

ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАМЕННОЙ СОЛИ В УСЛОВИЯХ СВЕРХДЛИТЕЛЬНОГО ОДНООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В.А. Агеенко¹, А.А. Скворцов¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru

Аннотация: Каменная соль — практически непроницаемая, мало обводненная геологическая среда с низкокзатратными условиями строительства подземных выработок. Достаточно высокая прочность и большая глубина заложения позволяет строить подземные резервуары большого объема. Наличие большого объема и высокого давления позволяет хранить большое количество активного газа. При строительстве таких резервуаров путем растворения в каменной соли происходит изменение напряженно-деформированного состояния в массиве вокруг выработки, что оказывает влияние на изменение объема выработанного пространства. В процессе эксплуатации происходит конвергенция (уменьшение объема резервуара) под действием горного давления, так как каменная соль обладает ярко выраженными реологическими свойствами. Поэтому одной из основных задач при строительстве резервуаров является расчет их длительной устойчивости. В связи с этим актуальным вопросом является изучение физико-механических свойств каменной соли, и особую роль стоит уделять изменению свойств во времени, так как расчет устойчивости резервуара производится на длительный период его эксплуатации с изменчивой нагрузкой. Срок эксплуатации подземных резервуаров рассчитан на 50 лет. Целью данного исследования было изучение реологических свойств каменной соли в течение длительного периода времени. Уникальностью данных экспериментов является их продолжительность. 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. Эксперименты были проведены в режиме одноосного нагружения образцов с разными осевыми нагрузками в течение 1 года. Представленные эксперименты по изучению реологических свойств каменной соли были опробованы в лабораторных условиях на базе ООО «Газпром геотехнологии».

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

Для цитирования: Агеенко В. А., Скворцов А. А. Изучение реологических свойств каменной соли в условиях сверхдлительного одноосного нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – С. 27–34. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-27-34.

Rheological properties of rock salt under super long-term sustained uniaxial loading

V.A. Ageenko¹, A.A. Skvortsov¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru

Abstract: Rock salt is an almost impermeable, low-moist geological medium offering conditions for low-cost construction of underground openings. Sufficient strength and deep occurrence allows construction of large-volume underground reservoirs. Large volumes available as well as high pressure enable storage of huge quantities of active gas. When such reservoirs are constructed in rock mass by means of dissolution, stresses and strains in rock salt around underground openings change, which transforms mined-out open areas. During operation, convergence (reduction in volume of reservoir) takes place under the action of rock pressure as rock salt possesses pronounced rheological properties. Therefore, one of the major problems in construction of underground reservoirs is their long-term strength analysis. In this connection, an urgent point is to study physical and mechanical properties of rock salt. An emphasis should be laid on the time change in these properties as the reservoir stability is designed for the long-term period of operation under variable loads. The design life of underground reservoirs is 50 years. This study aimed to analyze rheological properties of rock salt within a long period of time. The unique nature of the tests lies in their duration. Russia yet lacks a federal-scale authorized procedure for determination of rheological and plastic properties of salt rocks. It is therefore problematic to select a routine of experiments to determine the rheological properties. We carried out uniaxial compression testing of samples subjected to different axial loads for one year. The experimental data on rheological properties of rock salt were proved in laboratory of Gazprom Geotechnology.

Key words: rock salt testing, creep curves, load mode, experimental creep curve, experimentation duration, geomechanics, volumetric strains, creep prediction time.

For citation: Ageenko V. A., Skvortsov A. A. Rheological properties of rock salt under super long-term sustained uniaxial loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(11):27-34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-27-34.

Введение

Обеспечение устойчивости подземных хранилищ газа (ПХГ) в соляных формациях является необходимым условием их эффективной и безопасной эксплуатации.

Указанная устойчивость определяется качеством соответствующих проектных решений, принятие которых базируется на информации о физико-механических свойствах соляных горных пород вмещающего массива. Получению этой информации, в том числе с учетом реальных термобарических условий в зоне ПХГ, на основе прямых деформационных и косвенных геофизических измерений уделяется постоянное внимание исследователей [1–4]. Среди свойств каменной соли, оказывающих значительное влияние на устойчивость ПХГ, особое место занимают реологические свойства, определение которых наиболее трудоемко и связано с экспериментами в усло-

виях действующих постоянных напряжений.

Для корректного определения параметров ползучести [5] требуется проведение нескольких экспериментов на образцах, схожих по структуре и механическим свойствам, при различных величинах постоянных напряжений.

В настоящее время известно большое количество экспериментальных исследований ползучести горных пород [6, 7], в том числе и в условиях трехосного нагружения. Разработаны различные математические модели, прогнозирующие поведение материала на длительный срок деформирования [8]. Нормативными материалами расчетный срок для горнодобывающих предприятий или строительных объектов определяется 50 годами. Однако большинство экспериментов по определению параметров ползучести имеет продолжительность не более 500 ч. Целью данной работы было проведение

серии экспериментов для определения параметров ползучести [9–11] на схожих по структуре образцах каменной соли в условиях одноосного сжатия при различных напряжениях продолжительностью не менее одного года.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на образцах каменной соли Оренбургского месторождения. Испытывался 21 образец каменной соли, все были схожи по структуре и текстуре. Образцы изготавливались из малозагрязненной каменной соли Оренбургского месторождения высотой 70 мм и диаметром 35 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 длительных испытаний были определены прочностные и деформационные характеристики каменной соли в условиях одноосного нагружения. Данные представлены в таблице.

Выборка была разделена на 7 групп, образцы каждой группы испытывались под одним и тем же напряжением. Таким образом, производилось дублирование эксперимента. Результаты принимались за истинные только в том случае, если они практически совпадали. Результаты экспериментов усреднялись по каждой группе.

Испытания проводились в режиме заданного одноосного напряжения, которое менялось для различных групп от

$0,3 \cdot \sigma_{сж}$ до $0,9 \cdot \sigma_{сж}$ с шагом $0,1 \cdot \sigma_{сж}$. Эксперимент проводился в течение 1 года. В ходе эксперимента производилась одновременная запись продольных ε_1 и поперечных $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ деформаций. Частота записи составляла два раза в сутки первую неделю эксперимента и один раз в сутки со второй недели до конца эксперимента.

Аппаратное и методическое обеспечение

Исследования проводились на гидравлической установке ПРГ-00-000, разработанной специально для испытаний горных пород на ползучесть при одноосном сжатии. Принципиальная гидравлическая схема установки изображена на рис. 1.

Установка ПРГ-00-000 состоит из 7 испытательных секций (на схеме условно показаны две), в каждой из которых осуществляется одновременное нагружение трех образцов породы 1–3 и гидравлической системы нагружения. Нагружение осуществляется от баллонов со сжатым азотом 12–15 и двух-трех баллонов с компрессорным маслом 17 (на схеме условно показан один баллон). Необходимое для испытания давление в рабочих баллонах 12–15 создается с помощью сменного баллона со сжатым азотом 11 с высоким давлением. Компрессорное масло от баллонов 17, нагнетаемое насосом 16, через вентили давления (на чертеже не показаны) поступает на вход каждой испытательной секции (т.е. в гидравлический пресс, состоящий из цилиндра 6 и поршня 5) и передает давление через поршень 5 на образцы 1–3. Рядом с вентилем давления размещен вентиль утечки (на чертеже не

Свойства образцов каменной соли Оренбургского месторождения Properties of rock salt samples from the Orenburg deposit

Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение σ_p , МПа	Модуль деформации E_d , МПа	Модуль упругости E_y , МПа	Плотность, кг/м ³
29,5	3,2	5100	22 300	2150

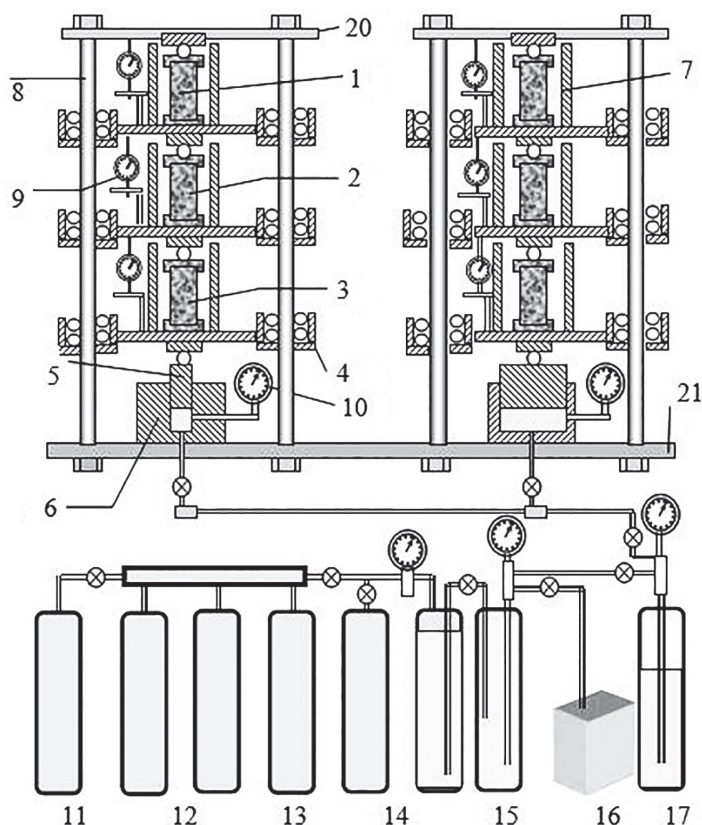


Рис. 1. Принципиальная схема установки ПРГ-00-000

Fig. 1. The schematic diagram of PWG-00-000

показан), снимающий нагрузку при окончании испытаний. Плита, перемещающаяся в процессе деформирования образца, закреплена на раме 8 с помощью подвижного механизма 4. Максимальное перемещение плиты на раме ограничено устройством 7. Продольные и поперечные деформации испытуемых образцов измерялись индикаторами часового типа 9. Давление масла под поршнем измеряется манометром 10. Образцы изолировались от окружающей среды двумя слоями резинового клея. Испытания проводились при комнатной температуре 22–27 °С.

По полученным результатам рассчитывались объемные деформации [12–15] по формуле:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_3. \quad (1)$$

Результаты экспериментов и их обсуждения

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости деформаций образцов от времени при различных напряжениях. Графики зависимости продольных деформаций образцов каменной соли от времени представлены на рис. 2.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что переход в прогрессирующую ползучесть произошел только при напряжении, равном 0,9 от $\sigma_{сж}$. На остальных кривых ползучести можно выделить только затухающую и установившуюся стадии ползучести. Стоит отметить, что переход в прогрессирующую ползучесть [16, 17] при напряжении 0,9 от $\sigma_{сж}$ вызван большими накопленными

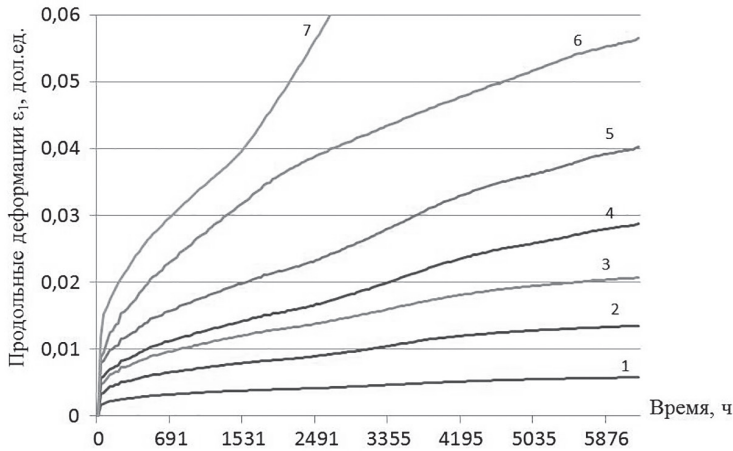


Рис. 2. График зависимости продольных деформаций ε_1 от времени при различных напряжениях: 1 – при $0,3 \cdot \sigma_{сж}$; 2 – при $0,4 \cdot \sigma_{сж}$; 3 – при $0,5 \cdot \sigma_{сж}$; 4 – при $0,6 \cdot \sigma_{сж}$; 5 – при $0,7 \cdot \sigma_{сж}$; 6 – при $0,8 \cdot \sigma_{сж}$; 7 – при $0,9 \cdot \sigma_{сж}$

Fig. 2. Graph of the longitudinal strain ε_1 from time to time at various voltages: 1 – at $0,3 \cdot \sigma_c$; 2 – at $0,4 \cdot \sigma_c$; 3 – at $0,5 \cdot \sigma_c$; 4 – at $0,6 \cdot \sigma_c$; 5 – at $0,7 \cdot \sigma_c$; 6 – at $0,8 \cdot \sigma_c$; 7 – at $0,9 \cdot \sigma_c$

деформациями на установившейся стадии ползучести.

По полученным в ходе эксперимента данным по формуле (1) были рассчитаны объемные деформации ε_v образцов. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

- при напряжении $0,3 \cdot \sigma_{сж}$ образец уплотнялся и не дошел до стадии разуплотнения;
- при остальных напряжениях происходило разуплотнение (важно отметить,

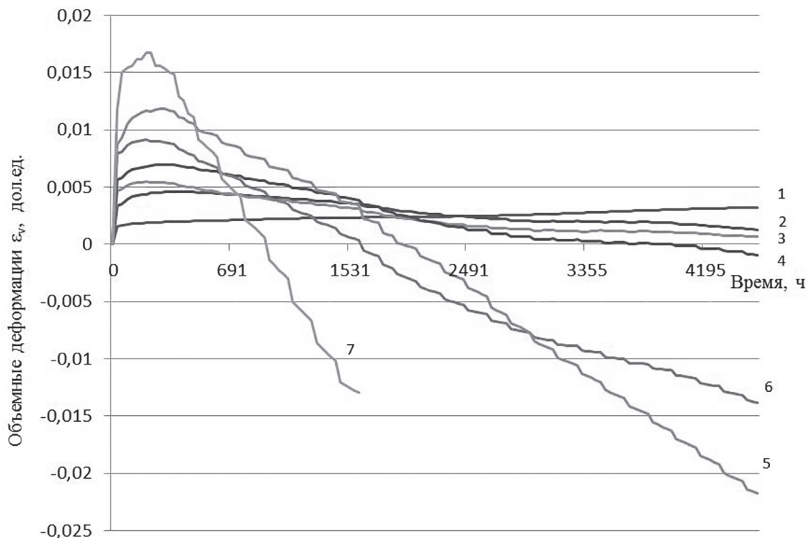


Рис. 3. Графики зависимости объемных деформаций ε_v от времени: 1 – при $0,3 \cdot \sigma_{сж}$; 2 – при $0,4 \cdot \sigma_{сж}$; 3 – при $0,5 \cdot \sigma_{сж}$; 4 – при $0,6 \cdot \sigma_{сж}$; 5 – при $0,7 \cdot \sigma_{сж}$; 6 – при $0,8 \cdot \sigma_{сж}$; 7 – при $0,9 \cdot \sigma_{сж}$

Fig. 3. Graphs of dependence of the volume strains ε_v on time: 1 – at $0,3 \cdot \sigma_c$; 2 – at $0,4 \cdot \sigma_c$; 3 – at $0,5 \cdot \sigma_c$; 4 – at $0,6 \cdot \sigma_c$; 5 – at $0,7 \cdot \sigma_c$; 6 – at $0,8 \cdot \sigma_c$; 7 – at $0,9 \cdot \sigma_c$

что переход в стадию разуплотнения вызван большими значениями накопленных деформаций);

- момент разуплотнения при напряжении $0,8 \cdot \sigma_{сж}$ произошел раньше, чем при напряжении $0,6 \cdot \sigma_{сж}$. При этом в момент перехода в разуплотнение деформации при напряжении $0,8 \cdot \sigma_{сж}$ практически в два раза больше, чем при напряжении $0,6 \cdot \sigma_{сж}$.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

- прогнозирование процесса ползучести каменной соли возможно до момента перехода образца в стадию прогрессирующей ползучести. При больших

напряжениях образец быстро накапливает деформации и переходит в стадию прогрессирующей ползучести, что уменьшает время прогноза ползучести.

- при испытаниях в режиме длительного нагружения образец переходит в стадию разуплотнения даже при минимальных значениях напряжения, чего невозможно отследить, сократив время эксперимента. Этот факт обусловлен накопленными деформациями.

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 изучения реологических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко О. С., Филимонов Ю. Л. Особенности деформирования каменной соли при повышенных температурах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 69–76. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-69-76.
2. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate // Strain, 2002. Vol. 38, Pp. 157–159.
3. Singh A., Kumar C., Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R. Engineering properties of rock salt and simplified closed-form deformation solution for circular opening in rock salt under the true triaxial stress state // Engineering Geology, 2018, 243, 218–230.
4. Шкуратник В. Л., Кравченко О. С., Филимонов Ю. Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 20–26.
5. Singh A., Kumar C., Kannan L. G., Rao K. S., Ayothiraman R. Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107, 243–248.
6. 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.
7. Ильинов М. Д., Карташов Ю. М. Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 207–209.
8. Агеенко В. А. Исследование реологических свойств каменной соли // Известия Уральского государственного горного университета. — 2019. — Вып. 1(53). — С. 115–120.
9. Тавостин М. Н. Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 8. — С. 125–128.
10. Пестренин В. М., Пестренина И. В., Мерзляков А. Ф. Ползучесть образцов каменной соли в опытах на сжатие // Известия вузов. Горный журнал. — 2012. — № 1. — С. 119–124.
11. 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.

12. *Проскураков Н. М., Ливенский В. С., Карташов Ю. М.* Реологические свойства соляных пород / Развитие калийной промышленности: обзорная информация. — М., 1974.
13. *Brandao N. B., Roehl D., Romanel C.* Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks // *Acta Geotechnica*, 2019, 13(6), 1329–1340.
14. *Паньков И. Л., Ударцева А. А.* Экспериментальное изучение деформирования соляных пород при ползучести // *Геология и полезные ископаемые Западного Урала*. — 2011. — № 11. — С. 205–207.
15. *Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б.* Прочность и деформируемость горных пород. — М.: Недра, 1979. — 269 с.
16. *Асанов В. А., Панькова И. Л.* Изучение особенностей деформирования соляных пород при длительном нагружении // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2010. — № 1. — С. 105–110.
17. *Асанова В. А., Панькова И. Л., Аникина В. В.* Деформирование соляных пород при длительном нагружении // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2011. — № 4. — С. 50–56. **ИАС**

REFERENCES

1. Kravchenko O. S., Filimonov Yu. L. Deformation of rock salt under increased temperature. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(1):69-76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-69-76.
2. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate. *Strain*, 2002. Vol. 38, Pp. 157–159.
3. Singh A., Kumar C., Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R. Engineering properties of rock salt and simplified closed-form deformation solution for circular opening in rock salt under the true triaxial stress state. *Engineering Geology*, 2018, 243, 218–230.
4. Spkuratnik V. L., Kravchenko O. S., Filimonov Yu. L. Experimental research of stress and temperature dependences of acoustic emission and rheological characteristics of rock salt. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no 4, pp. 20–26. [In Russ].
5. Singh A., Kumar C., Kannan L. G., Rao K. S., Ayothiraman R. Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 107, 243–248.
6. 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].
7. Il'inov M. D., Kartashov Yu. M. A rapid method for determining the rheological properties of rocks. *Zapiski Gornogo instituta*. 2011. Vol. 190, pp. 207–209. [In Russ].
8. Ageenko V. A. Investigation of rheological properties of rock salt. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2019, no. 1(53), pp. 115–120. [In Russ].
9. Tavostin M. N. The influence of stress state on the rheological properties of rock salt. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2000, no 8, pp. 125–128. [In Russ].
10. Pestrenin V. M., Pestrenina I. V., Merzlyakov A. F. The creep of rock salt samples in experiments on compression. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2012, no 1, pp. 119–124. [In Russ].
11. Koshelev A. E. *Obosnovanie i razrabotka metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv kamennoy soli s uchetom nachal'nogo polya napryazheniy* [Substantiation and development of a method for determining the mechanical properties of rock salt taking into account the initial stress field dissertation], Candidate's thesis, Moscow, 2013, 143 p.
12. Proskuryakov N. M., Livenskiy V. S., Kartashov Yu. M. Rheological properties of salt rocks. *Razvitie kaliynoy promyshlennosti: obzornaya informatsiya* [Development of the potash industry: an overview], Moscow, 1974.
13. Brandao N. B., Roehl D., Romanel C. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. *Acta Geotechnica*, 2019, 13(6), 1329–1340.
14. Pan'kov I. L., Udartseva A. A. Experimental study of deformation of salt rocks under creep. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. 2011, no 11, pp. 205–207. [In Russ].
15. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* [Strength and deformability of rocks], Moscow, Nedra, 1979, 269 p.

16. Asanov V. A., Pan'kova I. L. Study of features of deformation of salt rocks at long loading. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 1, pp. 105–110. [In Russ].

17. Asanova V. A., Pan'kova I. L., Anikina V. V. Deformation of salt rocks under prolonged loading. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2011, no 4, pp. 50–56. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агеенко Валерий Александрович¹ — аспирант, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru,

Скворцов Алексей Александрович¹ — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: a.skvortsov@gazpromgeotech.ru,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Агеенко В.А., e-mail: Valera.ageenko@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Ageenko¹, Graduate Student, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru,

A.A. Skvortsov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: a.skvortsov@gazpromgeotech.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.A. Ageenko, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ОСНОВНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭНЕРГОБАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И КОМПЛЕКСОВ

(№ 1208/11–19 от 22.10.2019; 11 с.)

Пичуев Александр Вадимович¹ — канд. техн. наук, доцент,

Грибкова Ольга Сергеевна¹ — аспирант,

Дьячков Николай Борисович¹ — канд. техн. наук, старший преподаватель,

¹ НИТУ «МИСиС».

Рассмотрены основные методические принципы определения составляющих энергобаланса технологических установок и комплексов, включая технологический расход электроэнергии и составляющих потерь в различных элементах электротехнического комплекса. Приведены обобщенные энерготехнологические характеристики для отдельных наиболее энергоемких электроустановок. В качестве примеров приведены полученные в результате исследования зависимости составляющих электробалансов подъемных и компрессорных установок, а также оценка эффективности работы технологических агрегатов с помощью коэффициента полезного действия.

Ключевые слова: энергетический баланс, потери энергии, энергоэффективность, полезный расход электроэнергии.

BASIC METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF DETERMINATION OF COMPONENTS OF ENERGY BALANCE OF TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS AND COMPLEXES

A.V. Pichuev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, O.V. Gribkova¹, Graduate Student,

N.B. Dyachkov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,

¹ National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

The article deals with the basic methodological principles of determining the components of the energy balance of technological installations and complexes, including technological power consumption and component losses in various elements of the electrical complex. The generalized energy-technological characteristics for some of the most energy-intensive electrical installations are given. As examples the dependences of components of electric balances of lifting and compressor installations received as a result of research, and also an estimation of efficiency of work of technological units by means of efficiency factor are resulted.

Key words: energy balance, energy losses, energy efficiency, useful energy consumption.