2022

УДК 620.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИШОФИТА ПО ДАННЫМ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Ю. В. Осипов^{1,2}, А. С. Вознесенский¹

¹Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", E-mail: yuhanna@list.ru, Ленинский проспект, 4, 119991, г. Москва, Россия ²000 "Газпром геотехнологии", E-mail: aL48@mail.ru, Варшавское шоссе, 33, стр. 5, 117105, г. Москва, Россия

Проведены реологические испытания образцов бишофитовой породы из скважины Волгоградского подземного хранилища газа. Построены зависимости деформаций от времени при разных осевых и боковых напряжениях. Предложена вязкоупругая феноменологическая модель и получено уравнение, описывающее эти зависимости. Разработана и алгоритмически реализована процедура интерпретации экспериментальных данных, позволяющая определить реологические характеристики исследуемых пород для различных соотношений главных напряжений. Выявлена слабая зависимость реологических свойств бишофитовой породы от глубины.

Бишофитовая порода, реологические свойства, сложное напряженное состояние, вязкоупругая модель, лабораторные испытания

DOI: 10.15372/FTPRPI20220602

Поведение горных пород существенно зависит от максимального приложенного напряжения, амплитуды, частоты нагрузки и ее формы [1–9]. Проявление такого процесса, как ползучесть горных пород при проектировании и строительстве подземных хранилищ газа в отложениях каменной соли, а также при строительстве скважин [10], может стать причиной появления серьезных проблем. В [11] проанализированы случаи со сминанием обсадных колонн на двух площадях месторождения в Восточной Сибири. Результаты исследования реологических свойств каменных солей позволили рассчитать долговечность крепи скважины сроком службы на 30 лет.

Определение реологических свойств галогенных пород в лабораторных условиях — весьма трудоемкая задача ввиду их неоднородности, сложности изготовления образцов и проведения самих испытаний, длящихся не менее 300 ч. В [12] исследованы механические свойства каменной соли при трехосной циклической нагрузке. В [13] при разных напряженных состояниях изучен предел прочности на сжатие образцов соляных пород Верхнекамского калийного ме-

№ 6

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00341).

сторождения и установлено, что при длительном и быстром режимах приложения нагрузки в простом и сложном напряженном состояниях процессы накопления повреждений в соляной породе качественно аналогичны. В [14] объединены элементы сопротивления материалов, теории упругости, теории пластичности, теории ползучести, вязкоупругости и механики разрушения. В [15–17] исследованы реологические свойств горных пород с использованием вязкоупругой модели для разных условий и объектов. В [18] изучены мерзлые грунты, кривые ползучести которых схожи с кривыми ползучести каменной соли.

Опыты на ползучесть — эталонные методы реологических испытаний, объективно отражающие влияние временного фактора. Важный момент в экспериментах на ползучесть — планирование режимов испытаний, что предусматривает задание напряжений и длительностей их приложения. Полученные реологические кривые и параметры модели должны давать возможность точного прогноза поведения горной породы в течение всего срока службы подземного объекта. В [19] рассмотрены свойства бишофитсодержащей породы при одноосном ступенчатом нагружении.

Одна из главных и наиболее трудоемких задач на этапах проектирования, проведения испытаний и эксплуатации подземных хранилищ газа в галогенных толщах — учет реологических свойств горных пород, приводящих к конвергенции стенок горной выработки и уменьшению ее размеров. Если реологические свойства каменной соли в настоящее время достаточно хорошо изучены, то данные о реологических свойствах бишофитсодержащей породы, встречающегося в залежах каменной соли в виде пластов и прослоев, практически отсутствуют. Бишофит — сверхгигроскопичный минерал, при малейшем контакте с окружающей средой впитывает влагу и переходит в текучее состояние. При минимальном механическом воздействии проявляются аномально высокие пластические и реологические свойства.

Цель настоящей работы — получение реологических кривых образцов бишофитовой породы в сложном напряженном состоянии и определение параметров уравнений состояния, описывающих процессы деформирования при различном соотношении главных напряжений.

ОБРАЗЦЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Образцы бишофитовой породы отбирались из скважины 8т Волгоградского подземного хранилища газа. Изготовлено 19 образцов высотой 70−80 мм, диаметром 35−40 мм, соотношением высоты к диаметру 2:1. Средняя плотность породы составила 1590 кг/м³. Химический анализ образцов показал содержание в них солей MgCl₂·6H₂O от 65 до 68 %, NaCl от 32 до 35 %, а химический состав — полную идентичность, что дало основание для их испытаний в одной группе. Перед началом эксперимента образец бишофита упаковывался в непроницаемую оболочку, с помощью которой исключался контакт с внешней средой в установке всестороннего сжатия.

Для сравнения проведены аналогичные исследования на образцах каменной соли из той же скважины 8т. Химический анализ образцов каменной соли показал содержание NaCl более 90%, химический состав — полную идентичность, что также дало основание для их испытаний в одной группе.

Реологические свойства в условиях трехосного напряженного состояния исследовались на установках всестороннего сжатия БУ-61. Каждая установка позволяла создавать независимые друг от друга нагрузки в классе напряженного состояния, соответствующего обобщенному сжатию ($\sigma_1 \ge \sigma_2 = \sigma_3$). Конструкция установки приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема камеры всестороннего сжатия БУ-61: 1, 2 — нижний и верхний шток; 3 — корпус; 4 — образец; 5 — полусфера; 6 — индикаторы часового типа; 7 — поршень гидродомкрата; 8 цилиндр гидродомкрата; 9 — крышка; 10 — электроввод; 11 — кольцевой датчик измерения поперечных деформаций

Гидравлическая установка всестороннего сжатия БУ-61 для испытания горных пород на ползучесть представляет собой комплекс из шести унифицированных камер трехосного сжатия, причем каждая камера работает автономно и имеет свой гидрораспределительный стенд, снабженный двумя ресиверами, поддерживающими постоянные осевые и боковые нагрузки при длительных испытаниях. Нагрузки и деформации на образце измерялись автоматически с интервалом 1 с. Полная картина деформирования и нагружения образца в камере в реальном времени выводилась на монитор оператора. Частота обновления значений на мониторе составляла 1 Гц.

Отличие опытов на ползучесть в сложном напряженном состоянии от опытов на ползучесть в режиме одноосного нагружения состоит в том, что на образец внутри рабочей камеры действует боковое давление с помощью рабочей жидкости (масла). Во избежание проникновения масла в микротрещины все образцы помещались в изолирующую манжету.

При планировании экспериментов учитывалось, что при длительном воздействии постоянной нагрузки различают затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести. Интерес представляло проявление затухающей ползучести, для которой разность главных напряжений, не превысившая границу ее проявления, практически никогда не разрушает породу и характеризует предел длительной прочности σ^{∞} , используемый для расчета характеристик безопасного строительства и эксплуатации подземных объектов. Из-за отсутствия регламентирующих документов федерального значения по определению реологических свойств горных пород эксперименты включали пробные испытания, цель которых — установить разности главных напряжений и последовательность их изменения для получения наиболее полной картины деформирования образцов при ползучести.

Максимальное главное напряжение σ_1 задавалось в зависимости от условия залегания проектируемой выработки, исходя из суммы главных напряжений, соответствующей глубине заложения кровли выработки:

$$\sigma = 2\gamma H = \sigma_1 + 2\sigma_3,$$

где σ — сумма главных напряжений, МПа; γ — объемный вес вышележащих пород, Н/м³; σ_1 , σ_3 — максимальное и минимальное главные напряжения, МПа; H — глубина заложения кровли проектируемой выработки, м.

При длительном деформировании образцов бишофита в опытах на ползучесть площадь образца менялась в течение эксперимента, осевое напряжение являлось функцией поперечных деформаций образца. Это учитывалось при последующих расчетах. Фактическая нагрузка пересчитывалась в осевое напряжение:

$$\sigma_1 = \frac{D_1 g}{S_0 (1 + \varepsilon_3)^2},$$

здесь D_1 — нагрузка, заданная в начале эксперимента при ползучести, кг; S_0 — площадь поперечного сечения образца, мм; g — ускорение свободного падения, м/с²; $(1 + \varepsilon_3)^2$ — множитель, учитывающий изменение поперечного сечения образца.

Так как деформационные процессы в бишофите протекают быстрее, чем в каменной соли [20], в методику испытаний внесены соответствующие коррективы. Сочетание напряжений, аналогичных напряжениям для образцов каменной соли, приводило к их быстрому разрушению из-за перехода в прогрессирующую ползучесть. В связи с этим разности главных напряжений приняты равными 2, 5, 8, 11, 14 и 17 МПа при неизменной сумме главных напряжений. Первая разность 2 МПа выбрана из тех соображений, чтобы не было быстрого перехода в прогрессирующую ползучесть. Кроме того, ввиду ограниченного количества образцов бишофита принято решение проводить трехосные испытания, изменяя разность главных напряжений в серии от меньшего значения к большему. Такой режим позволил получить более полную картину поведения образцов бишофита в каждом интервале напряжений. Отметим, что все испытания проводились при комнатной температуре и влажности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные по испытаниям образцов бишофита и каменной соли в виде файлов выложены на сайте [21]. В табл. 1 представлены обобщенные данные режимов проведения экспериментов при сумме главных напряжений 59 МПа и указаны продолжительности экспериментов. Сумма главных напряжений соответствовала глубине 1332 м, на которой залегал данный керновый материал.

Номер образца	Продолжительность эксперимента, ч	$\sigma_{_{\rm I}},$ МПа	$\sigma_{\scriptscriptstyle 3}$, МПа	Разность главных напряжений $\Delta \sigma$, МПа
8-1-3	40.0	27	16	11
8-5-1	85.0	27	16	11
8-1-2	3.3	29	15	14
8-3-2	3.3	29	15	14
8-4-2	2.0	31	14	17
8-5-2	2.0	31	14	17
7-18-2	90.0	21	19	2
7-18-2	300.0	23	18	5
7-18-4	91.5	21	19	2
7-18-4	301.0	23	18	5
7-17-2	305.0	23	18	5
7-17-3	305.0	23	18	5
7-18-3	68.5	25	17	8
7-17-4	208.0	25	17	8

ТАБЛИЦА 1. Главные напряжения и длительность эксперимента при $\sigma_1 + \sigma_3 = 59~{
m MIa}$

На рис. 2 по результатам обработки экспериментальных данных приведены зависимости $\varepsilon_1 = f(\Delta \sigma, t)$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = f(\Delta \sigma, t)$.



Рис. 2. Зависимость продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени для образцов бишофита № 7-18-2, 7-18-4 при $\Delta \sigma = 2$ МПа (*a*), № 7-18-2, 7-18-4, 7-17-2, 7-17-3 при $\Delta \sigma = 5$ МПа (*б*); № 7-18-3, 7-17-4 при $\Delta \sigma = 8$ МПа и № 8-1-3 и 8-5-1 при $\Delta \sigma = 11$ МПа (*в*); № 8-1-2, 8-3-2 при $\Delta \sigma = 14$ МПа и № 8-4-2, 8-5-2 при $\Delta \sigma = 17$ МПа (*г*)

Для более полного понимания влияния суммы главных напряжений на ползучесть бишофита дополнительно выполнены четыре эксперимента с суммой главных напряжений 45 МПа, которая соответствовала глубине 1023 м. В табл. 2 представлены обобщенные данные режимов проведения экспериментов, а также их продолжительность.

Номер образца	Продолжительность эксперимента, ч	$\sigma_{\!_1},$ МПа	$\sigma_{\scriptscriptstyle 3}$, МПа	Разность главных напряжений $\Delta \sigma$, МПа	
11-4-2	40.3	22.4	11.3	11	
11-2-5	19.2	22.4	11.3	11	
11-2-3	19.8	24.4	10.3	14	
10-7-4	3.4	26.4	9.3	17	

ТАБЛИЦА 2. Главные напряжения и длительность эксперимента при $\sigma_1 + \sigma_3 = 45~{
m M\Pi a}$

На рис. 3 в качестве примера показан результат испытания образов бишофита № 10-7-4 при сумме главных напряжений 45 МПа и образца № 8-4-2 при сумме 59 МПа.



Рис. 3. Зависимость продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени образцов бишофита № 10-7-4 ($\sigma = 45$ МПа) и № 8-4-2 ($\sigma = 59$ МПа) при $\Delta \sigma = 17$ МПа

В диапазоне разностей главных напряжений 11 - 17 МПа скорость деформирования образцов бишофита слишком большая, что привело в течение нескольких часов к их переходу в прогрессирующую ползучесть. В отличие от бишофита, для соляных горных пород в объемном напряженном состоянии переход на конечную стадию прогрессирующей ползучести никогда не происходит. При разности главных напряжений 2 МПа какие-либо проявления реологических процессов для бишофита и каменной соли отсутствовали, и такие испытания не проводились. Испытания образцов бишофита осуществлялись при разностях главных напряжений в диапазоне 5 – 17 МПа (рис. 2). При разности 5 МПа бишофит проявил ярко выраженные реологические свойства. Установлено, что с увеличением разности главных напряжений уменьшается время, необходимое образцу для перехода в прогрессирующую ползучесть.

Построение феноменологических моделей ползучести и определение их параметров. Для описания свойств бишофита использовались феноменологические реологические модели процессов ползучести, представляющие собой различные комбинации упругих и вязких элементов. Модель ползучести образцов представляет собой сумму слагаемых, описывающих упругое деформирование, а также затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести:

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

где $\Delta \sigma$ — разность главных напряжений; E_1 — модуль упругости образца бишофита; η_2 — вязкость, характеризующая затухающую ползучесть; E_2 — модуль упругости, характеризующий соотношение упругой деформации и деформации затухающей ползучести образца бишофита; η_1 — вязкость, характеризующая установившуюся ползучесть; E_3 — коэффициент, аналогичный модулю упругости и отражающий влияние прогрессирующей ползучести; τ_3 — параметр возрастания деформаций прогрессирующей ползучести.

Модуль упругости E_2 совместно с E_1 характеризует соотношение упругой деформации и деформации затухающей ползучести образца бишофита, а совместно с η_2 — затухающую ползучесть, отношение $\eta_2 / E_2 = \tau_2$ — время изменения деформации затухающей ползучести в *e* раз.

В табл. 3 приведены параметры модели (1), с помощью которой обрабатывались экспериментальные данные, и представлены средние значения по всем испытанным образцам бишофита из табл. 1 в зависимости от разности главных напряжений.

Δσ, МПа	Модуль упругости, МПа			Вязкость, МПа·ч		Постоянная времени, ч	
	E_1	E_2	E_3	$\eta_{\scriptscriptstyle 1}$	η_2	$ au_2$	$ au_3$
5	795.8	428.9	1369.1	9736.0	1563.7	753.8	2791.00
8	666.0	352.1	1179.0	3362.0	1089.1	2.9	535.60
11	529.0	228.8	1029.7	2068.5	753.9	3.9	11.20
14	510.8	224.0	656.5	1018.0	209.5	1.4	0.71
17	504.6	201.3	583.6	489.8	67.5	0.4	0.69

ТАБЛИЦА 3. Зависимость коэффициентов регрессионной модели (1) от разности главных напряжений $\Delta \sigma$ образцов бишофита

По всем испытанным образцам бишофита модули упругости, вязкость и постоянная времени уменьшались с увеличением разности главных напряжений (табл. 3). Высокое значение какого-то параметра говорит о том, что на данной ступени отсутствует или крайне незначительно проявляет себя ползучесть образца. Такие значения носят формальный характер и показывают, что ползучесть проявится через очень большое время.

Полученные кривые по каждому образцу аппроксимировались в соответствии с (1). Коэффициент детерминации R^2 был не менее 0.999, коэффициент вариации не превышал 1.9%, т. е. уравнение (1) удовлетворительно описывает кривые ползучести бишофита.

Для сравнения полученных результатов образцов бишофита проведены реологические испытания в сложном напряженном состоянии образцов каменной соли и аппроксимация их экспериментальных данных по формуле (1). В табл. 4 представлены параметры модели (1), с помощью которой обрабатывались экспериментальные данные, а именно средние значения по всем образцам каменной соли в зависимости от разности главных напряжений.

$\Delta \sigma$, ΜΠα	Модуль упругости, МПа			Вязкость,	МПа∙ч	Постоянная времени, ч	
	E_1	E_2	E_3	$\eta_{\scriptscriptstyle 1}$	η_2	$ au_2$	$ au_3$
5	425.3	362.4	254.7	10312.2	927.8	24.2	24839.2
8	397.4	285.4	129.3	5534.8	245.1	13.9	10527.4
11	370.0	181.2	47.6	1736.2	34.7	4.7	1033.6
14	356.2	159.6	38.1	867.4	25.9	2.4	867.5
17	332.4	137.3	26.9	591.7	18.5	1.8	672.4

ТАБЛИЦА 4. Зависимость коэффициентов регрессионной модели (1) от разности главных напряжений $\Delta \sigma$ образцов каменной соли

Как и в случае с образцами бишофита, модули упругости, вязкость и постоянная времени уменьшаются с проявлением той или иной стадии ползучести (табл. 4). В отличие от бишофита, образцы каменной соли не перешли на заключительную стадию — прогрессирующую ползучесть. Большие значения какого-то параметра также свидетельствуют о том, что на данной ступени ползучесть образца отсутствует либо проявляет себя крайне незначительно. По всем испытанным образцам прослеживается общая тенденция: с увеличением разности главных напряжений на ступени значения модулей упругости, вязкости и постоянной времени уменьшались. Коэффициент детерминации регрессионных зависимостей при аппроксимации кривых образцов каменной соли составил 0.998–0.999, коэффициент вариации — 0.5–1.3%, что говорит об удовлетворительном соответствии модели (1) экспериментальным данным.

Интерполяция реологических кривых ползучести бишофита для произвольных разностей главных напряжений. Представленные реологические кривые получены для нескольких разностей главных напряжений. На практике возникает необходимость получения аналогичных кривых при произвольных разностях главных напряжений, находящихся в диапазоне между их минимальными и максимальными значениями. Непосредственная интерполяция по формуле (1) с помощью алгоритмов Левенберга – Марквардта, Ньютона и др., осуществляющих подбор по методу наименьших квадратов, не дает желаемого результата из-за большого количества искомых коэффициентов. Разработаны алгоритм и программа для ЭВМ получения искомых кривых для любой заданной разности главных напряжений, базирующейся на прибавлении к значениям нижней кривой добавки, пропорциональной превышению заданной разности главных напряжений над ближайшим меньшим значением, рассчитанным экспериментально [22].

Алгоритм включает четыре блока:

1. Задание разности главных напряжений Δσ_g, для которой нужно вычислить параметры интерполяционной кривой.

2. Исходные данные для расчета: $\varepsilon_i(t_j)$, $\varepsilon_{i+1}(t_j)$ — кривые деформирования при разностях напряжений $\Delta \sigma_i$ и $\Delta \sigma_{i+1}$ соответственно; $\Delta \sigma_i$, $\Delta \sigma_{i+1}$ — разности напряжений, при которых сняты кривые $\varepsilon_i(t_j)$ и $\varepsilon_{i+1}(t_j)$, при этом $\Delta \sigma_i \leq \Delta \sigma_g < \Delta \sigma_{i+1}$; $\Delta \sigma_g(t_j)$, $\varepsilon_g(t_j)$ — разность главных напряжений и деформация для момента времени t_j , при котором рассчитывается очередная точка интерполяционной кривой. 3. Расчет отсчетов по времени интерполяционной кривой (рис. 4):

$$\varepsilon_{g}(t_{j}) = \varepsilon_{i}(t_{j}) + [\varepsilon_{i+1}(t_{j}) - \varepsilon_{i}(t_{j})] \left(\frac{\Delta \sigma_{g} - \Delta \sigma_{i}}{\Delta \sigma_{i+1} - \Delta \sigma_{i}}\right)$$
(2)

(для сокращения записи переменная *j* в скобках далее опускается);



Рис. 4. Расчет отсчетов по времени: 1, 2 — максимальная и минимальная экспериментальные кривые; 3 — интерполяционная

4. Расчет коэффициентов интерполяционной кривой в соответствии с (1):

— расчет коэффициентов по формуле (2), получаемой из (1), при ограничении первыми двумя слагаемыми:

$$\varepsilon(\Delta\sigma,t) = \frac{\Delta\sigma}{E_1} + \left(\frac{\Delta\sigma}{E_2} - \frac{\Delta\sigma}{E_1}\right) (1 - e^{-E_2 t/\eta_2}); \qquad (3)$$

— расчет коэффициентов по формуле (3), полученной из (1), при ограничении первыми тремя слагаемыми:

$$\varepsilon(\Delta\sigma,t) = \frac{\Delta\sigma}{E_1} + \left(\frac{\Delta\sigma}{E_2} - \frac{\Delta\sigma}{E_1}\right) (1 - e^{-E_2 t/\eta_2}) + \frac{\Delta\sigma}{\eta_1} t ; \qquad (4)$$

— расчет коэффициентов по формуле (1) без ограничений количества слагаемых (рис. 5). Как показали результаты интерполяции, полученные коэффициенты недостаточно хорошо аппроксимируют найденную кривую, рассчитанную по формуле (2). Введена дополнительная ступень для дополнительной аппроксимации при использовании полученных коэффициентов в качестве приближенных значений для подбора коэффициентов по алгоритму Левенберга – Марквардта;





— подбор коэффициентов интерполяционной кривой на заключительном этапе. На рис. 6 показана интерполяционная кривая, а также исходные кривые, по которым проводилась интерполяция. Соответствующие коэффициенты следующие: $E_1 = 3365$ МПа; $E_2 = 493.5$ МПа; $E_3 = 35150$ МПа; $\eta_1 = 300$ МПа·ч; $\eta_2 = 10.8$ МПа·ч; $\tau_3 = 0.47$ ч;



Рис. 6. Подбор интерполяционной кривой на заключительном этапе: *1* — интерполяционная кривая; *2*, *3* — максимальная и минимальная кривые

— оценка погрешностей. Рассчитываются максимальные разности между интерполяционными кривыми и кривыми, построенными по полученным коэффициентам с шагом изменения разности главных напряжений $\Delta \sigma_g = 0.1$ МПа в диапазоне от минимального до максимального экспериментальных значений. Погрешность, приведенная к максимальному значению времени, не превышала 1 %.

Чтобы показать, как деформировались образцы бишофита и каменной соли под нагрузкой, полученные результаты нормировались к их максимальным значениям. На рис. 7 приведены нормированные зависимости деформаций от времени для образца бишофита и каменной соли при одинаковой разности главных напряжений (11 МПа). Ползучесть у бишофита начала проявляться на более низком уровне нагрузок при относительной деформации выше 0.034, у каменной соли — выше 0.056, т. е. даже при незначительном механическом воздействии образцы бишофита проявляют ярко выраженные реологические свойства.



Рис. 7. Нормированные кривые ступенчатого нагружения образца бишофита № 8-5-1 (*1*) и каменной соли № 92-4 (*2*) при $\Delta \sigma = 11$ МПа

выводы

Результаты испытаний образцов бишофита Волгоградского подземного хранилища газа под нагрузкой в сложном напряженном состоянии в сравнении с образцами каменной соли показали, что осевое давление постоянно уменьшается из-за увеличения площади поперечного сечения образца. В отличие от образцов каменной соли, скорости деформирования которых при этом уменьшаются, на скоростях деформирования бишофита такое снижение практически не сказывается и деформационные кривые в зависимости от времени на значительной части остаются линейными.

Ползучесть у образцов бишофита при разности главных напряжений 2 МПа не проявляется, поэтому проведение таких исследований не требуется. При разности главных напряжений 5 МПа обнаружились ярко выраженные реологические свойства. На протяжении всего времени экспериментов отчетливо проявлялась установившаяся ползучесть, но в то же время наблюдался рост продольных и поперечных деформаций со временем. При разности главных напряжений 8, 11, 14 и 17 МПа образцы перешли на стадию прогрессирующей ползучести.

Предложена феноменологическая модель, включающая в себя параметры упругости, вязкости и удовлетворительно описывающая кривые ползучести образцов бишофита. С увеличением разности главных напряжений параметры упругости и вязкости уменьшаются, что отражает последовательный переход бишофита от упругой стадии к затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести. Разработана компьютерная программа расчета реологических характеристик для произвольных разностей главных напряжений, находящихся между минимальными и максимальными значениями, заданными в эксперименте.

Полученные параметры ползучести могут применяться при оценке напряженно-деформированного состояния соляных массивов горных пород, содержащих пласты и прослои бишофита, что важно при проектировании в них подземных сооружений, в частности подземных хранилищ углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Tao Z. Y. and Mo H. H. An experimental study and analysis of the behavior of rock under cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990, Vol. 27, No. 1. — P. 51–56.
- Singh T. N., Ray S. K., and Singh D. P. Effect of uniaxial cyclic compression on the mechanical behavior of rocks, Indian J. Eng. Mater. Sci., 1994, Vol. 1, No. 2. — P. 118–120.
- Li N., Chen W., and Zhang P. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2001, Vol. 38, No. 7. — P. 1071-1079.
- Bagde M. N. and Petroš V. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 46, No. 1. — P. 200–209.
- Xiao J. Q., Ding D. X., Jiang F. L., and Xu G. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2010, Vol. 47. — P. 461–468.
- 6. Bagde M. N. and Petroš V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2005, Vol. 4, No. 2. P. 237–50.
- Liu E. L., Huang R. Q., and He S. M. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions, Int. J. Rock Mech. Rock Eng., 2012, Vol. 45. — P. 89–102.

- Bagde M. N. and Petroš V. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading, Int. J. Rock Mech. Rock Eng., 2005, Vol. 38. — P. 169–196.
- Xiao J. Q., Ding D. X., and Xu G. Waveform effect on quasi-dynamic loading condition and the mechanical properties of brittle materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2008, Vol. 45, No. 4. — P. 621–626.
- Firme Pedro A. L. P., Roehl D., and Romanel C. An assessment of the creep behaviour of Brazilian salt rocks using the multi-mechanism deformation model, Acta Geotechnica, 2016, Issue 6. — P. 1445–1463.
- 11. Носиков А. В., Коротков С. А., Трясин Е. Ю., Торопецкий К. В., Михайлов Б. О., Борисов Г. А. Исследование ползучести каменных солей и применение в инженерных расчетах конструкции скважин // Экспозиция. Нефть. Газ. 2018. № 7 (67). С. 29–36.
- Ma L., Liu X., Wang M., Xu H., Hua R., Fan P., Jiang S., Wang G., and Yi Q. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 62. P. 34–41.
- **13. Титов Б. В.** Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии. — Березники, 1983. — 248 с.
- 14. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
- **15.** Nazarova L. A., Nazarov L. A., and Golikov N. A. Assessment of rheological properties of bazhenov formation by thermobaric test data, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, No. 3. P. 434–440.
- Nazarova L. A. and Nazarov L. A. Estimation of pillar stability based on viscoelastic model of rock mass, J. Min. Sci., 2005, Vol. 41, No. 5. — P. 399–406.
- 17. Nazarov L. A., Nazarova L. A., Freidin A. M., and Alimseitova Zh. K. Estimating the long-term pillar safety for room-and-pillar ore mining, J. Min. Sci., 2006, Vol. 42, No. 6. P. 530–539.
- **18.** Ageenko V. A., Tavostin M. N., and Vakulenko I. S. Triaxial compression testing of frozen soils for the determination of rheological parameters, J. Min. Sci. Technol., 2017, No. 3. P. 18–22.
- **19.** Osipov Yu. V. and Voznesenskii A. S. Investigation of the rheological properties of rocks in experiments on stepwise loading of cylindrical samples, J. Appl. Mech. Tech. Phys., 2022, Vol. 63, No. 2. P. 347–355.
- Osipov Y. V., Koshelev A. E., and Voznesenskii A. S. Experimental studies of the bischofite deformation properties, Min Informat. Anal. Bull., 2020, No. 10. — P. 5–15.
- **21. Osipov Yu. V.** Experimental creep curves of bischofite rock in a complex stressed state, Mendeley Data, V1, DOI:10.17632/kvst6h4zv8.1. https://data.mendeley.com/datasets/kvst6h4zv8/1.
- 22. Осипов Ю. В., Вознесенский А. С. Программа для расчета и построения кривых ползучести горных пород при заданном напряжении В-Сгеер, версия 1.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667656, заявка № 2022666434, 06.09.2022. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23.09.2022.

Поступила в редакцию 05/X 2022 После доработки 01/XI 2022 Принята к публикации 24/XI 2022