудника. Модель отражает основные факторы, определяющие устойчивость породных обнажений в рассматриваемых условиях: вид и параметры исходного поля напряжений, слоистость породного массива, ползучесть соляных пород. Для условий опытного участка горной выработки приведены результаты оценки изменения напряженно-деформированного состояния вмещающих горную выработку пород в зависимости от времени.

Ключевые слова: соляные породы, ползучесть, устойчивость горной выработки, глубокий рудник.