

ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ

И.А. Морозов¹, И.Л. Паньков², В.Н. Токсаров²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, e-mail: imorozov.work@yandex.ru

² Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

Аннотация: Представлено исследование напряженно-деформированного состояния пород, вмещающих одиночные горные выработки, пройденные в сильвинитовом пласте на глубине 1100 м. Вблизи кровли выработок залегают ангидритовые и ангидрит-доломитовые породы, вблизи почвы — карналлитовые. Основные результаты получены по данным математического моделирования. Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов в программном комплексе «ANSYS» с использованием упруго-вязко-пластической модели среды. Параметрическое обеспечение модели выполнено на основе лабораторных исследований породных образцов. По данным инструментальных наблюдений за характером деформирования горных выработок в натуральных условиях проведена верификация модели. Численные эксперименты выполнены на примере одиночной горной выработки с овально-арочной формой поперечного сечения шириной 6,0 м и высотой 3,7 м. Установлено, что устойчивость одиночной горной выработки, пройденной в соляных породах, определяется положением ее поперечного сечения относительно слабых карналлитовых пород, залегающих вблизи почвы, и прочных ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений, залегающих вблизи кровли выработки. Получены зависимости для оценки размеров областей запредельного деформирования вмещающих горные выработки пород. Показано, что существует оптимальная мощность соляных пород, отделяющих кровлю выработки от ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений. По результатам анализа величин смещений породного контура в зависимости от времени установлено, что близкое залегание ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород к кровле выработки, пройденной в соленосных отложениях, изменяет характер деформирования породного контура. Полученные результаты предназначены для научного сопровождения проектирования горных выработок.

Ключевые слова: соляные породы, ползучесть соляных пород, критерий Кулона-Мора, горные выработки в соляных породах, устойчивость горных выработок, свойства соляных пород, свойства ангидритовых пород, свойства ангидрит-доломитовых пород, смещение контура горной выработки.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г., а также при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-45-590004.

Для цитирования: Морозов И. А., Паньков И. Л., Токсаров В. Н. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 36–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.

Stability of underground openings in salt rock masses

I.A. Morozov¹, I.L. Pankov², V.N. Toksarov²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: imorozov.work@yandex.ru

² Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract: The study analyzes stresses and strains in rock mass enclosing single underground openings in sylvinitic bed at a depth of 1100 m. The roof of the stopes is closely spaced with anhydrite and anhydrite–dolomite rocks, and the floor rocks include carnallite layers. The mathematical modeling was performed by the finite element method analysis of an elasto-visco-plastic model of rock mass in ANSYS. The source parameters of the models were obtained in the lab-scale testing of rock samples. The model was verified using the in-situ instrumental observations of deformation in underground openings. The numerical experiments are implemented for a single stope with an oval arched cross-section 6.0 m wide and 3.7 m high. It is found that stability of a single stope in salt rock mass is conditioned by its cross-section position relative to weak carnallite layer in the floor and strong anhydrite and anhydrite–dolomite layer in the roof. The relations for sizing the post-limiting deformation zones in enclosing rock mass are obtained. It is shown that there exists an optimal thickness of salt rocks to separate the stope roof from anhydrite and anhydrite–dolomite layers. The displacement analysis of exposed rock surface versus time reveals that close-spaced occurrence of anhydrite and anhydrite–dolomite rocks relative to the roof of a stope driven in rock salt changes the behavior of deformation of exposed rock surface. The obtained results are meant for the scientific support of underground mine planning and design.

Key words: salt rocks, salt rock creep, Mohr–Coulomb criterion, underground openings in salt rocks, underground opening stability, rock salt properties, anhydrite rock properties, anhydrite–dolomite rock properties, stope boundary displacements.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation within the framework of State Contract No. 075-03-2021-374 dated December 29, 2020, as well as by the Russian Foundation for Basic Research and the Perm Krai Government, Project No. 19-45-590004.

For citation: Morozov I. A., Pankov I. L., Toksarov V. N. Stability of underground openings in salt rock masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(9):36-47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.

Введение

Работа выполнена на примере Гремячинского месторождения калийных солей, которое располагается на юго-западе Волгоградской области в 170 км от г. Волгограда и содержит около 1,2 млрд т полезного ископаемого, подсчитанного по категории С2 [1]. Промышленное значение имеет пласт сильвинита мощностью от 2 до 20 м, зале-

гающий на глубине от 1100 до 1300 м. Особенность месторождения заключается не только в большой глубине ведения горных работ, но и в залегании вблизи контура выработок пород с резко отличающимися прочностными и деформационными характеристиками: вблизи почвы сильвинитового пласта залегают слабые карналлитовые породы, а вблизи кровли — прочные ангид-

ритовые и ангидрит-доломитовые отложения [2, 3].

Ранее, в работе [2], были представлены результаты исследования деформирования горных выработок в условиях месторождения, полученные по данным инструментальных наблюдений на 8 замерных станциях. Высокая стоимость, трудоемкость и продолжительность натуральных наблюдений обуславливают ограниченный объем экспериментальных данных, что требует проведения дополнительных исследований для выявления характерных особенностей деформирования породного массива в рассматриваемых условиях. Поэтому целью настоящей работы является проведение численных экспериментов для оценки устойчивости одиночных горных выработок в соляных породах Гремячинского рудника с учетом результатов натуральных и лабораторных исследований [2, 4].

Основные этапы численного моделирования

Реализация математической модели выполнена в постановке плоского деформированного состояния. На рис. 1 приведена расчетная схема к задаче о напряженно-деформированном состоянии породного массива, вмещающей одиночную горную выработку, выполненная на примере одного из экспериментальных участков, по которому были получены результаты инструментальных наблюдений, представленные в работе [2].

Одиночная горная выработка влияет на напряженное состояние вмещающего породного массива в пределах $3 \div 5$ характерных размеров выработки [5]. Учитывая размеры поперечного сечения экспериментальных выработок, пройденных комбайном Урал-20Р (ширина — 6,0 м, высота — 3,7 м), размеры расчетной области составляли 18×30 м.

На основании натуральных исследований, выполненных в горных выработках в соляных породах месторождения, исходное поле напряжений в ненарушенном массиве принималось гидростатическим: $\sigma_x = \sigma_y = \gamma H = 24$ МПа, $t_{xy} = 0$ [6]. Указанная величина напряжений соответствует глубине заложения экспериментальных выработок, которая составляет около 1100 м [2].

В связи с тем, что особенность соляных пород заключается в их способности интенсивно деформироваться с течением времени (явление ползучести), то для исследования напряженно-деформированного состояния массива пород,

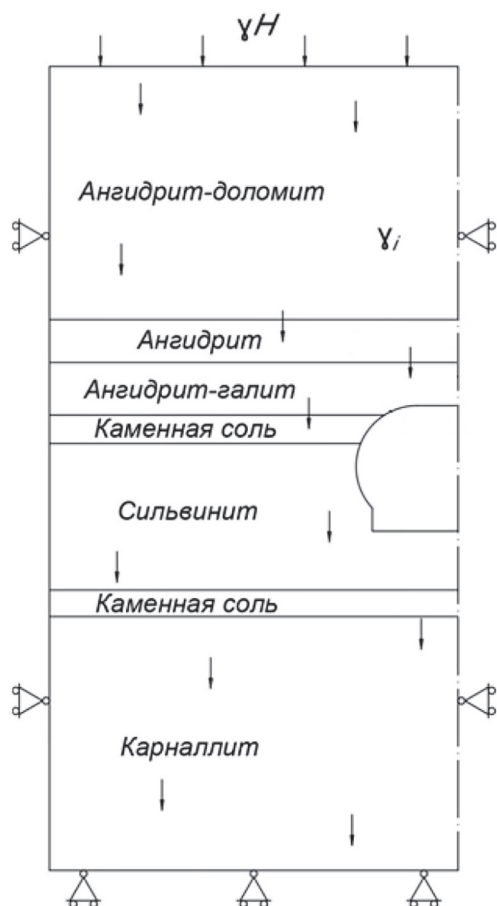


Рис. 1. Расчетная схема
Fig. 1. Calculation scheme

вещающего одиночную горную выработку, использовалась упруго-вязкопластическая модель среды, численная реализация которой была выполнена методом конечных элементов в программном комплексе «ANSYS» в 2 этапа с применением макрокоманд.

Для месторождения характерна большая глубина ведения горных работ, поэтому следует ожидать перехода части приконтурных пород в момент проходки выработки в запредельное состояние. Для определения размеров нарушенных зон, формирующихся в момент проходки, на 1-м этапе моделирования решалась упругопластическая задача. Связь между напряжениями и деформациями на допредельной стадии деформирования в рамках принятой модели описывалась законом Гука.

Для сжимающих напряжений переход пород в предельное состояние определялся по критерию Кулона-Мора [7]:

$$\tau_{np} = C + \sigma_n \operatorname{ctg} \varphi, \quad (1)$$

где C — коэффициент сцепления, МПа; σ_n — напряжения нормальные к площадке действия предельных (максимальных) касательных напряжений, МПа; φ — угол внутреннего трения.

В главных напряжениях критерий (1) имеет вид:

$$\sigma_3 = -(S + \sigma_1 \operatorname{ctg} \psi), \quad (2)$$

где

$$S = 2C \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \quad \operatorname{ctg} \psi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

В области растягивающих напряжений предельная поверхность ограничивалась прочностью при одноосном растяжении:

$$\sigma_1 = \sigma_p, \quad (3)$$

где σ_p — прочность при одноосном растяжении, МПа.

Считалось, что конечный элемент перешел в запредельное состояние, если величины главных напряжений, вычис-

ленные по закону Гука, превышали предельно допустимые значения. При этом для описания поведения конечных элементов, перешедших в запредельное состояние, также использовалась упругая модель среды, но с пониженными значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Вычислительный процесс продолжался до тех пор, пока конфигурация нарушенных зон не достигала окончательных (постоянных) размеров.

На 2-м этапе численного моделирования исследовалось изменение во времени напряженно-деформированного состояния массива, вмещающего одиночную горную выработку. Связь между напряжениями и деформациями для ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород описывалась законом Гука. При этом для соляных пород использовалась вязкоупругая модель среды.

На сегодняшний день существуют математические модели, учитывающие все три стадии ползучести соляных пород: неустановившуюся, установившуюся и прогрессирующую ползучесть. С некоторыми из этих моделей можно ознакомиться в работах [8–10]. Основным недостатком указанных моделей заключается в сложности их параметрического обеспечения, что подразумевает необходимость проведения длительных лабораторных экспериментов продолжительностью в отдельных случаях до нескольких месяцев и даже лет [11–13]. При этом в ходе длительного нагружения соляных пород нередко возникают случаи, когда периоды с возрастающей скоростью деформирования сменяются периодами с уменьшающейся скоростью, что также осложняет обработку и анализ экспериментальных данных [11, 14].

С учетом выше изложенного, а также данных работ [15, 16], связь скорости деформации ползучести соляных пород $\dot{\varepsilon}^{cr}$ с соответствующей величи-

Характеристики пород Гремячинского месторождения
Rock characteristics of the Gremyachinskoe deposit

Порода	D , ГПа	μ	k , МПа ^{-n} сут ⁻¹	n	σ_p , МПа	C , МПа	ϕ , °	γ , 10 ⁴ Н/м ³
Ангидрит-доломит	6,8	0,24	—	—	4,3	11,6	39	2,8
Ангидрит	5,3	0,24	—	—	2,8	8,1	37	2,8
Ангидрит-галит	1,2	0,30	$1,32 \cdot 10^{-13}$	6,5	1,7	9,4	29	2,4
Каменная соль	1,2	0,30	$1,32 \cdot 10^{-13}$	6,5	1,7	9,4	29	2,2
Сильвинит	1,0	0,30	$2,12 \cdot 10^{-13}$	6,5	1,4	7,5	29	2,2
Карналлит	1,1	0,38	$1,82 \cdot 10^{-12}$	5,9	0,6	3,6	18	2,2

D – модуль деформации; μ – коэффициент Пуассона; k – коэффициент ползучести; n – показатель ползучести; σ_p – предел прочности на растяжение; C – коэффициент сцепления; ϕ – угол внутреннего трения; γ – удельный вес

ной напряжения σ (МПа) определялась законом Нортонa:

$$\dot{\epsilon}^{cr} = k(\sigma)^n, \quad (4)$$

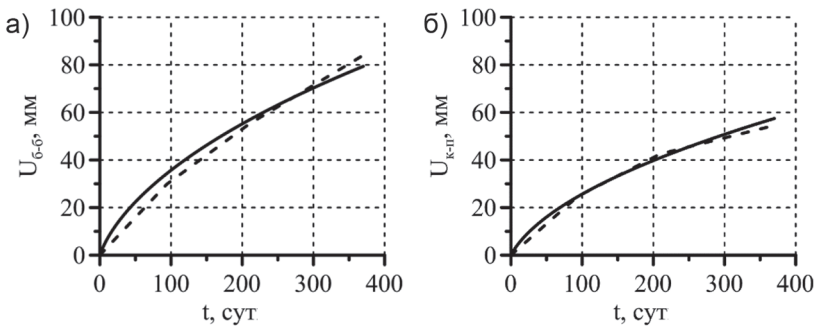
где k – коэффициент ползучести, МПа^{- n} ·с⁻¹; n – показатель ползучести.

Параметрическое обеспечение принятой модели среды выполнялось на основе результатов выполненных лабораторных исследований, а также данных работ [5, 17]. Комплекс лабораторных исследований образцов пород включал следующие типы испытаний: условно-мгновенное одноосное и трехосное сжатие, испытания на растяжение, а также исследования соляных пород в режиме длительного нагружения, с некоторыми результатами которых можно ознакомиться в работе [4].

В таблице представлены принятые значения характеристик пород Гремячинского месторождения. Указанные величины приведены с учетом выполненной верификации модели.

На примере одного из экспериментальных участков, геологическое строение которого представлено на рис. 1, была выполнена верификация модели. На рис. 2 приведены результаты расчета горизонтальной (U_{6-6}) и вертикальной ($U_{к-п}$) конвергенции, а также данные натурных наблюдений, более подробно с которыми можно ознакомиться в работе [2].

На основании анализа рис. 2 можно сделать вывод о том, что принятая математическая модель с параметрами, представленными в таблице, дает ре-



--- данные натурных наблюдений; — результаты математического моделирования

Рис. 2. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) конвергенция в зависимости от времени

Fig. 2. Relationship of horizontal (a) and vertical (b) mining convergence on time

зультаты, которые хорошо согласуются с данными инструментальных наблюдений за рассматриваемый период времени.

Дальнейшие численные эксперименты также выполнялись для случая одиночной горной выработки с овально-арочной формой поперечного сечения, пройденной комбайном Урал-20Р (ширина — 6,0 м, высота — 3,7 м) в промышленном (сильвинитовом) пласте на глубине 1100 м. В связи с тем, что породы каменной соли и сильвинита обладают близкими значениями показателей физико-механических свойств, результаты моделирования получены на примере типового геологического разреза, представленного сверху вниз: ангидрит-доломитом, ангидритом, сильвинитом и карналлитом.

Результаты исследования и их анализ

Влияние мощности буферного слоя в почве на состояние вмещающих выработки пород

Здесь и далее под буферным слоем будем понимать породную пачку, представленную однородными соляными по-

родами (за исключением карналлитовых) и отделяющую почву выработки от карналлитовых пород, кровлю — от ангидритовых и ангидрит-доломитовых.

На рис. 3 представлены результаты численных экспериментов по исследованию влияния мощности буферного слоя в почве выработки ($h_{п.б.}$) на формирование зон запредельного деформирования во вмещающих выработку породах. Мощность буферного слоя в кровле ($h_{к.б.}$) считалась постоянной: $h_{к.б.} = 3,5$ м.

Размеры нарушенных зон определялись по нормали, восстановленной к контуру выработки, отдельно для вмещающих пород кровли, почвы, боков выработки.

Установлено, что мощность буферного слоя в почве практически не оказывает влияния на образование зон запредельного деформирования в стенках и кровле выработок, размеры которых в момент проходки составляют, соответственно, около 1,4 и 1,5 м (рис. 3). При этом предельный размер нарушенной зоны в почве выработки, представленной однородными сильвинитовыми породами, в рассматриваемых условиях в момент проходки составляет 2,3 м.

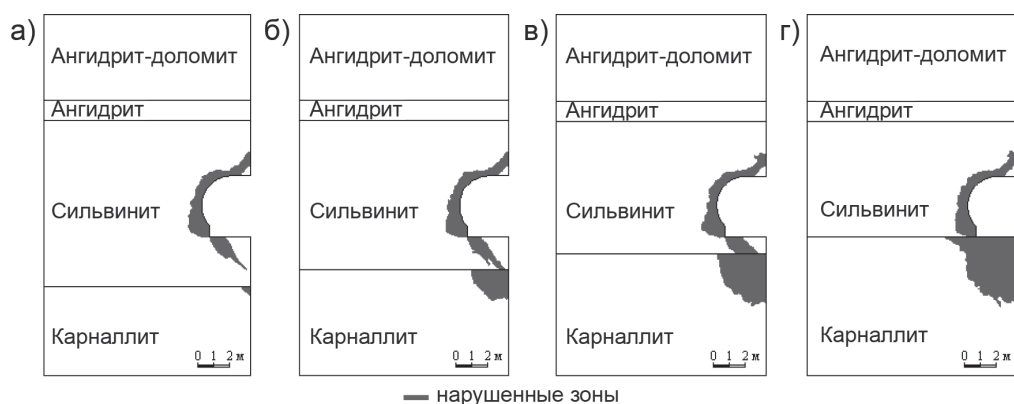


Рис. 3. Формирование нарушенных зон в зависимости от мощности буферного слоя в почве выработки: 3,0 м (а); 2,0 м (б); 1,0 м (в); 0 м (г)

Fig. 3. Generation of damaged rock zones versus buffer layer thickness in stope floor: 3,0 m(a); 2,0 m(b); 1,0 m(v); 0 m(g)

По результатам численных экспериментов установлено, что для оценки размеров зон запредельного деформирования в сильвинитовых ($h_{п.с.}$, м) и карналлитовых ($h_{п.к.}$, м) породах почвы выработок, образующихся в момент проходки, в зависимости от мощности буферного слоя в почве ($h_{п.б.}$, м) в условиях месторождения могут быть использованы следующие зависимости:

$$h_{п.с.} = \begin{cases} h_{п.б.}, & \text{при } 0 \leq h_{п.б.} < 2,3 \text{ м} \\ 2,3, & \text{при } h_{п.б.} \geq 2,3 \text{ м} \end{cases}, \quad (5)$$

$$h_{п.к.} = ah_{п.б.} + b, \text{ при } 0 \leq h_{п.б.} \leq 3,5 \text{ м} \quad (6)$$

где $a = -1,20$, $b = 4,21$ – параметры аппроксимации.

В том случае, когда мощность буферного слоя в почве выработки составляет более 3,5 м, зона запредельного деформирования в карналлитовых породах в рассматриваемых условиях в момент проходки выработки не образуется. Привязка почвы выработки по кровле карналлитового слоя приводит к формированию зоны запредельного деформирования в карналлитовых породах размером до 4 м и более.

Влияние мощности буферного слоя в кровле на состояние вмещающих выработки пород

На рис. 4 приводятся результаты моделирования, иллюстрирующие влияние мощности буферного слоя в кровле выработки ($h_{к.б.}$) на образование нарушенных зон во вмещающих выработку породах в момент проходки. Мощность буферного слоя в почве $h_{п.б.}$ принималась равной 3,5 м.

По результатам численных экспериментов установлено, что мощность однородных сильвинитовых пород, оставляемых в кровле выработки, не оказывает существенного влияния на образование зон запредельного деформирования в почве и стенках, размеры которых в момент проходки выработки в рассматриваемых условиях составляют, соответственно, около 2,3 и 1,4 м (рис. 4).

Снижение мощности буферного слоя в кровле выработки приводит к уменьшению размеров зоны запредельного деформирования, формирующейся в соляных породах кровли. Привязка кровли горной выработки к почве ангидритового слоя приводит к образованию в момент проходки выработки области на-



Рис. 4. Формирование нарушенных зон в зависимости от мощности буферного слоя в кровле выработки: 3,0 м (а); 2,0 м (б); 1,0 м (в); 0 м (г)

Fig. 4. Generation of damaged rock zones versus buffer layer thickness in stope roof: 3,0 m (a); 2,0 m (b); 1,0 m (v); 0 m (g)

рушенных пород в ангидритовом слое, размер которой составляет около 10–15 см (рис. 4).

По результатам математического моделирования установлено, что для оценки размеров нарушенной зоны ($h_{к.с.}$, м), формирующейся в сильвинитовых породах кровли в момент проходки выработки, может быть использована следующая зависимость:

$$h_{к.с.} = \begin{cases} ah_{к.б.}, & \text{при } 0 \leq h_{к.б.} < 1,4 \\ bh_{к.б.} + c, & \text{при } 1,4 \leq h_{к.б.} < 1,8 \\ dh_{к.б.}^2 + fh_{к.б.} + g, & \text{при } 1,8 \leq h_{к.б.} \leq 3,5 \end{cases}, \quad (7)$$

где $h_{к.б.}$ – мощность буферного слоя в кровле выработки, м; $a = 0,32$, $b = 1,85$, $c = -2,14$, $d = -0,12$, $f = 0,81$, $g = 0,12$, – параметры аппроксимации.

Анализ зависимости (7) позволяет сделать вывод о том, что мощность буферного слоя в кровле выработки в рассматриваемых условиях должна быть не более 1,4 м, что связано с резким возрастанием размеров зоны запредельного деформирования в сильвинитовых породах кровли при более 1,4 м.

По результатам численного моделирования было построено распределение растягивающих напряжений во вмещающих горную выработку породах в зависимости от мощности буферного слоя в кровле (рис. 5).

По результатам анализа рис. 5 можно сделать вывод о том, что уменьшение величины приводит к уменьшению размера области растягивающих напряжений, формирующейся в кровле выработки.

Стоит отметить: при зона растягивающих напряжений в кровле выработки, сложенной сильвинитовыми породами, не возникает, а при область растягивающих напряжений приурочена к ангидритовым породам в месте перехода сводчатой части кровли в плоскую.

На рис. 6 представлены зависимости смещения кровли (а) и боков (б) выработки, вызванного ползучестью соляных пород, от времени и мощности буферного слоя в кровле. Для сравнения на рис. 6, г приведены зависимости смещений кровли и боков для выработки с той же конфигурацией поперечного сечения, пройденной на той же глубине, но в однородном соляном массиве, сложенном сильвинитовыми породами.

Установлено, что мощность буферного слоя в кровле практически не оказывает влияния на величину смещения почвы выработки, поэтому указанные результаты здесь не приводятся.

По результатам математического моделирования установлено, что если горная выработка пройдена в однородном соляном массиве, то величины смещений ее стенок и кровли имеют близкие

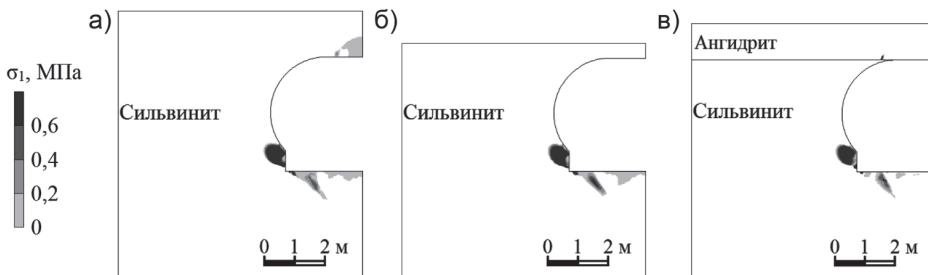


Рис. 5. Растягивающие напряжения во вмещающих выработку породах в зависимости от мощности буферного слоя в кровле: 1,5 м (а); 0,5 м (б); 0 м (в)

Fig. 5. Tensile stresses in enclosing rock mass surrounding stope versus buffer layer thickness in stope roof: 1,5 m(a); 0,5 m(b); 0 m(v)

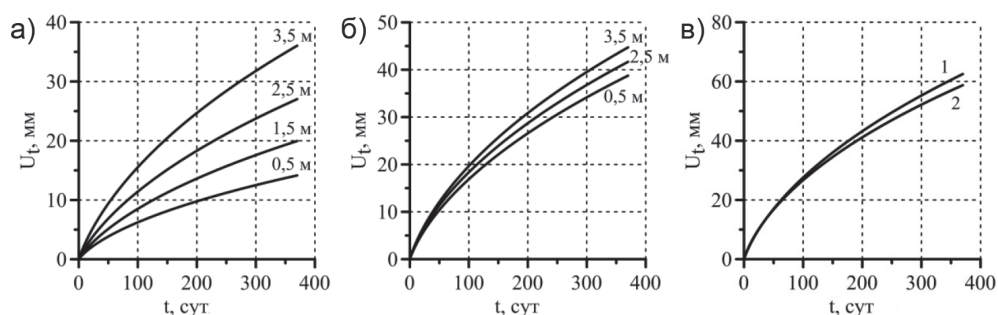


Рис. 6. Смещение контура горной выработки в зависимости от времени и мощности буферного слоя в кровле: кровля (а); бок (б); кровля (1) и бок (2) для выработки, пройденной в однородном соляном массиве; 0,5...3,5 м — мощность буферного слоя в кровле (в)

Fig. 6. Displacement of stope boundary versus time and buffer layer thickness in stope roof: roof (a); side (b); roof (1) and side (2) for mine working in a homogeneous salt mass; 0,5...3,5 m — buffer layer thickness of mining roof (v)

значения (рис. 6, в). Большие значения смещений кровли выработки по сравнению с боками объясняются конфигурацией рассматриваемого поперечного сечения горной выработки: ширина — 6,0 м, высота — 3,7 м.

По данным численных экспериментов, показанных на рис. 6, можно сделать следующий вывод: близкое залегание ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений к кровле выработки, пройденной в сильвинитовых породах, вызывает не только уменьшение смещений контура выработки, но и приводит к изменению характера его деформирования, что выражается в превышении смещений стенок соответствующих смещений кровли выработки. Так, например, для горной выработки, пройденной комбайном Урал-20Р (ширина — 6,0 м, высота — 3,7 м) в соленосных отложениях вблизи ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород, наблюдается снижение смещений стенок и кровли, соответственно, от 1,3 до 1,5 и от 1,7 до 4,4 раз по истечении 1 года с момента проведения выработки при изменении мощности буферного слоя в кровле от 3,5 до 0,5 м, по сравнению с аналогичной выработкой в однородных соленосных отложениях, пройденной на той же глубине.

Заключение

Основными результатами представленной работы являются следующие:

- установлено, что в момент проходки выработки в сильвинитовых породах комбайном Урал-20Р в условиях больших глубин Гремячинского месторождения во вмещающих породах образуются области запредельного деформирования. При отсутствии вблизи почвы выработки карналлитовых отложений размеры указанных областей в стенках, кровле и почве при проходке выработки достигают, соответственно, не менее 1,4; 1,5 и 2,3 м;
- установлено, что при размещении выработки вблизи карналлитовых отложений, залегающих на расстоянии менее 3,5 м от почвы выработки, в карналлитовых породах формируется область запредельного деформирования, размер которой при проходке выработки комбайном Урал-20Р может достигать 4 м и более;
- получены выражения для оценки размеров зон запредельного деформирования пород в кровле и почве выработки в момент проходки комбайном Урал-20Р в сильвинитовых породах промышленного пласта в зависимости от положения поперечного сечения относительно ангидритовых и ангидрит-доломитовых

пород, залегающих вблизи кровли, карналлитовых пород — вблизи почвы выработки;

- установлено, что устойчивость кровли горной выработки, пройденной в сильвинитовых породах Гремячинского месторождения вблизи ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений, обладающих более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными, зависит от мощности пачки однородных соляных пород, оставляемой в кровле выработки. Так, например, для одиночной горной выработки с овально-арочной формой поперечного сечения шириной 6,0 м и высотой 3,7 м оптимальная мощность соляных пород, оставляемых в кровле выработки, находится в диапазоне от 0,5 до 1,4 м;

- по результатам численных экспериментов установлено, что проведение

горной выработки комбайном Урал-20Р в соленосных отложениях вблизи ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород вызывает уменьшение величины смещения стенок и кровли, соответственно, от 1,3 до 1,5 и от 1,7 до 4,4 раз за 1-й год эксплуатации выработки при уменьшении мощности соленосных отложений в кровле с 3,5 до 0,5 м, тем самым изменяя характер деформирования породного контура.

Полученные результаты предназначены для научного сопровождения проектирования горных выработок.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидзинский С. А., Музалевский М. М., Ковальский Ф. И. Гремячинское месторождение сильвинитов / Новые данные по геологии соленосных бассейнов Советского Союза. — М.: Наука, 1986. — С. 204–219.

2. 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. — 2020. — № 7. — С. 113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-12.

3. Иофис М. А., Есина Е. Н., Мараков В. Е., Чистяков А. Н. Геомеханические критерии безопасной отработки Гремячинского месторождения калийных солей // Маркшейдерский вестник. — 2011. — № 4. — С. 44–52.

4. Морозов И. А., Ударцев А. А., Паньков И. Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 16–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

5. Константинова С. А., Крамсков Н. П., Соловьев В. А. Некоторые проблемы механики горных пород применительно к отработке алмазных месторождений Якутии. — Новосибирск: Наука, 2011. — 222 с.

6. Бельтюков Н. Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: Дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2018. — 159 с.

7. Baryakh A. A., Devyatkov S. Y., Samodelkina N. A. Theoretical explanation of conditions for sinkholes after emergency flooding of potash mines // Journal of Mining Science. 2016, vol. 52, no. 1, pp. 36–45. DOI: 10.1134/S1062739116010101.

8. Константинова С. А. Об одной феноменологической модели деформирования и разрушения соляных пород при длительном действии сжимающих нагрузок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1983. — № 3. — С. 8–13.

9. Jianqiang Deng, Yaoru Liu, Qiang Yang, Wei Cui, Yinbang Zhu, Yi Liu, Bingqi Li A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern // *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 119, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.comgeo.2019.103288.

10. Fei Wu, Hao Zhang, Quanle Zou, Cunbao Li, Jie Chen, Renbo Gao Viscoelastic-plastic damage creep model for salt rock based on fractional derivative theory // *Mechanics of Materials*. 2020, vol. 150, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103600.

11. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб.: Наука, 2001. — 343 с.

12. Fei Wu, Jie Chen, Quanle Zou A nonlinear creep damage model for salt rock // *International Journal of Damage Mechanics*. 2018, vol. 28, no. 5, pp. 1–14. DOI: 10.1177/1056789518792649.

13. 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.

14. Башура А. Н. Прогнозирование состояния выработок на глубоких горизонтах калийных рудников Старобинского месторождения и обоснование эффективных способов охраны: Дис. ... канд. техн. наук. — Солигорск: ЗАО «СИПР с ОП», 2004. — 146 с.

15. Huang Xiao Lan, Chao Yu Studies of hard interlayer's influence on the creep deformation of salt rock cavity // *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 594–597, pp. 452–455. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.452.

16. Motta G. E., Pinto C. L. New constitutive equation for salt rock creep // *Revista Escola de Minas*. 2014, vol. 67, no. 4, pp. 397–403. DOI: 10.1590/0370-44672014670165.

17. 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. **МИАБ**

REFERENCES

1. Svidzinskiy S. A., Muzalevskiy M. M., Koval'skiy F. I. Gremyachinskoye silvinit deposit. *Novye dannye po geologii solenosnykh basseynov Sovetskogo Soyuz* [New data on the geology of the saline basins of the Soviet Union], Moscow, Nauka, 1986, pp. 204–219.

2. Toksarov V. N., Morozov I. A., Beltyukov N. L., Udartsev A. A. Deformation of underground excavations under conditions of the Gremyachinsk potassium salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 113–124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-12.

3. Iofis M. A., Esina E. N., Marakov V. E., Chistyakov A. N. Geomechanical criteria for safe mining of the Gremyachinsky potash deposit. *Mine Surveying Bulletin*. 2011, no. 4, pp. 44–52. [In Russ].

4. Morozov I. A., Udarcsev A. A., Pankov I. L. Laboratory deformation testing of salt rocks from the Gremyachinsk and Upper Kama deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 16–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

5. Konstantinova S. A., Kramskov N. P., Solov'ev V. A. *Nekotorye problemy mekhaniki gornykh porod primenitel'no k otrabotke almaznykh mestorozhdeniy Yakutii* [Some problems of rock mechanics in relation to the development of diamond deposits in Yakutia], Novosibirsk, Nauka, 2011, 222 p.

6. Bel'tyukov N. L. *Razrabotka skvazhinnogo metoda izmereniya napryazheniy v massive gornykh porod na osnove effekta Kayzera* [Development of a downhole method for measuring stresses in a rock mass based on the Kaiser effect], Candidate's thesis, Perm, GI UrO RAN, 2018, 159 p.

7. Baryakh A. A., Devyatkov S. Y., Samodelkina N. A. Theoretical explanation of conditions for sinkholes after emergency flooding of potash mines. *Journal of Mining Science*. 2016, vol. 52, no. 1, pp. 36–45. DOI: 10.1134/S1062739116010101.

8. Konstantinova S. A. On a phenomenological model of deformation and destruction of salt rocks under the prolonged action of compressive loads. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1983, no. 3, pp. 8–13. [In Russ].

9. Jianqiang Deng, Yaoru Liu, Qiang Yang, Wei Cui, Yinbang Zhu, Yi Liu, Bingqi Li A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 119, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.comgeo.2019.103288.

10. Fei Wu, Hao Zhang, Quanle Zou, Cunbao Li, Jie Chen, Renbo Gao Viscoelastic-plastic damage creep model for salt rock based on fractional derivative theory. *Mechanics of Materials*. 2020, vol. 150, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103600.

11. Stavrogin A. N., Tarasov B. G. *Экспериментальная физика и механика горных пород* [Experimental rock physics and mechanics], Saint-Petersburg, Nauka, 2001, 343 p.

12. Fei Wu, Jie Chen, Quanle Zou A nonlinear creep damage model for salt rock. *International Journal of Damage Mechanics*. 2018, vol. 28, no. 5, pp. 1–14. DOI: 10.1177/1056789518792649.

13. Ageenko V. A., Skvortsov A. A. Rheological properties of rock salt under super long-term sustained uniaxial loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 27–34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-27-34.

14. Bashura A. N. *Прогнозирование состояния выработок на глубокых горизонтах калийных рудников Старобинского месторождения и обоснование эффективных способов охраны* [Forecasting of the state of workings in the deep horizons of the Starobinskoye potash mines and justification of effective methods of protection], Candidate's thesis, Soligorsk, ZAO «SIPR с ОР», 2004, 146 p.

15. Huang Xiao Lan, Chao Yu Studies of hard interlayer's influence on the creep deformation of salt rock cavity. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 594–597, pp. 452–455. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.452.

16. Motta G. E., Pinto C. L. New constitutive equation for salt rock creep. *Revista Escola de Minas*. 2014, vol. 67, no. 4, pp. 397–403. DOI: 10.1590/0370-44672014670165.

17. Pestrenin V. M., Pestrenina I. V., Merzlyakov A. F. Creep of rock salt samples in compression experiments. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2012, no. 1, pp. 119–124. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Морозов Иван Александрович¹ – старший преподаватель,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: imorozov.work@yandex.ru,

Паньков Иван Леонидович¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

Токсаров Валерий Николаевич¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Морозов И.А., e-mail: imorozov.work@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.A. Morozov, Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia, e-mail: imorozov.work@yandex.ru,

I.L. Pankov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

V.N. Toksarov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: I.A. Morozov, e-mail: imorozov.work@yandex.ru.

Получена редакцией 07.04.2021; получена после рецензии 28.06.2021; принята к печати 10.08.2021.

Received by the editors 07.04.2021; received after the review 28.06.2021; accepted for printing 10.08.2021.