

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ ВБЛИЗИ ШАХТНОГО СТВОЛА

Журавков М. А., Николайчик М. А., Климович Н. М.

Белорусский государственный университет

Введение. В настоящее время компьютерное (численное) моделирование находит все больше применений в различных областях механики: биомеханике, гидро- и аэродинамике, электродинамике и т. д. Не исключением стало и его применение в геомеханике. В частности, широкое распространение в геомеханике получило численное моделирование геомеханического состояния массива при ведении горных работ, возведении подземных геотехнических сооружений, а также эксплуатации объектов горнодобывающей промышленности. Данное исследование посвящено определению напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива от глубины ведения горных работ до дневной поверхности.

На сегодняшний день, анализ литературных источников показывает немногочисленное количество работ по данной тематике. Малое количество работ, посвященных моделированию НДС массива от глубины ведения горных работ до дневной поверхности объясняется сложностью данного направления исследований, обусловленную большим количеством параметров, которые необходимо учитывать при составлении механико-математических моделей. Многие из этих работ посвящены изучению характеристик мульды оседания (максимальное оседание, ширина мульды и т. д.) дневной поверхности, так, например, в [1] исследуется взаимосвязь между коэффициентом оседания дневной поверхности и глубиной разработки при камерной системе ведения горных работ. В [2–3] изучаются характеристики динамического оседания массива с помощью моделей, основанных на объединении вязкоупругих и вероятностных моделей. В [4–5] исследуется напряженное состояние вблизи зон добычи полезных ископаемых и их влияние на вышележащую поверхность с помощью сопряжения нескольких численных методов.

В данной статье рассматривается задача моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива при его отработке столбовой системой (отработка большими площадями) от глубины ведения горных работ до дневной поверхности в окрестности шахтного ствола. Цель исследования заключается в изучении характеристик мульды оседания (максимального оседания и ширины мульды) дневной поверхности и их верификация с данными натурных замеров. Также, в рамках исследования, проводился анализ взаимного влияния проходки лавы и шахтного ствола в подработанном массиве горных пород.

Постановка задачи. В качестве модельной задачи рассматривался процесс отработки породного массива одиночной лавой (широким очистным забоем) в окрестности шахтного ствола. Горные работы велись на глубине 555 м.

Геомеханическая модель строилась с учетом следующих обобщенных слоев: верхний осадочный слой мощностью 105 м, следующий слой глинисто-мергелистой толщи (ГМТ) мощностью 265 м и нижележащая соленосная толща. Геометрические размеры численной модели выбирались с учетом отсутствия влияния отдаленных границ модели на НДС участка породного массива, где велись очистные работы и проходил шахтный ствол. Высота области моделирования равнялась 2000 м, радиус – 20 000 м. Высота лавы принималась равной 2,15 м, ширина лавы в направлении, пер-

пендикулярном направлении забоя – 221 м, общая длина вынимаемого столба по направлению движения забоя – 2600 м. Радиус шахтного ствола равнялся 4 м, толщина бетонной крепи – 0,7 м, высота шахтного ствола – 1000 м. Расстояние от шахтного ствола до границы области, обрабатываемой лавой, принималось равным 385 м. При этом шахтный ствол находится в зоне влияния очистных работ.

В качестве модели поведения грунтов, составляющих обобщенные слои, была выбрана модель Кулона-Мора. Физико-механические свойства материалов, используемых в качестве исходных данных, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства материалов

Параметр	Осадочный слой	ГМТ	Соленосная толща	Бетон Б30
Модуль упругости, ГПа	2,76	0,56	2,05	32,5
Коэффициент Пуассона	0,36	0,4	0,27	0,2
Угол внутреннего трения, град	11,12	46,55	41	–
Структурное сцепление, МПа	0,19	1,25	1,47	–
Предел прочности на сжатие, МПа	–	–	30	30
Плотность, кг/м ³	2043	2150	2400	2350

Модельные задачи решались в трехмерной постановке на базе метода конечных элементов (МКЭ). Каждая задача рассчитывалась в квазистатической постановке. Все тела механико-математической модели рассматривались как квазиоднородные и квазиизотропные упругопластические тела.

Граничные условия. Граничное условие на нижней границе модели представляло собой условие жесткого закрепления. К боковым границам прикладывалось горное (литостатическое) давление величиной ρgh , где ρ – плотность грунта, g – ускорение свободного падения, h – глубина залегания грунта. Задача решалась в поле силы тяжести и в полных напряжениях, т. е. на каждом последующем шаге учитывались напряжения, полученные на предыдущем шаге [6].

Ход решения. Алгоритм решения модельной задачи состоял из 3-ех расчетных шагов. На первом шаге массив рассматривался как упругая среда, на остальных – как упругопластическая [7].

На первом шаге определялось начальное (естественное) НДС ненарушенного породного массива.

На втором шаге определялось НДС породного массива после проходки шахтного ствола. Проходка шахтного ствола и постановка бетонной крепи учитывались в одном расчетном шаге. Модельная задача решалась с учетом напряжений, полученных на 1-ом шаге.

На третьем шаге вычислялось НДС породного массива после проходки лавы и окончания активного процесса сдвижения пород. На данном шаге в зону полного обрушения и активного трещинообразования, вставлялись блочные элементы в виде упругой связи, жесткость которой в вертикальном направлении – $2,4 \cdot 10^{11}$ Н/м, в направлении забоя – $1 \cdot 10^{13}$ Н/м, в направлении, перпендикулярном направлению забоя – $1 \cdot 10^{15}$ Н/м.

Жесткость упругой связи выбиралась таким образом, чтобы обеспечить выполнение следующих наблюдений за оседанием земной поверхности над одной из лав рудника, расположенного на Старобинском месторождении калийных солей:

– «...определяемая согласно действующему нормативному документу граница существенного оседания под влиянием очистной выемки в лаве располагается на расстоянии примерно 274 м от движущегося забоя лавы, образуя, таким образом, граничный угол в 63 градуса»;

– «...величина оседания по центру выработанного пространства на удалении 1243 м от забоя лавы достигает около 1070 мм, что составляет 83 % от расчетного согласно нормативному документу».

При этом задачи определения значения жесткостей упругих связей, а также выделения характерных зон нарушения предельного условия по напряжениям сжатия (рисунки 1, *a* и *б*) и зоны нарушения предельного условия Кулона-Мора (рисунок 1, *в*), которые впоследствии могут формировать свод возможного полного сдвижения над очистной выработкой и области разгрузки под обрабатываемым пространством, решались отдельно [7].

Высота свода обрушения и активного трещинообразования составляла 89 м., ширина в направлении, перпендикулярном направлению забоя (далее данное направление обозначается как «профиль 1») – 237 м, ширина в направлении забоя («профиль 2») – 2618 м (на уровне отработки лавы).

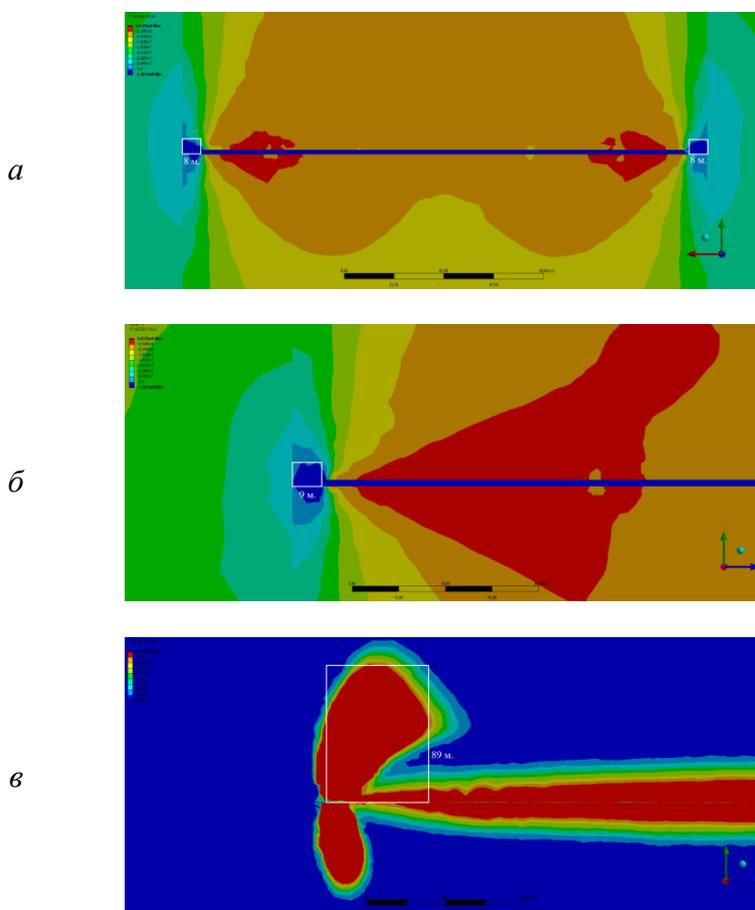


Рис. 1. Краевые зоны нарушения предельного условия: *a* – по напряжениям сжатия в 1-ом профиле; *б* – по напряжениям сжатия во 2-ом профиле; *в* – Кулона-Мора во 2-ом профиле

Результаты моделирования. На рисунках 2–3 представлены распределения вертикальных перемещений на дневной поверхности и в массиве горных пород после проходки лавы без учета шахтного ствола. В таблице 2 приведено сравнение результатов моделирования и натурных наблюдений.

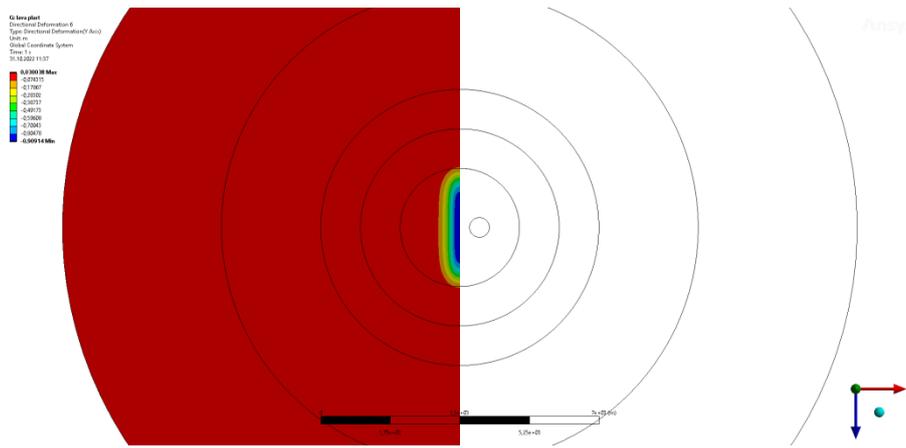


Рис. 2. Распределение вертикальных перемещений на дневной поверхности после проходки лавы без учета шахтного ствола

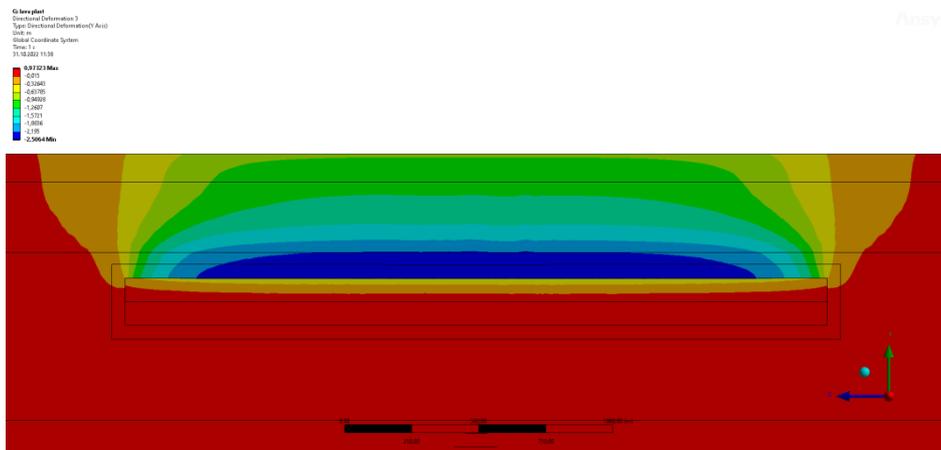


Рис. 3. Распределение вертикальных перемещений в породной толще после проходки лавы без учета шахтного ствола (профиль 2)

Таблица 2 – Сравнение результатов моделирования и данными натурных замеров

Данные	Максимальное оседание мульты сдвижения	Полуширина мульты минус полуширина лавы (профиль 2)
Согласно натурным замерам	1070 мм	274 м
По результатам моделирования	880 мм	329 м
Разница между полученными и исходными данными	18 %	20 %

Далее, на рисунках 4–6 приведены результаты моделирования НДС породного массива после проходки шахтного ствола без учета лавы.

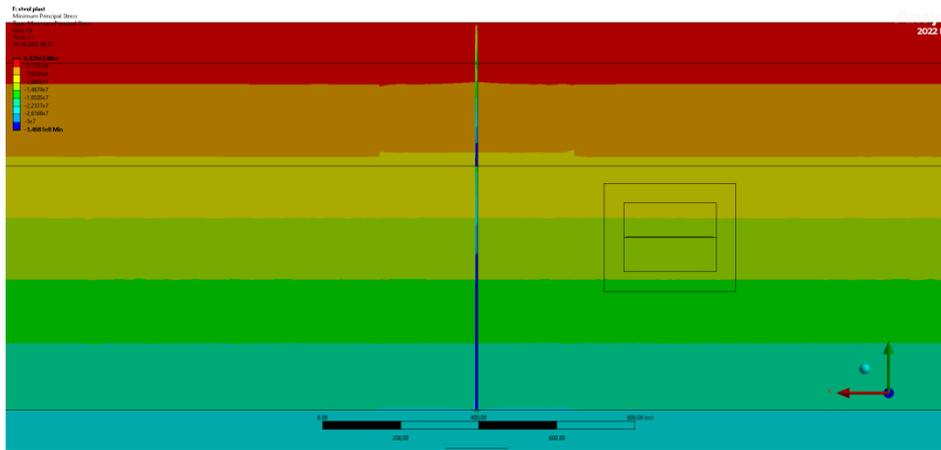


Рис. 4. Распределение сжимающих напряжений в породной толще после проходки шахтного ствола без учета лавы (профиль 1)

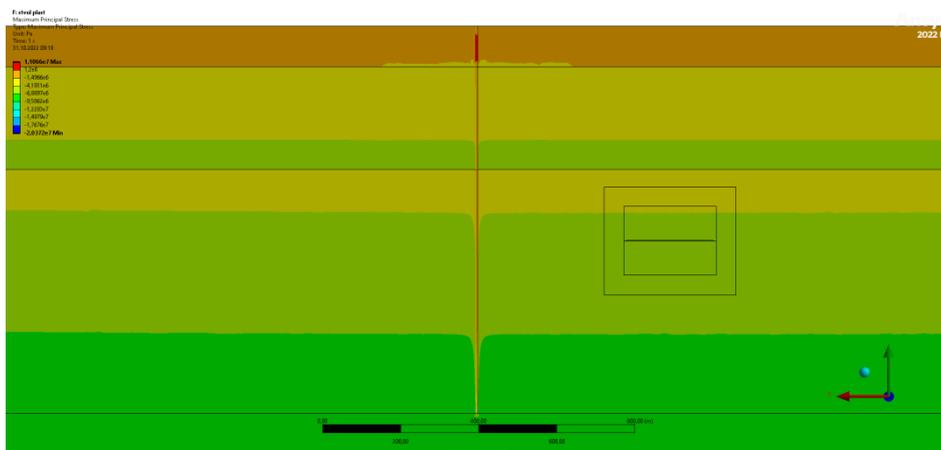


Рис. 5. Распределение растягивающих напряжений в породной толще после проходки шахтного ствола без учета лавы (профиль 1)

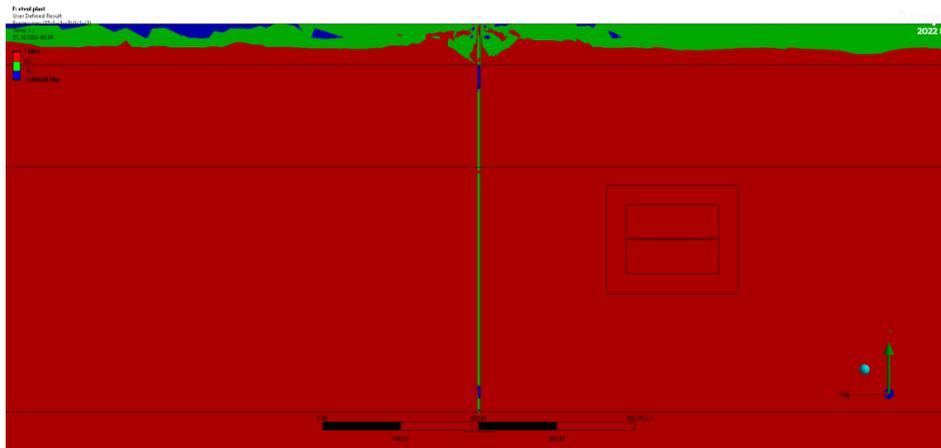


Рис. 6. Распределение коэффициента Надаи-Лодэ в породной толще после проходки шахтного ствола без учета лавы (профиль 1)

На рисунках 7–10 представлены результаты моделирования НДС породного массива после проходки сначала шахтного ствола, а затем лавы. В таблице 3 приведено сравнение результатов на 2-ом и 3-ем этапах моделирования.

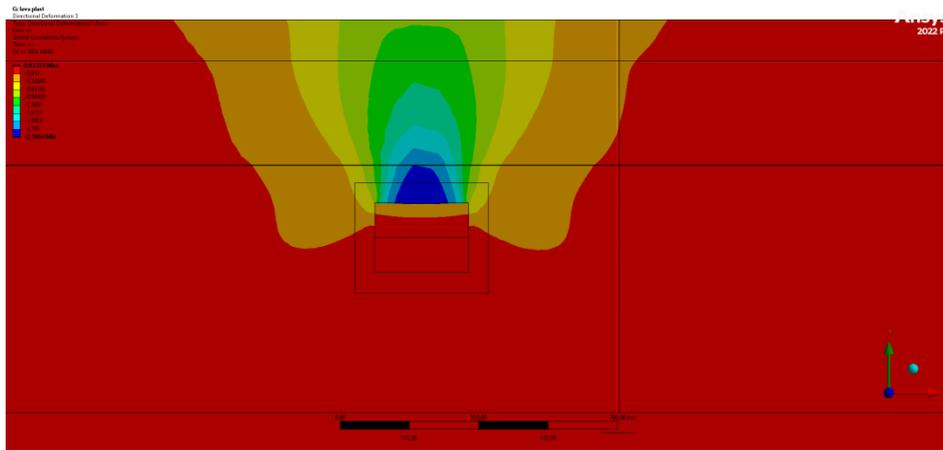


Рис. 7. Распределение вертикальных перемещений в породной толще после проходки шахтного ствола и лавы (профиль 1)

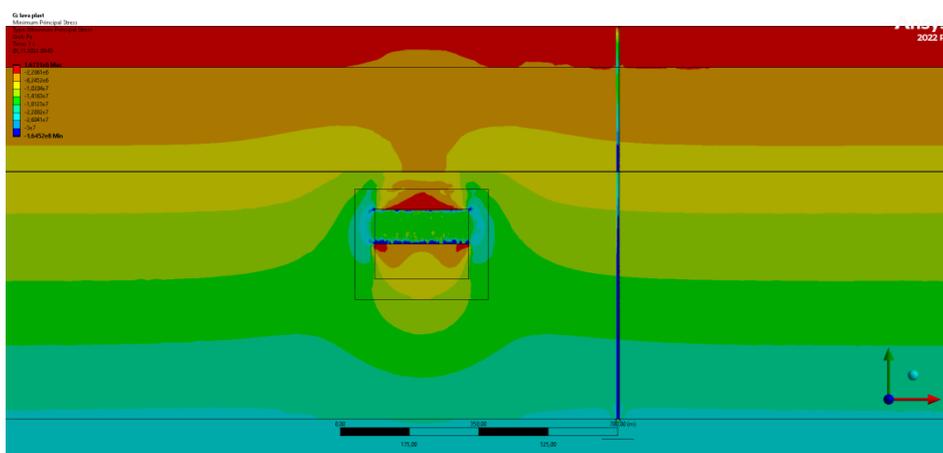


Рис. 8. Распределение сжимающих напряжений в породной толще после проходки шахтного ствола и лавы (профиль 1)

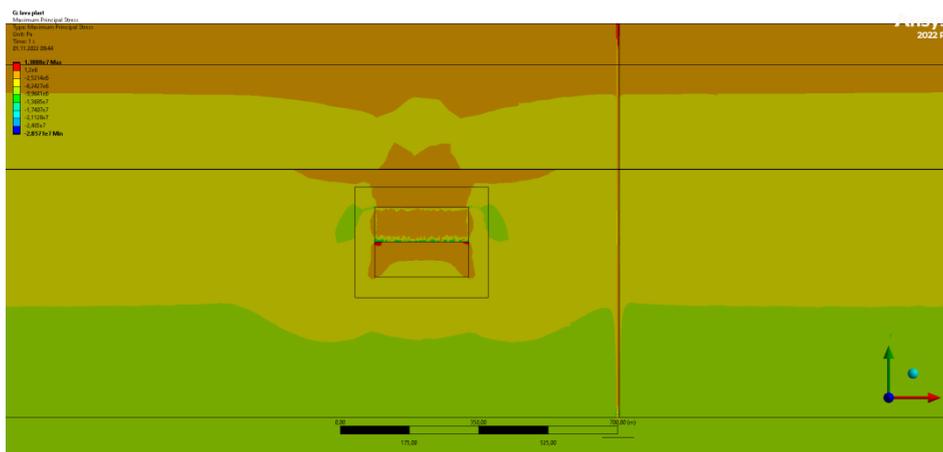


Рис. 9. Распределение растягивающих напряжений в породной толще после проходки шахтного ствола и лавы (профиль 1)

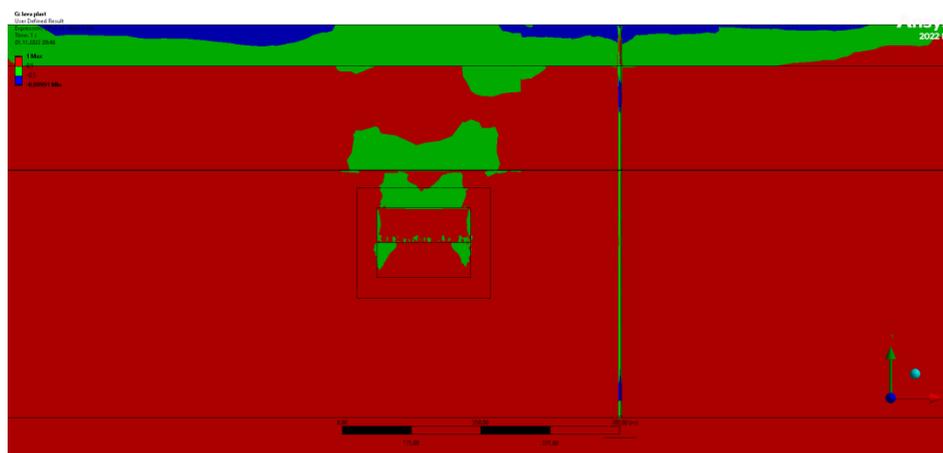


Рис. 10. Распределение коэффициента Надаи-Лоде в породной толще после проходки шахтного ствола и лавы (профиль 1)

Таблица 3 – Влияние наличия шахтного ствола на мульду оседаний дневной поверхности

	Максимальное оседание мульды сдвижения	Полуширина мульды минус полуширина лавы (профиль 2)	Полуширина мульды минус полуширина лавы (профиль 1)
По результатам моделирования без учета проходки шахтного ствола	880 мм	329 м	509 м
По результатам моделирования с учетом проходки шахтного ствола	909 мм	329 м	502 м
Разница между полученными результатами	3 %	0 %	1,4 %

Выполненные сравнительные расчеты показывают, что разница, при моделировании НДС породного массива после проходки лавы без учета шахтного ствола, между данными натурных замеров и результатами моделирования составляет 18–20 % (рисунки 2–3 и таблица 2).

При моделировании проходки шахтного ствола было замечено, что предельное значение по напряжениям сжатия в бетонной крепи достигается в окрестности переслаивания ГМТ-соленосная толща и в соленосной толще начиная с глубинной отметки равной 593 м (рисунок 4). Предельное значение по напряжениям растяжения превышает в бетонной крепи почти во всем осадочном слое (рисунок 5). По распределению коэффициента Надаи-Лоде [8] видно, что бетонная крепь находится в обобщенном напряженном состоянии сдвига (ближе к зумфу и на переслаивании осадочного слоя с ГМТ наблюдается обобщенное растяжение) (рисунок 6).

При моделировании проходки лавы после шахтного ствола наблюдается сохранение размера области, в которой достигается предельное значение по напряжениям растяжения (рисунок 9), однако, размер области, в которой превышает предельное значение по напряжениям сжатия увеличивается (глубинная отметка в соленосной толще увеличивается с 593 м до 490 м) (рисунок 8). По распределению коэффициента Надаи-Лоде (рисунок 10) наблюдается небольшое увеличение уже имеющихся зон обобщенного растяжения.

Так же стоит учитывать, что предельное состояние по условиям сдвига является более опасным нежели по напряжениям сжатия. Кроме того, фактическая прочность крепи превышает заявленные величины для данной марки бетона, так как используется ж/бетонная крепь, которая существенно увеличивает прочностные характеристики крепи.

По таблице 4 видно, что наличие шахтного ствола в окрестности ведения очистных работ оказывает не существенное (1,4–2 %) на характеристики мульды оседания.

Заключение. Таким образом, построена численная геомеханическая модель массива горных пород при его отработке столбовой системой в окрестности шахтного ствола, позволяющая моделировать трехмерное НДС породного массива от глубин ведения горных работ до дневной поверхности.

Численное моделирование проводилось на базе алгоритмов метода конечных элементов и метода блочных элементов. Все тела механико-математической модели рассматривались как квазиоднородные квазиизотропные упругопластические тела и соответствовали модели поведения грунтов Кулона-Мора.

В ходе моделирования были определены размеры зоны, представляющей собой свод обрушения и активного трещинообразования, а также характеристики мульды оседаний (максимальное оседание и ширина мульды) дневной поверхности. Верификация полученных результатов проводилась в соответствии с данными натурных замеров одного из рудников Старобинского месторождения калийных солей.

Анализ полученных результатов показал, что, даже в случае попадания в зону влияния очистных работ, изменение НДС шахтного ствола незначительно, что не приводит к критическим изменениям в нем. Данный факт дает возможность уменьшать расстояние между шахтным стволом и зонами ведения очистных работ, что поможет снизить оставляемые в недрах запасы полезных ископаемых.

Благодарность. Работа выполнена в рамках НИР кафедры теоретической и прикладной механики БГУ № 644/21 «Разработать математические модели и методы решения новых классов краевых задач механики сплошных сред применительно к актуальным современным проблемам науки и техники», ГПНИ «Конвергенция», задание 1.7.01.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. GUO Wen-bing. Relationship between surface subsidence factor and mining depth of strip pillar mining / GUO Wen-bing, HOU Quan-lin, ZOU You-feng // Transactions of Nonferrous Metals Society of China – 2011. – № 21 – P. 594–598.
2. Superposition model for analyzing the dynamic ground subsidence in mining area of thick loose layer / Defeng Hou [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018, – № 28 – P. 663–668.
3. Wen-Xiu Li. A visco-elastic theoretical model for analysis of dynamic ground subsidence due to deep underground mining // Applied Mathematical Modelling. – 2015. – № 39 – P. 5495–5506.
4. Francisco Zarate. A coupled fluid FEM-DEM technique for predicting blasting operations in tunnels // Underground Space. – 2018. – № 3 – P. 310–316.
5. Yang Ju. Numerical analysis of the dynamic evolution of mining-induced stresses and fractures in multilayered rock strata using continuum-based discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – №113 – P. 191–210.
6. Компьютерное моделирование в геомеханике / М. А. Журавков [и др.] // Минск : БГУ, 2008 – С. 200.

7. Моделирование геомеханического состояния породного массива при отработке подземного пространства большими площадями / М. А. Журавков [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов – 2022. – № 4. – С. 97–104.

8. Николайчик М. А. Оценка напряженно деформируемого состояния тубинговой крепи при тампонировании околоствольного массива / М. А. Николайчик, М. А. Журавков // «Теоретическая и прикладная механика» – 2021. – № 36 – С. 93–98.

Поступила: 15.03.2023