УДК 622.02

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО СТУПЕНЧАТОМУ НАГРУЖЕНИЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Ю. В. Осипов, А. С. Вознесенский*

Общество с ограниченной ответственностью "Газпром геотехнологии", 123290 Москва, Россия * Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119991 Москва, Россия

E-mails: yuhanna@list.ru, al48@mail.ru

Создана и в лабораторных условиях апробирована методика определения эмпирической зависимости реологических свойств горных пород от напряжений. С использованием результатов испытаний цилиндрических образцов каменной соли и бишофита Нижневолжского месторождения получены кривые деформирования при ступенчатом нагружении, разработана и верифицирована вязкоупругая модель, описывающая изменение деформаций во времени. Показано, что с увеличением напряжения параметры, характеризующие упругость и вязкость исследуемых пород, уменьшаются. Это соответствует последовательному переходу от стадии упругого деформирования к стадиям затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести. Установлено, что ползучесть бишофита проявляется при значениях напряжений более 0,5 МПа, а ползучесть каменной соли — более 5 МПа. По отношению к пределу прочности на одноосное сжатие и максимальным деформациям ползучесть бишофита проявляется при значениях относительного напряжения 0,19, для каменной соли эти значения превышают 0,11 и 0,43 соответственно.

Ключевые слова: реологические свойства горных пород, вязкоупругая модель, лабораторный эксперимент, ступенчатое нагружение, каменная соль, бишофит.

DOI: 10.15372/PMTF20220219

Введение. Все материалы в той или иной степени подвержены процессу ползучести [1], в частности галогенные горные породы, к числу которых относятся галит, сильвинит, карналлит, бишофит и др. Наличие горных пород с выраженными реологическими свойствами может приводить к различным осложнениям при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, в том числе к смятию обсадных колонн на глубине залегания пластов.

Бишофит встречается в породных массивах, содержащих подземные хранилища углеводородов [2–5], что свидетельствует о необходимости изучения его реологических свойств [6] для построения уравнений состояния в моделях упруговязкопластических материалов [7, 8], которые используются при исследовании устойчивости указанных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-05-00341).

[©] Осипов Ю. В., Вознесенский А. С., 2022

Поскольку бишофит является галогенной породой, следует изучить свойства бишофита в сравнении с другими породами этого класса, в частности с каменной солью. Результаты реологических испытаний в режиме одноосного ступенчатого нагружения каменной соли приведены в работах [9–11].

Во многих работах полученные кривые ползучести интерпретировались с помощью феноменологических моделей, в которых используются упругий, пластический и вязкий элементы. Изучению структурных реологических моделей горных пород посвящены работы [12–15] и др.

При исследовании реологических свойств горных пород применяются методы двух типов: 1) прямые (классические) методы; 2) косвенные методы, к числу которых относится метод ступенчатого нагружения.

Прямой метод является наиболее достоверным при экспериментальном определении реологических свойств [16, 17]. Существует ряд трудностей, возникающих при использовании прямого метода: сложное оборудование, значительная длительность экспериментов, необходимость поддержания постоянного давления при изменении температуры и влажности [18]. Это обусловило разработку косвенных методов, позволивших уменьшить длительность испытаний и их трудоемкость. В работе [19] предложен метод, основанный на ступенчатом приложении нагрузки к образцу в течение заданного времени с последующим ее увеличением. Данный метод развит в работах [20–22].

В данной работе исследуется ползучесть бишофита при одноосном напряженном состоянии, формулируются феноменологические модели и определяются параметры ползучести.

1. Испытываемые образцы. Для проведения исследований отбирались образцы бишофита из Волгоградского подземного хранилища газа из скважины 8т на глубине 1319÷1337 м. На этой глубине бишофит представлен двумя слоями толщиной 3,2 и 4,4 м. В результате химического анализа исследуемых образцов бишофита определена массовая доля солей: MgCl₂ — 38–50 %, NaCl — 25–37 %. Влажность образцов не превышала 23 %. Химический состав всех образцов показал их полную идентичность, что позволило проводить испытания образцов одной группы. До начала эксперимента, вследствие сверхвысокой гигроскопичности, образец бишофита упаковывался в специальную оболочку, исключающую контакт с внешней средой.

Также проведены исследования образцов каменной соли из скважины 8т на глубине 1405 ÷ 1415 м. В результате химического анализа исследуемых образцов каменной соли установлено, что массовая доля NaCl составляет более 90 %. Влажность образца не превышала 23 %. Химический состав всех образцов показал их полную идентичность, что также позволило проводить испытания образцов одной группы.

Было изготовлено 15 цилиндрических образцов бишофита с отношением высоты к диаметру 2 : 1. Высота образцов бишофита изменялась в диапазоне 71 ÷ 74 мм, диаметр — 34 ÷ 36 мм. Для всех образцов определялись масса и размеры, а также плотность. Среднее значение плотности составило 1,56 г/см³.

2. Оборудование для проведения испытаний. Изучение реологических свойств бишофита в условиях одноосного ступенчатого нагружения проводилось с использованием автоматизированного испытательного комплекса "ACИC". Устройство осевого нагружения ГТ 2.0.8, входящее в состав комплекса, позволяло создавать максимальную нагрузку на образец до 30 кН. Также данное устройство было оснащено датчиками перемещения, необходимыми для непрерывного измерения осевой деформации образца в течение всего эксперимента. Образец бишофита, изготовленный для проведения экспериментов, испытаний, и установка для испытаний показаны на рис. 1.

Относительная погрешность измерения продольных деформаций не превышала 0,96 %, нагрузки — 0,4 %.



Рис. 1. Образец бишофита для проведения реологических испытаний (скважина 8т Волгоградского подземного хранилища газа) (a) и оборудование с установленным образцом (b)

3. Методика проведения испытаний. Предварительно с использованием 11 образцов бишофита определялся мгновенный предел прочности при одноосном сжатии, среднее значение которого по результатам испытаний составило 6,1 МПа при коэффициенте вариации 0,34. Первоначально планировалось 12 ступеней одноосного нагружения для каждого образца. Такое количество ступеней было выбрано для детального изучения всех стадий ползучести образца под нагрузкой. Значение напряжения на первой ступени составило 0,5 МПа, т. е. 10 % значения предела прочности при одноосном сжатии. Напряжение на следующих ступенях увеличивалось на 0,5 МПа по сравнению с напряжением на предыдущей ступени. Длительность действия напряжения на каждой ступени составляла 24 ч. Измерение нагрузок и деформаций на поверхности образца осуществлялось в автоматическом режиме с периодом измерения 1 с. Испытания проводились при комнатных температуре и влажности. В ходе испытаний установлено, что вследствие ползучести образец бишофита разрушался на четвертой или пятой ступени нагружения.

Для сравнения проведены испытания на ползучесть образцов каменной соли. Методика испытаний образцов каменной соли, имеющей бо́льшую прочность, была идентична методике испытаний образцов бишофита. При среднем значении предела прочности 25 МПа шаг увеличения напряжения составлял 5 МПа, что обеспечило одинаковое планируемое количество ступеней нагружения каменной соли и бишофита и позволило наглядно представить их различие при деформировании.

4. Результаты исследования. На рис. 2 приведена зависимость относительной осевой деформации ε от времени t образца бишофита 10-6-2, а также образца каменной соли 36-9-2 вплоть до их разрушения, т. е. перехода на конечную стадию прогрессирующей ползучести, при ступенчатом увеличении нагрузки.

Следует отметить, что в случае каменной соли количество ступеней нагружения до разрушения было больше, чем в случае бишофита.

5. Результаты испытаний образцов бишофита. В данной работе при описании ползучести как бишофита, так и каменной соли применялись структурные феноменологические реологические модели, в которых использовались упругий, вязкий и пластический элементы. Для определения вида ползучести на каждой ступени рассчитывались скорости



Рис. 2. Кривые ползучести при ступенчатом нагружении: 1 — образец бишофита 10-6-2, 2 — образец каменной соли 36-9-2



Рис. 3. Зависимости скорости ползучести v_c образца бишофита 10-6-2 от времени в отсутствие пятой ступени (*a*) и при ее наличии (*б*) при различных значениях напряжения σ :

 $1-\sigma=1,0$ МПа, $2-\sigma=1,5$ МПа, $3-\sigma=2,0$ МПа, $4-\sigma=2,5$ МПа

деформирования. Расчеты проводились в среде Mathcad с использованием специально созданных программ. На рис. 3 показано изменение скорости ползучести образца бишофита 10-6-2 на второй-пятой ступенях. Первая ступень не показана, поскольку при действующем на ней напряжении 0,5 МПа в образце не происходило реологических процессов и скорость деформирования была равна нулю. На пятой ступени вследствие резкого увеличения скорости ползучести произошло разрушение образца.

Как отмечено выше, на первой ступени под действием напряжения, равного 0,5 МПа, скорость ползучести образца бишофита незначительна. На второй ступени под действием напряжения $\sigma = 1,0$ МПа скорость осевого деформирования образца уменьшалась, что характерно для процесса затухающей ползучести. На третьей ступени при напряжении $\sigma = 1,5$ МПа скорость осевого деформирования менялась незначительно, что характерно для установившейся ползучести. На четвертой ступени при напряжении $\sigma = 2,0$ МПа

увеличивалась скорость деформации бишофита и произошел переход из режима установившейся ползучести в режим прогрессирующего течения. На пятой ступени произошло резкое увеличение скорости деформирования образца, вызванное увеличением напряжения до значения $\sigma = 2,5$ МПа, что привело к разрушению образца в течение 2 ч.

Разрушение образцов происходило на четвертой или пятой ступени после проявления прогрессирующей ползучести.

6. Построение феноменологических моделей и определение их параметров для образцов бишофита. В качестве феноменологической реологической модели деформирования бишофита была выбрана модель ползучести, представляющая собой комбинацию упругих и вязких элементов:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4, \tag{1}$$

где ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 — соотношения, описывающие упругое деформирование, затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучесть.

На первой ступени после приложения к образцу напряжения $\sigma=0,5$ МП
а имели место только упругие деформации

$$\varepsilon_1(\sigma) = \sigma/E_1,\tag{2}$$

где ε_1 — упругая деформация; σ — напряжение; E_1 — модуль упругости образца бишофита.

На второй ступени напряжение увеличилось на 0,5 МПа и составило 1,0 МПа. Помимо упругого деформирования (см. (2)), характерного для первой ступени, проявилась затухающая ползучесть. Данная ступень описывается упруго-вязкой моделью Бюргерса

$$\varepsilon_2(t,\sigma) = \left(\frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_1}\right) \left(1 - e^{-E_2 t/\eta_2}\right),\tag{3}$$

где η_2 — вязкость; E_2 — модуль упругости. Первый множитель характеризует упругую деформацию, второй — деформацию затухающей ползучести. Отношение $\eta_2/E_2 = \tau_2$ характеризует время изменения деформации затухающей ползучести в e раз.

На третьей ступени при напряжении $\sigma = 1,5$ МПа к затухающей ползучести добавилась установившаяся ползучесть, которая характеризуется увеличением деформации во времени с постоянной скоростью. Третья ступень достаточно точно описывается вязким элементом:

$$\varepsilon_3(t,\sigma) = \sigma t/\eta_1 \tag{4}$$

 $(\eta_1 - вязкость, характеризующая установившуюся ползучесть).$

На четвертой ступени при напряжении $\sigma = 2,0$ МПа скорость деформирования, установившаяся на участке $t = 0 \div 5$ ч, начала возрастать (см. рис. 3), что обусловлено проявлением прогрессирующей ползучести.

Для описания прогрессирующей ползучести используем экспоненту:

$$\varepsilon_4(t,\sigma) = \left(\frac{\sigma}{E_3} - \frac{\sigma}{E_1}\right) \left(e^{t/\tau_3} - 1\right).$$
(5)

Здесь E_3 — коэффициент, аналогичный модулю упругости и характеризующий влияние прогрессирующей ползучести; τ_3 — параметр, характеризующий увеличение деформации прогрессирующей ползучести во времени.

Подставляя (2)–(5) в (1), получаем

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \left(\frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_1}\right) \left(1 - e^{-E_2 t/\eta_2}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \left(\frac{\sigma}{E_3} - \frac{\sigma}{E_1}\right) \left(e^{t/\tau_3} - 1\right).$$
(6)

На пятой ступени при $\sigma = 2,5$ МПа вследствие резкого увеличения скорости деформирования, начавшегося на четвертой ступени, образец бишофита в течение 2 ч разрушился.



Рис. 4. Кривые ползучести образца бишофита 10-7-3: точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации по формуле (6); 1 — σ = 0,5 МПа, 2 — σ = 1,0 МПа, 3 — σ = 1,5 МПа, 4 — σ = 2,0 МПа, 5 — σ = 2,5 МПа

На рис. 4 приведены кривые ползучести, полученные по формуле (6), и экспериментальные данные. Видно, что формула (6) достаточно точно описывает деформирование образца на всех ступенях нагружения.

В табл. 1 приведены параметры модели (6), с использованием которой проводилась обработка экспериментальных данных. Следует отметить, что для всех испытанных образцов бишофита значения модулей упругости, вязкости и постоянной времени уменьшаются (табл. 2).

Проведена также статистическая обработка результатов, полученных по формуле (6) для других образцов. Для всех испытанных образцов бишофита коэффициент детерминации R^2 составлял не менее 0,9938, коэффициент вариации не превышал 1,85 %. Таким образом, формула (6) удовлетворительно описывает кривые ползучести бишофита (см. рис. 4).

7. Обсуждение результатов испытаний образца каменной соли. На рис. 5 приведены экспериментальные кривые ползучести и результаты их аппроксимации по формуле (6) для образца каменной соли 36-9-2 до момента его разрушения.

На рис. 6 представлена зависимость скорости ползучести образца каменной соли 36-9-2 от номера ступени и приложенного напряжения. На рис. 6 не показаны первые две ступени нагружения, так как скорости деформации на них значительно меньше упругой деформации.

Из рис. 5 следует, что на первой ступени при напряжении $\sigma = 5$ МПа отсутствуют реологические процессы в образце каменной соли. На второй ступени при напряжении $\sigma = 10$ МПа реологические процессы также отсутствовали. На третьей, четвертой и пятой ступенях при напряжении $\sigma = 15$, 20, 25 МПа соответственно скорость деформирования уменьшалась, что характерно для процесса затухающей ползучести. На шестой ступени при напряжении $\sigma = 30$ МПа скорость деформирования стала практически постоянной, что характерно для установившейся ползучести. На седьмой ступени при напряжении $\sigma = 35$ МПа произошло резкое увеличение скорости деформирования, что через 5,5 ч привело к разрушению образца.

В табл. 3 приведены параметры упругости и вязкости, вычисленные по формуле (6), с использованием которой проводилась обработка экспериментальных данных для образца

Таблица 1

Номер ступени	σ, ΜΠα	E_1 , MПа	E_2 , MПа	E_3 , MПа	$\eta_1, M\Pi a \cdot ч$	$\eta_2, \mathrm{M\Pi a} \cdot \mathrm{v}$	$ au_2,$ ч	$ au_3,$ ч
$\begin{array}{c}1\\2\\3\\4\\5\end{array}$	0,5 1,0 1,5 2,0 2,5	$ 1610 \\ 4001 \\ 244 \\ 79 \\ 20 $	$1610 \\ 888 \\ 193 \\ 75 \\ 10.8$	$98,9 \cdot 10^{6} \\ 67,2 \cdot 10^{6} \\ 5,0 \cdot 10^{6} \\ 77 \\ 12.5$	$8 \cdot 10^{6}$ 5397 1432 588 227	$40100\\1641\\194\\33\\0.11$	$ \begin{array}{c} 4998 \\ 1,9 \\ 1,0 \\ 0,44 \\ 0,006 \end{array} $	16554 12,9 27,7 7,2 2.6

Зависимости коэффициентов регрессионной модели (6) от напряжений на различных ступенях нагружения для образца бишофита 10-6-2

Таблица 2

Зависимости коэффициентов регрессионной модели (6) от напряжений на различных ступенях нагружения для образца бишофита 11-8-3

Номер ступени	σ, ΜΠα	E_1 , MПа	E_2 , MПa	E_3 , МПа	$\eta_1, M\Pi a \cdot ч$	$\eta_2, M\Pi a \cdot ч$	$ au_1,$ ч	$ au_2,$ ч
1	0,5	1113	744	95	4547	15551	6,1	9409
2	$1,\!0$	538	229	38	2370	5656	10,3	4774
3	1,5	162	111	46	617	2289	$5,\!6$	5357
4	2,0	66	68	66	0,03	675	$0,\!00044$	2



Рис. 5. Кривые ползучести для образца каменной соли 36-9-2: точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации по формуле (6); $1-\sigma=5$ МПа, $2-\sigma=10$ МПа, $3-\sigma=15$ МПа, $4-\sigma=20$ МПа, $5-\sigma=25$ МПа, $6-\sigma=30$ МПа, $7-\sigma=35$ МПа



Рис. 6. Зависимость скорости ползучести образца каменной соли 36-9-2 от времени на различных ступенях:

1 — третья ступень ($\sigma = 15 \text{ MIIa}$), 2 — четвертая ступень ($\sigma = 20 \text{ MIIa}$), 3 — пятая ступень ($\sigma = 25 \text{ MIIa}$), 4 — шестая ступень ($\sigma = 30 \text{ MIIa}$), 5 — седьмая ступень ($\sigma = 35 \text{ MIIa}$)

Таблица З

Номер ступени	σ, ΜΠα	E_1 , MПа	E_2 , MПа	E_3 , МПа	$\eta_1, M\Pi a \cdot ч$	$\eta_2, M\Pi a \cdot ч$	$ au_{2}, ч$	$ au_3,$ ч
1	5	1978	1978	$1,\!38\cdot 10^6$	$362,0\cdot10^6$	8817	4,46	182765
2	10	2369	2141	$150,0 \cdot 10^{6}$	$10,3\cdot 10^6$	345	0,16	3839
3	15	2110	1960	$10,5\cdot 10^6$	174541	2178	1,11	102
4	20	1897	1689	$95,0\cdot 10^6$	131758	1200	0,71	95
5	25	1558	1369	$1130,0 \cdot 10^{6}$	61469	1459	1,07	63
6	30	1307	1030	$7180,0 \cdot 10^{6}$	25002	711	0,69	39
7	35	883	755	15496	9917	240	0,32	0

Зависимость коэффициентов регрессионной модели (6) от напряжения на различных ступенях для образца каменной соли 36-9-2

каменной соли 36-9-2. Так же как и для образцов бишофита, значения модулей упругости, вязкости и постоянной времени уменьшаются.

Значение коэффициента детерминации регрессионных зависимостей при аппроксимации кривых для образца 36-9-2 находится в диапазоне 0,919÷0,999, значение коэффициента вариации — в диапазоне 0,10÷0,71 %, что также свидетельствует об удовлетворительном соответствии результатов расчетов по модели (6) экспериментальным данным.

8. Сравнение результатов испытаний образцов бишофита и каменной соли. Результаты, полученные для образцов бишофита и каменной соли, нормировались их максимальными значениями. На рис. 7 приведена зависимость деформаций от времени для образцов бишофита и каменной соли. Видно, что для образца бишофита ползучесть проявляется на более низком уровне нагружения при значениях относительной деформации $\varepsilon/\varepsilon_{\rm max} > 0,0013$ и напряжения $\sigma > 0,19$, для образца каменной соли $\varepsilon/\varepsilon_{\rm max} > 0,11$, $\sigma > 0,43$. Это свидетельствует о том, что даже при незначительном механическом воздействии образцы бишофита проявляют реологические свойства.

9. Выводы. Результаты проведенных реологических испытаний образцов бишофита в режиме одноосного ступенчатого нагружения позволяют сделать следующие выводы.



Рис. 7. Зависимость деформации от времени для образцов бишофита 10-6-2 (1, 2, 6, 10, 12) и каменной соли 36-9-2 (3–5, 7–9, 11): 1 — $\sigma = 0,5$ МПа, 2 — $\sigma = 1,0$ МПа, 3 — $\sigma = 5$ МПа, 4 — $\sigma = 10$ МПа, 5 —

 $T = \sigma = 0.5$ MHa, $2 = \sigma = 1.0$ MHa, $3 = \sigma = 5$ MHa, $4 = \sigma = 10$ MHa, $5 = \sigma = 15$ MHa, $6 = \sigma = 1.5$ MHa, $7 = \sigma = 20$ MHa, $8 = \sigma = 25$ MHa, $9 = \sigma = 30$ MHa, $10 = \sigma = 2.0$ MHa, $11 = \sigma = 35$ MHa, $12 = \sigma = 2.5$ MHa

Результаты одноосных реологических испытаний образцов бишофита Волгоградского подземного хранилища газа и образцов каменной соли качественно согласуются. В то же время бишофит проявляет более выраженную текучесть, возникающую даже при небольших напряжениях. Получена математическая модель, включающая параметры упругости и вязкости и удовлетворительно описывающая кривые ползучести указанных геоматериалов.

С увеличением напряжения параметры упругости и вязкости уменьшаются. Это означает, что в процессе деформирования бишофит последовательно переходит от упругой стадии к стадиям затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести.

Ползучесть бишофита проявляется при напряжениях $\sigma > 0.5$ МПа, ползучесть каменной соли — при $\sigma > 5$ МПа, т. е. значения напряжения различаются на порядок. При оценке по напряжениям и деформациям, отнесенным к максимальным значениям, ползучесть бишофита проявляется при относительных деформациях более 0,0013 и напряжениях более 0,19, а в случае каменной соли эти значения составляют более 0,11 и 0,43 соответственно.

Полученные параметры ползучести могут быть использованы при оценке напряженнодеформированного состояния соляных массивов горных пород, содержащих пласты бишофита, что необходимо для проектирования подземных сооружений, в частности подземных хранилищ углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Носиков А. В., Коротков С. А., Трясин Е. Ю. и др. Исследование ползучести каменных солей и применение в инженерных расчетах конструкции скважин // Экспозиция Нефть Газ. 2018. № 7. С. 29–36.
- Ligen T., Weiyao Z., Huayin Z., et al. Monitoring well pattern deployment in China gas storage and its initial success rate // J. Energy Storage. 2020. V. 32. 101950. DOI: 10.1016/j.est.2020.101950.
- 3. Казарян В. А., Цыбульский П. Г. Технология строительства резервуаров Калининградского подземного хранилица газа // Горн. журн. 2010. № 3. С. 48–51.

- 4. Гончарова В. В., Еропткин Д. В., Чемезов И. И. и др. Новые технологии выбора места и оценки соляных структур для подземных хранилищ природного газа // Вестн. евразийской науки. 2020. Т. 12, № 4. С. 1–7.
- Ban F., Xiao L., Yuan G., Yang Ch. Rapid solution mining technology for underground gas storage in salt-caverns and case histories // Natur. Gas Industry. 2012. V. 32, N 9. P. 77–79. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.09.018.
- Osipov Y. V., Koshelev A. E., Voznesenskii A. S. Experimental studies of the bischofite deformation properties // Min Inform. Anal. Bull. 2020. V. 2020, N 10. P. 5–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-5-15.
- 7. Аннин Б. Д. Новый класс определяющих соотношений линейной анизотропной наследственной теории упругости // Композиты и наноструктуры. 2016. Т. 8, № 1. С. 1–6.
- 8. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Голиков Н. А. Оценка реологических свойств породколлекторов пластов баженовской свиты по данным термобарических испытаний // Физ.техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2017. № 3. С. 22–28.
- Zhang S., Zhu Y. Deformation mechanism of water-rich soft rock tunnel // Electron. J. Geotech. Engng. 2016. V. 21/22. P. 6951–6962.
- Abedi F., Moosavi M., Bahroudi A., Moazenian A. Effect of solid impurity on creep behavior of salt rocks of the Hormoz formation // Intern. J. Mining Geo-Engng. 2020. V. 54. P. 161–166.
- Wang J., Zhang Q., Song Z., Zhang Y. Creep properties and damage constitutive model of salt rock under uniaxial compression // Intern. J. Damage Mech. 2020. V. 29, N 6. P. 902–922.
- Olovyannyy A., Chantsev V. Numerical experiments concerning long-term deformation of rock samples // Mining Mineral Deposits. 2019. V. 13, N 4. P. 18–27.
- Карташов Ю. М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев и др. М.: Недра, 1979.
- 14. Lerche S. Kriech- und Schädigungsprozesse im Salinargebirge bei mono- und multizyklischer Belastung: Diss. ... Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften. Clausthal, 2012.
- Liu J., Pu S., Pu S., Rao J. Visco-elastoplastic constitutive fatigue model for rocks // Adv. Civil Engng. 2020. V. 2020. 4292043.
- Wu C., Liu J., Zhou Z., et al. Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test // Adv. Engng Sci. 2017. V. 49. P. 165–172.
- 17. **Проскуряков Н. М.** Реологические свойства соляных пород. Развитие калийной промышленности: Обзор. информ. / Н. М. Проскуряков, В. С. Ливенский, Ю. М. Карташов. М.: Науч.-исслед. ин-т техн.-экон. исслед. в хим. комплексе, 1974.
- Ставрогин А. Н. Экспериментальная физика и механика горных пород / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов. СПб.: Наука, 2001.
- 19. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. М.: Углетехиздат, 1947.
- 20. **Тавостин М. Н.** Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли // Горн. информ.-аналит. бюл. 2000. № 8. С. 125–128.
- 21. **Ильинов М. Д., Карташов Ю. М.** Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Зап. Горн. ин-та. 2011. Т. 190. С. 207–209.
- 22. А. с. 1244546 СССР, МПК G 01 N 3/08. Способ испытания на прочность соляных пород в лабораторных условиях / Ю. М. Карташов, Е. С. Оксенкруг. Опубл. 15.07.1986, Бюл. № 26.

Поступила в редакцию 5/IV 2021 г., после доработки — 21/IV 2021 г. Принята к публикации 26/IV 2021 г.