ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(4):113-123
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.03 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_113

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КАМЕННОЙ СОЛИ В РЕЖИМЕ СТУПЕНЧАТОГО НАГРУЖЕНИЯ

В.А. Агеенко

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru

Аннотация: Обеспечение устойчивости подземных хранилищ газа (ПХГ) выполняется за счет соответствующих проектных решений, обоснование которых предполагает наличие надежной информации о физико-механических свойствах соляных пород вмещающего ПХГ массива. Каменная соль обладает ярко выраженными реологическими свойствами. В связи с этим их определение следует рассматривать как одну из приоритетных задач геоконтроля при строительстве и эксплуатации ПХГ. В настоящее время известно большое количество экспериментальных исследований ползучести горных пород, в том числе и в условиях трехосного нагружения. Разработаны различные математические модели, прогнозирующие поведение материала на длительный срок деформирования. Нормативными материалами расчетный срок эксплуатации для горнодобывающих предприятий или строительных объектов определяется 50 годами, однако большинство экспериментов по определению параметров ползучести имеет продолжительность не более 500 ч. Цель данной работы — выявить закономерность поведения каменной соли в ходе испытаний по определению реологических характеристик прямым методом и ступенчатым методом в режиме одноосного и трехосного нагружения с изменяющимися значениями величины и продолжительности ступени на схожих по структуре образцах каменной соли. На основе полученных результатов расчета реологических характеристик традиционным и ступенчатым методами определить оптимальные методические подходы оценки реологических свойств соляных горных пород в режимах одноосного и трехосного нагружения. Результаты проведенных экспериментов позволили определить необходимые параметры проведения экспериментов в режиме ступенчатого нагружения, при которых реологические характеристики согласуются с данными, полученными в результате экспериментов, проведенных прямым методом.

Ключевые слова: испытание каменной соли, режим ступенчатого нагружения, время проведения эксперимента, деформации, напряжения, реологические характеристики, прогноз процесса ползучести.

Для цитирования: *Агеенко В.А.* Обоснование параметров реологических испытаний каменной соли в режиме ступенчатого нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 113–123. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_113.

Justification of rheological test measurement parameters in incremental loading mode for rock salt

V.A. Ageenko

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: Valera.ageenko@mail.ru

© В.А. Агеенко. 2021.

Abstract: Stability of underground gas storages depends on proper design choices. Justification of the design choices requires reliable data on physical and mechanical properties of salt rock mass enclosing underground gas storages. Rock salt possesses pronounced rheological properties. In this connection, determination of rheological properties should be assumed as one of the top-priority tasks of geocontrol in construction and operation of underground gas storages. Very many experimental studies into rock creepage are known to date, including triaxial loading. Various mathematical models are available to predict behavior of materials under long-term deformation. Regulatory documents set the estimated period of operation for mining or construction facilities as 50 years, while the most creep tests last for not longer than 500 hours. The aim of this study is to reveal the behavioral patterns of rock salt in rheological tests of direct and incremental uniaxial and triaxial loading, with varying values and durations of load increments in rock salt samples of similar structure. The calculated rheological characteristics in the direct and incremental loading methods can be used to define the optimal approaches to estimation of rheological properties of salt rocks under uniaxial and triaxial loading. The experimental results made it possible to find the required incremental loading test parameters such that the rheological characteristics agree with the data of the direct loading tests.

Key words: rock salt test, incremental loading mode, experimentation duration, strains, stresses, rheological characteristics, creeping process prediction.

For citation: Ageenko V.A. Justification of rheological test measurement parameters in incremental loading mode for rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4):113-123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_113.

Введение

В данной работе представлены результаты экспериментов по определению реологических характеристик прямым методом и методом ступенчатого нагружения [1–4]. Прямым методом испытываются образцы под постоянным напряжением во времени с записью времени до разрушения. Данный метод описан в работах [5–8]. Зависимость между временем и действующим постоянным напряжением в образце характеризует процесс снижения прочности породы во времени и называется функцией долговечности, а график этой функции — кривой длительной прочности [9–12]. Одним из основных преимуществ прямого метода по определению предела длительной прочности перед косвенными методами является достоверность определяемых величин. Главным недостатком данного метода является необходимость применения сложного оборудования, трудоемкость и, что очень важно, продолжительность проведения эксперимента. Эксперимент прямым методом может проходить от нескольких дней до нескольких месяцев. В течение всего времени проведения эксперимента необходимо поддерживать постоянную нагрузку, температуру, влажность и др. Даже в одноосном напряженном состоянии эксперимент трудоемок, а в режиме трехосного нагружения трудоемкость возрастает многократно [13].

Метод ступенчатого нагружения впервые предложил Г.Н. Кузнецов [14]. Сущность метода заключается в выдерживании нагрузки на каждой ступени до затухания деформаций или достижения ими минимальной постоянной скорости деформирования. Изучение данного метода отражено в работах [15–16]. Стоит отметить, что в зависимости от выбора

параметров проведения экспериментов в режиме ступенчатого нагружения получаемые данные могут сильно разниться с данными, полученными в экспериментах, проведенных прямым методом. В связи с этим целью этой работы было обоснование параметров и режимов ступенчатого нагружения, при которых результаты будут согласовываться с результатами, полученными при испытаниях прямым методом. Это позволит уменьшить время проведения эксперимента без потери качества получаемых данных. Далее в работе приведены исследования на основе проведенных экспериментов.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на образцах каменной соли Волгоградского месторождения. Образцы изготавливались из малозагрязненной каменной схожей по структуре и текстуре. Размеры образцов составляли: высота 80 мм, диаметром 40 мм. Перед началом исследований проводилось цензурирование ультразвуковым время-импульсным методом, что гарантировало однородность выбранных образцов (скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в них различались не более чем на 3%). Перед началом проведения испытаний были определены прочностные и деформационные характеристики каменной соли в условиях одноосного нагружения. Эксперименты при одних и тех же условиях повторялись 5 раз. В результате исследований было испытано 90 образцов, из них 55 в режиме ступенчатого нагружения и 35 прямым методом [17]. Результаты принимались за истинные только в том случае, если они практически совпадали.

Эксперименты в режиме ступенчатого одноосного нагружения производились следующим образом. К образцу прикладывалась и сохранялась постоянной на протяжении времени *t* одна и та же нагрузка σ_1 = 3 МПа, затем нагрузка увеличивалась на 3 МПа и снова сохранялась постоянной на протяжении времени *t*. Таким образом, процедура повторялась до разрушения образца каменной соли. Согласно выбранному режиму испытаний, на следующем образце величины нагрузок оставались во всех экспериментах одинаковые, однако величина времени ступени *t* изменялась и была выбрана автором с учетом максимально возможного количества экспериментов и времени. Все эксперименты проводились в аккредитованном испытательном лабораторном центре на базе ООО «Газпром геотехнологии» на установках «Геотек».

Результаты исследования

Таким образом, была проведена серия экспериментов при постоянном одинаковом шаге σ_n увеличения действующего напряжения, но разном времени ступени *t*, что отражено в табл. 1.

Данные, полученные в ходе экспериментов, обрабатывались, затем производилось количественное и качественное сравнение полученных скоростей деформирования. Скорость деформирования рассчитывалась по формуле:

$$v_n = \frac{e_n - e_{n-1}}{t} \text{ дол.ед./с} \qquad (1)$$

где $e_n - e_{n-1}$ — значения деформаций, накопленные за время *t*, дол.ед.; *t* — время, соответствующее интервалу записи данных в ходе эксперимента.

На рис. 1 представлен график скорости деформирования v_n для эксперимента с постоянным действующим напряжением σ_1 на ступени втечении 48 ч. Кроме того, дополнительным критерием перехода на следующую ступень было достижение скорости продольного деформирования значения $1{,}0 \cdot 10^{-11}$ дол. ед./с.

Таблица 1

Условия проведения ступенчатого нагружения
Incremental loading test conditions

Шаг увеличения действующего напряжения на каждой ступни σ_n, МПа	**Время каждой ступени *t*, при котором действующее осевое напряжение оставалось постоянным σ_1 = const**
3	5 мин
	10 мин
	20 мин
	30 мин
	1 ч
	3 ч
	12 ч
	24 ч
	48 ч
	168 ч (1 неделя)
	336 ч (2 недели)

Особо стоит отметить, что на каждой ступени скорости продольного деформирования постоянно уменьшаются в том случае, если не происходит разрушение образца. При напряжении 28 МПа скорость продольного деформирования начала уменьшаться, а в дальнейшем снова начала возрастать. Отдельного внимания требует тот факт, что прогнозирование процесса деформирования на участке, где образец перешел в стадию прогрессирующей ползучести и скорость v_1 начала возрастать, является сложным процессом. В связи с этим, дальнейшее обоснование времени постоянного напряжения на каждой ступени будет производиться для ступеней, где образец не переходит в стадию прогрессирующей ползучести.

В экспериментах с условиями, приведенными в табл. 1, производилось определение скоростей продольного деформирования на конечном участке кривой ползучести каждой ступени, данному участку соответствовали минимальные значения скоростей. Результаты этих измерений приведены в табл. 2.

Для выявления времени, при котором скорость деформирования выходит на постоянную минимальную величину, были проведены эксперименты с временем на ступенях, равным 68 ч. На одной ступени время выдержки действующего напряжения на ступени было сокращено до 19 ч. График изменения скорости продольного деформирования v_1 представлен на рис. 2.

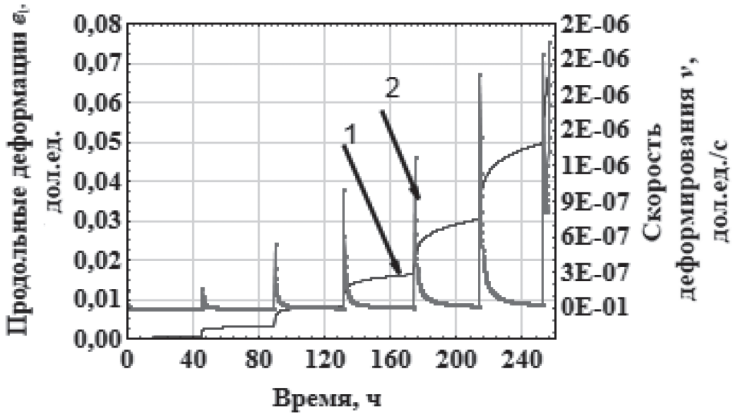

Рис. 1. График зависимости продольных деформаций e_1 (1) и скорости продольного деформирования v_1 (2) от времени t
Fig. 1. Graph of longitudinal deformations e_1 (1) and longitudinal strain rate v_1 (2) versus time t

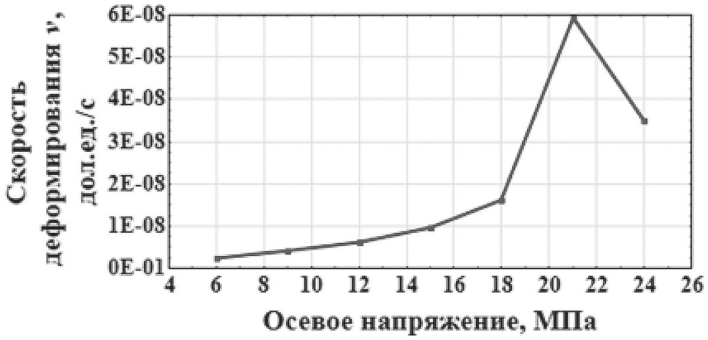

Рис. 2. Графическая зависимость скорости продольного деформирования образца v_1 от действующего осевого напряжения σ_1

Fig. 2. Graphical dependence of the longitudinal strain rate of the sample v_1 on the acting axial stress σ_1

Полученные результаты подтверждают тот факт, что определение скорости продольного деформирования каменной соли сильно зависит от времени проведения эксперимента. Для достоверного определения скорости деформирования необходима практическая реализация экспериментов с различным временем на ступени и последующий анализ со сравнением скорости, полученной в экспериментах, проведенных прямым методом. Результаты определения скоростей деформирования при различном времени выдержки постоянного напряжения на ступени представлено в табл. 2. Так же в табл. 3 представлены результаты определения скорости деформирования при проведении реологических испытаний прямым методом [14]. Время эксперимента прямым методом составляло 300 ч. Все эксперименты, результаты которых представлены в табл. 2 и 3, были проведены авторами.

Результаты определения продольных скоростей деформирования v_1 прямым методом свидетельствуют о том, что установившаяся скорость изменяется в интервале от 10^{-8} до 10^{-10} дол.ед./с в зависимости от величины напряжения, при котором проходил эксперимент. В режиме ступенчатого нагружения при достижении времени на ступени свыше 48 ч скорость деформирования согласуется со скоростью, полученной в результате экспериментов, проведенных прямым методом.

Определение скоростей деформирования в экспериментах, проводимых методом ступенчатого нагружения, показывает, что при времени выдержки на ступени от 5 мин до 48 ч скорость изменяется в интервале от 10^{-6} до 10^{-8} дол. ед./с. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что проводить эксперименты с величиной выдержки действующего напряжения на ступени меньше 48 ч некорректно, так как определенные скорости деформирования при таких условиях значительно выше скоростей, полученных в результате экспериментов, проведенных прямым методом.

В связи с необходимостью выбора величины шага увеличения действующего напряжения были проведены эксперименты с шагом увеличения напряжения 0,5 МПа, 3 МПа. Особо стоит отметить тот факт, что на начальных ступенях нагружения, когда нагрузки значительно меньше предельных значений, деформации растут очень медленно; скорости деформирования минимальны. Приведем некоторые данные результатов проведеных экспериментов с разной величиной ступени нагружения.

На рис. 3 представлены результаты проведения испытания методом ступен-

Таблица 2

Скорости продольного деформирования на ступенях с разным временем выдержки постоянного напряжения
Longitudinal strain rates at increments with different hold-up times of constant stress

Действующее напряжение на ступени, МПа	Значения скоростей продольного деформирования, дол. ед./с, при времени выдержки на ступени										
	5 мин	10 мин	20 мин	30 мин	1 ч	3 ч	12 ч	24 ч	48 ч	1 неделя	2 недели
3	7,91E-07	2,22E-07	8,41E-08	4,96E-08	3,33E-08	1,13E-08	2,28E-09	1,77E-09	1,03E-09	2,11E-10	1,13E-10
6	1,08E-06	3,26E-07	1,41E-07	8,02E-08	5,60E-08	1,84E-08	4,15E-09	3,86E-09	2,44E-09	2,77E-10	1,87E-10
9	1,48E-06	4,80E-07	2,38E-07	1,29E-07	9,42E-08	2,99E-08	7,54E-09	8,42E-09	5,76E-09	8,41E-10	1,01E-09
12	2,03E-06	7,07E-07	4,01E-07	2,10E-07	1,58E-07	4,85E-08	1,36E-08	1,83E-08	1,36E-08	2,42E-09	
15	2,78E-06	1,04E-06	6,75E-07	3,39E-07	2,66E-07	7,87E-08	2,48E-08	4,00E-08	3,22E-08	4,92E-09	
18	3,81E-06	1,53E-06	1,13E-06	5,49E-07	4,47E-07	1,27E-07	4,51E-08	8,72E-08	7,61E-08	1,16E-08	
21	5,21E-06	2,25E-06	1,91E-06	8,89E-07	7,53E-07	2,07E-07	8,19E-08	1,90E-07	1,20E-07		
24	7,14E-06	3,31E-06	2,69E-06	1,43E-06	1,26E-06	6,35E-07	1,48E-07	5,16E-07			

Таблица 3

Скорости продольного деформирования образцов испытанных прямым методом
Longitudinal strain rates in samples in direct loading

Действующее напряжение, МПа	Время проведения эксперимента, ч	Скорость продольного деформирования, дол. ед./с
3	300	9,81E-10
6		2,21E-09
9		5,63E-09
12		1,11E-08
15		1,66E-08
18		4,38E-08
21		7,63E-08

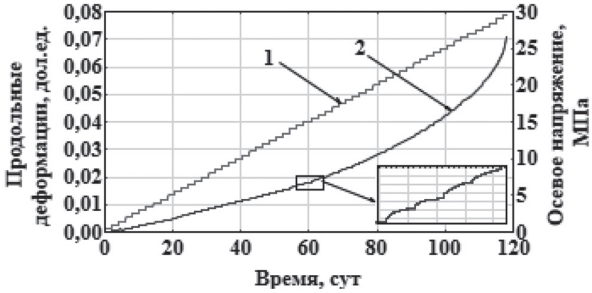

Рис. 3. Графические зависимости экспериментальных данных испытания образца каменной соли в режиме ступенчатого нагружения с временем t на каждой ступени, равным 48 ч, и шагом ступени 0,5 МПа: 1 — осевое напряжение σ_1, МПа; 2 — продольные деформации e_1

Fig. 3. Graphic dependences of the experimental test data for a rock salt sample in the step loading mode with a time t at each stage equal to 48 hours and a step step of 0,5 MPa: 1 — axial stress σ_1, MPa; 2 — longitudinal strains e_1

чатого нагружения. Время выдержки постоянного действующего напряжения на каждой ступени составляло 48 ч, напряжение увеличивалось при переходе на следующую ступень на 0,5 МПа. По результатам проведенных экспериментов была определена зависимость изменения скорости продольного деформирования от напряжения на ступени.

Результаты расчета скорости продольного деформирования приведены на рис. 4.

Подобные расчеты были выполнены для экспериментов, у которых одинаковое время выдержки действующего напряжения на ступени. Действующее напряжение для экспериментов в режиме ступенчатого нагружения увеличивалось на величину σ_n, которая составляла 0,5; 0,7 и 3 МПа. Данная величина в работе обозначена шагом увеличения действующего напряжения.

Результаты проведенных экспериментов, представлены на рис. 5. На рисунке наглядно видно, что величина шага увеличения действующего напряжения незначительно влияет на зависимость скорости деформирования v_1 от действующего напряжения σ_1.

Этот акт позволяет рассматривать кривую скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1, полученную в результате обработки экспериментальных данных с наибольшим количеством ступеней как эталонную. Эталонную кривую опишем уравнением экспоненциальной функции

$$f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2} \qquad (2)$$

Рис. 4. Графическая зависимость изменения скорости продольного деформирования (v_1) от осевого напряжения σ_1

Fig. 4. Graphical dependence of the longitudinal strain rate change (v_1) on the axial stress σ_1

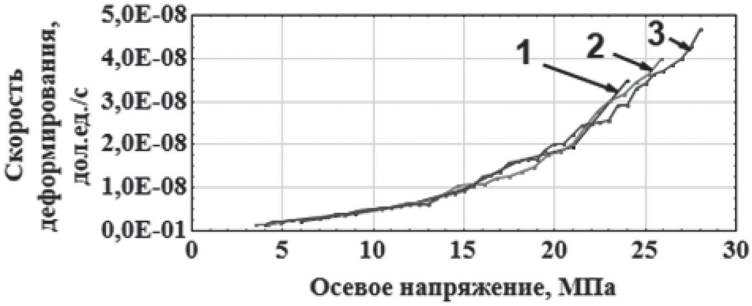

Рис. 5. Графические зависимости изменения скорости продольного деформирования v_1 в режиме ступенчатого нагружения с временем (t) на каждой ступени, равным 48 ч, и разной величиной шага нагружения σ_n: 1 – σ_n = 3 МПа; 2 – σ_n = 0,7 МПа; 3 – σ_n = 0,5 МПа

Fig. 5. Graphic dependences of the change in the longitudinal deformation rate v_1 of the experiments in the step loading mode with a time (t) at each stage equal to 48 hours and a different loading step: 1 — σ_n = 3 MPa; 2 — σ_n = 0,7 MPa; 3 — σ_n = 0,5 MPa

Результаты расчета позволяют установить доверительный интервал с точностью 15% от эталонной зависимости.

Полученные зависимости следует интерпретировать следующим образом: в том случае, если провести эксперименты в режиме ступенчатого одноосного нагружения с различной величиной шага увеличения действующего напряжения на ступенях и расчетные значения будут выше линии 3 и ниже линии 2, то с погрешностью 15% можно утверждать, что зависимость определена верно.

Суть проведенных экспериментов с количеством ступеней меньше, чем у эталонной, сводится к следующему. Необходимо оценить, какое количество ступеней достаточно для того, чтобы данные соответствовали эталонным с погрешностью не более 15%.

В связи с этим необходимо описать уравнением экспоненциальной функции зависимости, полученные в результате экспериментов с количеством ступеней, равным 7, шаг увеличения действующего напряжения на ступени в этом эксперименте составлял σ_n = 3 МПа. Изначально для расчета было выбрано 3 точки зависимости скорости продольного деформирования от напряжения.

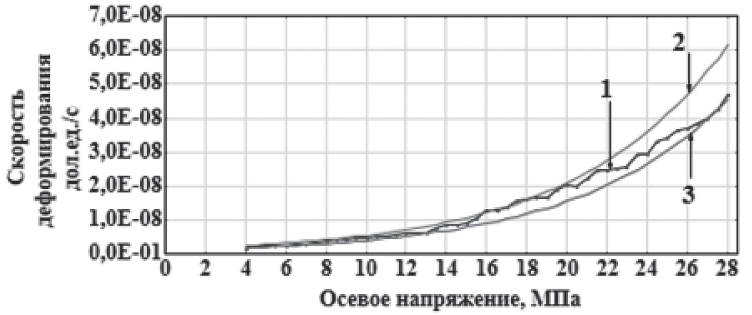

Рис. 6. Графическое отображение доверительного интервала от набора данных эталонной кривой: 1 — экспериментальные данные скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1; 2 — данные эталонной кривой, умноженные на 1,15; 3 — данные эталонной кривой, умноженной на 0,85

Fig. 6. Graphic display of the confidence interval from the dataset of the reference curve: 1 — calculated data of the longitudinal strain rate v_1 from the axial stress σ_1; 2 — data of the reference curve multiplied by 1,15; 3 — data of the reference curve multiplied by 0,85

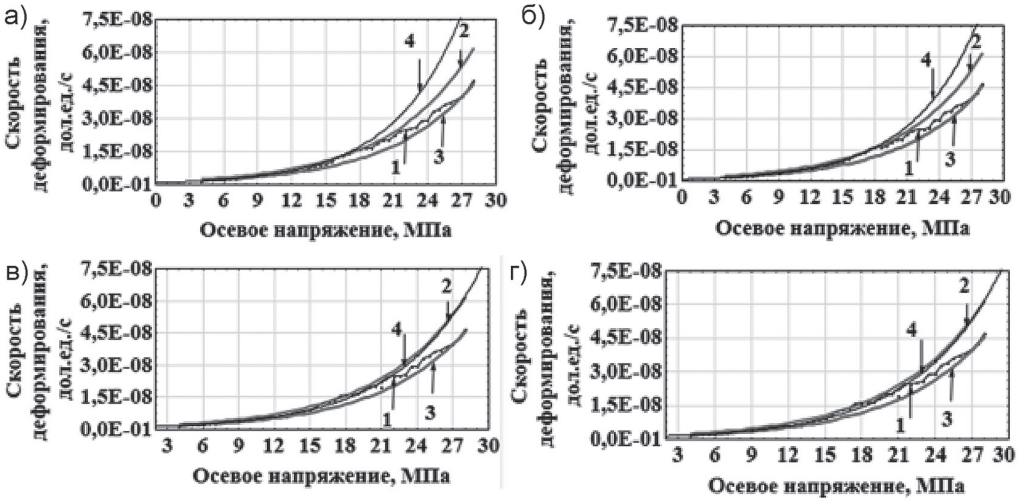

Рис. 7. Графические зависимости результатов расчета скорости деформирования по 3 точкам (а), по 4-м точкам (б), по 5 точкам (в) и по 6 точкам (г): 1 — данные эксперимента; 2 — верхняя граница доверительного интервала; 3 — нижняя граница доверительного интервала; 4 — график построенный по 4 значениям зависимости скорости продольного деформирования от напряжения

Fig. 7. Graphic dependences of the results of calculating the strain rate for 3 points (a), for 4 points (b), for 5 points (c) and for 6 points (d): 1 — calculated data of the experiment; 2 — upper limit of the confidence interval; 3 — lower bound of the confidence interval; 4 — graph of the function described by the values of the experiment with a step of the degree of voltage of 3 MPa

В случае непопадания графика функции в доверительный интервал в расчет добавлялось еще одно значение зависимости скорости продольного деформирования от напряжения. Процедура повторялась до момента, когда график функции попал в доверительный интервал.

На рис. 7 представлены результаты проведенных расчетов.

Обсуждение результатов

Анализ исследований, результаты которых приведены на рис. 7, свидетельствует о возможности с погрешностью 15% определить зависимость скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1 в результате экспериментов в режиме одноосного ступенчатого нагружения с временем выдержки действующего напряжения на каждой ступени не менее 48 ч и количеством ступеней *n* не менее 6.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

- при проведении реологических испытаний каменной соли методом ступенчатого нагружения для получения зависимости скорости деформирования от напряжения достаточно ограничить длительность ступени 48 ч.
- при реализации метода ступенчатого нагружения, для получения зависимости скорости деформирования от напряжения с погрешностью 15%, количество ступеней должно быть не менее 6.

Все вышеизложенное может послужить основой для разработки математической модели описания прогноза процесса ползучести каменной соли. Так, построение математической модели позволит определить минимальное время проведения эксперимента для определения реологических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Кошелев А. Е.* Обоснование и разработка метода определения механических свойств каменной соли с учетом начального поля напряжений: диссертация канд. тех. наук: 25.00.20. — М., 2013. — 143 с.

3. *Пермяков Р. О., Соломенцев Г. Г., Гаркушин П. К.* Исследование физико-механических свойств, процесса деформирования и разрушения соляных пород // Труды ВНИИГалургии. — 1974. — Вып. 67. — С. 108—119.

4. *Тавостин М. Н.* Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 8. — С. 125—128.

5. *Singh D. P.* Long-tezm strength of rock // Colliezy Guazdian. 1977. Vol. 225. No 11. Pp. 861—866.

6. *Wu C., Liu J., Zhou Z., Xu H., Wu F., Zhuo Y., Wang L.* Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test // Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 2017. Vol. 49. Pp. 165—172.

7. *Ударцев А. А., Паньков И. Л.* Исследование ползучести красного сильвинита при различных боковых давлениях // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2015. — № 1. — С. 270—273.

8. *Chtourou H., Guillot M., Gakwaya A.*Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part I. Experimental material characterization and validation // International Journal of Solids and Structures. 2002. Vol. 39. No 4. Pp. 1059–1075.

9. *Wang R., Jiang Y., Yang C., Huang F., Wang Y.* A nonlinear creep damage model of layered rock under unloading condition // Mathematical Problems in Engineering. 2018. Vol. 8. Article 8294390.

10. *Zhou Z., Liu J., Wu F., Wang L., Zhuo Y., Liu W., Li J.* Experimental study on creep properties of salt rock and mudstone from bedded salt rock gas storage // Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 2016. Vol. 48. Pp. 100—106.

11. *Liu B., Xu H., Dong L., Ma Y., Li K.* A nonlinear rheological model of rock salt based on DS-dashpot under cyclic loading // Rock and Soil Mechanics. 2018. Vol. 39. Pp. 107—114.

12. *Кузнецов Г. Н.* Механические свойства горных пород. — М.: Углетехиздат, 1947. — 179 с.

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

14. *Ударцев А. А., Бельтюков Н. Л.* Исследование ползучести соляных пород сатимольского месторождения борно-калийных солей / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. Вып. 11. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2013. — 298 с.

15. *Константинов С. А., Ваулин И. Б., Ильинов М. Д.* Некоторые результаты испытаний образцов соляных пород на ползучесть // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2008. — № 2. — С. 118—122.

16. *Титов Б. В.* Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии: диссертация канд. тех. наук. — Березники, 1983. — 248 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Nosikov A. V., Korotkov S. A., Tryavin E. Yu., Toropetskiy K. V., Mikhailov B. O., Borisov G. A. Investigation of creep of rock salts and application of well design in engineering calculations. *Exposition Oil & Gas*. 2018, no 7 (67), pp. 29—36. [In Russ].

2. Koshelev A. E. *Obosnovanie i razrabotka metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv kamennoy soli s uchetom nachal'nogo polya napryazheniy* [Justification and development of a

method for determining the mechanical properties of rock salt, taking into account the initial stress field], Candidate's thesis, Moscow, 2013, 143 p.

3. Permyakov P. O., Solomentsev G. G., Garkushin P. K. The study of physical and mechanical properties, the process of deformation and destruction of salt rocks. *Trudy VNIIGalurgii*. 1974, Issue 67, pp. 108 — 119. [In Russ].

4. Tavostin M. N. The influence of the type of stress state on the rheological properties of rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000, no 8, pp. 125 — 128. [In Russ].

5. Singh D. P. Long-tezm strength of rock. *Colliezy Guazdian*. 1977. Vol. 225. No 11. Pp. 861 — 866.

6. Wu C., Liu J., Zhou Z., Xu H., Wu F., Zhuo Y., Wang L. Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*. 2017. Vol. 49. Pp. 165 — 172.

7. Udartsev A. A., Pan'kov I. L. Creep study of red sylvinite at various lateral pressures. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. 2015, no 1, pp. 270 — 273. [In Russ].

8. Chtourou H., Guillot M., Gakwaya A.Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part I. Experimental material characterization and validation. *International Journal of Solids and Structures*. 2002. Vol. 39. No 4. Pp. 1059–1075.

9. Wang R., Jiang Y., Yang C., Huang F., Wang Y. A nonlinear creep damage model of layered rock under unloading condition. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 8. Article 8294390.

10. Zhou Z., Liu J., Wu F., Wang L., Zhuo Y., Liu W., Li J. Experimental study on creep properties of salt rock and mudstone from bedded salt rock gas storage. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*. 2016. Vol. 48. Pp. 100 — 106.

11. Liu B., Xu H., Dong L., Ma Y., Li K. A nonlinear rheological model of rock salt based on DS-dashpot under cyclic loading. *Rock and Soil Mechanics*. 2018. Vol. 39. Pp. 107 — 114.

12. Kuznetsov G. N. *Mekhanicheskie svoystva gornykh porod* [Mechanical properties of rocks], Moscow, Ugletekhizdat, 1947, 179 p.

13. Il'inov M. D., Kartashov Yu. M. The accelerated method for determining the rheological properties of rocks. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 207 — 209. [In Russ].

14. Udartsev A. A., Bel'tyukov N. L. Investigation of creep of salt rocks of the Satimolskoye deposit of boron-potassium salts. *Ctrategiya i protsessy osvoeniya georesursov*: sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 11 [Strategy and processes of development of geo-resources. Collection of scientific papers, Issue 11], Perm, GI UrO RAN, 2013, 298 p. [In Russ].

15. Konstantinov S. A., Vaulin I. B., Il'inov M. D. Some results of tests of samples of salt rocks on creep. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2008, no 2, pp. 118 — 122. [In Russ].

16. Titov B. V. *Issledovanie i razrabotka metoda opredeleniya dlitel'noy prochnosti solyanykh gornykh porod pri szhatii* [Research and development of a method for determining the long-term strength of salt rocks under compression], Candidate's thesis, Berezniki, 1983, 248 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Агеенко Валерий Александрович — аспирант,
e-mail: Valera.ageenko@mail.ru, НИТУ «МИСиС».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.A. Ageenko, Graduate Student, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 17.04.2020; получена после рецензии 12.12.2020; принята к печати 10.03.2021.
Received by the editors 17.04.2020; received after the review 12.12.2020; accepted for printing 10.03.2021.