
МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2021.2.4

ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ КРЕПЬ ПРИ СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЕ ОТРАБОТКИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

С.Ю. Девятков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Очистная выемка калийных пластов столбовой системой отработки сопровождается деформированием подработанного горного массива и разрушением пород кровли и почвы выработок в выемочном столбе лавы. Вследствие этого актуальной является задача изучения изменения напряженно-деформированного состояния породного массива, вызванного ведением горных работ. Для этого было выполнено геомеханическое моделирование отработки калийных пластов в условиях их слоевой выемки длинными очистными забоями. Используемая модель учитывала основные особенности строения подработанного массива, а также обрушение пород кровли отработываемого пласта с заполнением ими выработочного пространства лавы и раскрытие глинистых контактов в соляной толще. Получена количественная оценка давления в крепи и выполнено сравнение с фактическими данными о давлении в стойках крепи.

Ключевые слова: сдвигение, оседание земной поверхности, давление на крепь, напряженно-деформированное состояние, критерий Кулона-Мора; математическое моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Разработка калийных месторождений столбовой системой отработки сопровождается разрушением пород кровли и почвы выработок в выемочном столбе лавы и деформированием всего подработанного горного массива, включая земную поверхность. Вследствие этого существует постоянная опасность внезапного обрушения пород кровли, нарушения целостности водозащитной толщи, ведущего к прорыву надсолевых вод в горные выработки [1, 2], а также перехода статических оседаний земной поверхности в динамическую форму. Всё это представляет реальную угрозу как ведению горных работ, так и безопасной жизнедеятельности подработанных территорий, приводит к значительным финансовым убыткам и негативным социально-экономическим и экологическим последствиям [3].

Целью данных исследований являлось изучение изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанного массива в процессе подвигания очистного забоя лавы и оценка возникающего при этом давления в забойной крепи. Расчеты осуществлялись в двухмерной упруго-пластической постановке методом конечных элементов. Связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывалась законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определялись критерием Кулона-Мора. Для анализа нарушения целостности пород в области действия растягивающих напряжений использовался предел прочности при растяжении.

Геомеханическая модель

Для оценки изменения напряженно-деформированного состояния горного массива в процессе отработки лавы выполнено геомеханическое моделирование отработки слоев II, II-III, III в условиях слоевой выемки калийного пласта длинными очистными забоями.

Двухмерная расчетная схема построена по подвиганию забоя лавы и соответствует типовому для Старобинского месторождения геологическому разрезу (рис. 1).

При математическом моделировании для исследуемого участка учитывались основные особенности геологического строения подработанного массива. Граничные условия формулировались из соображений, что верхняя граница (дневная поверхность) является свободной, на нижней вертикальные, а на боковых горизонтальные перемещения равняются нулю. Расчетная область находилась в условиях действия массовых сил, интенсивностью γ_i (где γ_i – удельный вес пород i -го элемента геологического разреза).

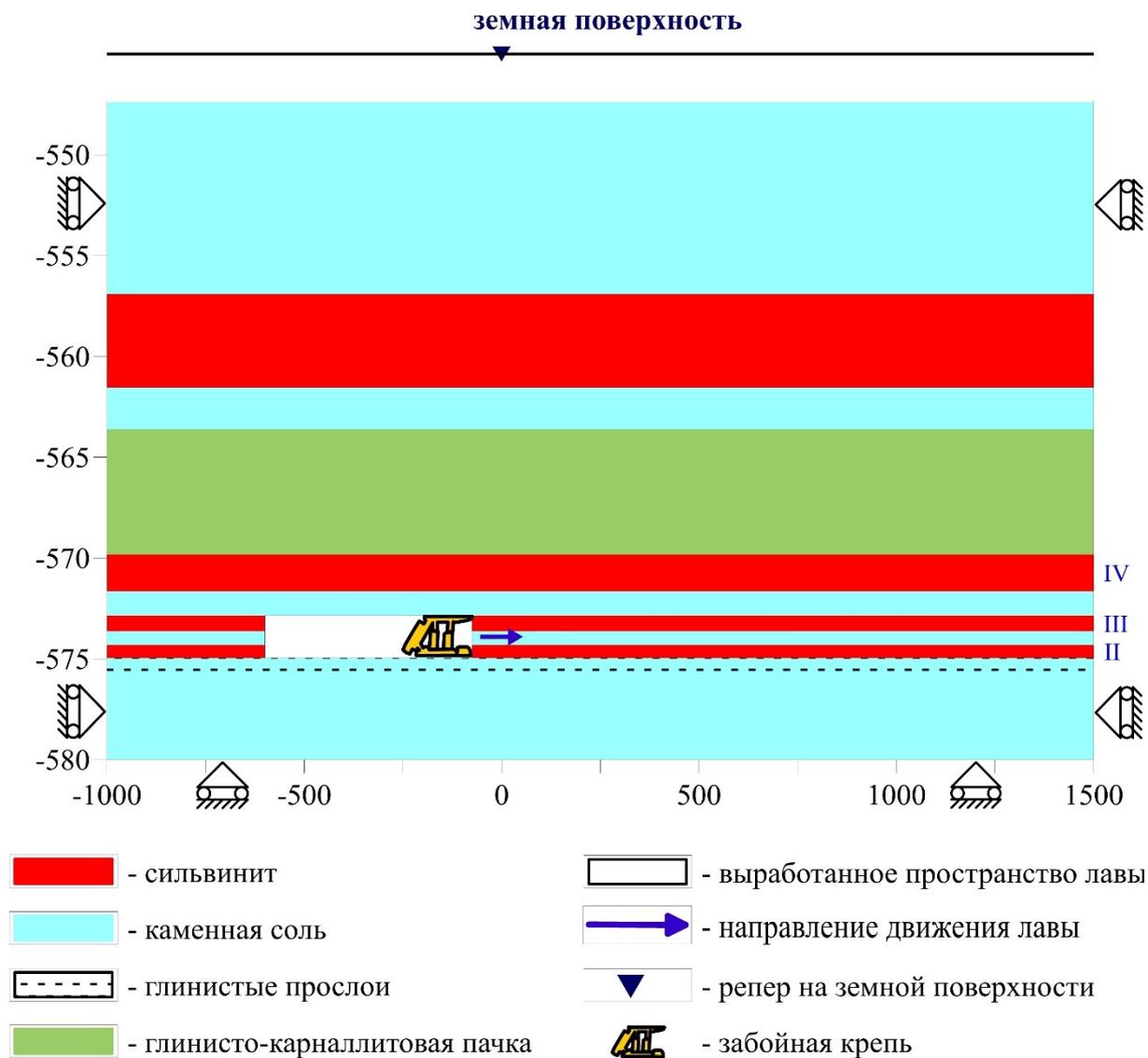


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема

Для определения напряженно-деформированного состояния пород применялась модель идеальной упруго-пластичной среды с внутренним трением. В качестве условия пластичности в области сжатия использовалась параболическая огибающая кругов Мора [4]. Условием локализации пластических деформаций являлось выполнение равенства

$$\tau_{max} = \tau^* = \sqrt{(\sigma_p + \sigma) \left[2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c)} + \sigma_c \right]}, \quad (1)$$

а в области растяжения –

$$\sigma_1 = \sigma_p, \quad (2)$$

где $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ – максимальное касательное напряжение, $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ – нормальное напряжение, σ_c – предел прочности на сжатие, σ_p – предел прочности на растяжение, σ_1, σ_3 – главные напряжения, определяемые по результатам математического моделирования.

Отметим, что зоны локализации пластических деформаций в областях сжатия и растяжения отождествляются с процессами трещинообразования, соответственно, за счет развития трещин сдвига и отрыва.

Численное решение задачи осуществлялось по стандартной процедуре метода конечных элементов [5]. Для учета пластического характера деформирования пород использовался метод секущей матрицы [6].

Прочность на растяжение горных пород значительно ниже их показателей при сжатии. В этой связи локализация растягивающих усилий в каких-либо областях массива является предпосылкой к разрушению пород. Вместе с тем, очевидно, что разрушенные под действием растягивающих напряжений породы не будут обрушаться в выработанное пространство, если они окружены материалом, не потерявшим своей несущей способности. Поэтому в качестве первого условия обрушения пород принимался выход зоны действия растягивающих напряжений на обнажение. Реализация этого критерия осуществлялась путем специальной организации вычислительного итерационного процесса: на каждой итерации из рассмотрения исключались (обнулялись) конечные элементы, примыкающие к границе кровли выработанного пространства областей концентрации растягивающих напряжений [7].

Наличие глинистых прослоев в кровле лавы является дополнительным фактором, способствующим обрушению пород. В этом случае при достижении областью сдвиговой трещиноватости «раскрытого» глинистого контакта происходит обрушение пород в выработанное пространство [8]. Учет данного критерия обрушения также реализован в расчетной процедуре путем локализации и последующего исключения из расчетов областей, ограниченных «раскрытым» глинистым прослоем и зонами сдвиговой трещиноватости.

Обрушенные из кровли лавы породы заполняют выработанное пространство и с учетом их разуплотнения формируют техногенную геосреду, которая также включается в расчетную схему математического моделирования. Ее деформационные свойства принимаются на порядок ниже соответствующих показателей породного массива.

Включенные в расчетную схему глинистые прослои моделировались контактными элементами Гудмана [9]. Свойства глинистых контактов принимались по данным лабораторных исследований [8].

При геомеханическом моделировании допускалось раскрытие глинистых контактов, представленных в почве и кровле лавы. Наличие контактов в кровле обуславливает быстрое ее разрушение. При этом в почве лавы реализуется интенсивное расслоение.

Математическое моделирование выполнено для условий лавы № 102 рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий».

Результаты математического моделирования

Выполненные расчеты показывают, что в процессе подвигания забоя лавы в почве выработки локализуются области пластических деформаций, связанные с формирова-

нием трещин отрыва. Обрушение пород кровли также связано главным образом с трещинами отрыва и начинает наблюдаться уже при протяженности выработанного пространства порядка 5 м.

Вследствие этого вслед за подвиганием забоя лавы происходит формирование на месте выработанного пространства нового пласта из обрушенных пород кровли. Мощность данного пласта будет в основном определяться распределением зон техногенной трещиноватости, возникающих в процессе очистной выемки, объемом обрушенных пород кровли с учетом коэффициента их разуплотнения, а также скоростью подвигания забоя лавы. На рис. 2 приведен характерный пример заполнения выработанного пространства лавы обрушенными породами кровли. По рисунку хорошо прослеживается периодичность областей техногенной трещиноватости в почве выработанного пространства и зон обрушения кровли.

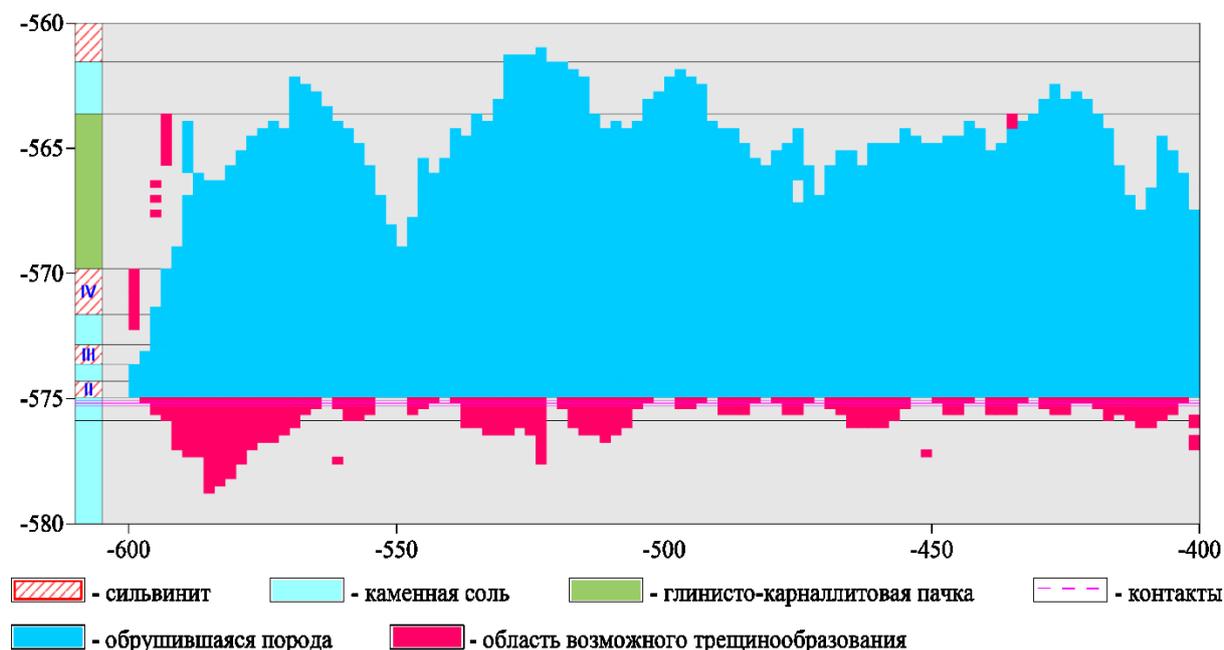


Рис. 2. Заполнение выработанного пространства лавы обрушенными породами кровли

Согласно результатам математического моделирования, на характер деформирования массива определяющее влияние оказывают свойства обрушенных из кровли пород, заполняющих выработанное пространство лавы. В зависимости от принятых в расчете деформационных свойств обрушенных пород существенно изменяется величина максимальных оседаний земной поверхности. Вследствие этого с помощью вариации их механических свойств возможно регулировать оседания земной поверхности в процессе моделирования движения фронта очистных работ. В физическом смысле это соответствует тому, что разупрочнение обрушенных пород происходит не мгновенно до конечных значений деформационных свойств, а изменяется во времени по мере подвигания забоя лавы. При этом принимается, что они на порядок ниже соответствующих показателей породного массива.

Одним из важных параметров крепи лавы является давление в ее стойках. На основе имеющихся инструментальных измерений этого давления можно качественно оценить полученные результаты геомеханического моделирования.

На рис. 3 приведено расчетное давление в крепи. Можно отметить, что оно имеет ярко выраженную цикличность, связанную с подвиганием очистного забоя, и изменяется в интервале 20–50 МПа.

На рис. 4 показано характерное давление, измеренное в стойках крепи лавы № Б2-н Березовского рудника 1 РУ. Изменение давления во времени в полной мере отражает циклический характер системы отработки: в момент перестановки крепи в стойках создается давление порядка 20 МПа, по мере ведения очистных работ происходит увеличение давления до значений, определяемых положением стойки крепи в лаве, горно-геологическими и горнотехническими условиями очистной выемки. В данном случае максимальное давление находится в диапазоне 40–50.

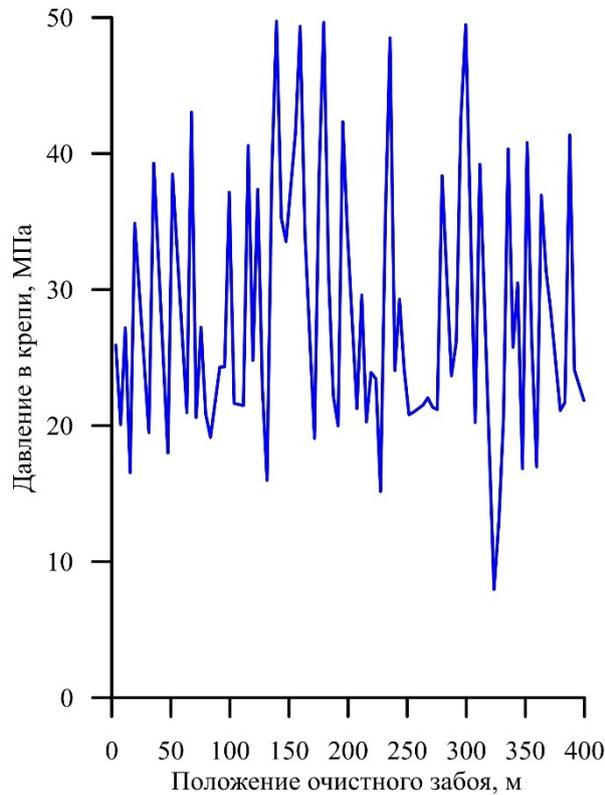


Рис. 3.
Расчетное давление в крепи

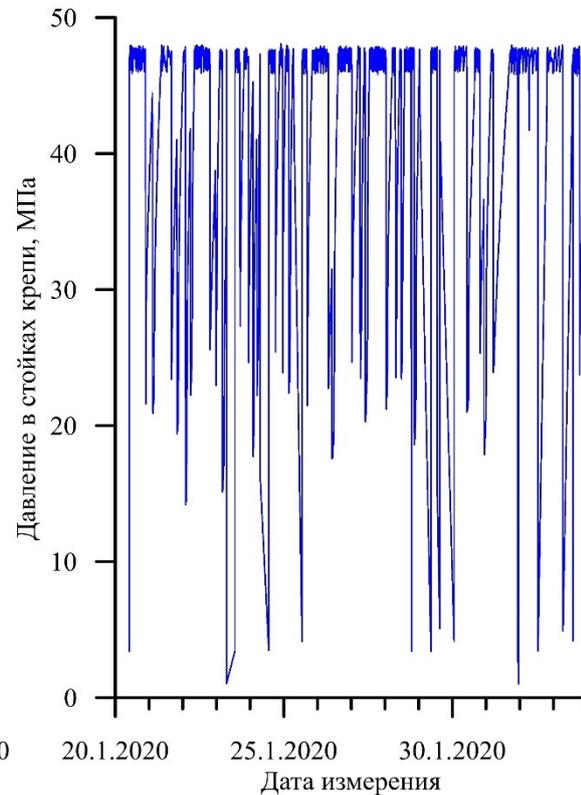


Рис. 4. Давление в стойках крепи лавы № Б2-н Березовского рудника 1 РУ по датчику 83а

Таким образом, полученные в результате математического моделирования расчетные значения давления в крепи качественно полностью согласуются с данными натурных измерений.

Выводы

Построенная двухмерная геомеханическая модель позволяет в полной мере отразить горно-геологические и горнотехнические условия ведения горных работ. Полученные результаты математического моделирования хорошо согласуются с данными инструментальных измерений смещений земной поверхности и давления в стойках призабойной крепи, что свидетельствует об адекватности описания процесса деформирования породного массива при слоевой выемке пластов длинными очистными забоями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-45-596001 р_НОЦ_Пермский край и Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prugger F.F., Prugger A.F. Water problems in Saskatchewan potash mining – what can be learned from them // CIM Bulletin. – 1991. – V. 84, № 945. – P. 58–66.
2. Шиман М.И. Предотвращение затопления калийных рудников. – М.: Недра, 1992. – 160 с.: ил.
3. Пономаренко Т. Экологические, экономические и социальные последствия аварийных ситуаций на калийных рудниках // Management Systems in Production Engineering. – 2012. – № 2 (6). – С 28–31.
4. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
7. Барях А.А., Федосеев А.К. О механизме формирования карстовых провалов на земной поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 12–22.
8. Барях А.А., Шумихина А.Ю., Токсаров В.Н., Лобанов С.Ю., Евсеев А.В. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей // Горн. журн. – 2011. – № 11. – С. 15–19.
9. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // Adv. Rock Mech. – 1974. – V.1, Pt A. – P. 127–140.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2021.2.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА НОРТОНА
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ
СОЛЯНЫХ ПОРОД**

И.А. Морозов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Описание процесса деформирования соляных пород в условиях длительного нагружения требует использования специальных моделей механики сплошной среды, позволяющих учитывать фактор времени. Одной из наиболее простых с точки зрения параметрического обеспечения является модель ползучести, в которой связь между скоростью установившейся ползучести и уровнем действующих напряжений выражается в виде степенной зависимости (закон Нортон). На основании данных лабораторных исследований образцов сильвинита и карналлита в условиях длительного одноосного нагружения установлено, что закон Нортон хорошо описывает стадию установившейся ползучести соляных пород. По результатам обработки и анализа данных лабораторных исследований породных образцов получены параметры ползучести сильвинита и карналлита, предназначенные для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего горные выработки.

Ключевые слова: соляные породы, сильвинит, карналлит, ползучесть, закон Нортон.

Исследованию ползучести горных пород посвящено большое количество работ [1–5 и др.]. В настоящее время существуют математические модели, позволяющие с достаточной степенью точности описать все три стадии ползучести соляных пород: неустановившуюся, установившуюся и прогрессирующую [6–8]. На практике выбор той или иной модели обуславливается точностью аппроксимации экспериментальных кривых ползучести, а также количеством параметров, необходимых для идентификации принятой модели. В связи с тем, что получение экспериментальных данных о деформировании горных пород в режиме длительного нагружения представляет очень трудоемкий и дорогостоящий процесс продолжительностью до нескольких месяцев и даже лет, для решения практических задач целесообразно делать выбор в пользу более простых моделей с минимальным количеством параметров. Поэтому целью настоящей работы является изучение возможности применения закона Нортон для описания процесса ползучести соляных пород.