

УДК 001.891.574

***АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ГОРНОЙ ПОРОДЫ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ***

Кучуков А.М.

Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Россия, г. Пермь

Аннотация

В работе проведен расчет и анализ напряженно-деформированного состояния каменной соли в окрестности выработки с помощью численного моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench. Выполнено построение расчетной схемы с учетом влияния закрепленных сторон модели на поля напряжений и деформаций. Проведено исследование сходимости конечно-элементной сетки путем вычисления напряжений в одной и той же точке при различном количестве элементов. Выполнен анализ актуальной литературы по данной проблематике.

Ключевые слова: эффект масштабирования, сходимость сетки, горная выработка, анализ напряженно-деформированного состояния, ANSYS.

***ANALYSIS OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE ROCK IN
THE NEIGHBORHOOD***

Kuchukov A.M.

Student 4 course, Aerospace faculty

Department of "Mechanics of composite materials and structures"

Perm National Research Polytechnic University

Russia, Perm

Annotation

In this work, we calculated and analyzed the stress-strain state of rock salt in the vicinity of a mine using numerical modeling in the ANSYS Workbench software package. The calculation scheme is constructed considering the influence of the fixed sides of the model on the stress and strain fields. The convergence of the finite element mesh was studied by calculating the stresses at the same point for a different number of elements. The analysis of relevant literature on this issue.

Keywords: scaling effect, grid convergence, mining, stress-strain state analysis, ANSYS.

Введение

Горные породы внутри земной коры находятся в состоянии напряженного равновесия, вызываемого действием сил гравитационного и тектонического характера. Из-за отсутствия свободных пространств внутри массива без влияния внешних сил породы не могут перемещаться, изгибаться или изменять свою форму [1].

В результате проведения горных выработок соляные породы деформируются и переходят в новое состояние равновесия. Напряжение и силы, возникающие в горных породах, называют горным давлением [2].

Проблемой, исследуемой в данной работе, является разрушение горной породы при проведении работ в толще земли.

Основной целью является расчет и анализ напряженно-деформируемого состояния горной породы в окрестности выработки.

В литературе большое внимание уделено построению моделей деформирования и разрушения различных пород. В статье [3] представлена концептуальная модель деформирования и разрушения слоистой кровли угольного пласта при его отработке. Также рассматриваются реологические

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

модели деформирования и разрушения соляных пород, которая позволяет рассматривать первичные, вторичные и третичные деформации ползучести [4].

Многие работы численного моделирования процессов разрушения материалов посвящены зарождению и развитию трещин [5]. Алгоритм итерационных процедур основан на том, что при нагружении образца происходит расчет напряжений и деформаций в каждом элементе. После этого сверяются полученные значения в каждом элементе с критическим. Если в каком-то элементе это значение превышает допустимое, то этот элемент “умерщвляется”, а свойств материала в данном элементе умножается на малую величину, отличную от нуля [6]. Также алгоритм может включать в себя перестроение сетки после каждой итерации [7, 8]. Проблема многих исследований состоит в том, чтобы подобрать правильную сетку для расчета [9].

Постановка краевой задачи

Полная система уравнений теории упругости включает следующие уравнения [10]:

Уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (1)$$

Соотношения Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

Обобщенный закон Гука

$$\sigma_{ij} = C_{ijmn} \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

Граничные условия

$$u_i|_{\Gamma_u} = u_i^* \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}n_i|_{\Gamma_\sigma} = T_i^*$$

За материал была выбрана каменная соль с упругими характеристиками, представленными в таблице 1. Материал был принят за изотропный.

Таблица 1 – Упругие характеристики каменной соли

Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³	Модуль сдвига, МПа
150	0,3	2350	70

Массовые силы F_i были приняты близкими к нулю. Задача решалась в условиях плоско-деформированного состояния. Расчетная схема исходной модели представлена на рисунке 1. Углы отверстия в выбранной геометрической модели были скруглены с целью уменьшить в данном месте концентрацию напряжений.

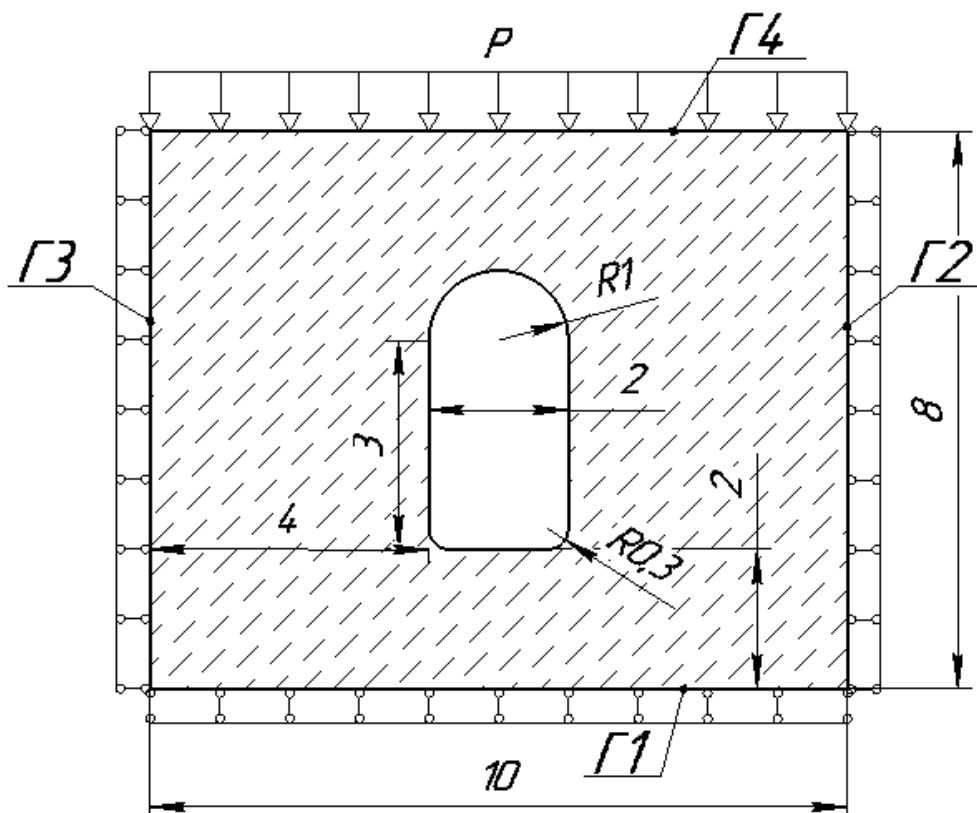


Рисунок 1 – Исходная модель горной породы в окрестности выработки

Исходя из принятых допущений и геометрии исходной области, постановка краевой задачи принимает вид:

Уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (5)$$

Соотношения Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (6)$$

Обобщенный закон Гука

$$\sigma_{ij} = E \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} u_2|_{\Gamma_1} &= 0 \\ u_1|_{\Gamma_2} &= 0 \\ u_1|_{\Gamma_3} &= 0 \\ S_2|_{\Gamma_4} &= S_0 \end{aligned} \quad (8)$$

Эффект масштабирования

При анализе напряженно-деформирования состояния геометрической модели были выявлены неоднородные поля напряжений (см. Рисунок 2).



Рисунок 2 – Напряжения σ_{33} в исходной геометрической модели

Как видно из рисунка 2, напряжения вблизи закрепленных сторон горной породы являются неоднородными. Данное явление было вызвано деформированием верхнего слоя породы над отверстием. Для того чтобы избавиться от неоднородности полей напряжений и деформаций, расстояние между закрепленными сторонами и отверстием постепенно увеличивалось, что было необходимо для получения достоверных результатов численного моделирования. В результате проделанных операций поля напряжений вдали отверстия стали однородными, что и требовалось получить.

Исследование сходимости конечно-элементной сетки

На геометрической модели путем перестроения сетки с различным количеством элементов были вычислены компоненты тензора напряжений в одной точке. Все данные были занесены в таблицу и построены графики зависимости значений компонентов тензора напряжений от количества элементов в сетке. Было построено 20 различных сеток с количеством элементов

от 464 до 29988. График зависимости компоненты тензора напряжений σ_{11} от количества конечных элементов в расчетной сетке представлен на рисунке 3.

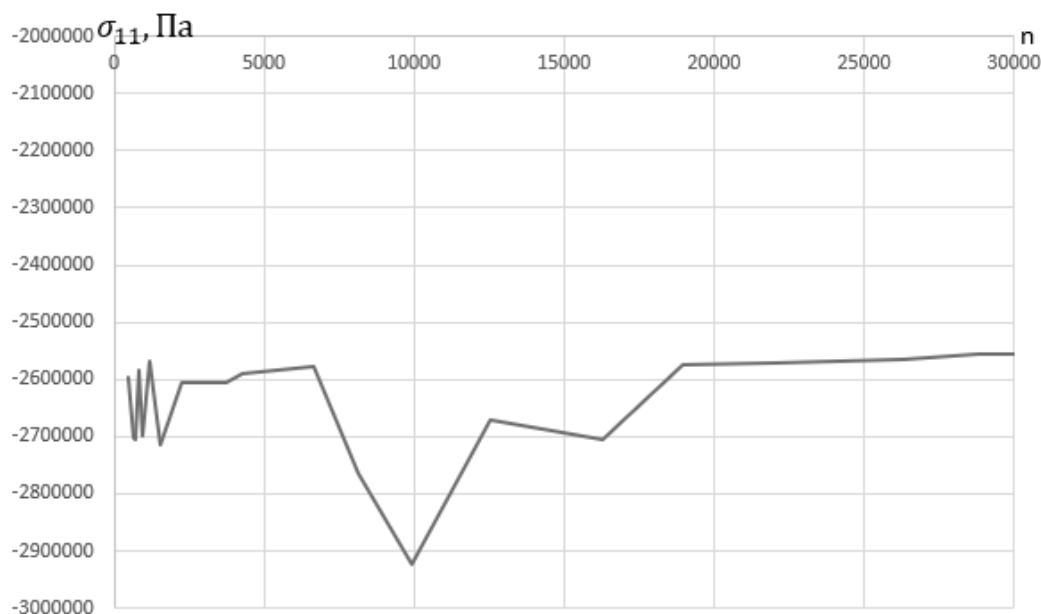


Рисунок 3 – Зависимость σ_{11} от количества элементов в расчетной сетке

Как видно из графика, сходимость конечно-элементной сетке была достигнута. Расчет напряженно-деформированного состояния был проведен на сетке с размером конечного элемента 0,13 м (см. Рисунок 4).

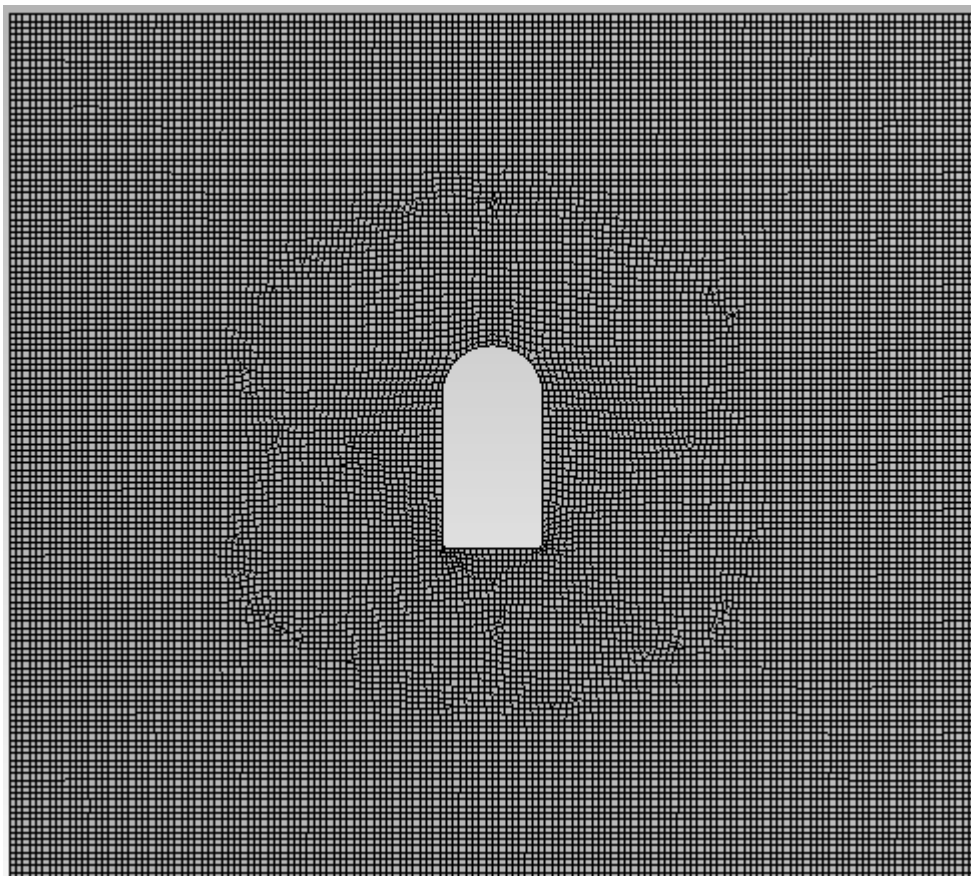


Рисунок 4 – Конечно-элементная сетка с размером элемента 0,13 м

Использование данной конечно-элементной сетки было принято за оптимальное ввиду того, что затрачиваются меньшие ресурсы вычислительной машины, что приводит к уменьшению времени расчета при небольшой погрешности вычислений.

Анализ напряженно-деформированного состояния горной породы

Благодаря исследованию влияния закрепленных сторон расчетной схемы на поля напряжений и деформаций, а также анализу сходимости конечно-элементной сетки, были получены достоверные результаты напряженно-деформированного состояния горной породы в окрестности выработки. Эквивалентные поля напряжений по Мизесу представлены на рисунке 5.

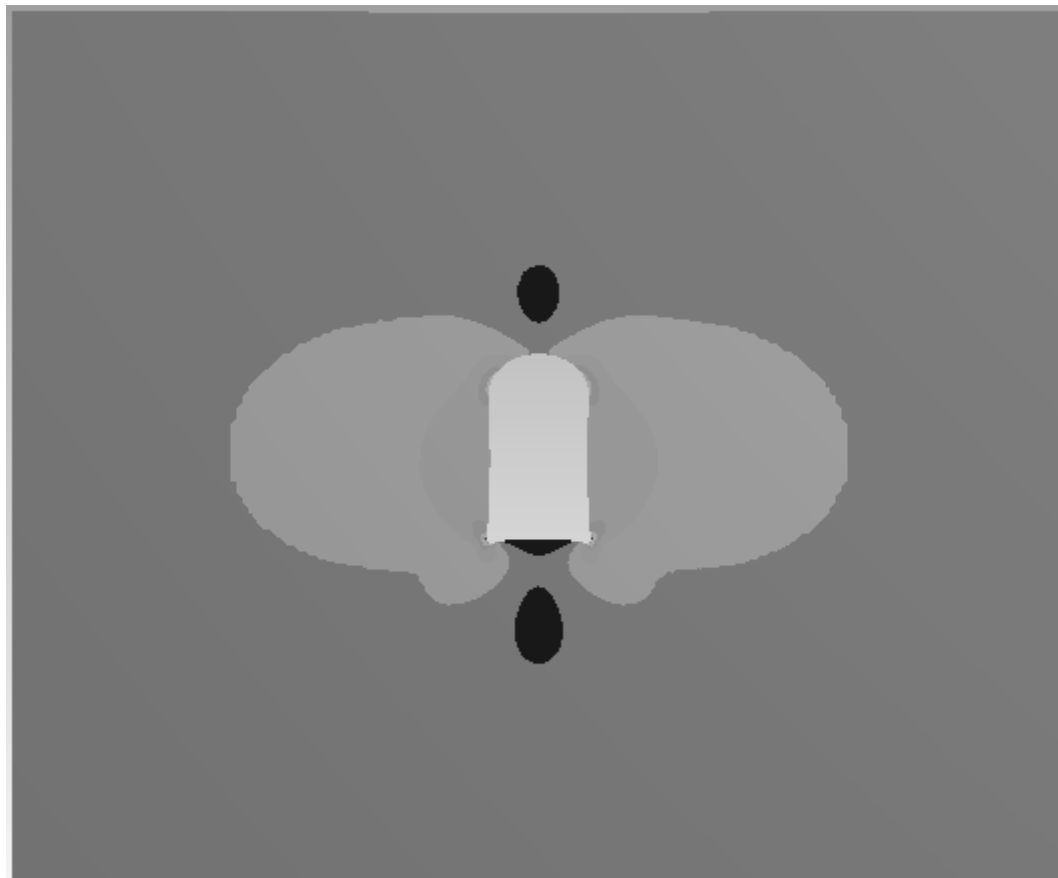


Рисунок 5 – Эквивалентные напряжения по Мизесу

Исходя из анализа полей эквивалентных напряжений по Мизесу можно заметить максимальные напряжения в области скругленных углов туннельного отверстия, что соответствует реальным условиям эксплуатации горных пород в окрестностях выработок.

Вывод

В ходе анализа предварительных полей напряжений и деформаций была выявлена их неоднородность вблизи закрепленных сторон горной породы. С помощью увеличения расстояния от закрепленных сторон до отверстия была достигнута необходимая однородность полей напряжений и деформаций.

Построен график зависимости значений тензора напряжений в одной и той же точке от количества конечных элементов. Показана сходимость конечно-

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

элементной сетки. Была выявлена и использована в дальнейших расчетах наиболее оптимальная сетка.

При проведении численного эксперимента были проанализированы поля напряжений и деформаций в окрестностях горной выработки. Наибольшие напряжения достигаются в местах скругления туннельного отверстия.

Работа выполнена в рамках НИРС [11].

Библиографический список

1. Еловикова А.С. Анализ напряженно-деформированного состояния соляного породного массива в окрестности горных выработок разной формы / А.С. Еловикова // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 130-132.

2. Введение в механику подземных сооружений: учебное пособие / М.Г. Зерцалов. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 116 с.

3. Трофимов В.А. некоторые закономерности, определяющие расслоение и посадку пород кровли выработки при отработке угольных пластов / В.А. Трофимов, Ю.А. Филиппов // Безопасность труда в промышленности. – 2015. - №5. – С.50-55.

4. Ермашов А.О. Численное моделирование деформирования и разрушения образцов соляных пород / А.О. Ермашов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. - №7. – С.74-81.

5. Ядров В.И. Моделирование роста поверхностной трещины под действием циклической нагрузки в программе ANSYS // Омский научный вестник. – 2014. - № 3. – С. 152-156.

6. Sadrnejad, S.A. Numerical modelling for the evaluation of progressive damage to plain concrete structures/ S.A. Sadrnejad // Journal of the south African institution of civil engineering. – 2010. – Vol. 52, № 2. – P. 19-30.

7. Сметанников О.Ю. Численная модель развития трещины при повторном гидроразрыве пласта / О.Ю. Сметанников, Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, Д.В. Шустов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т.8, № 2. – С. 208-218.

8. Каспарова Е.А. Численные и аналитические методы моделирования роста и взаимодействия трещин / Е.А. Каспарова, П.С. Шушпанников // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 79-91.

9. The Sandia Fracture Challenge: blind round robin predictions of ductile tearing / В. L. Boyce, S. L. B. Kramer, H. E. Fang et al. // International journal of fracture. – 2014. – Vol. 186, № 1-2. – P. 5-68.

10. Соколкин Ю.В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. / Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М.: Наука, 1984. – 115 с.

11. Методические указания по проведению научно-исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» / Е.Ю. Макарова, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2017. – 40 с.

Оригинальность 79%