

## К ОЦЕНКЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД

А.А. Барях<sup>1</sup>, А.А. Ударцев<sup>1</sup>, И.Л. Паньков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: bar@mi-perm.ru

**Аннотация:** Проведен комплекс лабораторных испытаний образцов сильвинита, карналлита и каменной соли, отобранных на шахтных полях Верхнекамского месторождения солей, включающий эксперименты на одноосное сжатие при мгновенном и длительном режиме нагружения. По результатам испытаний построены полные диаграммы деформирования и кривые ползучести, определены основные механические и реологические параметры деформирования соляных пород. Установлен характер влияния уровня нагружения образцов на скорость установившейся ползучести. Предложен ускоренный метод определения предела длительной прочности соляных пород, основанный на построении расчетной кривой длительной прочности по скорости установившейся ползучести. При этом время разрушения соляных образцов определяется по критическим деформациям на пределе остаточной прочности. Применение данной методики позволяет сократить время длительных испытаний до 5–7 дней. Построены расчетные кривые длительной прочности для всех литотипов исследуемых пород. Для сильвинитовой породы установлена зависимость изменения предела длительной прочности от отношения высоты образцов к их ширине. Данные результаты использованы для оценки допустимой степени нагружения междукамерных целиков. Показано, что для «высоких» междукамерных целиков допустимое значение степени их нагружения должно быть снижено по отношению к регламентированным величинам.

**Ключевые слова:** соляные породы, междукамерные целики, реологические испытания, одноосная ползучесть, предел длительной прочности, скорость установившейся ползучести, ускоренные методы, допустимая степень нагружения целиков.

**Благодарность:** Экспериментальные исследования проводились на оборудовании ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН. Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

**Для цитирования:** Барях А. А., Ударцев А. А., Паньков И. Л. К оценке длительной прочности соляных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 5–22. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_5.

### Estimating long-term strength in salt rocks

A.A. Baryakh<sup>1</sup>, A.A. Udartsev<sup>1</sup>, I.L. Pankov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences,  
Perm, Russia, e-mail: bar@mi-perm.ru

---

**Abstract:** A package of lab-scale tests of sylvinitic, carnallite and rock salt sampled in mines of the Upper Kama (Verkhnekamensk) deposit were carried out, including uniaxial instantaneous and long-term compression. Using the test data, the complete diagrams of deformation and the creep curves were plotted, and the main mechanical and rheological parameters of rock salt deformation were determined. It is found how the load level affects the stationary creep rate in the test samples. A rapid method is proposed for determining long-term strength of salt rocks by plotting a theoretical curve of the long-term strength as function of the stationary creep rate. The destruction time of the test salt rock samples is defined by the critical strains at the limit of the residual strength. The use of the method allows reducing the testing time to 5–7 days. The theoretical curves of the long-term strength are plotted for all lithological types of salt rocks. For sylvinitic, the long-term strength is correlated with the height-to-width ratio of the test samples. The results are used to estimate the allowable loading rate for rib pillars. It is shown that for «high» pillars, the allowable loading rate should be lower than the specified standard values.

**Key words:** salt rocks, rib pillars, rheological tests, uniaxial creep, long-term strength limit, stationary creep rate, rapid methods, allowable loading rate of pillars.

**Acknowledgements:** The tests used equipment of the Material and Substance Research Shared Equipment Center at the Perm Research Center of the Ural Branch, RAS. The study was carried out within the framework of a large research project and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, Agreement No. 075-15-2024-535 or 23.04.2024.

**For citation:** Baryakh A. A., Udartsev A. A., Pankov I. L. Estimating long-term strength in salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11):5-22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_5.

---

## Введение

Соляные породы относятся к классу геоматериалов с выраженным проявлением реологических свойств [1–3]. Эти свойства определяют поведение несущих элементов камерной системы разработки, которые при освоении калийных и соляных месторождений должны обеспечить сохранность водозащитной толщи на весь срок службы рудников [4–6].

При камерной системе разработки основной грузонесущей конструкцией являются междукамерные целики. В горной практике их устойчивость определяется степенью нагружения  $C$ , которая характеризуется отношением действующей на целик нагрузки к его несущей способности [7]. В частности, для условий самого крупного в России Верхне-

камского месторождения солей (ВКМС) степень нагружения междукамерных целиков регламентируется на уровне предела длительной прочности («Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей»):  $C \leq [C] = 0,3 - 0,4$  ( $[C]$  — нормативное значение степени нагружения). В этом случае целики должны сохранять свою устойчивость бесконечно длительное время. В реальных условиях это, конечно, не достигается: вследствие постепенного обрушения пород кровли изменяется коэффициент формы целиков, снижается их прочность и увеличивается степень нагружения [8]. Еще один фактор, косвенно связанный с рег-

ламентацией нормативной степени нагружения целиков, оказывает влияние на оценку их устойчивости во времени. Так, считается, что коэффициент формы при определении мгновенной и длительной прочности одинаков. Вместе с тем фактические наблюдения показывают, что при одной и той же степени нагружения «высокие» целики разрушаются быстрее «низких» [9]. Таким образом, исследование реологических свойств соляных пород в условиях длительного нагружения, включая оценки предела их длительной прочности, является важным аспектом обеспечения безопасности горных работ и защиты калийных и соляных рудников от затопления.

Прямой метод определения предела длительной прочности пород основывается на испытаниях образцов в режиме ползучести при различных уровнях нагружения и доведения их до стадии прогрессирующего деформирования [10, 11]. К достоинствам прямых реологических исследований можно отнести достоверность получаемых результатов, а к недостаткам — большие временные и трудовые затраты, что ограничивает возможность его применения в массовых испытаниях. В этой связи на практике зачастую используют косвенные или ускоренные методы определения реологических свойств горных пород. В настоящее время известно несколько десятков методов определения предела длительной прочности, которые постоянно развиваются и дополняются новыми подходами. Большой обзор ускоренных методов для различных горных пород представлен в работе [12], где все косвенные методы разделены на две большие группы.

Методы первой группы, например, такие как метод ползучести [13], метод ступенчатого нагружения [14, 15] или метод релаксации напряжений [16], могут длиться от нескольких суток до не-

скольких месяцев. При этом определение предела длительной прочности осуществляется с помощью экстраполяции полученных результатов.

Ко второй группе косвенных методов можно отнести вибрационный метод [17], метод объемных деформаций [18] или звуковые методы [19, 20], не требующие экстраполяции опытных данных. Время проведения таких экспериментов относительно небольшое — от нескольких минут до нескольких часов. Оценка предела длительной прочности основывается на исследовании закономерностей процесса микро-трещинообразования.

Оценить преимущества того или иного метода весьма затруднительно, поскольку большинство опытов проводилось на различных литотипах пород с применением разных режимов и схем нагружения. Немногочисленные эксперименты, проводимые на одной и той же горной породе, показали, что различные косвенные методы дают не всегда одинаковые значения предела длительной прочности.

Анализ результатов определения предела длительной прочности соляных пород показал, что мнения авторов по поводу влияния коэффициента формы (отношения высоты образцов  $h$  к их ширине  $b$ ) на длительную прочность различны. Например, в работе [21] П. Кноль установил, что каждому отношению соответствует свой предел длительной прочности. Напротив, из работы [22] следует, что предел длительной прочности каинитовой руды не зависит от  $h/b$  и составляет примерно 65% от кратковременной прочности.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что разработка относительно достоверного метода определения предела длительной прочности соляных пород, а также оценка влияния на этот показатель отношения  $h/b$  является крайне важной в практическом плане задачей.

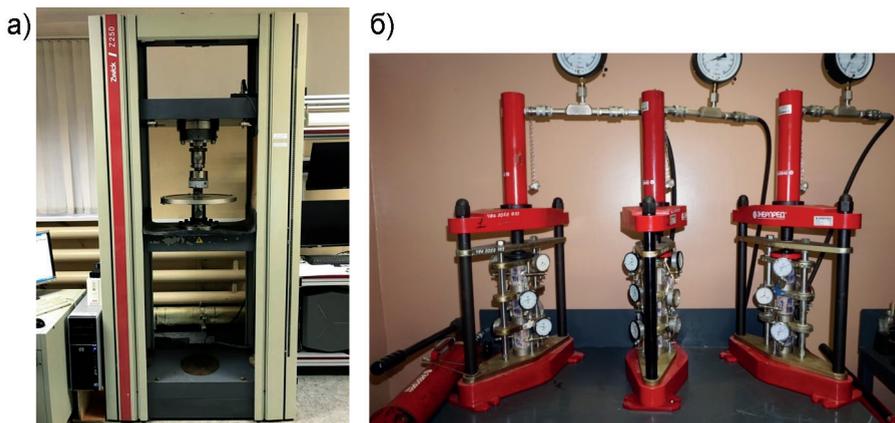


Рис. 1. Оборудование для проведения мгновенных и длительных испытаний: электромеханический пресс Zwick/Z250 (а); реологические установки (б)

Fig. 1. Equipment for conducting instant and long-term tests: electromechanical press Zwick/Z250 (a); rheological units (b)

### Методика проведения экспериментальных исследований

Для решения поставленных задач выполнялся комплекс экспериментов, включающих мгновенные и длительные испытания при одноосном сжатии. Исследования производились на образцах соляных пород в соответствии с действующими стандартами испытаний в условиях режима сухого трения между образцом и плитами пресса.

Мгновенные испытания выполнялись с использованием пресса фирмы Zwick/

Roel (рис. 1, а), обеспечивающего жесткий режим нагружения с возможностью получения до- и запредельных показателей деформирования. Испытания проводились при скорости деформирования 1,0 мм/мин до полного разрушения образцов. Измерение продольных деформаций осуществлялось по перемещению траверсы пресса (между торцами образца).

Длительные испытания в условиях одноосного сжатия проводились на реологических гидравлических прессах, позволяющих одновременно испытывать

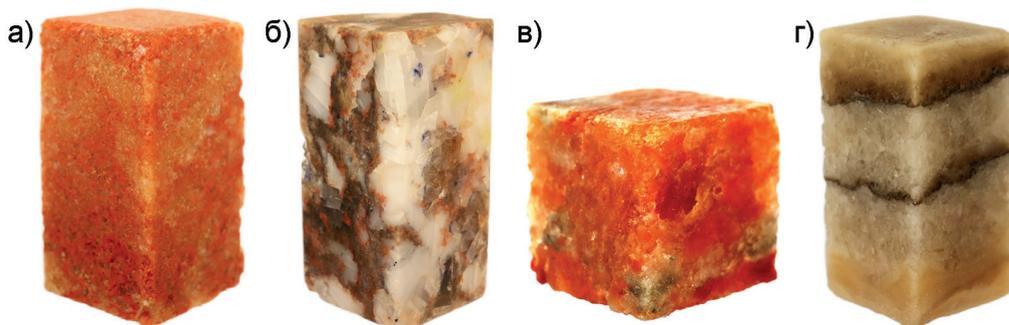


Рис. 2. Образцы, изготовленные из породных монолитов: сальвинит красный ( $h/b = 2,0$ ) (а); сальвинит пестрый ( $h/b = 2,0$ ) (б); карналлит ( $h/b = 1,0$ ) (в); каменная соль ( $h/b = 2,0$ ) (г)

Fig. 2. Samples made from rock monoliths: red sylvinit ( $h/b = 2,0$ ) (a); variegated sylvinit ( $h/b = 2,0$ ) (b); carnallite ( $h/b = 1,0$ ) (v); rock salt ( $h/b = 2,0$ ) (g)

до трех образцов при постоянной нагрузке (рис. 1, б). С целью исключения влияния влажности во время испытаний образцы герметизировались с помощью тонкой полиэтиленовой оболочки. Измерение продольных деформаций осуществлялось двумя симметрично установленными индикаторами часового типа.

Экспериментальные исследования проводились на образцах красного и пестрого сильвинита, карналлита и каменной соли, изготовленных из породных монолитов, отобранных на шахтных по-

лях ВКМС (см. рис. 2). Образцы сильвинита представляли собой прямоугольные призмы с основанием  $35 \times 35$  мм и отношением  $h/b$ , составляющим: 2,0; 1,5 и 1,0. Образцы каменной соли также имели прямоугольную форму с отношением  $h/b = 2,0$ . Для образцов карналлита, в связи с его низкими прочностными свойствами, была выбрана кубическая форма с размером ребра 70 мм. При изготовлении образцов соблюдались требования по параллельности их торцевых поверхностей.

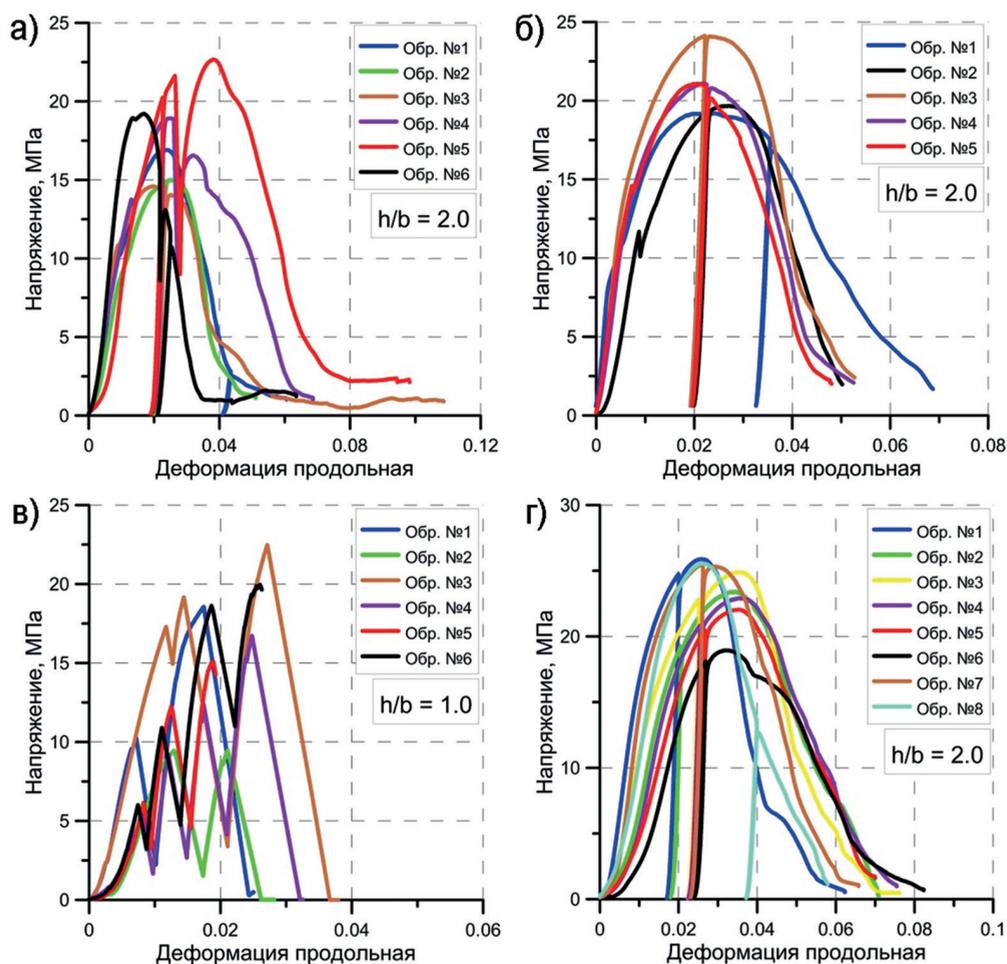


Рис. 3. Диаграммы деформирования соляных пород: сильвинит красный (а); сильвинит пестрый (б); карналлит (в); каменная соль (г)

Fig. 3. Deformation diagrams of salt rocks: red sylvinite (a); variegated sylvinite (b); carnallite (v); rock salt (g)

Таблица 1

**Осредненные значения прочностных и деформационных показателей соляных пород**  
**Average values of strength and deformation indicators of salt rocks**

Порода	$h/b$	Кол. шт.	$\sigma_{np}$ , МПа	$\varepsilon_{np}$ , %	$D_{np}$ , ГПа	$D_y$ , ГПа	$E$ , ГПа	$M_c$ , ГПа	$W_v$ , Дж/м <sup>3</sup>	$\varepsilon_{ост}$ , %
Сильвинит красный	1,0	4	31,27	5,92	0,53	1,07	9,54	0,37	5,21	9,31
	1,5	4	23,81	3,32	0,72	1,62	11,82	0,76	1,41	6,55
	2,0	6	17,89	2,13	0,92	2,06	10,15	1,32	0,59	4,53
Сильвинит пестрый	1,0	5	29,64	3,91	0,76	1,63	12,62	0,25	3,55	8,66
	1,5	5	22,15	2,55	0,88	2,28	13,34	0,91	0,99	5,66
	2,0	5	21,03	2,14	0,99	3,61	13,54	1,34	0,72	4,50
Карналлит	1,0	6	17,05	1,84	0,94	1,88	—	—	0,22	2,74
Каменная соль	2,0	8	23,63	2,53	0,96	1,85	17,49	1,28	0,84	5,51

**Результаты и анализ проведенных исследований**

По результатам мгновенных испытаний строились полные диаграммы деформирования для каждого типа пород (рис. 3), используемые для определения следующих прочностных и деформационных показателей: предел прочности при одноосном сжатии ( $\sigma_{np}$ ), разрушающая деформация ( $\varepsilon_{np}$ ), секущий модуль деформации ( $D_{np}$ ), касательный модуль деформации ( $D_y$ ), модуль упругости ( $E$ ), модуль спада ( $M_c$ ), удельная энергоёмкость ( $W_v$ ) и остаточная деформация ( $\varepsilon_{ост}$ ), соответствующая остаточной прочности. Общее количество испытанных образцов составило 43 шт. Полученные прочностные и деформационные показатели соляных пород приведены в табл. 1.

Сравнительный анализ результатов мгновенных испытаний сильвинита, каменной соли и карналлита показал, что наибольшая прочность характерна для образцов подстилающей каменной соли, которой присущи также более высокие значения разрушающей и остаточной деформации. Низкие прочностные свойства соответствуют образцам карналлитовой породы, разрушение которых проходило в хрупком режиме. Также установлено, что с уменьшением высоты

сильвинитовых образцов значения предела прочности, удельной энергоёмкости, разрушающей и остаточной деформаций — увеличиваются, а значения модулей деформации — уменьшаются.

Длительные испытания соляных пород на ползучесть осуществлялись при следующих нагрузках:

- сильвинит —  $0,2\sigma_{np} \div 0,8\sigma_{np}$ ;
- карналлит —  $0,2\sigma_{np} \div 0,6\sigma_{np}$ ;
- каменная соль —  $0,5\sigma_{np} \div 0,8\sigma_{np}$ .

Максимальное время проведения экспериментов для красного сильвинита составило 65 дней, для пестрого сильвинита — 89 дней, для карналлита — 37 дней, для каменной соли — 45 дней. Общее количество испытанных образцов — 153 шт.

По результатам экспериментов строились кривые ползучести в координатах «продольная деформация — время», определялась скорость относительных деформаций на стадии установившейся ползучести ( $\dot{\varepsilon}$ ) и оценивался коэффициент длительной прочности ( $K_{\infty} = \sigma_{\infty} / \sigma_{np}$ , где  $\sigma_{\infty}$  — предел длительной прочности, МПа), определяющий уровень нагружения, выше которого происходит переход образца в прогрессирующую стадию деформирования. Характерные кривые ползучести для образцов сильвинита,

карналлита и каменной соли приведены на рис. 4.

Результаты определения скорости установившейся ползучести в зависимости от уровня приложенной нагрузки представлены в табл. 2.

Результаты испытаний на ползучесть показали, что все образцы сильвинита с нагрузкой  $0,3\sigma_{np}$  и большая часть образцов с нагрузкой  $(0,4-0,45)\sigma_{np}$  со временем переходили в затухающую стадию деформирования, для образцов карналлита затухающая ползучесть наб-

людалась только при нагрузке 0,2 от предела прочности на одноосное сжатие, а для образцов, изготовленных из каменной соли, развитие деформаций во времени носило затухающий характер при уровне нагружения, равном 0,5. Следовательно, коэффициент длительной прочности для сильвинитовых пород варьируется в диапазоне от 0,4 до 0,45, для карналлитовых пород этот показатель находится в пределах от 0,2 до 0,3, а для каменной соли — в интервале от 0,5 до 0,6.

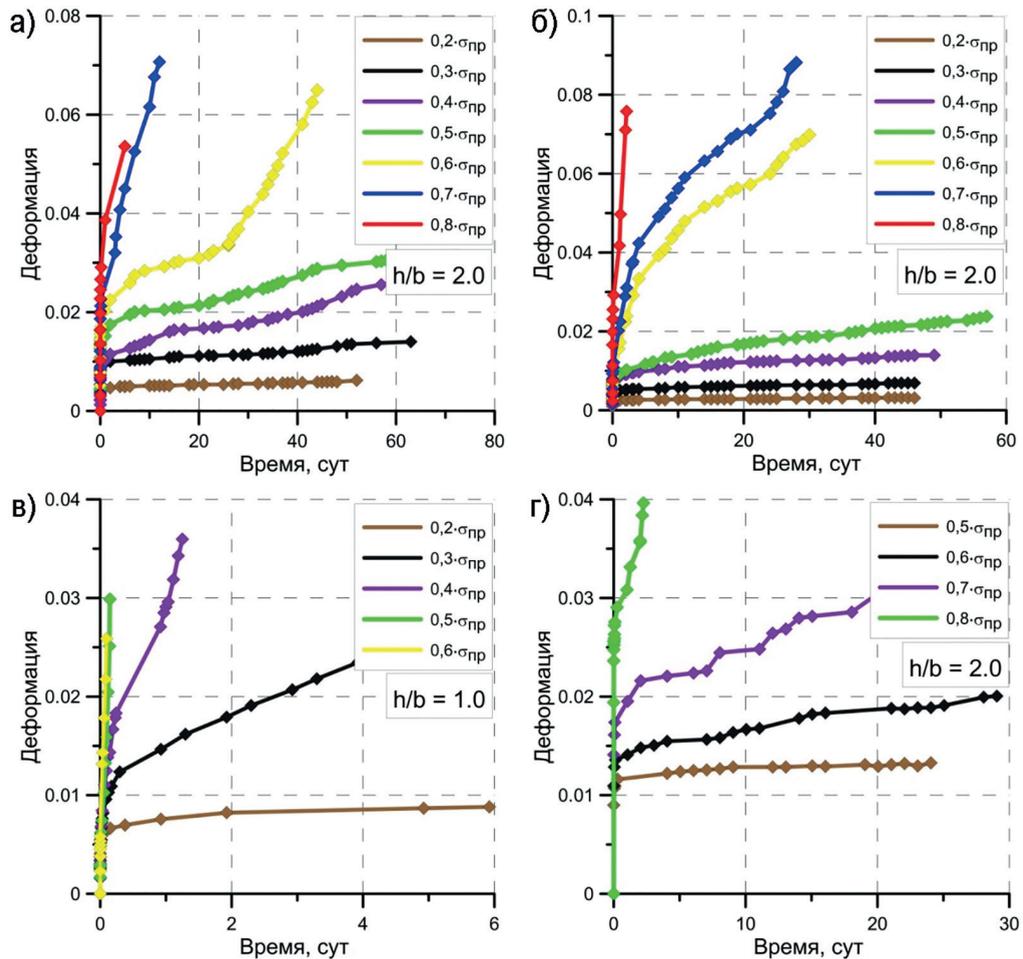


Рис. 4. Характерные кривые ползучести соляных пород: сильвинит красный (а); сильвинит пестрый (б); карналлит (в); каменная соль (г)

Fig. 4. Characteristic creep curves of salt rocks: red sylvinitite (a); variegated sylvinitite (b); carnallite (v); rock salt (g)

Таблица 2

**Средние скорости установившейся ползучести соляных образцов ( $\dot{\epsilon}_{cp}$ ),  $10^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$**   
**Average steady-state creep rates of salt samples ( $\dot{\epsilon}_{cp}$ ),  $10^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$**

Порода	h/b	Уровни нагружения						
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
		Количество испытанных образцов						
		3	3	3	3	3	3	3
Сильвинит красный	1,0	0,373	0,638	3,573	12,204	19,919	31,992	101,674
	1,5	0,121	0,182	0,79	1,521	6,057	9,906	27,809
	2,0	0,031	0,093	0,201	0,913	1,455	2,301	7,268
Сильвинит пестрый	1,0	0,090	0,257	1,689	3,778	11,184	24,249	61,287
	1,5	0,093	0,159	0,684	1,935	3,773	9,822	30,100
	2,0	0,043	0,121	0,183	0,448	2,172	3,745	8,490
Карналлит	1,0	0,252	1,63	28,394	96,83	448,108	—	—
Каменная соль	2,0	—	—	—	0,114	0,349	0,653	3,294

Анализ скоростей относительных деформаций на стадии установившейся ползучести показал более интенсивный характер деформирования во времени образцов карналлита по сравнению с образцами сильвинита и каменной соли. При уровнях нагрузки 0,5 и 0,6 скорости установившейся ползучести карналлита превосходят аналогичные скорости красного сильвинита в 10–20 раз. Также установлено, что скорость деформирования сильвинита на установившейся стадии увеличивается с уменьшением высоты образца.

#### **Ускоренный метод оценки предела длительной прочности**

Анализ полученных экспериментальных данных и результатов исследований других авторов показал, что:

- процессы деформирования и разрушения соляных пород при кратковременном и длительном режиме нагружения качественно похожи [23];
- скорость установившейся ползучести горных пород зависит от уровня их нагружения [24, 25];
- при превышении уровня нагружения определенных значений выход на

прогрессирующую стадию разрушения происходит при конкретных деформациях, постоянных для каждого типа горных пород [24–26].

Вышеизложенные особенности деформирования горных пород при длительном нагружении легли в основу метода построения кривых длительной прочности, базирующегося на оценках скорости установившейся ползучести и критической деформации разрушения.

Сущность метода базируется на следующем:

- определение критических деформаций, при достижении которых образцы переходят в стадию прогрессирующей ползучести или разрушаются;
- определение времени разрушения образцов по скорости установившейся ползучести;
- корректировка действующего на образец уровня нагружения;
- построение расчетной кривой длительной прочности и описание полученных экспериментальных данных аналитическим выражением.

Анализ результатов длительных испытаний соляных пород позволил установить, что в большинстве случаев при

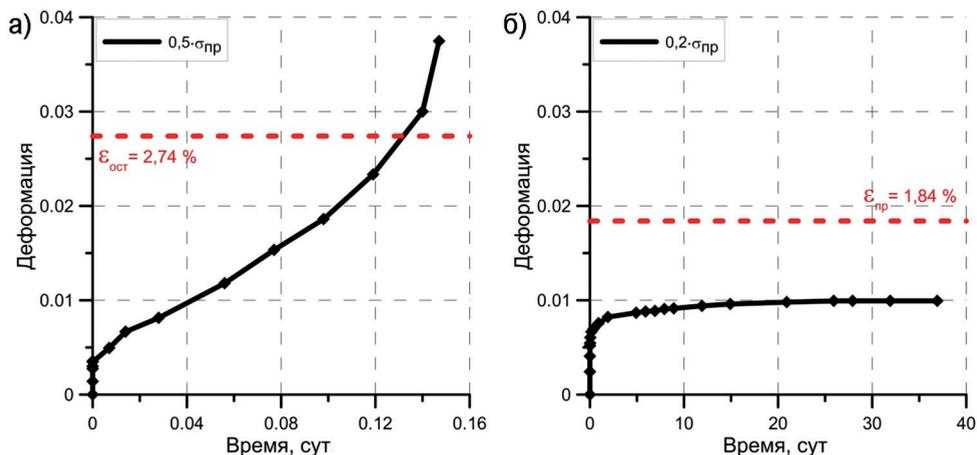


Рис. 5. Кривые ползучести карналлита с выходом на прогрессирующую (а) и затухающую (б) стадию  
 Fig. 5. Creep curves of carnallite with the emergence of the progressive (a) and decaying (b) stages

достижении деформациями ползучести значений, соответствующих деформациям остаточной прочности, происходит резкое увеличение скорости деформирования образцов с переходом на стадию разрушения. В этой связи за критические принимались деформации, соответствующие деформациям остаточной прочности, определяемые при мгновенных испытаниях ( $\epsilon_{ост}$ ).

Кроме этого, стоит отметить, что деформации образцов, переходивших в затухающую стадию, не превышали деформаций на пределе прочности ( $\epsilon_{пр}$ ), определяемых также по мгновенным диаграммам деформирования.

На рис. 5 в качестве примера приведены кривые ползучести карналлита с явным выходом в затухающую и прогрессирующую стадию деформирования.

Время разрушения образцов вычислялось при помощи экстраполяции стадии установившейся ползучести до критических деформаций ( $\epsilon_{ост}$ ). На рис. 6 представлена схема определения времени разрушения образцов соляных пород, которая оценивается по формуле

$$t_p = \frac{\epsilon_{ост} - P}{\dot{\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{ост}$  — остаточная деформация, соответствующая остаточной прочности;

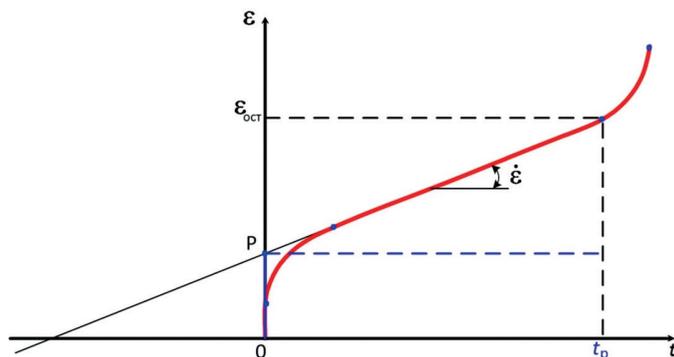


Рис. 6. Схема определения времени разрушения соляных образцов  
 Fig. 6. Scheme for determining the destruction time of salt samples

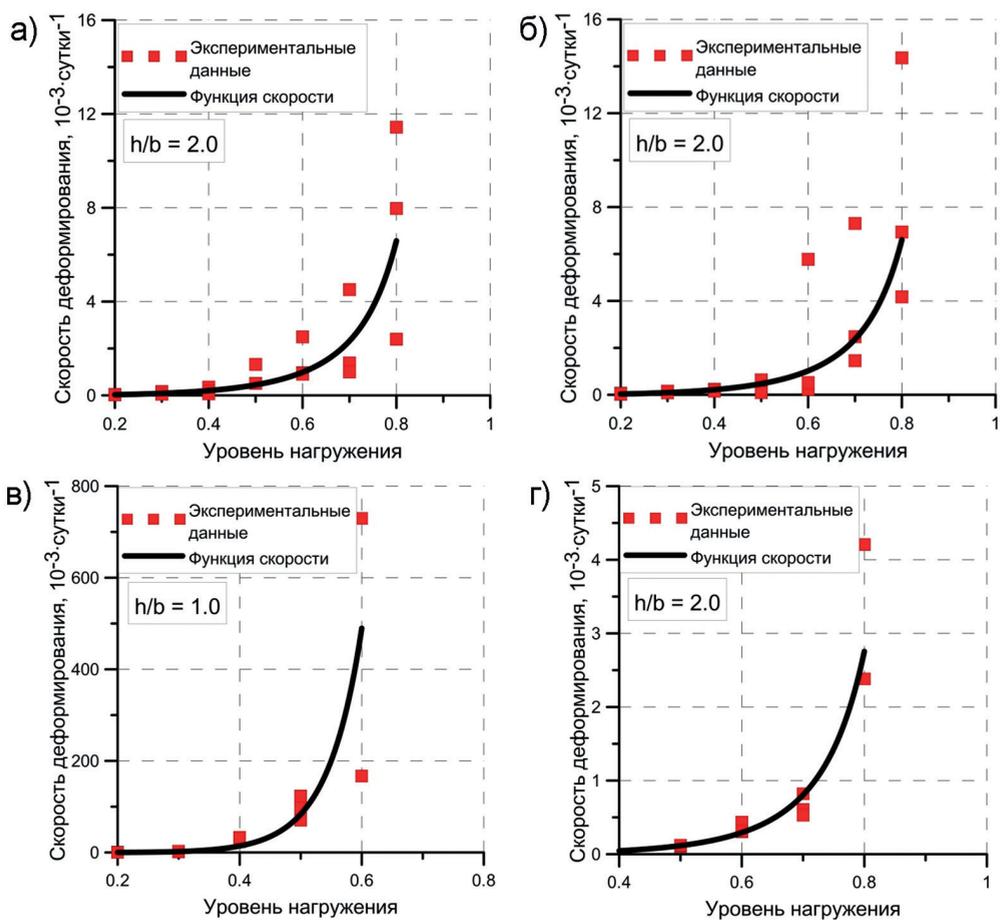


Рис. 7. Экспериментальные зависимости изменения скорости установившейся ползучести от уровня нагружения соляных пород: сильвинит красный (а); сильвинит пестрый (б); карналлит (в); каменная соль (г)

Fig. 7. Experimental dependences of the change in the rate of steady-state creep on the loading level of salt rocks: red sylvinit (a); variegated sylvinit (b); carnallite (v); rock salt (g)

$P$  — деформация, соответствующая точке пересечения прямой линии, аппроксимирующей стадию установившейся ползучести, с осью ординат;  $\dot{\epsilon}$  — скорость установившейся ползучести каждого в отдельности соляного образца.

В связи с разбросом значений предела прочности на одноосное сжатие уровень действующего нагружения для каждого образца корректировался по усредненным экспериментальным зависимостям изменения скорости установившейся ползучести от нагрузки (рис. 7),

аппроксимированным степенным уравнением:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \left( \frac{K}{1-K} \right)^n, \quad (2)$$

где  $K = \sigma/\sigma_{пр}$  — уровень нагрузки;  $\sigma$  — действующее на образец напряжение, МПа;  $A$  и  $n$  — параметры аппроксимации, значения которых приведены в табл. 3.

Для вычисления скорректированного уровня нагружения необходимо преобразовать выражение (2) к следующему виду:



Рис. 8. График линейной функции (6) (••• – экспериментальные точки, перестроенные в координатах « $1/(1-K) - 1/t_p^{0.7}$ »)

Fig. 8. Graph of the linear function (6) (••• – experimental points rearranged in coordinates « $1/(1-K) - 1/t_p^{0.7}$ »)

$$K = \frac{\sqrt[n]{\frac{\dot{\varepsilon}}{A}}}{\left(1 + \sqrt[n]{\frac{\dot{\varepsilon}}{A}}\right)} \quad (3)$$

$$K = 1 - (1 - K_\infty) \cdot \frac{t_p^{0.7}}{t_p^{0.7} + B} \quad (4)$$

где  $B$  – параметр аппроксимации.

Для вычисления коэффициента длительной прочности и параметра аппроксимации  $B$  необходимо провести следующие преобразования:

1. Выражение (4) приводится к виду

$$\frac{1}{1 - K_\infty} + \frac{B}{1 - K_\infty} \cdot \frac{1}{t_p^{0.7}} = \frac{1}{1 - K} \quad (5)$$

Таблица 3

**Результаты определения параметров аппроксимации функции скорости и коэффициентов длительной прочности**

**Results of determining the parameters of the approximation of the speed function and the coefficients of long-term strength**

Порода	$h/b$	Кол-во образцов, шт.	$A \cdot 10^{-3}$	$n$	$K_\infty$	$B$	$\sigma_\infty$ , МПа
Сильвинит красный	1,0	21	5,18	2,13	0,434	1,042	13,57
	1,5	21	1,61	2,08	0,402	2,795	9,57
	2,0	21	0,45	1,94	0,392	5,930	7,01
Сильвинит пестрый	1,0	21	2,76	2,47	0,450	1,500	13,34
	1,5	21	1,31	2,03	0,414	2,911	9,17
	2,0	21	0,47	1,90	0,411	5,716	8,64
Карналлит	1,0	15	83,59	4,36	0,259	0,203	4,42
Каменная соль	2,0	12	0,12	2,28	0,518	8,373	12,24

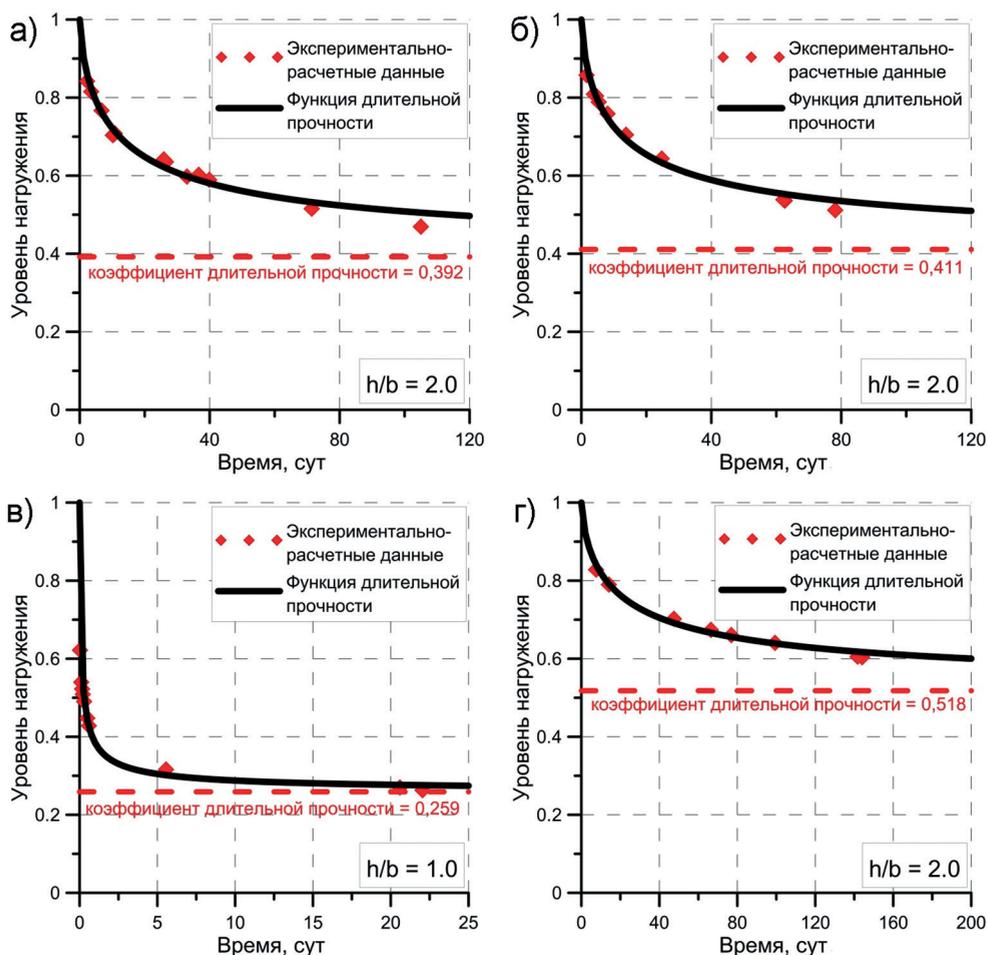


Рис. 9. Экспериментально-расчетные кривые длительной прочности, описанные функцией (4): сильвинит красный (а); сильвинит пестрый (б); карналлит (в); каменная соль (г)  
 Fig. 9. Experimentally calculated curves of long-term strength described by function (4): red silvinit (a); variegated silvinit (b); carnallite (v); rock salt (g)

2. Строится график прямой линии:

$$y = a \cdot x + c, \quad (6)$$

где  $y = 1/(1 - K)$ , а  $x = 1/t_p^{0.7}$ , пример представлен на рис. 8.

3. Определяется тангенс угла наклона (а) и точка пересечения прямой с осью ординат (с) и вычисляются искомые параметры:

$$K_{\infty} = \frac{c-1}{c}, B = \frac{a}{c}. \quad (7)$$

Результаты определения коэффициента длительной прочности и параметра  $B$ , а также предела длительной прочности для всех исследуемых типов образцов представлены в табл. 3. Пример расчетных кривых длительной прочности соляных пород, описанных функцией (4), показан на рис. 9.

Анализ полученных кривых длительной прочности (рис. 9) показал их удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, что позволяет

использовать уравнения (4) – (7) при расчете коэффициента длительной прочности соляных пород.

Кроме этого, стоит отметить, что стадия установившейся ползучести реализуется уже на третьи – пятые сутки проведения длительных экспериментов, что подтверждается исследованиями других авторов [27]. Аналогичное явление наблюдается и на образцах, переходивших в затухающую стадию деформирования. В этой связи время проведения длительных испытаний можно сократить до 5 – 7 дней.

### Оценка влияния формы междукамерных целиков на предел длительной прочности

Результаты проведенных исследований позволили установить, что с уменьшением высоты сильвинитовых образцов происходит увеличение предела длительной прочности. Аналогичная зависимость прослеживается и для коэффициента длительной прочности. В целом, полученный вывод согласуется с ранее проведенными исследованиями по выявлению влияния формы соляных образ-

цов на коэффициент длительной прочности.

С целью детального изучения данного явления был проведен анализ результатов определения предела длительной прочности, включая предыдущие исследования, часть которых изложена в работе [28], на образцах сильвинита с отношением  $h/b$ , равным: 2,5; 2,0; 1,75; 1,5; 1,25; 1,0; 0,75; 0,6; 0,5 и 0,4. Общее количество испытанных образцов составило более 200 шт.

Анализ полученных результатов подтвердил, что на величину предела длительной прочности соляных пород, так же как на предел мгновенной прочности, оказывает влияние отношение высоты образца  $h$  к его ширине  $b$ . Рассмотрим приложение этих исследований к оценке долговременной устойчивости междукамерных целиков.

В соответствии с действующими нормативными документами («Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей») стандартный коэффициент фор-

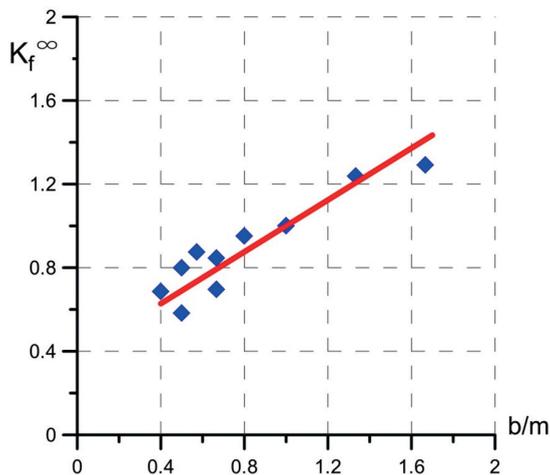


Рис. 10. Изменение коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения  $b/m$

Fig. 10. Change in the shape factor for the ultimate tensile strength from the ratio  $b/m$

мы  $K_f$  определяет несущую способность междукамерных целиков в зависимости от отношения его ширины  $b$  к высоте  $m$ . С учетом этого показателя производится вычисление расчетной степени нагружения целиков  $C$ . Как отмечалось выше, нормативная (допустимая) степень нагружения целиков  $[C]$ , по сути, является аналогом коэффициента длительной прочности. Выполнение условия  $C \leq [C]$  теоретически свидетельствует о долговременной устойчивости целиков. Исторически, по крайней мере на ВКМС, междукамерные целики характеризовались отношением  $b/m$ , как правило, превышающим 1 («низкие» целики). Допустимая степень их нагружения принималась директивно на основании натуральных наблюдений без учета коэффициента формы. В этой связи естественным является допущение, что  $[C] = 0,3 - 0,4$  соответствует квадратным в сечении целикам ( $b/m = 1$ ).

В настоящее время имеют место варианты параметров системы разработки с отношением  $b/m < 1$  («высокие» целики). В соответствии с результатами лабораторных реологических испытаний по аналогии с прочностным коэффициентом формы ( $K_f$ ) введем понятие коэффициента формы для предела длительной прочности:

$$K_f^\infty = \frac{\sigma_\infty}{\sigma_\infty|_{b/h=1,0}}, \quad (8)$$

где  $\sigma_\infty|_{b/h=1,0}$  — предел длительной прочности для целиков квадратной формы.

Принимая, что при  $b/m = 1$   $K_f^\infty = 1$ , можно построить зависимость изменения коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения ширины целика к высоте (рис. 10), которая аппроксимируется линейной функцией:

$$K_f^\infty = 0,62 \left( \frac{b}{m} \right) + 0,38 \quad \text{при } b/m < 1. \quad (9)$$

Выражение (9) может использоваться в виде показателя, корректирующего допустимую степень нагружения междукамерных целиков. В частности, для условий ВКМС базовый критерий расчета междукамерных целиков с отношением  $b/m < 1$  запишется следующим образом:

$$C \leq K_f^\infty [C] \quad \text{при } b/m < 1. \quad (10)$$

В соотношении (10) корректирующий коэффициент  $K_f^\infty$ , по сути, означает, что допустимая степень нагружения «высоких» междукамерных целиков меньше, чем «низких». Так, например, для междукамерных целиков с отношением  $b/m = 0,5$  расчетная степень нагружения должна быть  $C \leq 0,69[C] = 0,21 - 0,28$ . Другими словами, для обеспечения их длительного устойчивого состояния требуется снижение действующей нагрузки, которое при прочих равных условиях достигается увеличением ширины целиков либо уменьшением ширины очистных камер.

### Заключение

Выполнен комплекс лабораторных испытаний образцов сильвинита, карналлита и каменной соли, отобранных на шахтных полях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, включающий эксперименты на одноосное сжатие при мгновенном и длительном режимах нагружения. Получены следующие основные результаты.

1. Деформирование карналлита во времени протекает более интенсивно, чем сильвинита и каменной соли. Выявлена тенденция повышения скорости относительных деформаций на стадии установившейся ползучести для сильвинитовых пород при уменьшении высоты образца.

2. Разработан метод определения коэффициента длительной прочности соля-

ных пород, основанный на построении расчетной кривой длительной прочности по скорости установившейся ползучести и критическим деформациям на пределе остаточной прочности. Его использование позволяет сократить время длительных испытаний до 5–7 дней.

3. Для условий Верхнекамского месторождения солей обоснована величина коэффициента формы для предела длительной прочности, которая используется для корректировки допустимой степени нагружения междукамерных целиков на участках шахтных полей ВКМС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеенко В. А. Исследование реологических свойств каменной соли // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 1(53). – С. 115–120. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-115-120.

2. Осипов Ю. В., Вознесенский А. С. Определение реологических свойств бишофита по данным трехосных испытаний // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 6. – С. 15–26. DOI: 10.15372/FTPRPI20220602.

3. Abedi F., Moosavi M., Bahroudi A., Moazenian A. Effect of solid impurity on creep behavior of salt rocks of the Hormoz formation // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2020, vol. 54, no. 2, pp. 161–166.

4. Шокин Ю. П. О нарушениях сплошности подработанной водозащитной толщи на калийных рудниках // Горный журнал. – 2019. – № 1. – С. 70–75. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.15.

5. Qin X. S., Cao H., Guo L. J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep stope of underground salt mine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002.

6. Majeed Y., Abbas N., Emad M. Z. Stability evaluation of room-and-pillar rock salt mines by using a flat jack technique – A case study // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2023, vol. 123, no. 6. DOI: 10.17159/2411-9717/1872/2023.

7. Барях А. А., Ломакин И. С., Самоделькина Н. А., Тенисон Л. О. Оценка степени нагружения междукамерных целиков при отработке двух пластов на Верхнекамском месторождении солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_5.

8. Барях А. А., Лобанов С. Ю., Ломакин И. С. Анализ изменения степени нагружения междукамерных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 70–82.

9. Паньков И. Л., Аникин В. В., Бельтюков Н. Л., Евсеев А. В., Кузьминых В. С., Ломакин И. С., Морозов И. А., Токсаров В. Н., Ударцев А. А. Изучение деформирования и разрушения соляных пород для разработки методов геомеханической оценки устойчивости грузонесущих элементов камерной системы разработки калийных месторождений // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 3. – С. 14–24. DOI: 10.7242/2658-705X/2022.3.2.

10. Wang J., Zhang Q., Song Z., Feng S., Zhang Y. Nonlinear creep model of salt rock used for displacement prediction of salt cavern gas storage // Journal of Energy Storage. 2022, vol. 48, article 103951. DOI: 10.1016/j.est.2021.103951.

11. Lyu C., Liu J., Ren Y., Liang C., Liao Y. Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 146, article 104873. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104873.

12. Титов Б. В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Березники: ВНИИГ, Уральский филиал, 1983. – 18 с.

13. Firme P. A., Brandao N. B., Roehl D., Romanel C. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks // Acta Geotechnica. 2018, vol. 13, no. 6, pp. 1329–1340. DOI: 10.1007/s11440-018-0689-7.

14. Wang G., Zhang L., Zhang Y., Ding G. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behaviour of rock salt // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, vol. 66, pp. 181 – 187. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2013.12.013.

15. Осипов Ю. В., Вознесенский А. С. Исследование реологических свойств горных пород в экспериментах по ступенчатому нагружению цилиндрических образцов // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2022. – Т. 63. – № 2(372). – С. 197–206. DOI: 10.15372/RMTF20220219.

16. Константинова С. А., Аптуков В. Н., Мерзляков А. Ф. Влияние геометрии образца на скорость кратковременной релаксации и ползучести сильвинита, карналлита и каменной соли // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2013. – № 1(41). – С. 13 – 15.

17. Карташов Ю. М. Методические указания по ускоренным вибрационным испытаниям слабых горных пород на ползучесть. – Л.: ВНИМИ, 1967. – 36 с.

18. Кошелев А. Е. Обоснование и разработка метода определения механических свойств каменной соли с учетом начального поля напряжений: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 24 с.

19. Бельтюков Н. Л. Исследование параметров акустической эмиссии при испытании соляных пород в режиме ползучести / Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сборник научных трудов. Вып. 15. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2017. – С. 131 – 134.

20. 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. DOI: 10.15372/FTPRPI20190403.

21. Knoll P. Beitrag zum einfluß der zeit auf die verformung und den bruch von salzgestein. Leipzig, 1973, 91 p.

22. Рыженьков А. М. Влияние высоты образцов калийной руды Стебниковского месторождения на их длительную прочность и параметры ползучести при одноосном сжатии // *Физические процессы горного производства: Межвузовский сборник*. – 1975. – № 2. – С. 43–45.

23. Ударцев А. А., Паньков И. Л. Изучение характера деформирования сильвинита в условиях одноосного сжатия при различных режимах нагружения // *Горное эхо*. – 2022. – № 4(89). – С. 54–59. DOI: 10.7242/echo.2022.4.9.

24. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 175 с.

25. Ставрогин А. Н. Экспериментальные исследования ползучести и долговечности горных пород / Исследование реологических свойств грунтов. Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л., 1968. – 228 с.

26. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

27. Агеенко В. А. Обоснование оптимальных параметров экспресс-метода определения характеристик ползучести каменной соли: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2020. – 25 с.

28. Паньков И. Л. Обоснование допустимой степени нагружения целиков пласта KpII / Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2008 г. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009. – С. 69–71. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Ageenko V. A. Study of rheological properties of rock salt. *News of the Ural State Mining University*. 2019, no. 1(53), pp. 115 – 120. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-115-120.

2. Osipov Yu. V., Voznesensky A. S. Determination of rheological properties of bischofite from tri-axial tests. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 6, pp. 15 – 26. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220602.

3. Abedi F., Moosavi M., Bahroudi A., Moazenian A. Effect of solid impurity on creep behavior of salt rocks of the Hormoz formation. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2020, vol. 54, no. 2, pp. 161 – 166.

4. Shokin Yu. P. On discontinuities in the underworked water-protective layer at potash mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 70 – 75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.15.

5. Qin X. S., Cao H., Guo L. J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep stope of underground salt mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002.
6. Majeed Y., Abbas N., Emad M. Z. Stability evaluation of room-and-pillar rock salt mines by using a flat jack technique — A case study. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023, vol. 123, no. 6. DOI: 10.17159/2411-9717/1872/2023.
7. Baryakh A. A., Lomakin I. S., Samodelkina N. A., Tenison L. O. Loading of rib pillars in multiple seam mining at the Upper Kama salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 5–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_5.
8. Baryakh A. A., Lobanov S. Y., Lomakin I. S. Analysis of time-to-time variation of load on inter-chamber pillars in mines of the Upper Kama potash salt deposit. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no. 4, pp. 70–82. [In Russ].
9. Pankov I. L., Anikin V. V., Beltyukov N. L., Evseev A. V., Kuzminykh V. S., Lomakin I. S., Morozov I. A., Toksarov V. N., Udartsev A. A. Study of deformation and destruction of salt rocks for development of methods of geomechanical assessment of stability of load-bearing elements of chamber system of development of potash deposits. *Perm Federal Research Center Journal*. 2022, no. 3, pp. 14–24. [In Russ]. DOI: 10.7242/2658-705X/2022.3.2.
10. Wang J., Zhang Q., Song Z., Feng S., Zhang Y. Nonlinear creep model of salt rock used for displacement prediction of salt cavern gas storage. *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 48, article 103951. DOI: 10.1016/j.est.2021.103951.
11. Lyu C., Liu J., Ren Y., Liang C., Liao Y. Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 146, article 104873. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2021.104873.
12. 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, 18 p.
13. Firme P. A., Brandao N. B., Roehl D., Romanel C. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. *Acta Geotechnica*. 2018, vol. 13, no. 6, pp. 1329–1340. DOI: 10.1007/s11440-018-0689-7.
14. Wang G., Zhang L., Zhang Y., Ding G. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behaviour of rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, vol. 66, pp. 181–187. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2013.12.013.
15. Osipov Yu. V., Voznesenskii A. S. Investigation of the rheological properties of rocks in experiments on stepwise loading of cylindrical samples. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2022, vol. 63, no. 2(372), pp. 197–206. [In Russ]. DOI: 10.15372/PMTF20220219.
16. Konstantinova S. A., Aptukov V. N., Merzlyakov A. F. Influence of sample geometry on the rate of short-term relaxation and creep of sylvinit, carnallite and rock salt. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013, no. 1(41), pp. 13–15. [In Russ].
17. Kartashov Yu. M. *Metodicheskie ukazaniya po uskorennyim vibratsionnym ispytaniyam slabyykh gornykh porod na polzuchest'* [Guidelines for accelerated vibration testing of weak rocks for creep], Leningrad, VNIMI, 1967, 36 p.
18. 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, 24 p.
19. Beltyukov N. L. Study of acoustic emission parameters during testing of salt rocks in creep mode. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 15* [Strategy and processes of development of georesources: Collection of scientific papers. Issue 15], Perm, GI UrO RAN, 2017, pp. 131–134.
20. Shkuratnik V. L., Kravchenko O. S., Filimonov Y. L. Stresses and temperature affecting acoustic emission and rheological characteristics of rock salt. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 4, pp. 20–26. DOI: 10.15372/FTPRP120190403.
21. Knoll P. *Beitrag zum einfluß der zeit auf die verformung und den bruch von salzgestein*. Leipzig, 1973, 91 p.
22. Ryzhenkov A. M. Effect of the height of potash ore samples from the Stebnikovskoye deposit on their long-term strength and creep parameters under uniaxial compression. *Fizicheskie protsessy gornogo proizvodstva: Mezhvuzovskiy sbornik*. 1975, no. 2, pp. 43–45. [In Russ].

23. Udartsev A. A., Pankov I. L. Study of the nature of sylvinite deformation under uniaxial compression under various loading conditions. *Gornoe ekho*. 2022, no. 4(89), pp. 54–59. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.4.9.

24. Erzhanov Zh. S. *Teoriya polzuchesti gornyx porod i ee prilozheniya* [Theory of rock creep and its applications], Alma-Ata, Nauka, 1964, 175 p.

25. Stavrogin A. N. Experimental studies of rock creep and durability. Study of the rheological properties of soils. *Issledovanie reologicheskikh svoystv gruntov. Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike* [Proceedings of the coordination meetings on hydraulic engineering], Leningrad, 1968, 228 p.

26. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Prochnost' i deformiruemost' gornyx porod* [Strength and deformability of rocks], Moscow, Nedra, 1979, 269 p.

27. Ageenko V. A. *Obosnovanie optimal'nykh parametrov ekspress-metoda opredeleniya kharakteristik polzuchesti kamennoy soli* [Justification of the optimal parameters of the express method for determining the creep characteristics of rock salt], Candidate's thesis, Moscow, 2020, 25 p.

28. Pankov I. L. Justification of the permissible degree of loading of pillars of the KrII formation. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: Materialy ezhegodnoy nauchnoy sessii Gornogo instituta UrO RAN po rezul'tatam NIR v 2008 g.* [Strategy and processes of development of georesources: Proceedings of the annual scientific session of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the results of research in 2008], Perm, GI UrO RAN, 2009, pp. 69–71. [In Russ].

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барях Александр Абрамович<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
академик РАН, руководитель  
научного направления «Горные науки»,  
e-mail: bar@mi-perm.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2737-6166,

Ударцев Артем Александрович<sup>1</sup> — младший  
научный сотрудник,  
e-mail: udartsev@mi-perm.ru,

Паньков Иван Леонидович<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: ivpan@mi-perm.ru,

<sup>1</sup> Горный институт Уральского отделения РАН.

**Для контактов:** Барях А.А., e-mail: bar@mi-perm.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Baryakh<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),  
Academician of Russian Academy of Sciences,  
e-mail: bar@mi-perm.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2737-6166,

A.A. Udartsev<sup>1</sup>, Junior Researcher,  
e-mail: udartsev@mi-perm.ru,

I.L. Pankov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher, e-mail: ivpan@mi-perm.ru,

<sup>1</sup> Mining Institute of Ural Branch,  
Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Baryakh, e-mail: bar@mi-perm.ru

Получена редакцией 12.06.2024; получена после рецензии 19.07.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 12.06.2024; received after the review 19.07.2024; accepted for printing 10.10.2024.