

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2021.4.7

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

В.С. Кузьминых

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Проведены испытания образцов соляных пород Верхнекамского месторождения калийных солей в режиме длительного растяжения. Испытания проводились на универсальной электромеханической машине Zwick Z050 при нагрузках – 0,4 и 0,8 МПа, с длительностью приложения нагрузки – 14 суток. По результатам испытаний получены кривые ползучести и «остаточные» диаграммы деформирования при растяжении.

**Ключевые слова:** соляная порода, кривые ползучести, диаграмма деформирования, модуль деформации.

Горно-геологические условия Верхнекамского месторождения калийных солей предполагают применение камерной системы разработки, с оставлением поддерживающих междукамерных целиков, на которые действует горное давление, обусловленное весом вышележащих пород. Данная система разработки позволяет обеспечить максимальную сохранность выработанного пространства от прорыва грунтовых вод путем поддержания сплошности водозащитной толщи, а также позволяет обеспечить максимальную сохранность наземных объектов и сооружений. Наиболее уязвимым элементом контура выработки при данном способе выемки полезного ископаемого является кровля, в которой образуются зоны с неоднородным напряженным состоянием, что обуславливает ее разрушение в результате возникновения длительных растягивающих напряжений [1]. В связи с этим для оценки устойчивости кровли выработок необходима достоверная информация о деформационных свойствах соляных пород под действием длительных растягивающих усилий [2].

Для проведения исследования по изучению деформации ползучести соляных пород при растяжении из породного монолита сильвинита, отобранного на пласте АБ рудника СКРУ-3, были изготовлены образцы призматической формы высотой 200 мм и поперечным сечением 50×50 мм. Эксперименты проводились на универсальной электромеханической машине Zwick 050 (максимальное усилие – 50 кН), позволяющей поддерживать режим ползучести с одновременным измерением деформаций. Методика подготовки образца к проведению длительных испытаний на растяжение приведена в работе [3].

Экспериментальное изучение деформационных свойств соляных пород проводилось в два этапа. На первом этапе реализовывалась стадия ползучести, выполняемой по схеме, приведенной на рис. 1, при постоянных уровнях растягивающих усилий ( $\sigma_0$ ) – 0,4 и 0,8 МПа. Время выдержки ( $t$ ) каждого эксперимента составляло 14 суток.

Полученные результаты представлялись в виде кривых ползучести в координатах «относительная деформация растяжения – время испытания» (рис. 2).

Обработка результатов эксперимента на ползучесть позволила установить деформацию мгновенного нагружения ( $\varepsilon_{мг}$ ), начальный модуль деформации первого этапа ( $D_{y1}$ ) и деформацию ползучести ( $\varepsilon_{пол}$ ) образца за время  $t$ . Результаты определения деформационных показателей соляных пород в условиях растяжения в режиме ползучести приведены в табл. 1.

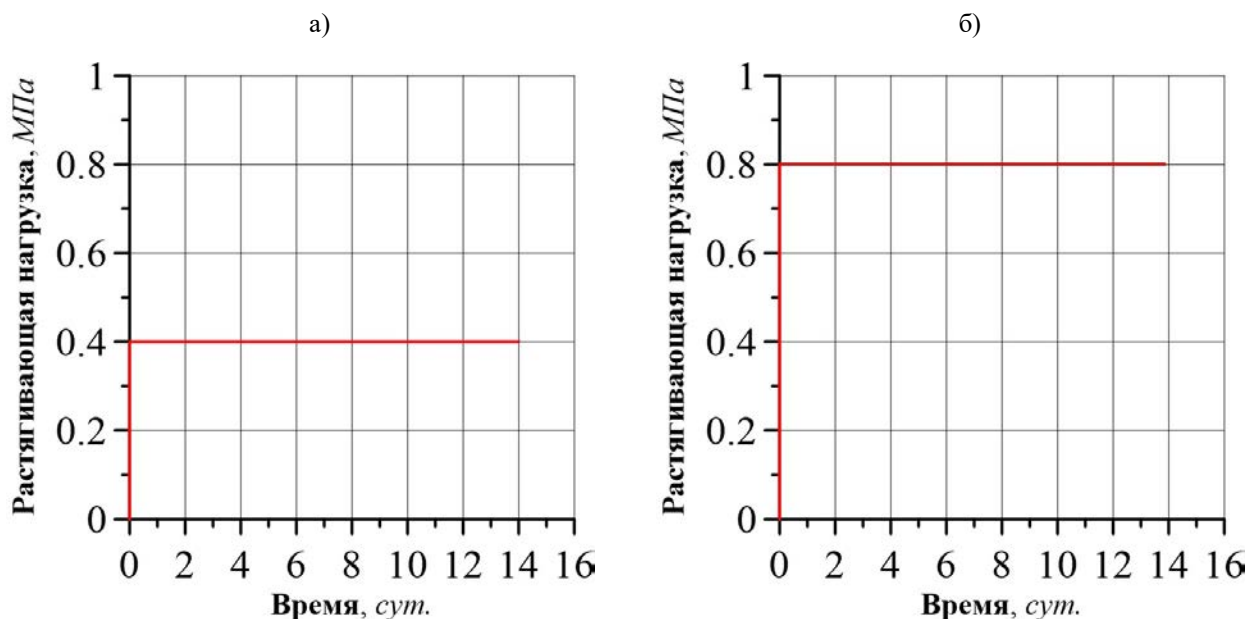


Рис. 1. Схемы нагружения при проведении испытаний:  
а – 0,4 МПа; б – 0,8 МПа

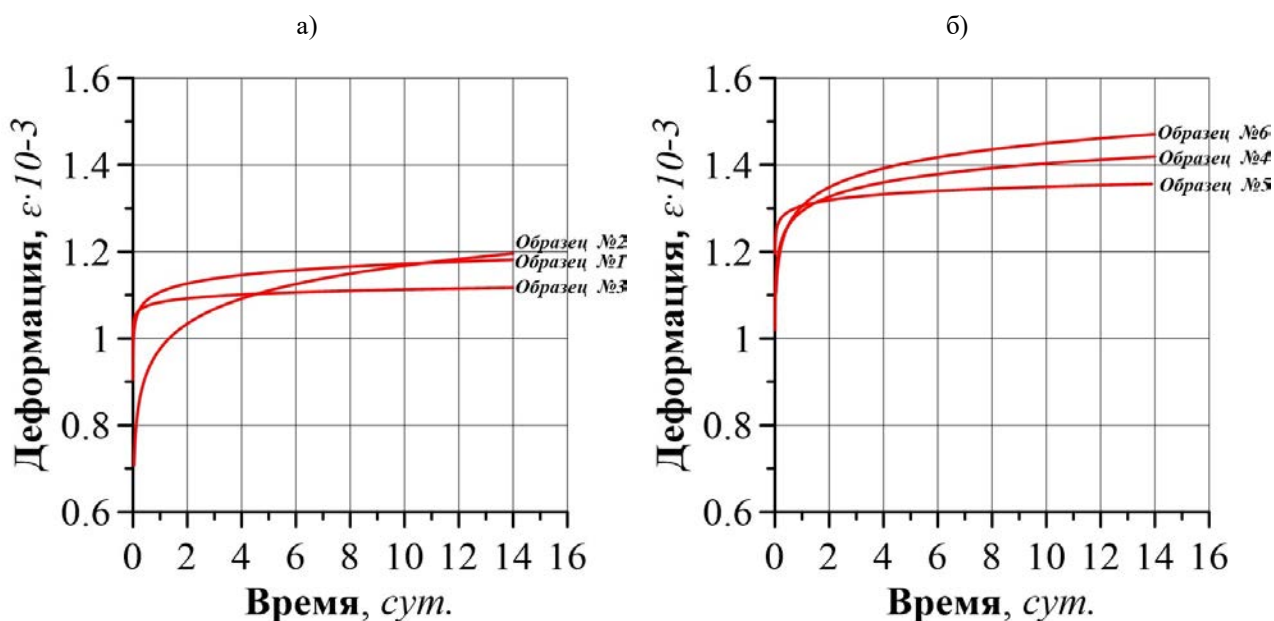


Рис. 2. Характерный вид кривых ползучести соляных пород при прямом растяжении для различных величин растягивающего усилия:  
а – 0,4 МПа ; б – 0,8 МПа

С целью определения «истинной» степени нагружения ( $\sigma_0/\sigma_{np}$ ), на втором этапе испытаний образцы после стадии длительного нагружения переводились в режим растяжения с постоянной скоростью деформирования  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  до их полного разрушения. По результатам строились «остаточные» диаграммы деформирования (рис. 3), которые использовались для определения предела прочности при растяжении ( $\sigma_{np}$ ), соответствующей ему разрушающей деформации ( $\varepsilon_{np}$ ), начального модуля деформации второго этапа ( $D_{y2}$ ), определяемого по линейному участку диаграммы, а также предельного модуля деформации ( $D_{np}$ ) по схеме, приведенной в работе [4].

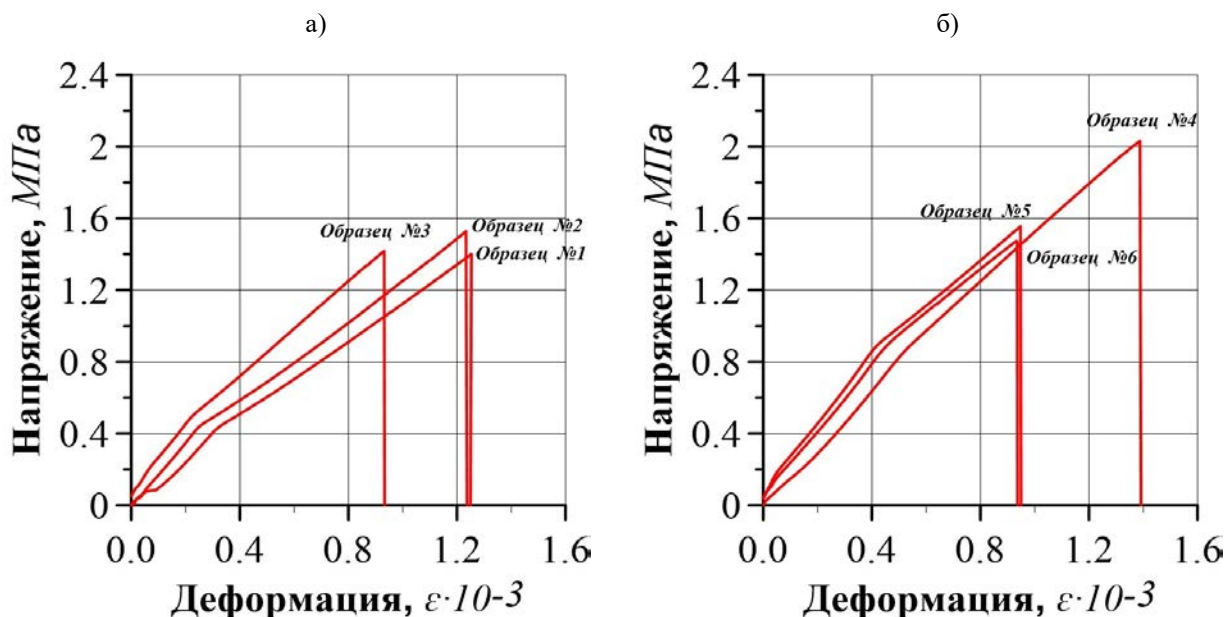


Рис. 3. Вид диаграмм деформирования:  
а – 0,4 МПа ; б – 0,8 МПа

Результаты определения деформационных свойств соляных пород в условиях квази-мгновенного растяжения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения деформационных свойств соляных пород

№ обр	Растяжение в режиме ползучести			Растяжение в режиме постоянной скорости деформирования				
	$\epsilon_{мг}$	$D_{y1}, ГПа$	$\epsilon_{пол}$	$\epsilon_{пр}, \epsilon \cdot 10^{-3}$	$\sigma_{пр}, МПа$	$\sigma_0/\sigma_{пр}$	$D_{y2}, ГПа$	$D_{пр}, ГПа$
<b><math>\sigma_0=0,4 МПа</math></b>								
1	0,91	1,53	1,18	1,25	1,40	0,29	1,05	1,12
2	0,71	1,76	1,20	1,23	1,53	0,26	1,20	1,24
3	1,04	1,81	1,12	0,93	1,42	0,28	1,31	1,53
<b><math>\sigma_0=0,8 МПа</math></b>								
4	1,13	1,82	1,42	1,40	2,03	0,39	1,35	1,45
5	1,24	2,00	1,36	0,95	1,56	0,51	1,25	1,64
6	1,09	2,00	1,47	0,94	1,47	0,54	1,18	1,56

Полученные результаты позволили выявить, что за время эксперимента на первом этапе при длительной растягивающей нагрузке 0,4 МПа деформация ползучести изменяется в интервале  $(1,12 \div 1,20) \cdot 10^{-3}$  (среднее значение –  $1,17 \cdot 10^{-3}$ ); мгновенная деформация ползучести изменяется в интервале  $(0,71 \div 1,0,4) \cdot 10^{-3}$  (среднее значение –  $0,89 \cdot 10^{-3}$ ); начальный модуль деформации –  $1,53 \div 1,81$  ГПа (среднее значение – 1,70 ГПа). При нагрузке в 0,8 МПа деформация ползучести изменяется в интервале  $(1,36 \div 1,47) \cdot 10^{-3}$  (среднее значение –  $1,42 \cdot 10^{-3}$ ); мгновенная деформация ползучести изменя-

ется в интервале  $(1,09 \div 1,24) \cdot 10^{-3}$  (среднее значение –  $1,15 \cdot 10^{-3}$ ); начальный модуль деформации –  $1,82 \div 2,00$  ГПа (среднее значение –  $1,94$  ГПа). Также стоит отметить рост деформации ползучести и начального модуля деформации соляных пород с увеличением прикладываемой нагрузки.

По итогам второго этапа экспериментов установлено, что на всех диаграммах деформирования четко прослеживается «перелом» при переходе через точку приложения нагрузки ( $\sigma_0$ ), соответствующей длительным испытаниям. Анализ результатов определения параметров деформирования соляных пород позволил установить, что для образцов, испытанных после приложения длительной нагрузки,  $\sigma_0=0,4$  МПа предел прочности при растяжении изменяется в интервале  $1,40 \div 1,53$  МПа (среднее значение –  $1,45$  МПа); разрушающая деформация  $0,93 \cdot 10^{-3} \div 1,25 \cdot 10^{-3}$  (среднее значение –  $1,14 \cdot 10^{-3}$ ); предельный модуль деформации –  $1,12 \div 1,53$  ГПа (среднее значение –  $1,30$  ГПа); начальный модуль деформации –  $1,05 \div 1,31$  ГПа (среднее значение –  $1,19$  ГПа). Для образцов испытанных после приложения длительной нагрузки  $\sigma_0=0,8$  МПа предел прочности при растяжении изменяется в интервале  $1,47 \div 2,03$  МПа (среднее значение –  $1,69$  МПа); разрушающая деформация  $0,94 \cdot 10^{-3} \div 1,4 \cdot 10^{-3}$  (среднее значение –  $1,10 \cdot 10^{-3}$ ); предельный модуль деформации –  $1,45 \div 1,64$  ГПа (среднее значение –  $1,54$  ГПа); начальный модуль деформации –  $1,18 \div 1,35$  ГПа (среднее значение –  $1,26$  ГПа). Так же была определена «истинная» степень нагружения ( $\sigma_0/\sigma_{np}$ ), которая в среднем составила  $0,28$  при  $\sigma_0=0,4$  МПа и  $0,48$  при  $\sigma_0=0,8$  МПа.

Ввиду высокой трудоемкости проведения испытаний, а также из-за необходимости поддержания постоянными микроклиматических параметров, таких как температура и влажность, полученные результаты включали только области неустановившейся и установившейся ползучести. В этой связи дальнейшее развитие данных исследований должно быть направлено на увеличение уровня прикладываемой нагрузки с целью определения предела длительной прочности и регистрации всех стадий деформирования, включая стадию прогрессирующей ползучести.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г., а также при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004. 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. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 272 с.: ил.
2. Паньков И.Л. Исследование механических свойств соляных пород при растяжении / И.Л. Паньков, Ю.И. Гараева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 154-157.
3. Асанов В.А., Паньков И.Л., Кузьминых В.С., Морозов И.А. Методические аспекты определения прочностных, деформационных и энергетических характеристик соляных пород при прямом растяжении породных образцов в лабораторных условиях // Вестн. ПНИПУ: Механика. – 2018. – № 4. – С. 58-68. – DOI: 10.15593/pern.mech/2018.4.05.
4. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.