

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prugger F.F., Prugger A.F. Water problems in Saskatchewan potash mining – what can be learned from them // CIM Bulletin. – 1991. – V. 84, № 945. – P. 58–66.
2. Шиман М.И. Предотвращение затопления калийных рудников. – М.: Недра, 1992. – 160 с.: ил.
3. Пономаренко Т. Экологические, экономические и социальные последствия аварийных ситуаций на калийных рудниках // Management Systems in Production Engineering. – 2012. – № 2 (6). – С 28–31.
4. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
7. Барях А.А., Федосеев А.К. О механизме формирования карстовых провалов на земной поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 12–22.
8. Барях А.А., Шумихина А.Ю., Токсаров В.Н., Лобанов С.Ю., Евсеев А.В. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей // Горн. журн. – 2011. – № 11. – С. 15–19.
9. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // Adv. Rock Mech. – 1974. – V.1, Pt A. – P. 127–140.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2021.2.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА НОРТОНА
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ
СОЛЯНЫХ ПОРОД**

И.А. Морозов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Описание процесса деформирования соляных пород в условиях длительного нагружения требует использования специальных моделей механики сплошной среды, позволяющих учитывать фактор времени. Одной из наиболее простых с точки зрения параметрического обеспечения является модель ползучести, в которой связь между скоростью установившейся ползучести и уровнем действующих напряжений выражается в виде степенной зависимости (закон Нортон). На основании данных лабораторных исследований образцов сильвинита и карналлита в условиях длительного одноосного нагружения установлено, что закон Нортон хорошо описывает стадию установившейся ползучести соляных пород. По результатам обработки и анализа данных лабораторных исследований породных образцов получены параметры ползучести сильвинита и карналлита, предназначенные для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего горные выработки.

Ключевые слова: соляные породы, сильвинит, карналлит, ползучесть, закон Нортон.

Исследованию ползучести горных пород посвящено большое количество работ [1–5 и др.]. В настоящее время существуют математические модели, позволяющие с достаточной степенью точности описать все три стадии ползучести соляных пород: неустановившуюся, установившуюся и прогрессирующую [6–8]. На практике выбор той или иной модели обуславливается точностью аппроксимации экспериментальных кривых ползучести, а также количеством параметров, необходимых для идентификации принятой модели. В связи с тем, что получение экспериментальных данных о деформировании горных пород в режиме длительного нагружения представляет очень трудоемкий и дорогостоящий процесс продолжительностью до нескольких месяцев и даже лет, для решения практических задач целесообразно делать выбор в пользу более простых моделей с минимальным количеством параметров. Поэтому целью настоящей работы является изучение возможности применения закона Нортон для описания процесса ползучести соляных пород.

В соответствии с законом Нортона [9–11], связь между скоростью деформации ползучести $\dot{\varepsilon}^{cr}$ и соответствующей величиной напряжения σ (Па) можно представить в виде:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = k(\sigma)^n \quad (1)$$

Для применения закона Нортона, как видно по выражению (1), необходимо знать всего два параметра: k – коэффициент ползучести ($\text{Па}^{-n}\text{с}^{-1}$), n – показатель ползучести.

После логарифмирования выражения (1) получаем следующую зависимость:

$$\ln(\dot{\varepsilon}^{cr}) = \ln(k) + n \cdot \ln(\sigma), \quad (2)$$

С учетом того, что k и n – это константы, нетрудно заметить: зависимость $\ln(\dot{\varepsilon}^{cr})$ от $\ln(\sigma)$ является линейной. Поэтому определение параметров ползучести сводится к построению в логарифмической шкале зависимости скорости установившейся ползучести образцов от уровня напряжения и аппроксимации ее функцией вида [11]:

$$y = a + b \cdot x, \quad (3)$$

где $y = \ln(\dot{\varepsilon}^{cr})$; $a = \ln(k)$; $b = n$; $x = \ln(\sigma)$.

На основании вышеизложенного параметры ползучести определяются через эмпирические коэффициенты a и b :

$$k = e^a, \quad n = b \quad (4)$$

Для изучения возможности применения закона Нортона для описания ползучести соляных пород использовались результаты лабораторных экспериментов на ползучесть образцов сильвинитовых и карналлитовых пород, которые приводятся в работе [12]. Характерные кривые ползучести образцов сильвинита представлены на рис. 1 [12].

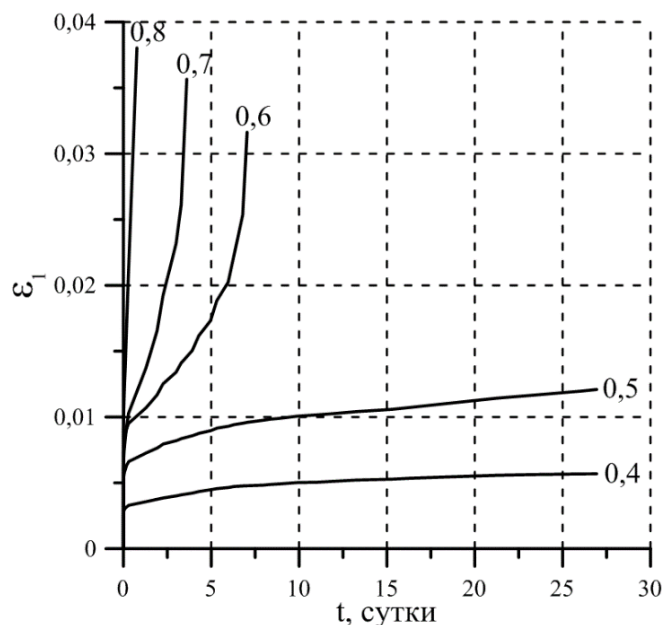


Рис. 1. Кривые ползучести образцов сильвинита: 0,4...0,8 – осевая нагрузка в долях от предела прочности ($\sigma_{пр}$)

На рис. 2 приводятся зависимости скорости деформации установившейся ползучести $\dot{\epsilon}_1^{cr}$ (сутки⁻¹) соляных пород от величины действующего относительного напряжения $\sigma_1/\sigma_{пр}$ в логарифмической шкале. Указанные зависимости получены по данным испытания 30 образцов карналлитовой и сильвинитовой породы в условиях длительного одноосного нагружения.

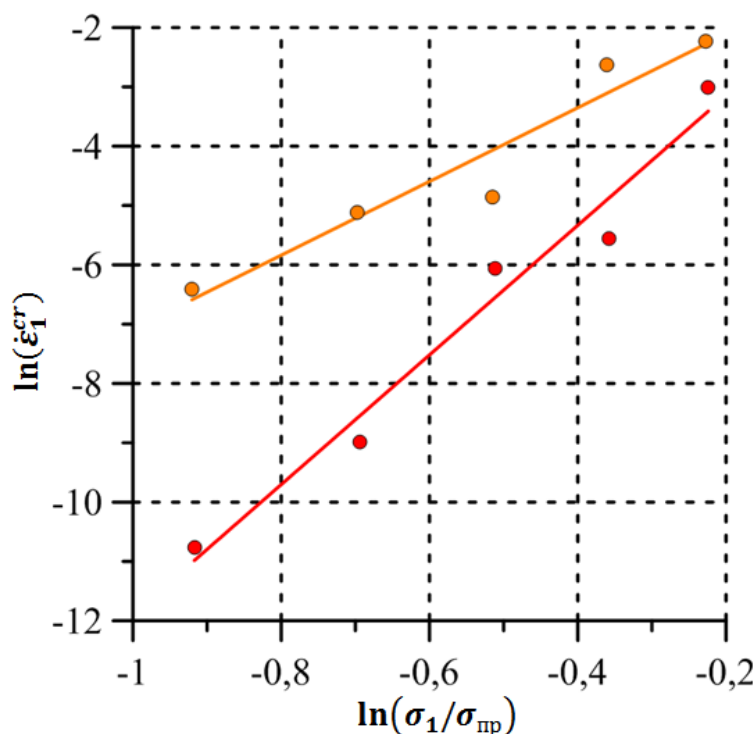


Рис. 2. Зависимости скорости установившейся ползучести образцов соляных пород от величины действующего относительного напряжения:
 — — сильвинит, $R^2 = 0,97$; — — карналлит, $R^2 = 0,93$

Анализ результатов, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод о том, что закон Нортона достаточно хорошо описывает установившуюся ползучесть соляных пород в рассматриваемом диапазоне действующего относительного напряжения. При этом для рассматриваемых типов пород параметры ползучести принимают следующие значения:

- сильвинит: $k = 3,18 \cdot 10^{-17}$ (МПа⁻ⁿсутки⁻¹), $n = 10,93$;
- карналлит: $k = 9,35 \cdot 10^{-17}$ (МПа⁻ⁿсутки⁻¹), $n = 6,22$.

Необходимо отметить, что полученные в лабораторных условиях значения параметров ползучести могут отличаться от значений, соответствующих естественным условиям залегания породных пластов [6, 13], но могут быть использованы в качестве первого приближения при оценке напряженно-деформированного состояния вмещающего горные выработки породного массива, сложенного соленосными отложениями.

Основными результатами представленной работы являются следующие:

- на основании лабораторных исследований образцов сильвинита и карналлита в условиях длительного одноосного нагружения установлено, что закон Нортона хорошо описывает стадию установившейся ползучести соляных пород;

– по результатам обработки и анализа данных лабораторных исследований породных образцов получены параметры ползучести сильвинита и карналлита, предназначенные для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего горные выработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-45-596011 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Huang X., Yu C. Studies of Hard Interlayer's Influence on the creep deformation of Salt Rock Cavity // Advanced Materials Research. – 2012. – V. 594–597. – P. 452–455. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.594–597.452.
- Li W.J., Han Y.H., Wang T., Ma J.W. DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – V. 46. – P. 38–46. – DOI: 10.1016/j.jngse.2017.07.013.
- Mansouri H., Ajalloeian R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – V. 110. – P. 19–27. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.07.006.
- Zhou H.W., Wang C.P., Han B.B., Duan Z.Q. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48, 1. – P. 116–121. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.004.
- Токсаров В.Н., Морозов И.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 7. – С. 113–124. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.
- Константинова С.А. Методы прогноза и обеспечения устойчивости капитальных выработок в соляных породах : дис. ... д.т.н.: 05.15.04. – Пермь, 1993. – 482 с.: ил.
- Wang G., Zhang L., Zhang Y., Ding G. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behavior of rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – V. 66. – P. 181–187. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.12.013.
- Deng J.Q., Liu Y.R., Yang Q., Cui W., Zhu Y.B., Liu Y., Li B.Q. A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern // Computers and Geotechnics. – 2020. – V. 119. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103288.
- Motta G.E., Pinto C.L. New constitutive equation for salt rock creep // Rem: Revista Escola de Minas. – 2014. – V. 67, № 4. – P. 397–403. – DOI: 10.1590/0370-44672014670165.
- Yu Y.S., Ong C.G., Mottahed P. Viscoelastic finite element analysis in design of potash mines // Engineering Computations. – 1988. – V. 5, № 3. – P. 248–253. – DOI: 10.1108/eb023743.
- Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
- Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 16–28. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.
- Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.