

Исследование реологических свойств каменной соли

Валерий Александрович АГЕЕНКО*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Россия, Москва

Актуальность. Методы определения устойчивости при длительной эксплуатации подземных резервуаров, созданных путем выщелачивания, пока не отражают всего многообразия влияющих на них факторов, поэтому не только геометрические параметры выработок, но и минимальное допускаемое давление хранимого продукта принимаются со значительным запасом. Создание надежных методов определения основных параметров подземных резервуаров связано с изучением физико-механических свойств соляных пород. В связи с тем, что галогенные породы даже при минимальном механическом воздействии проявляют пластические свойства, применимость к ним существующих стандартизированных методов определений различных механических свойств, по нашему мнению, носит дискуссионный характер. Это подтверждается и тем обстоятельством, что в России до сих пор нет методики федерального уровня по определению реологических и пластических свойств соляных горных пород. В связи с этим выбор методики проведения экспериментов по определению реологических свойств является проблематичным.

Целью исследования являются проведение экспериментов и проверка нового метода прогноза кривых ползучести.

Методы и результаты. В работе внимание уделено уникальности экспериментальных определений реологических свойств соляных горных пород. Описаны методики проведения экспериментов. Большое внимание уделено изучению необходимой продолжительности эксперимента по определению реологических характеристик. Выявлены закономерности при кривых ползучести в зависимости от времени эксперимента и предложено необходимое время проведения эксперимента. Описан метод прогнозирования кривой ползучести на 300 ч по первым 60 мин ползучести. Данная методика описания является новой в сравнении с другими, родственными исследования по данной тематике. Накопленный опыт экспериментальных данных дает основание для разработки стандарта организации по определению комплекса физико-механических свойств галогенных пород. Описанные эксперименты по испытанию были опробованы ООО «Газпром геотехнологии».

Выводом данной работы является новый предложенный метод прогнозирования эксперимента по первым 40 мин ползучести.

Ключевые слова: испытание каменной соли, кривые ползучести, режим нагружения, экспериментальная кривая ползучести, время проведения эксперимента, геомеханика.

Введение
Каменная соль под нагрузкой с течением времени имеет особенность изменять свои прочностные характеристики. Во многом это связано с изменением напряжений в массиве [1]. Напряженно-деформированное состояние с течением времени изменяется, так как у соли хорошо прослеживаются реологические свойства. Основными реологическими характеристиками являются предел длительной прочности и реологические кривые [2].

Экспериментальные данные

Для исследования одноосной ползучести и определения предела длительной прочности по методике Е. М. Шафаренко производились эксперименты с постоянным напряжением на протяжении 300 ч [3]. Напряжения выбирались равными 9, 12, 15 и 18 МПа. Результаты ползучести представлены на рис. 1.

Для описания линий ползучести применялось уравнение логарифмической кривой, это позволяло избежать погрешности [4] датчика при расчете скорости ползучести на установившемся участке ползучести, доли ед.:

$$e_1 = a + b \lg(t),$$

где a, b – параметры уравнения; t – время, ч.

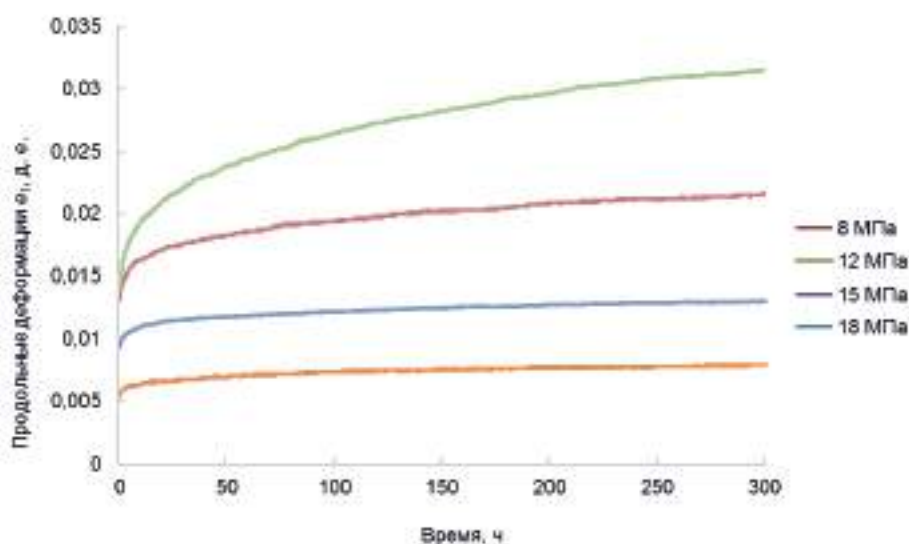


Рисунок 1. Кривые ползучести каменной соли.
Figure 1. Creep curves of salt rock.

* valera.ageenko@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-7190-964X>

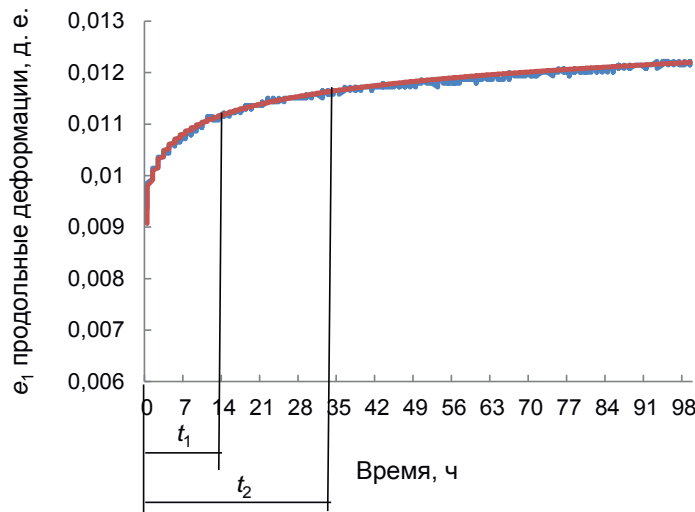


Рисунок 2. Участки отбора времени ползучести.
Figure 2. Sites for time selection of creeping.

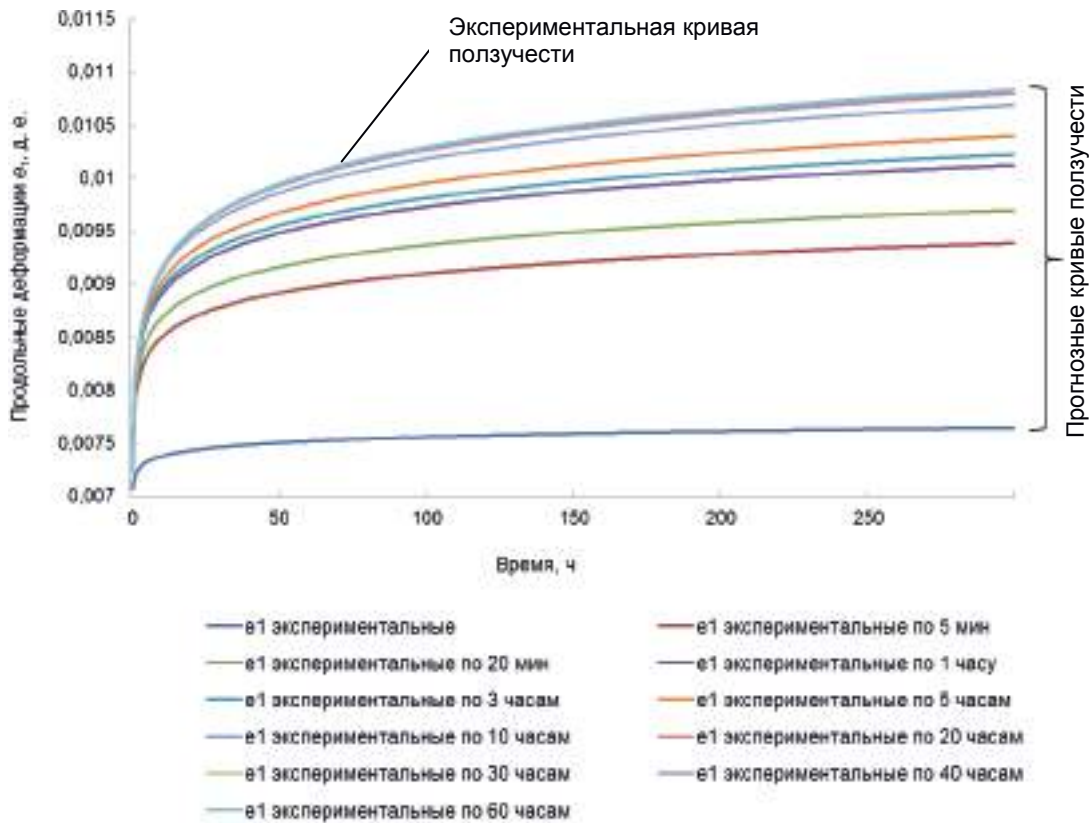


Рисунок 3. Графики расчётных кривых ползучести и экспериментальная кривая.
Figure 3. Graphs of calculated creep curves and an experimental curve.

Предлагаемая методика прогнозирования эксперимента

В связи с производственной необходимостью [5] была поставлена задача изучить минимальное время ползучести для построения прогнозной кривой. Для этого строились прогнозные кривые ползучести по логарифмическому уравнению [6]. Коэффициент корреляции при описании был не ниже 0,98.

На начальном участке ползучести выбиралось время от 5 до 100 мин и строилась прогнозная кривая ползучести на 300 ч для сравнения с экспериментальной кривой. На рис. 2 показаны участки отбора времени для прогноза.

Время t_p , по которому строились прогнозные кривые ползучести, выбиралось следующее: 5 мин, 20 мин, 1 ч, 3 ч, 5 ч, 10 ч, 20 ч, 30 ч, 40 ч и 60 ч.

Сопоставление экспериментальных и прогнозных кривых ползучести

На основании выбранного времени по уравнению, доли ед.,

$$e_1 = a + b \lg(t_p)$$

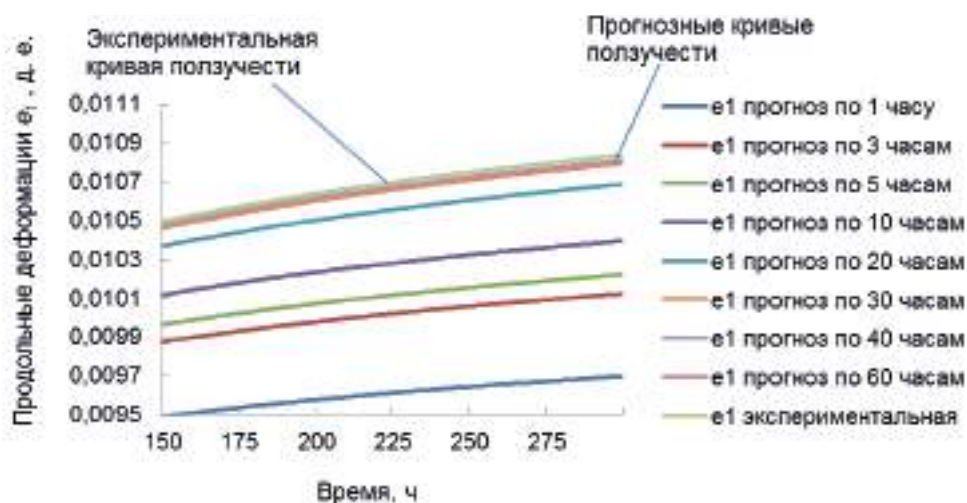


Рисунок 4. Графики расчётных кривых ползучести и экспериментальная кривая.
Figure 4. Graphs of calculated creep curves and an experimental curve.

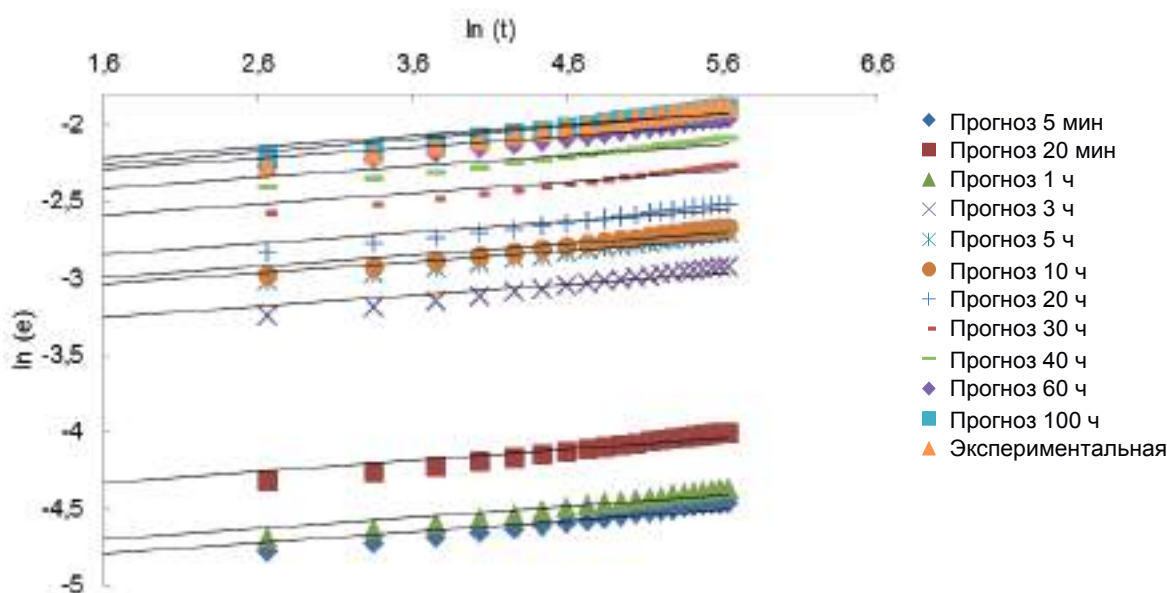


Рисунок 5. График зависимостей продольных деформаций от времени в логарифмических координатах.
Figure 5. Graph of dependences of longitudinal deformations on time in logarithmic coordinates.

строились прогнозные кривые ползучести и сравнивались с экспериментальными данными ползучести. Результаты представлены на рис. 3.

Из графика видно, что при увеличении времени для прогноза расчетная кривая приближается к экспериментальным данным. Более детально это отражено на рис. 4.

Визуально видно, что наступает такой момент, при котором расчетная кривая ползучести практически совпадает с экспериментальной кривой. По результатам обработки [7] графиков видно, что данное время составляет минимум 40 ч. При увеличении времени картина существенно не меняется. Для того чтобы оценить, как точно экспериментальная кривая совпадает с расчетной кривой, сравнивались коэффициенты зависимости продольных деформаций от времени [8]. Для этого строился график зависимости продольных деформаций от времени в логарифмических координатах и описывался уравнением:

$$\lg(e) = k \lg(t) - b,$$

где b – параметр уравнения.

Полученные графики представлены на рис. 5.

Коэффициенты зависимости продольных деформаций от времени сравнивались в процентном соотношении [9]. Данные представлены в таблице.

Результаты подтверждают, что при достижении времени 40 ч коэффициент изменяется незначительно и количественно отличается от экспериментального не более чем на 5 %.

**Коэффициенты зависимости продольных деформаций расчетных кривых и экспериментальной кривой от времени.
The coefficients of dependence on time of longitudinal deformations of the calculated curves and the experimental curve.**

Время ползучести, выделенное для прогноза	Уравнения прямых	Отклонение, %
Фактическое	$y = 0,0340 x - 2,4002$	—
100 ч	$y = 0,0339 x - 2,5323$	0,18
60 ч	$y = 0,0329 x - 2,5888$	3,2
40 ч	$y = 0,0325 x - 2,6982$	4,3
30 ч	$y = 0,0303 x - 2,8211$	15,1
20 ч	$y = 0,0289 x - 2,9611$	14,7
10 ч	$y = 0,0271 x - 3,1236$	20,1
5 ч	$y = 0,0256 x - 3,3162$	30,1
3 ч	$y = 0,0237 x - 3,5531$	29,4
1 ч	$y = 0,0228 x - 4,2122$	32,8
20 мин	$y = 0,0175 x - 4,2989$	48,4
5 мин	$y = 0,0090 x - 5,0659$	73,5

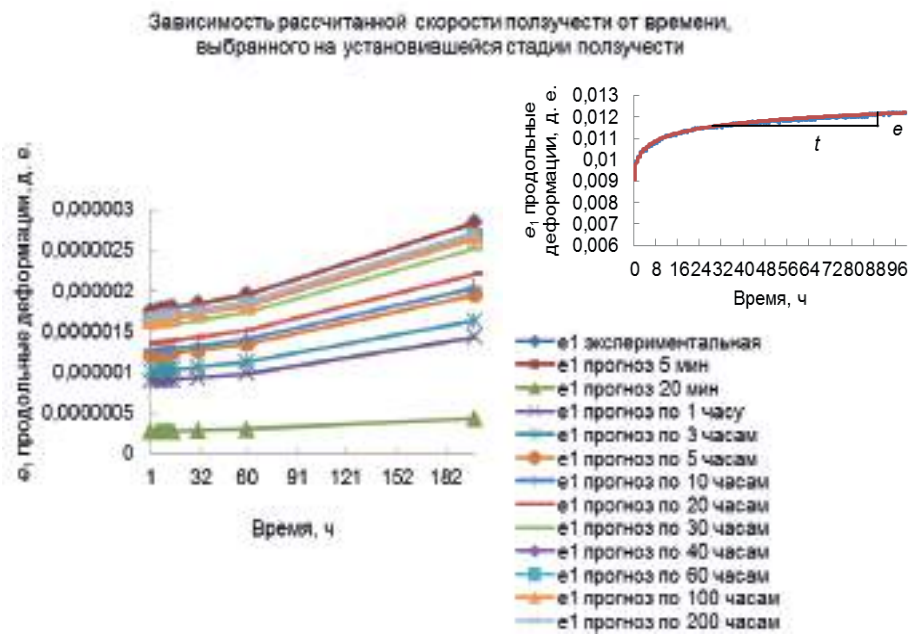


Рисунок 6. Справа график определения скорости деформирования на экспериментальной кривой ползучести, слева графики скоростей деформирования в зависимости от времени на конечном участке ползучести.

Figure 6. On the right hand, there is a graph of determining the strain rate on the experimental creep curve; on the left hand – graphs of the strain rate depending on time on the final creeping zone.

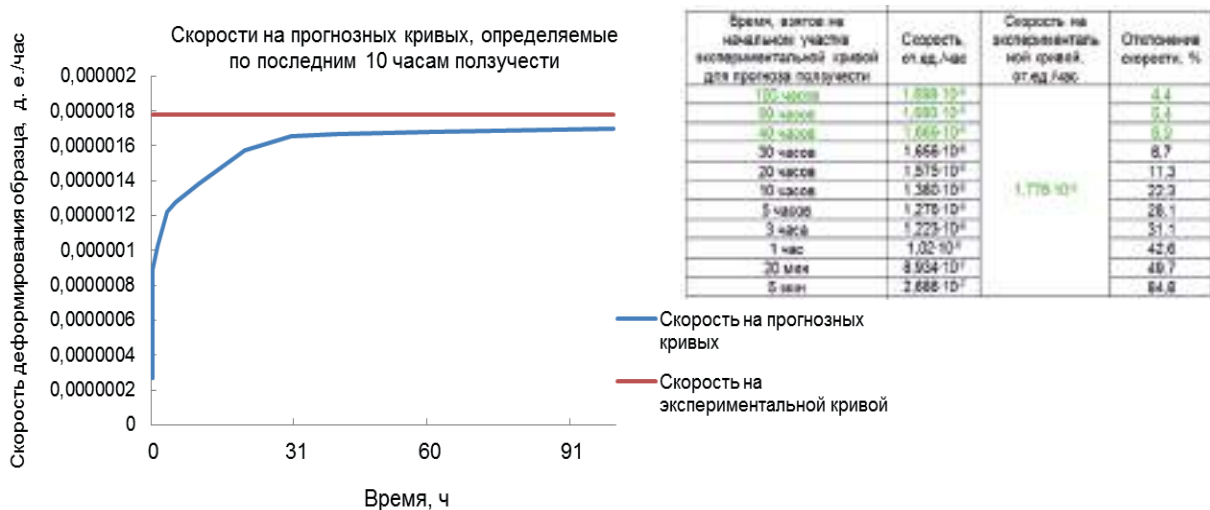


Рисунок 7. Расчет скорости ползучести на экспериментальной кривой и расчётных кривых.
Figure 7. Calculation of creeping rate on the experimental curve and calculated curves.

Дальнейшие исследования ползучести были направлены на изучение скоростей ползучести на установившейся стадии ползучести [10]. Для этого рассчитывалась скорость на конечном этапе ползучести на ветвях, которые не перешли в стадию прогрессирующей ползучести [11]. Расчет скорости производился по формуле, доли ед./ч:

$$v_i = e_i / t_p$$

где t_i – время ползучести на конечной стадии ползучести, которое было выбрано для определения скорости [12]; e_i – величина продольных деформаций [13], $e_i = e_{\text{кон}} - e_p$; t_i – время по которому производился расчет скорости.

Результаты определения скоростей представлены на рис. 6.

Из графика видно, что до определенного времени, которое составляет около 20 ч, скорость меняется незначительно. Для более точных расчетов было выбрано время расчета скорости на конечном участке ползучести, равное 10 ч. Результаты исследований представлены на рис. 7.

Выводы

Исследования показывают, что при времени прогноза для ползучести свыше 40 ч скорость меняется незначительно и количественно не превышает 6 % [14]. Все расчетные кривые, у которых время составляет менее 40 ч, скорости сильно отличаются от экспериментальных данных [15].

Можно утверждать, что для прогноза кривой ползучести достаточно 40 ч ползучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. А., Левицкий Ю. Ф. Геология галогенных отложений (формаций) СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 424 с.
2. Хохлов А. В. Кривые длительной прочности нелинейной модели вязкоупругопластичности типа Максвелла и правило суммирования поврежденности при ступенчатом нагружении // Вестник СамГТУ. Сер. «Физико-математические науки». 2016. Т. 20, № 3. С. 524–543.
3. Хохлов А. В. Определяющее соотношение для реологических процессов с известной историей нагружения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 140–160.
4. Димитриенко Ю. И., Юрин Ю. В. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород с учетом ползучести // Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 3. С. 101–118.
5. Ильинов М. Д., Карташов Ю. М. Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 207–209. [Link](#)
6. Nakan Özgen, İhsan Özkan, Cem Şensöğüt. Measurement and mathematical modelling of the creep behaviour of Tuzköy rock salt // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2014. Vol. 66. P. 128–135. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.005>
7. Yu Zhang, Wei-ya Xu, Jian-fu Shao, Hai-bin Zhao, Wei Wang. Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydro-power Project // Water Science and Engineering. 2015. Vol. 8, issue 1. P. 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.01.005>
8. Агеенко В. А. Разработка алгоритмов компьютерного проектирования наземного пространства в историческом центре Москвы и на присоединенных территориях // ГИАБ. 2012. № 5. С. 358–359.
9. Агеенко В. А., Баклашов И. В. Разработка теории и моделирование процессов сводообразования в окрестности горизонтальной выработки // ГИАБ. 2015. № 12. С. 5–7.
10. Паньков И. Л., Асанов В.А., Ударцев А. А., Кузьминых В. С., Евсеев В. С. Особенности деформирования и разрушения соляных пород // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф. Пермь: Горный ин-т УрО РАН, 2014. С. 304–311.
11. Паньков И. Л., Ударцева А. А. Экспериментальное изучение деформирования соляных пород при ползучести // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 11. С. 205–207.
12. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40, № 2. P. 151–171. [https://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00138-7](https://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00138-7)
13. El Hassan Ait Laasri, Es-Said Akhouayri, Dris Agliz, Abderrahman Atmani. Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using cross-correlation // Digital Signal Processing. 2014. Vol. 26. P. 87–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2013.12.009>
14. Addair T. G., Dodge D. A., Walter W. R., Ruppert S. D. Large-scale seismic signal analysis with Hadoop // Computers and Geosciences. 2014. Vol. 66. P. 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.014>
15. Yoon C. E., O'Reilly O., Bergen K. J., Beroza G. C. Earthquake detection through computationally efficient similarity search // Science Advances. 2015. Vol. 1, issue 11. e1501057. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501057>

Статья поступила в редакцию 16 января 2019 г.

Study of the rheological properties of salt rock

Valerii Aleksandrovich AGEENKO*

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

Relevance. Methods for determining durability during long-term operation of underground reservoirs created by chemical degradation do not cover the diversity of factors affecting them, therefore not only the geometrical parameters of workings, but the minimum allowable pressure of the stored product as well are considered with a significant margin. Creating reliable methods for determining the basic parameters of underground reservoirs is associated with the study of the physical and mechanical properties of salt rocks. Due to the fact that halogen rocks (even with a minimal mechanical effect) exhibit plastic properties, the applicability of the existing standardized methods for determining various mechanical properties to them, in our opinion, is debated. This is confirmed by the fact that there is still no methodology in Russia for determining the rheological and plastic properties of salt rocks. In this regard, the choice of methods of conducting tests to determine rheological properties is problematic.

The purpose of the study is the performance of an experiment and test a new method for predicting creep curves.

Methods and results. This paper focuses on the uniqueness of the experimental determinations of rheological properties of salt rocks. Experimental techniques are described. Much attention is paid to the study of the required duration of the experiment to determine the rheological characteristics. Regularities were found with creep curves depending on the experiment time and the required time for this was proposed. The method for predicting the creep curve for 300 h over the first 60 min of creeping is described. This method of description is a new method in comparison with other related studies on this topic. The accumulated experience of experimental data provides the basis for the development of a standard for determining the complex of physical and mechanical properties of halogen rocks. The described surveys were tested by OOO Gazprom Geotechnology.

The conclusion is the presence of a new proposed method for predicting the experiment for the first 40 minutes of creeping.

Keywords: salt rock test, creep curves, loading conditions, experimental creep curve, experiment timing, geomechanics.

REFERENCES

1. Ivanov A. A., Levitsky Yu. F. 1960, *Geologiya galogennykh otlozheniy (formatsiy) SSSR* [Geology of halogen deposits (formations) of the USSR]. Moscow, 424 p.
2. Khokhlov A. V. 2016, Stress rupture curves of the nonlinear model of viscous elasticity and plasticity of the Maxwell type and the summation rule of damage under step loading. *Vestnik SamGTU* [Journal of Samara State Technical University], Series "Physical and mathematical Sciences", vol. 20, no. 3, pp. 524–543. (*In Russ.*)
3. Khokhlov A. V. 2008, Defining relationship of rheological processes with a known loading history. *Izvestiya RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Mechanics of solids], no. 2, pp. 140–160. (*In Russ.*)
4. Dimitrienko Yu. I., Yurin Yu. V. 2015, Finite-element modeling of the stress-strain state of rocks with regard to creeping. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and computational methods], no. 3, pp. 101–118. (*In Russ.*)
5. Ilyinov M. D., Kartashov Yu. M. 2011, Accelerated method for determining the rheological properties of rocks, St. Petersburg: *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 190, pp. 207–209. (*In Russ.*) [Link](#)
6. Hakan Özşen, İhsan Özkan, Cem Şensöğüt. 2014, Measurement and mathematical modelling of the creep behaviour of Tuzköy rock salt. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 66, pp. 128–135.
7. Yu Zhang, Wei-yaXu, Jian-fu Shao, Hai-bin Zhao, Wei Wang. 2015, Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project. *Water Science and Engineering*, vol. 8, issue 1, pp. 55–62.
8. Ageenko V. A. 2012, Development of algorithms for computer-aided design of ground-based space in the historic centre of Moscow and in the adjacent territories. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 358–359. (*In Russ.*)
9. Ageenko V. A., Baklashov I. V. 2015, Development of the theory and modeling of arch formation in the vicinity of the horizontal working. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 5–7.
10. Pankov I. L., Asanov V. A., Udartsev A. A., Kuz'minykh V. S., Evseev V. S. 2014, *Osobnosti deformirovaniya i razrusheniya solyanykh porod* [Features of deformation and destruction of salt rocks]. Problems of safety and efficiency of development of georesources in modern conditions: proceedings of the scientific and practical conference. Perm, pp. 304–311.
11. Pankov I. L., Udartseva A. A. 2011, Experimental study of salt formation in creeping. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala* [Geology and minerals of the Western Urals], no. 11, pp. 205–207. (*In Russ.*)
12. Lavrov A. 2003, The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, no. 2, pp. 151–171.
13. El Hassan Ait Laasri, Es-Said Akhouayri, Dris Agliz, Abderrahman Atmani. 2014, Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using cross-correlation. *Digital Signal Processing*, vol. 26, pp. 87–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2013.12.009>
14. Addair T. G., Dodge D. A., Walter W. R., Ruppert S. D. 2014, Large-scale seismic signal analysis with Hadoop. *Computers and Geosciences*, vol. 66, pp. 145–154.
15. Yoon C. E., O'Reilly O., Bergen K. J., Beroza G. C. 2015, Earthquake detection through computationally efficient similarity search. *Science Advances*, vol. 1, issue 11. e1501057. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501057>

The article was received on January 16, 2018

* valera.ageenko@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7190-964X>