

Рис. 5. Кривая длительной прочности

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.: ил.
2. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
3. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 272 с.: ил.
4. Паньков И.Л., Гараева Ю.И. Исследование механических свойств соляных пород при растяжении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 154-157.

УДК 622.2

DOI:10.7242/echo.2023.4.6

## ОБ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

И.А. Морозов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе приведено описание разработанной и реализованной методом конечных элементов математической модели деформирования вмещающих горные выработки пород для условий глубокого калийного рудника. Модель отражает основные факторы, определяющие устойчивость породных обнажений в рассматриваемых условиях: вид и параметры исходного поля напряжений, слоистость породного массива, ползучесть соляных пород. Для условий опытного участка горной выработки приведены результаты оценки изменения напряженно-деформированного состояния вмещающих горную выработку пород в зависимости от времени.

**Ключевые слова:** соляные породы, ползучесть, устойчивость горной выработки, глубокий рудник.

На сегодняшний день численность населения нашей планеты превысила отметку в 8 миллиардов человек [1]. В связи с этим для целого ряда наиболее густо населенных территорий вопросы обеспечения продовольственной безопасности приобретают особо важное значение. Решение указанной проблемы невозможно без увеличения площади и урожайности земель сельскохозяйственного назначения путем внесения в почву калийных удобрений, источником которых является калийная руда, добываемая подземным (шахтным) способом.

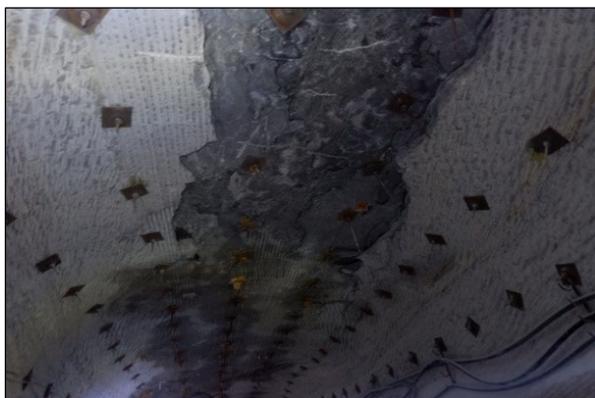
Исчерпание наиболее доступных полезных ископаемых ставит новые задачи перед горной наукой, связанные с необходимостью оценки и прогноза устойчивости горных выработок в сложных инженерно-геологических условиях. Гремячинский калийный рудник – это пример строительства современного предприятия, ведущего горные работы в условиях больших глубин (до 1300 м) при весьма сложных горно-геологических условиях, особенность которых заключается в следующем [2, 3]:

- высокий уровень исходного поля напряжений (24–25 МПа);
- промышленный сильвинитовый пласт средней мощностью около 10 м подстилают карналлитсодержащие породы прочностью не более 10-15 МПа;
- над пластом сильвинита располагаются ангидрит-доломитовые отложения, которые не склонны к проявлению деформации ползучести, а также обладают довольно высокими значениями показателей механических свойств по сравнению с соляными породами.

В настоящее время основная часть подготовительных горных выработок, пройденных в соляных породах Гремячинского месторождения, крепится анкерной крепью. На рис. 1а представлен пример горной выработки, закрепленной семью рядами анкеров в 2022 году. Аналогичные параметры крепления характерны для большей части подготовительных выработок. Но еще в 2018 году был оборудован опытный участок, который закреплен тремя рядами анкеров. Состояние выработки по прошествии 4 лет эксплуатации представлено на рис. 1б.

Анализ фактического состояния закрепленных горных выработок свидетельствует о том, что не всегда увеличение количества рядов анкеров приводит к повышению устойчивости породного обнажения. В этой связи актуальными являются исследования, направленные на оценку устойчивости горных выработок в условиях Гремячинского месторождения с целью определения рациональных параметров анкерного крепления подготовительных горных выработок. Одной из задач, направленных на достижение указанной цели, является обоснование и реализация математической модели деформирования вмещающих горные выработки пород в условиях месторождения методом конечных элементов. Решению указанной задачи посвящена настоящая работа.

а)



б)



**Рис. 1.** Выработки, закрепленные анкерной крепью:  
а – крепление в 2022 году, 7 рядов анкеров; б – крепление в 2018 году, 3 ряда анкеров

Установлено, что основными формами проявления горного давления в выработках, пройденных в соляных породах месторождения, являются пучение почвы и отжим пород боков. На некоторых участках интенсивное деформирование соляных пород приводит к разрыву анкеров и опорных плиток, установленных в сводчатой части кровли. Также в условиях слоистого строения кровли характерным проявлением горного давления является расслоение и отслоение пачек соляных пород.

Учитывая основные особенности деформирования вмещающих горные выработки пород в условиях Гремячинского ГОКа, была разработана и реализована методом конечных элементов математическая модель, которая учитывает возможный переход отдельных участков массива в предельное состояние в соответствии с критериями [4]:

$$\tau_{\text{пр}} = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_n)(2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{\text{сж}}^0) + \sigma_{\text{сж}}^0})},$$

$$\sigma_1 = \sigma_p,$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – предельное касательное напряжение, МПа;  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение, МПа;  $\sigma_p$  – предел прочности при одноосном растяжении породных образцов, МПа;  $\sigma_{\text{сж}}^0$  – предел прочности при одноосном сжатии породных образцов, МПа;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение, действующее на площадке с  $\tau_{\text{пр}}$ , МПа.

Для соляных пород модель учитывает снижение длительной прочности  $\sigma_{\text{сж}}(t)$  с течением времени по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}}(t) = \sigma_{\text{сж}}^0 f(t).$$

Функция  $f(t)$ , характеризующая снижение длительной прочности с течением времени, определяется по формуле [5]:

$$f(t) = C_\infty + \frac{1 - C_\infty}{1 + \beta t^{\alpha_0}},$$

где  $C_\infty$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta$  – эмпирические коэффициенты.

Деформация ползучести соляных пород определялась методом переменных параметров упругости [6, 7]:

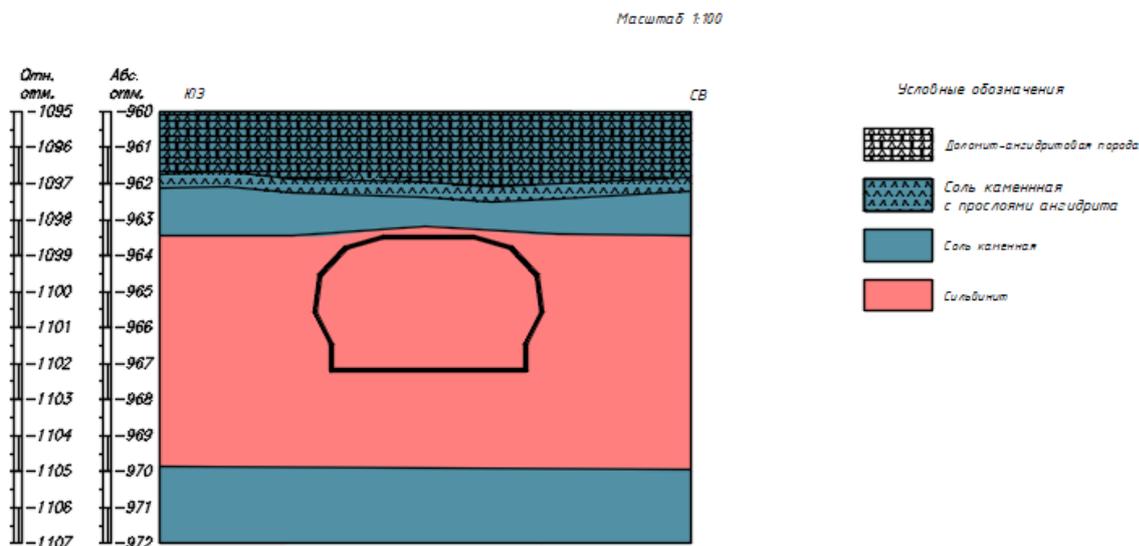
$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \Phi(t)},$$

где  $E(t)$  – модуль упругости, соответствующий моменту времени  $t$ , ГПа;  $E_0$  – модуль упругости, соответствующий моменту проходки горной выработки  $t = 0$ , ГПа;  $\Phi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}$  – функция, характеризующая ползучесть соляных пород, в которой  $\alpha$ ,  $\delta$  – параметры ползучести.

В связи с тем, что одной из форм проявления горного давления в условиях Гремячинского месторождения является расслоение вмещающего горные выработки породного массива, моделирование контактов пород осуществлялось путем включения в расчетную схему ослабленных прослоев малой мощности с пониженными механическими характеристиками.

Параметрическое обеспечение математической модели выполнено с учетом лабораторных исследований породных образцов [8].

Верификация математической модели проведена по данным наблюдений на реперной станции, заложенной в одной из горных выработок, пройденной в один ход комбайном Урал-20Р. Геологическое строение вмещающих выработку пород представлено на рис. 2.



**Рис. 2.** Геологическое строение вмещающих выработку пород в месте оборудования реперной станции

Некоторые результаты тестовых расчетов, выполненных с использованием разработанной и реализованной математической модели, показаны на рис. 3. Оценка напряженно-деформированного состояния выполнена на примере одиночной горной выработки. Геологическое строение вмещающих пород принято в соответствии с разрезом, представленном на рис. 2.

Установлено, что лучшее соответствие результатам натуральных наблюдений даёт модель, в расчетную схему которой включены ослабленные прослои, моделирующие поведение контактов породных слоев (рис. 3б).

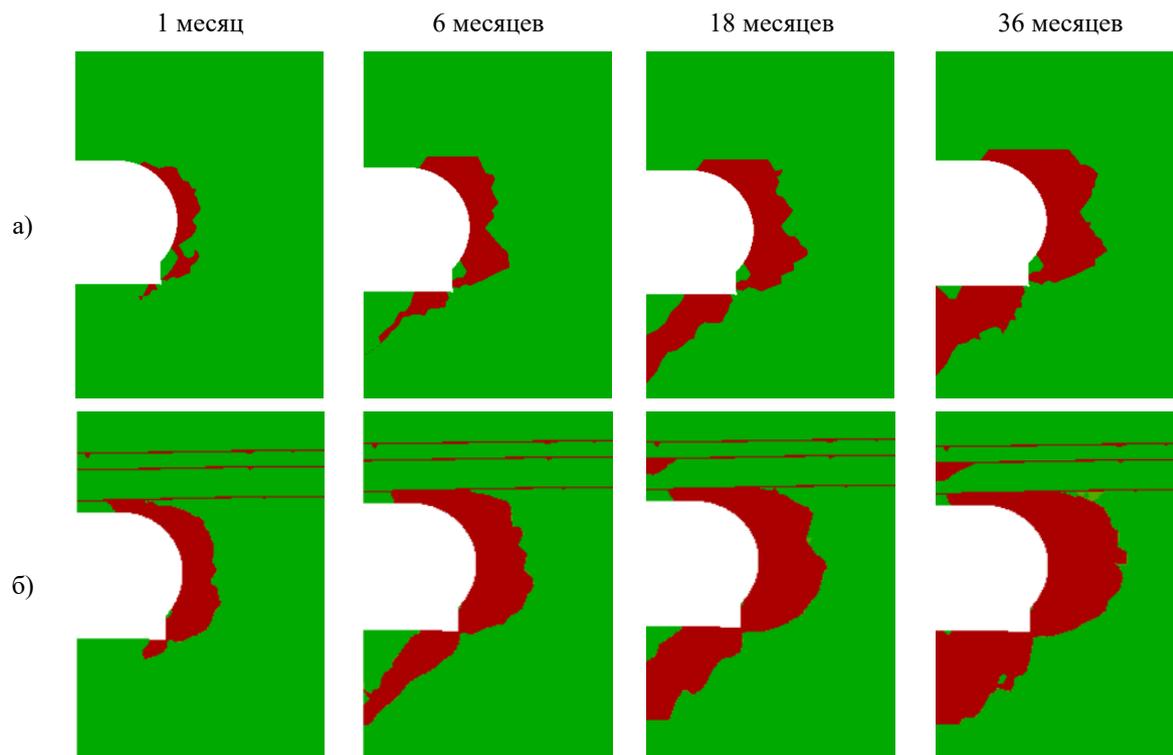
По результатам, представленным на рис. 3б установлено, что уже в первый месяц эксплуатации выработки в рассматриваемых условиях при отсутствии крепления возможно отслоение с последующим обрушением оставленной пачки сильвинита малой мощности в кровле выработки, а в течение 1,5 лет вероятно образование достаточно большой зоны запредельного деформирования в слое каменной соли. При этом расслоение пород кровли возможно до 1,6 м.

На основе сравнительного анализа результатов моделирования (рис. 3) можно сделать вывод о том, что при отсутствии крепления расслоение пород кровли может приводить к снижению устойчивости не только боков, но и почвы, что выражается в увеличении областей запредельного деформирования в боках и почве.

Обобщая изложенное, основными результатами исследования являются следующие:

- разработана и реализована методом конечных элементов математическая модель деформирования вмещающих горные выработки пород, которая учитывает основные факторы, определяющие устойчивость породных обнажений в условиях Гремячинского месторождения: вид и параметры исходного поля напряжений, слоистость породного массива, ползучесть соляных пород;

- для условий опытного участка горной выработки выполнена оценка изменения напряженно-деформированного состояния вмещающих горную выработку пород в зависимости от времени.



**Рис. 3.** Распределение зон запредельного деформирования во вмещающих выработку породах в зависимости от времени: а – без учета влияния контактов пород; б – с учетом влияния контактов пород в виде ослабленных прослоев

Разработанную и реализованную методом конечных элементов математическую модель планируется использовать при многовариантном численном моделировании изменения состояния вмещающих горные выработки пород в условиях Гремячинского ГОКа с целью обоснования рациональных параметров анкерного крепления подготовительных горных выработок.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. UN DESA. World Population Prospects 2022: Summary of Results. – New York: United Nations, 2022. – 52 p.
2. Поспелов Д.А., Токсаров В.Н. Результаты скважинных испытаний по определению деформационных свойств горных пород в условиях глубокого калийного рудника // Горное эхо. – 2023. – № 1 (90). – С. 59-64. – DOI: 10.7242/echo.2023.1.8.
3. Свидзинский С.А., Музалевский М.М., Ковальский Ф.И. Гремячинское месторождение сильвинитов // Новые данные по геологии соленосных бассейнов Советского Союза. – М., 1986. – С. 204-219.
4. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41.
5. Титов Б.В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии : дис. ... к.т.н. 05.15.11 / Титов Борис Васильевич. – Березники, 1983. – 248 с.: ил.
6. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
7. Амусин Б.З. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 162-166.
8. Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 16-28. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.