

Таким образом, на основе информации о развитии процесса сдвижения земной поверхности для условий Верхнекамского и Саскачеванского калийных месторождений выполнена калибровка геомеханической модели. Показано, что более предпочтительной является калибровка по данным о нарастании оседаний земной поверхности для Саскачеванского месторождения вследствие подобия горно-геологических и горнотехнических условий разработки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания №0422-2019-0148-С-01.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горно-обогатительный комбинат по добыче и обогащению калийных солей мощностью 2,3 млн. т/год 95% КСЛ Гремячинского месторождения Котельниковского района Волгоградской области. Рудник Гремячинского ГОК: Проектная документация. Раздел 5 / АО «ВНИИ Галургии». – Пермь, 2016.
2. Технический проект отработки Гремячинского месторождения подземным шахтным способом: Проектная документация. Раздел 2. Геологическое строение шахтного поля. 71.002-ГГ / ОАО «Галургия». – Пермь, 2015.
3. 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.
4. Vagayakh A.A., Samodelkina N.A Rheological analysis of geomechanical processes // Journal of Mining Science. – 2005. – V. 41, № 6. – P. 522-530. DOI: 10.1007/s10913-006-0015-x.
5. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
8. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
9. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2020.2.6

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

И.А. Морозов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния одиночной горной выработки, пройденной на глубине 1100 м в соляных породах Гремячинского рудника. Поведение пород описывалось идеальной упруго-пластической средой, что соответствует моменту проходки выработки. Задача решалась методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Оценка состояния приконтурных пород в момент проходки выработки выполнялась по критерию прочности Кулона-Мора.

По результатам исследования установлено, что для рассмотренных горно-геологических, горнотехнических условий наибольший размер зоны сдвиговой нарушенности характерен для боков выработок, локализованной в основном в пласте силвинита. Установлено образование локальных участков повышенных растягивающих напряжений в момент проходки как в кровле, почве, так и в боках выработок.

Полученные результаты предназначены для обоснования способов повышения устойчивости элементов горных выработок.

**Ключевые слова:** соляные горные породы, гидростатическое поле напряжений, прочность, зоны нарушенности, устойчивость выработок.

Увеличение глубины залегания промышленных пластов, вовлечение в отработку все более глубоких горизонтов приводит к неуклонному усложнению горно-геологических и горнотехнических условий отработки. Одним из основных факторов, осложняющих поддержание горных выработок на глубоких горизонтах, является высокий уровень исходного (естественного) поля напряжений. В отдельных случаях это может приводить к переходу значительных объемов приконтурных пород в запредельное состояние практически сразу после проходки выработки, что необходимо учитывать при обосновании соответствующих способов охраны и крепления [1]. Целью работы является оценка состояния горных пород в условиях глубоких горизонтов калийных рудников на примере одиночной горной выработки в условиях Гремячинского месторождения калийных солей.

Основными горно-геологическими особенностями Гремячинского месторождения являются следующие [2-4]:

- глубина залегания промышленного сильвинитового пласта 1100-1300 м;
- вблизи кровли промышленного пласта залегают прочные несклонные к ползучести ангидритовые, ангидрит-доломитовые породы, вблизи почвы – слабые карналлитовые породы.

Для исследования деформационных процессов в окрестности породных обнажений в одиночных горных выработках, пройденных в соляных породах в один ход комбайном Урал-20Р, были оборудованы замерные станции, состоящие из контурных и глубинных реперов в кровле, почве и боках. В окрестности заложения замерных станций были пробурены геологоразведочные скважины с отбором керна для определения прочностных и деформационных характеристик вмещающих горные выработки пород.

Как известно [5, 6], величина и характер распределения добавочного поля напряжений в окрестности породных обнажений определяются параметрами исходного (естественного) поля напряжений. Для оценки компонентов естественного поля напряжений сотрудниками ГИ УрО РАН (Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. и др.) был использован специально разработанный метод [7, 8], основанный на нагружении стенок скважин, пробуренных в подземных горных выработках, прессиометром с записью и последующим анализом нагрузки, деформации, активности акустической эмиссии. По данным [7] вертикальная составляющая исходного поля напряжений в условиях Гремячинского месторождения равна весу пород налегающей толщи и составляет примерно 24 МПа (глубина 1100 м), в то время как коэффициент бокового распора изменяется в диапазоне 0,9–1,0, что соответствует гидростатическому полю напряжений и согласуется с данными работ [8, 9].

Задача по оценке состояния пород, вмещающих экспериментальные выработки, решалась в постановке плоской деформации. Породы описывались идеальной упруго-пластической средой. Оценка состояния приконтурных пород горных выработок проводилась на основе критерия прочности Кулона-Мора:

$$\tau_{пр} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $C$  – коэффициент сцепления;  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Коэффициент сцепления определялся по формуле:

$$C = \sqrt{\sigma_p \left[ 2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж} \right]},$$

где  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{сж}$  – прочность, соответственно, при одноосном растяжении, сжатии.

Угол внутреннего трения определялся по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{C} - 1} - 1.$$

В области растяжения паспорт прочности ограничивался пределом прочности на растяжение:

$$\sigma_1 = \sigma_p.$$

На рис. 1 представлена принципиальная расчетная схема и геологический разрез для одного из экспериментальных участков. На геологическом разрезе снизу-вверх выделяются следующие слои: карналлитовый, каменной соли, сильвинитовый, каменной соли, ангидрит-галитовой породы, ангидритовый и ангидрит-доломитовый.

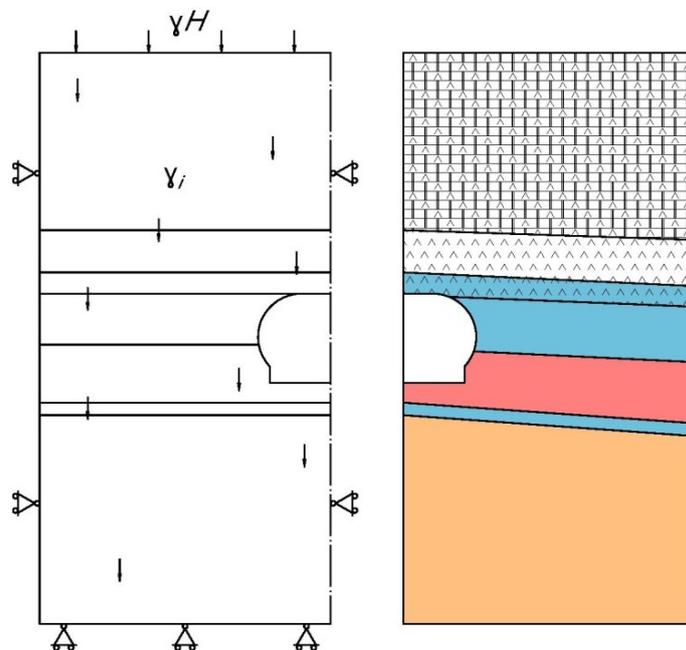


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема и геологический разрез для одного из экспериментальных участков

Задача решалась методом конечных элементов [10] в программном комплексе ANSYS. Исходное поле напряжений ненарушенного массива принималось гидростатическим:  $\sigma_x = \sigma_y = \gamma H = 24$  МПа,  $\tau_{xy} = 0$ .

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования: распределение максимальных касательных напряжений (рис. 2а), распределение растягивающих напряжений (рис. 2б).

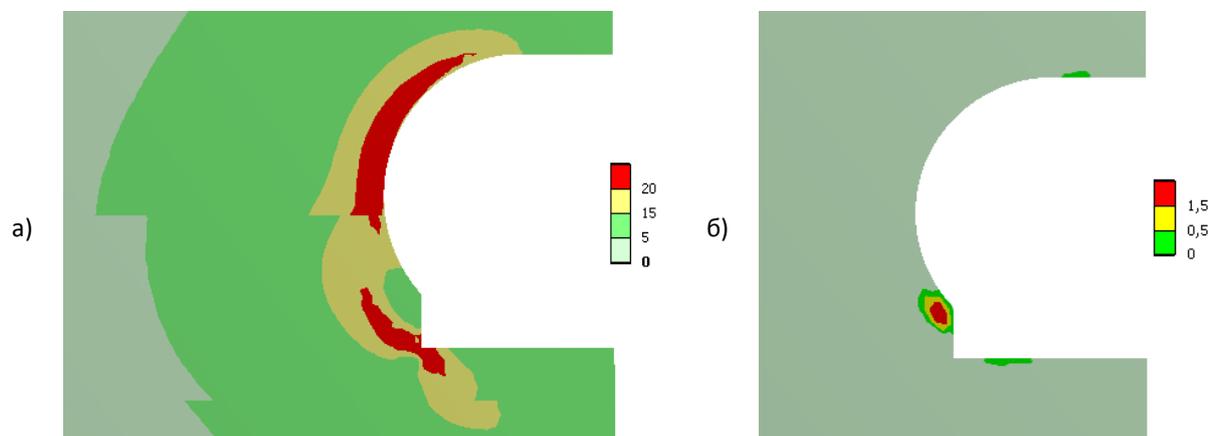


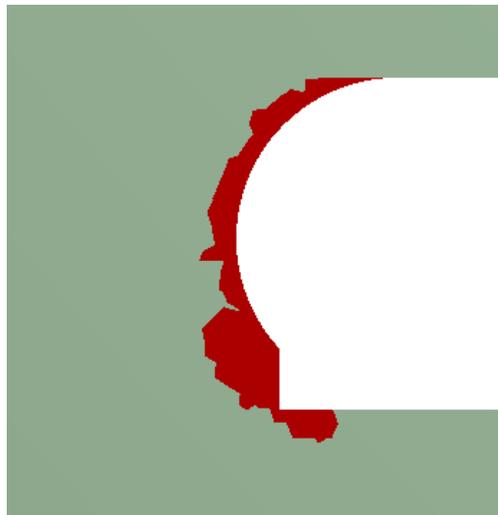
Рис. 2. Результаты численного моделирования: а – распределение максимальных касательных напряжений (МПа); б – распределение растягивающих напряжений (МПа)

Анализ рис. 2а позволяет сделать вывод о том, что наибольшие касательные напряжения в момент проходки выработки достигают более 20 МПа и локализуются в пределах области размером 0,5–0,7 м от контура выработки вглубь массива.

По результатам, представленным на рис. 2б, установлено, что в момент проходки выработки формируются области растягивающих напряжений как в кровле, почве, так и боках. В кровле и почве зоны растягивающих напряжений локализуются в пределах 10–15 см от породного контура, а значения напряжений не превосходят 0,5 МПа. Зона растягивающих напряжений в боках приурочена к месту перехода плоской части стенки выработки в скругленную. При этом величина растягивающих напряжений превышает 1,5 МПа. Необходимо отметить, что формирование даже небольших зон растягивающих напряжений в приконтурных породах может приводить к необходимости применения дополнительных мер охраны, крепления выработок.

По результатам численного моделирования была выполнена оценка размеров областей приконтурных пород, перешедших в запредельное состояние.

На рис. 3 представлены области разрушения от действия сдвигающих и растягивающих напряжений, возникающих в момент проходки выработки.



**Рис. 3.** Области разрушения от действия сдвигающих и растягивающих напряжений, возникающие в момент проходки выработки

По результатам анализа (рис. 2, рис. 3) можно сделать вывод, что для рассматриваемых горно-геологических, горнотехнических условий характерно возникновение зоны сдвиговой нарушенности, наибольший размер которой в боку выработки в момент проходки может составлять около 0,7 м в пласте сильвинита. При этом в почве зона нарушенных пород приурочена к углу выработки, а в кровле охватывает всю область перехода сводчатой части в плоскую.

Данные инструментальных наблюдений также подтверждают, что в начальный период эксплуатации выработки величины смещений боков превосходят смещения кровли и почвы. При этом наименьшие значения смещений фиксируются в кровле выработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам численного моделирования установлено, что для рассмотренных горно-геологических, горнотехнических условий Гремячинского месторождения в момент проходки выработок в соляных породах формируется зона сдвиговой нарушенно-

сти в боках, почве и переходе сводчатой части кровли в плоскую. Наибольший размер этой зоны ориентирован субгоризонтально вглубь массива и составляет около 0,7 м в пласте сильвинита.

Установлено, что в кровле, почве, боках выработок в момент проходки возникают зоны растягивающих напряжений, значения которых могут достигать 1,5 МПа и более, что в слабых соляных породах может потребовать применения дополнительных способов охраны и крепления горных выработок.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И.Л. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт. – Киев: Техника, 1972. – 156 с.
2. 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.
3. Кутырло В.О. Особенности строения калийной залежи Гремячинского месторождения // Литасфера. – 2009. – № 1 (30). – С. 86-94.
4. Андреев Г.Н., Иванкин А.В. Особенности строения отложений кунгура в пределах Гремячинского месторождения калийных солей по материалам высокоразрешающей сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 3. – С. 89-93.
5. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: МГУ, 2004. – 208 с.
6. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 438 с.: ил.
7. Бельтюков Н.Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: дис. ...к.т.н.; 25.00.20: защищена 11.04.19 / Бельтюков Николай Леонидович. – Пермь, 2019. – 159 с.
8. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 10. – С. 144-148.
9. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / ГИ УрО РАН; [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
10. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2020.2.7

### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

В.Н. Токсаров

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведены результаты интерпретации геофизического исследования скважин, пробуренных на нефтяных месторождениях Верхней Камы. Установлено, что в Соликамской впадине максимальные горизонтальные напряжения сжатия действуют в субширотном направлении, при этом азимутальные углы варьируются в диапазоне 225°-300°. Максимальными главными напряжениями являются вертикальные. Промежуточные главные напряжения ориентированы в субширотном направлении, минимальные – в субмеридиональном.

**Ключевые слова:** разрушение стенок скважин, овализация, кавернометрия, осадочные породы, оценка напряжений, коэффициент бокового распора.