

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ГЕОМЕХАНІКА.**  
**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО**  
**СТАНУ ПОРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА НАВКОЛО ПІДЗЕМНОЇ**  
**ВИРОБКИ**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
**ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ**

Дніпро  
НТУ «Дніпровська політехніка»  
2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



**ДНІПРОВСЬКА  
ПОЛІТЕХНІКА**  
1899

**ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА**  
*Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки*

**ГЕОМЕХАНІКА.  
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО  
СТАНУ ПОРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА НАВКОЛО ПІДЗЕМНОЇ  
ВИРОБКИ**  
**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ**

*для студентів спеціальності 184 Гірництво*

Дніпро  
НТУ «Дніпровська політехніка»  
2018

Шашенко О.М. Геомеханіка. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану породного середовища навколо підземної виробки : методичні рекомендації до виконання практичних завдань дисципліни «Геомеханіка» для студентів спеціальності 184 Гірництво / О.М. Шашенко, Н.В. Хозяйкіна, В.А. Чередник. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. – 30 с.

Автори:

О.М. Шашенко, д-р техн. наук., проф.;

Н.В. Хозяйкіна, канд. техн. наук, доц.;

В.А. Чередник, аспірант.

Рекомендовано до видання редакційною радою ДВНЗ «НГУ» (протокол №3 від 21.03.2018) за поданням кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки (протокол №9 від 21.02.2018).

Подано методичні рекомендації до виконання практичних завдань дисципліни «Геомеханіка» для студентів спеціальності 184 Гірництво.

Розглянуто алгоритм комп'ютерного моделювання геомеханічних процесів навколо протяжної одиночної виробки, що знаходиться поза зоною впливу очисних робіт.

Методичні рекомендації передбачають виконання розрахункових завдань у комп'ютерному класі з використанням програмного продукту *Phase 2* канадської компанії Rockscience з викладачем та під час самостійної роботи.

Рекомендується також для розроблення курсового та дипломного проєктів (робіт).

Відповідальний за випуск: завідувач кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, д-р техн. наук, проф. С.М. Гапєєв.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Вступ.....  | 4  |
| Загальні відомості щодо улаштуванню пакетів програм методу<br>скінченних елементів..... | 5  |
| Вихідні данні.....  | 6  |
| Порядок виконання завдання.....   | 7  |
| 1. Параметри проекту.....   | 7  |
| 2. Визначення границь досліджуваної області.....  | 8  |
| 3. Створення скінчено-елементної сітки.....   | 10 |
| 4. Дискретизація границь.....   | 10 |
| 5. Граничні умови.....  | 11 |
| 6. Властивості породного масиву.....  | 12 |
| 7. Виїмка матеріалу з виробки.....  | 17 |
| 8. Загальний вигляд створеної моделі.....   | 18 |
| 9. Розрахунок.....  | 18 |
| 10.Інтерпретація результатів.....   | 19 |
| 11.Експорт відображень.....   | 27 |
| 12.Висновок.....  | 27 |
| 13.Список рекомендованої літератури.....  | 28 |
| 14.Додаток А.....   | 29 |

## ВСТУП

Дійсні методичні вказівки є опис методики самостійного виконання студентами індивідуального завдання з дисципліни «Геомеханіка» в розділі «Чисельне моделювання геомеханічних процесів».

Метою виконання даного індивідуального завдання є отримання студентом навички комп'ютерного моделювання геомеханічних процесів навколо протяжної одиночної виробки, що знаходиться поза зоною впливу очисних робіт, і складається в умінні:

- підготувати розрахункову модель в одному з існуючих програмних пакетів (ПП), що реалізує метод скінченних елементів (МСЕ);
- виконати необхідні розрахунки;
- проаналізувати отримані результати;
- підготувати звіт про виконання досліджень.

Основна ідея індивідуального завдання полягає в виконання аналізу напружено-деформованого стану (НДС) породного масиву, який представлений скінчено-елементною апроксимованою досліджуваною областю і знаходиться в плоско-деформованому стані, з урахуванням глибини залягання ( $H$ ) і власної ваги порід ( $\gamma$ ), тобто в гравітаційно-напруженому стані.

Гравітаційне напруження в масиві представлено як  $\sigma_{\text{верт}} = \gamma H$  - це тиск власної ваги порід від поверхні до деякої заданої (кінцевої) глибини ( $0 \leq H \leq H_k$ ).

Задачі студента, що виконує індивідуальне завдання, полягають у наступному:

- а) на основі індивідуальних геометричних параметрів побудувати розрахункову схему моделі, апроксимувати досліджуваний масив скінчено-елементної сіткою, задати фізико-механічні властивості породного масиву і граничні умови;
- б) провести розрахунок;
- в) інтерпретувати результати розрахунку і виконати аналіз напружено-деформованого стану породного масиву, який деформується відповідно до закону Гука (лінійно-пружна деформація);

г) підготувати звіт про виконану роботу.

**Звіт про виконану роботу подається в друкованому вигляді та має містити:**

- титульна сторінка (див. Додаток А);
- вихідні дані розрахункового завдання;
- розрахункову схему;
- картини напружено-деформованого стану досліджуваної області породного масиву навколо круглої виробки;
- сформовані висновки за результатами аналізу (чисельне рішення порівнюється з аналітичним);
- висновок.

***Загальні відомості щодо улаштуванню пакетів програм (ПП),  
що реалізують метод скінченних елементів (МСЕ)***

Існує досить велика кількість розрахункових пакетів, що реалізують в чисельному вигляді метод скінченних елементів.

З відомих потужних ПП можна назвати ANSYS, Solidworks, PLAXIS, Phase 2, RS 2 та ін.

Розроблені ПП мають різні за зручністю для користувача інтерфейси і швидкості рахунку, проте загальна архітектура пакетів в цілому схожа. Такі ПП мають три основні структурні елементи:

- **препроцесор** призначений для підготовки базової геометрії розрахункової моделі; створення сітки скінченних елементів, апроксимуючої досліджувану область моделі; завдання граничних умов і фізико-механічних властивостей вміщуючих гірських порід в моделі;
- **процесор** (розрахунковий модуль), який власне і виконує обчислювальні процедури по МК, відповідно до заданого типу аналізу і моделі середовища;
- **постпроцесор** служить для обробки та подання (графічних або чисельних) результатів розрахунку.

Хід виконання індивідуального завдання розглядається стосовно ПП Phase 2.

***Вихідні данні.***

1. Породний масив – однорідний, представлений гірською породою - алевроліт.
2. Межа міцності на одноосьовий стиск –  $R_{cm}$  (кг/см<sup>2</sup>).
3. Об'ємна вага гірської породи –  $\gamma$  (т/м<sup>3</sup>).
4. Глибина закладання виробки –  $H$  (м).
5. Напівпроліт (радіус) виробки -  $R_0$  (м).

*Значення вихідних даних відповідають варіанту даних індивідуального розрахункового завдання № 1 [1].*

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

### Запустити програму *Phase 2*.

Натисніть «Пуск» → «Програми» → Rocscience → Phase 2 7.0 → Phase 2.

Якщо програма не розгорнута на весь екран, зробіть це. Для подальшої роботи з моделлю так буде зручніше.

Під час запуску програми буде створено новий документ, так що відразу можете приступити до роботи після запуску.

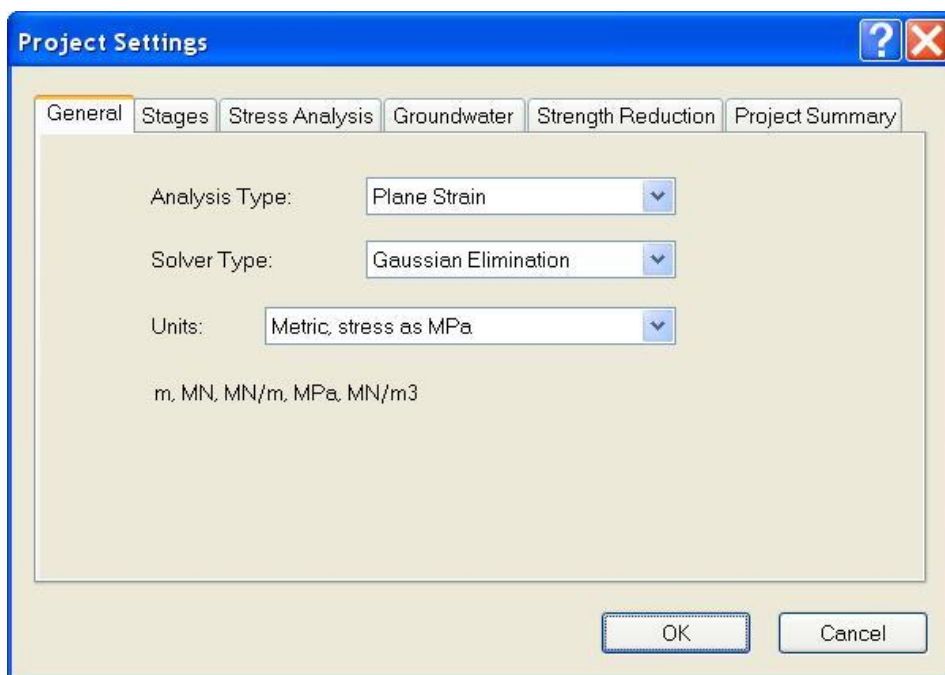
### 1. Параметри проекту



Вікно «Параметри проекту» використовується для вибору головних параметрів аналізу моделі *Phase 2*.

У даному випадку не потрібно змінювати попередньо налаштовані значення, але подивимося на це вікно.

Оберіть: Аналіз (*Analysis*) → Параметри проекту (*Project Settings*)



Оскільки під час розрахунку будемо використовувати метричні (МПа) одиниці переконайтеся, що одиниці (*Units*) встановлені метричні (МПа), на вкладці Загальні (*General*). Це визначить одиниці ваги, довжини, сили, напружень, що використовуються в аналізі.



Примітка: *Phase 2* запам'ятовує значення одиниць (*Units*), які нещодавно використовувалися в проекті.

Такі параметри використовуються для усіх нових документів.

Оберіть вкладку *Стадії (Stages)*. Зазначимо, що в даному випадку задача буде вирішуватися тільки в одну стадію.

Оберіть вкладку *Опис проекту (Project Summary)* і наберіть назву проекту.

Не змінюйте інші параметри проекту. Натисніть «Так» (OK).

## 2. Визначення границь досліджуваної області

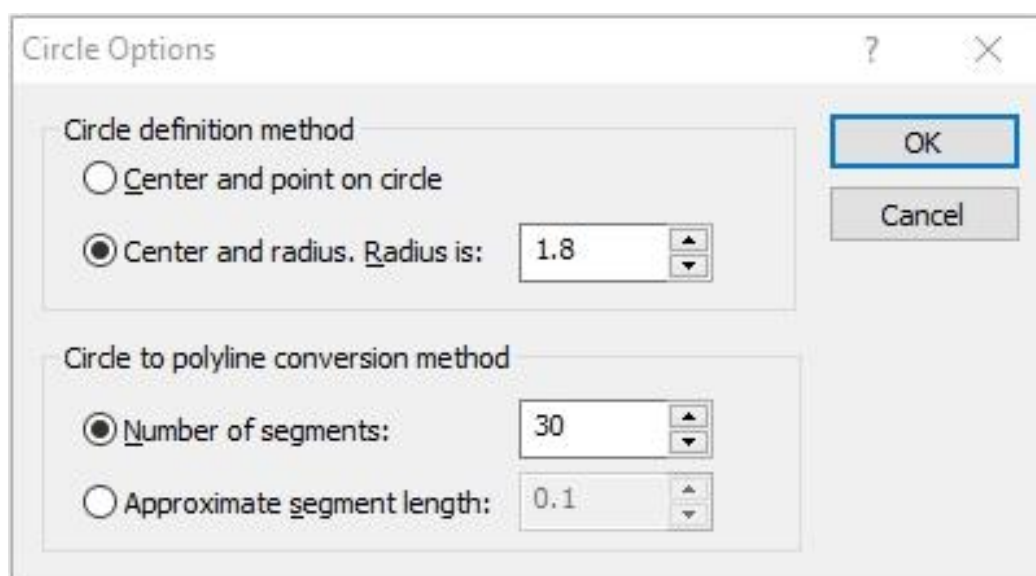
Спочатку створіть виробку:

Оберіть: *Границі (Boundaries)* → *Додати виробку (Add Excavation)*

Введіть необхідну інформацію в рядок введення в правому нижньому кутку екрану: *Enter vertex [t=table, i=cancel]* Вводимо: **i** (так як створюємо окружність – круга виробка).


Якщо ввести “i” (англ.) в строку введення, то з’явиться діалогове вікно, в якому вказується радіус виробки і кількість сегментів, на які буде розбита окружність. Враховуйте, що дуги в *Phase 2* насправді це набір прямолінійних відрізків. Меню дуги і багато інших корисних функцій доступні в контекстному меню при натисненні правої кнопки миші.

У меню вказуємо радіус виробки ( $R_0$ ) (вихідні дані) і кількість сегментів і далі тиснемо «Так» (OK).



У результаті цих дій отримали окружність, заданого радіуса. Для подальшої роботи необхідно задати центр окружності.

У правому нижньому кутку висвітилося «віконце» з написом: *Enter circle center [u = undo; esc = cancel]* у рядок введення в правому нижньому кутку екрану вводимо: 0 \_ 0 і далі *enter*.

Оберіть «Zoom All»  (або натисніть F2), щоб вмістити всю виробку по центру екрана монітора.

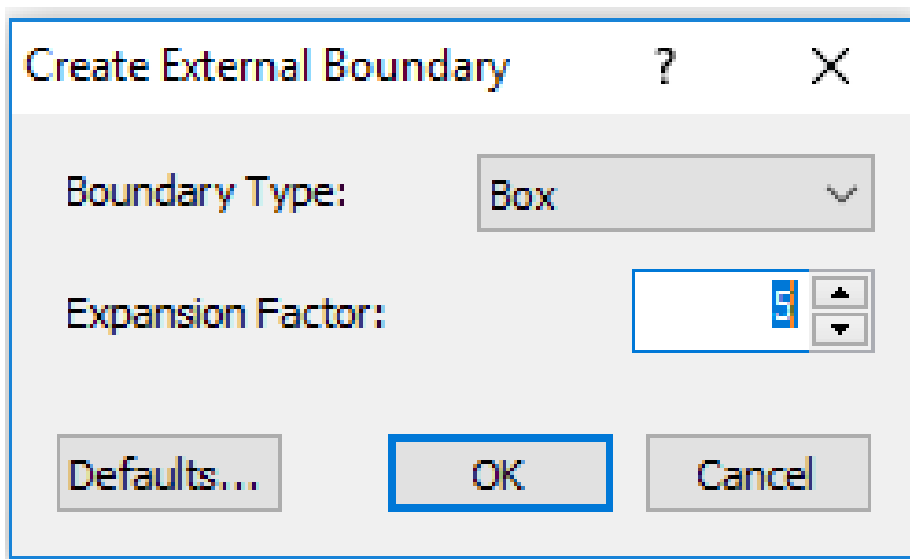
## 2.1. Створення зовнішньої границі



У *Phase 2* зовнішню границю можна створити автоматично або вручну. Використовуємо один з видів автоматичного створення.

Оберіть: *Границі (Boundaries)* → Додати зовнішню границю (*Add External*).

З'явилося діалогове вікно «Створити зовнішню границю» (*Create External Boundary*).



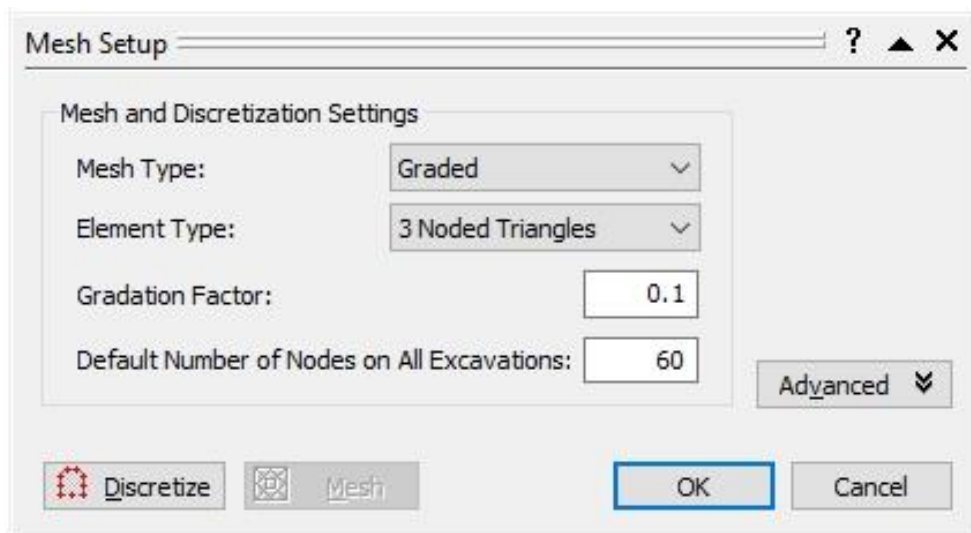
Використовуємо параметри *Тип границі (Boundary Type)* = Коробка (*Box*) и Коефіцієнт віддалення (*Expansion Factor*) = 5, натисніть «Так» (*OK*), зовнішня границя буде створена автоматично.

Границі для досліджуваної області введені.

### 3. Створення скінчено-елементної сітки



Наступний крок - створення скінчено-елементної сітки. У *Phase 2* створення сітки простий процес з двох кроків. Спочатку необхідно створити дискретизацію границь, а потім створити сітку. При цьому можна налаштовувати багато параметрів в «*Опції сітки*» (*Mesh Setup*) перед створенням сітки. Змінимо деякі параметри, хоча спочатку є встановлені параметри, які будуть використовуватися, якщо не користуватися «*Опціями сітки*» (*Mesh Setup*).



Оберіть: *Сітка (Mesh)* → *Опції сітки (Mesh Setup)*

Введіть:

*Тип сітки (Mesh Type)* = *Ступеневий (Graded)*

*Тип скінчених елементів. (Elem. Type)* = *3 - вузлові трикутники (3 Noded Triangles)*

*Коефіцієнт укрупнення (Gradation Factor)* = *0.1*

*Кількість вузлів на контурі виробки (Default Number of Nodes on All Excavations)* = *60*

Натисніть «*Так*» (*OK*).

### 4. Дискретизація границь



Оберіть: *Сітка (Mesh)* → *Дискретизація (Discretize)*

Дискретизація границь (червоні хрестики на границях) формування розміченої рамки для скінчено-елементної сітки. Відзначимо, що відомості про дискретизацію

відображаються в рядку статусу, показуючи кількість елементів дискретизації для кожного типу границі.

*Discretizations: Excavation = 59 External = 49*

або в українській версії

*Дискретизація: Виробка = 59 Зовнішня границя = 49*

Відмітимо, що задано кількість елементів на границі 60, а отримано 59. Не турбуйтеся, це нормальний результат процесу розбиття, кількість одержаних елементів не завжди збігається з введеним. Кількість елементів завжди можна скорегувати в «*Опціях дискретизації*» (Discretization options).

**4.1. Створимо сітку**, обравши «*Опції сітки*» (*Mesh option*) з панелі або з меню сітки (*Mesh menu*).

Оберіть: *Сітка (Mesh)*



Сітка створена без додаткового втручання користувача. Після створення в рядку статусу відображається кількість елементів і вузлів сітки:

*ELEMENTS = 1173 NODES = 2240* або *ЕЛЕМЕНТИВ = 1173 ВУЗЛИВ = 2240*

Примітка: можна створити дискретизацію і сітку натиснувши одну кнопку «*Дискретизація і сітка*» (*Discretize and Mesh*).

## **5. Граничні умови**



Для цієї опції не потрібно користувачу вказувати додаткові граничні умови. Автоматично застосовуються стандартні граничні умови, де вся зовнішня межа закріплена, тобто нульові переміщення.

### **5.1. Поле напружень**

*Поле напружень (Field Stress)* визначає первинне напруження в непорушеному масиві, тобто до проведення виробки.

Програма *Phase 2* дозволяє обрати або *Постійне поле напружень (Constant field stress)*, або *Гравітаційне поле напружень (Gravity field stress)*.

У даному випадку застосуємо *Постійне поле напружень (Constant)*.

**5.1.1. Оберіть: Навантаження (Loading) → Поле напружень (Field Stress)**

Field Stress Properties

Field Stress Type: Constant

Sigma 1 (MPa, Comp. +): 24

Sigma 3 (MPa, Comp. +): 24

Sigma Z (MPa, Comp. +): 24

Angle (degrees from horizontal, CCW): 0

Locked-in horizontal stress (in plane) (MPa, Comp. +): 0

Locked-in horizontal stress (out-of-plane) (MPa, Comp. +): 0

OK Cancel Advanced >>

Введіть:

*Тип поля напружень = Постійне (Field Stress Type = Constant)*

*Sigma 1 = 24*

*Sigma 3 = 24*

*Sigma Z = 24*

*Angle (Угол) = 0*

Натисніть «Так» (OK).

Величини значень *Sigma 1*, *Sigma 3* і *Sigma Z* розраховуються добутком вихідних даних, де -  $\gamma$  об'ємна вага гірських порід (т/м<sup>3</sup>); *H* - глибина закладення виробки (м).

Зверніть увагу, що маленький «стрес блок» у верхньому правому кутку вказує на відносну величину і напрямок поля напружень.



Відмітимо, що кут поля напружень в *Phase 2* відраховується проти годинникової стрілки між напрямком *Sigma 1* і горизонтальною віссю!

## 6. Властивості породного масиву

Основними властивостями породного масиву є фізико-механічні характеристики порід, що вміщують досліджувану область.

До основних фізико-механічних характеристик відносяться: модуль Юнга (*E*, МПа), коефіцієнт Пуассона ( $\mu$ ), межа міцності на одновісний (*R<sub>сж</sub>*), коефіцієнт

геологічної міцності (*КГП*) представляє величину, яка разом з іншими фізико-механічними властивостями інтактного масиву використовується в розрахунках для оцінки зниження міцності в масиві в різних геологічних умов.

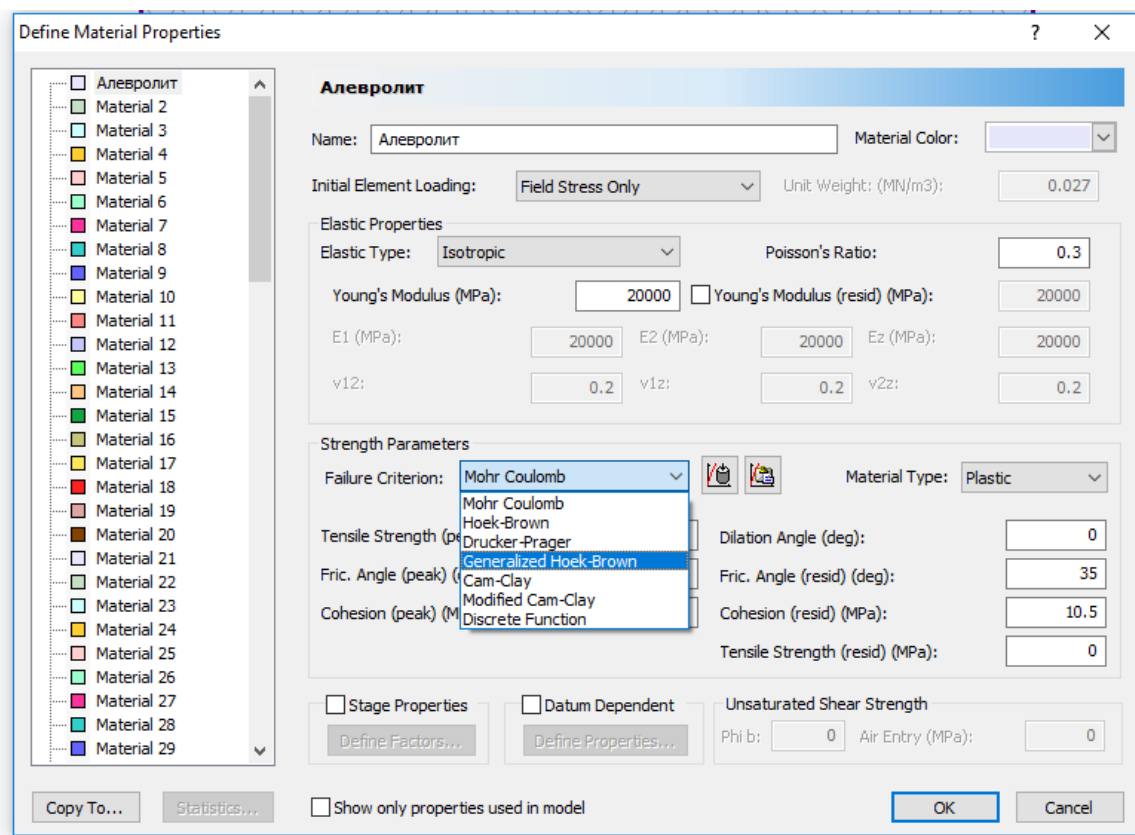
### 6.1. Оберіть: *Властивості (Properties)* → *Задати матеріали (Define Materials)*

На першій вкладці введіть наступні властивості:

Введіть ім'я (*Name*) = порода (алевроліт),

Коефіцієнт Пуассона (*Poisson's ratio*) = 0,3

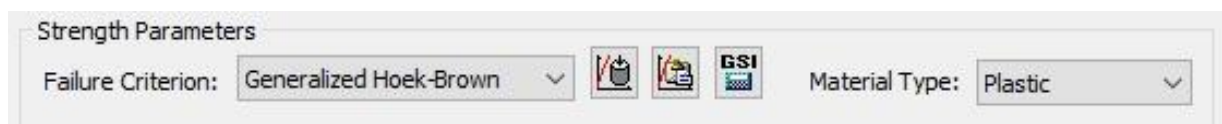
Модуль Юнга (*Young's Modulus, МПа*) – в даному випадку залишаємо, як пропонує програма (20000).



### 6.2. Оберіть критерій – *Generalized Hoek-Brown*.

*Тип матеріалу (Material Type)* – *Пластичний (Plastic)*

На панелі вікна з'явилася «іконка» *GSI*



Далі натисніть на кнопку *GSI* і відкрийте калькулятор.

*GSI (Geological Strength Index)* - коефіцієнт геологічної міцності, що враховує геологічні особливості породного масиву, зокрема його структуру і наявність тріщин ( $5 \leq GSI \leq 100$ ).

Введіть властивості матеріалу в наступному діалоговому вікні:

Якщо не дано точні значення, то властивості вибираються виходячи з середніх значень представленого діапазону.

Дані властивості представляють значення:

6.3. *Intact UCS (MPa)* – коефіцієнт геологічної міцності для зв'язних порід (КТП).

| Rock Type: <span>General</span> <span>OK</span><br>GSI Selection: <span>50</span> <span>Cancel</span>  |   | SURFACE CONDITIONS           |      |      |      |           |
|--|---|------------------------------|------|------|------|-----------|
|  |   | VERY GOOD                    | GOOD | FAIR | POOR | VERY POOR |
| STRUCTURE  |   | DECREASING SURFACE QUALITY → |      |      |      |           |
| INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities<br>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets<br>VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets<br>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity<br>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces<br>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes | DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES<br>↓ | 90                           |      |      | N/A  | N/A       |
|  |   | 80                           |      |      |      |           |
|  |   | 70                           |      |      |      |           |
|  |   | 60                           |      |      |      |           |
|  |   | 50                           |      |      |      |           |
|  |   | 40                           |      |      |      |           |
|  |   | 30                           |      |      |      |           |
|  |   | 20                           |      |      |      |           |
|  |   | 10                           |      |      |      |           |
|  |   | N/A                          | N/A  |      |      |           |



#### 6.4. Geological Strength Index – коефіцієнт міцності вміщуючих порід

List of Mi Values

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Anhydrite             | 12 ± 2 |
| Basalt                | 25 ± 5 |
| Breccia               | 19 ± 5 |
| Breccias              | 20 ± 2 |
| Chalk                 | 7 ± 2  |
| Claystones            | 4 ± 2  |
| Conglomerates         | 21 ± 3 |
| Crystalline Limestone | 12 ± 3 |
| Dacite                | 25 ± 3 |
| Diabase               | 15 ± 5 |
| Diorite               | 25 ± 5 |
| Dolerite              | 16 ± 5 |
| Dolomites             | 9 ± 3  |
| Gabbro                | 27 ± 3 |
| Gneiss                | 28 ± 5 |
| Granite               | 27 ± 3 |

Selected Mi Value

Mi Value:

Filter List

☐ Rock Type

- ☒ Sedimentary
- ☐ Igneous
- ☐ Metamorphic

☐ Texture

- ☒ Coarse
- ☐ Medium
- ☐ Fine
- ☐ Very Fine

Зі списку назв гірських порід вибираємо цікаву для нас гірську породу із зазначенням її меж міцності. Далі кнопка «Так» (OK).

#### 6.5. Disturbance Factor $D$ – фактор $D$

$D$  – параметр, що залежить від ступеня порушення масиву внаслідок вибухових робіт і ефекту релаксації напружень, варіює від 0 (для інтактного) до 1 (для сильно порушеного) породного масиву.

Application: ☒ Tunnels ☐ Slopes

Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.

Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.

Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.

Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.

Disturbance Factor:

Необхідно задати фактор  $D = 0$  тому умови задачі відповідають проведення тунелю в підземних умовах. Далі – «Так» (OK).



## 6.6. Intact Rock Constant

Intact UCS (MPa): 45

☒ Peak ☒ Residual

Geological Strength Index: 60

Intact Rock Constant  $m_i$ : 4

Disturbance Factor: 0

**mb:** 0.959

**s:** 0.0117436

**a:** 0.5028

☐ Compute rock mass elastic modulus

OK Cancel

Перевіряємо відповідність введених даних. Далі - «Так» (OK).

6.7. Модуль Юнга (Young`s Modulus, MPa) – розраховується автоматично відповідно до введених вами даними.

**Алевролит**

Name: Алевролит Material Color: [dropdown]

Initial Element Loading: Field Stress Only Unit Weight: (MN/m<sup>3</sup>): 0.027

**Elastic Properties**

Elastic Type: Isotropic Poisson's Ratio: 0.3

Young's Modulus (MPa): 20000 ☐ Young's Modulus (resid) (MPa): 20000

E1 (MPa): 20000 E2 (MPa): 20000 E3 (MPa): 20000

$\nu_{12}$ : 0.2  $\nu_{13}$ : 0.2  $\nu_{23}$ : 0.2

**Strength Parameters**

Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown Material Type: Plastic

Intact Comp. Strength (MPa): 45 Dilation Parameter: 0

mb Parameter (peak): 0.958604 mb Parameter (resid): 0.958604

s Parameter (peak): 0.011744 s Parameter (resid): 0.011744

a Parameter (peak): 0.502841 a Parameter (resid): 0.502841

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Define Factors... Define Properties...

**Unsaturated Shear Strength**

Phi b: 0 Air Entry (MPa): 0

Copy To... Statistics... ☐ Show only properties used in model

OK Cancel

У діалоговому вікні – Натисніть «Так» (OK).

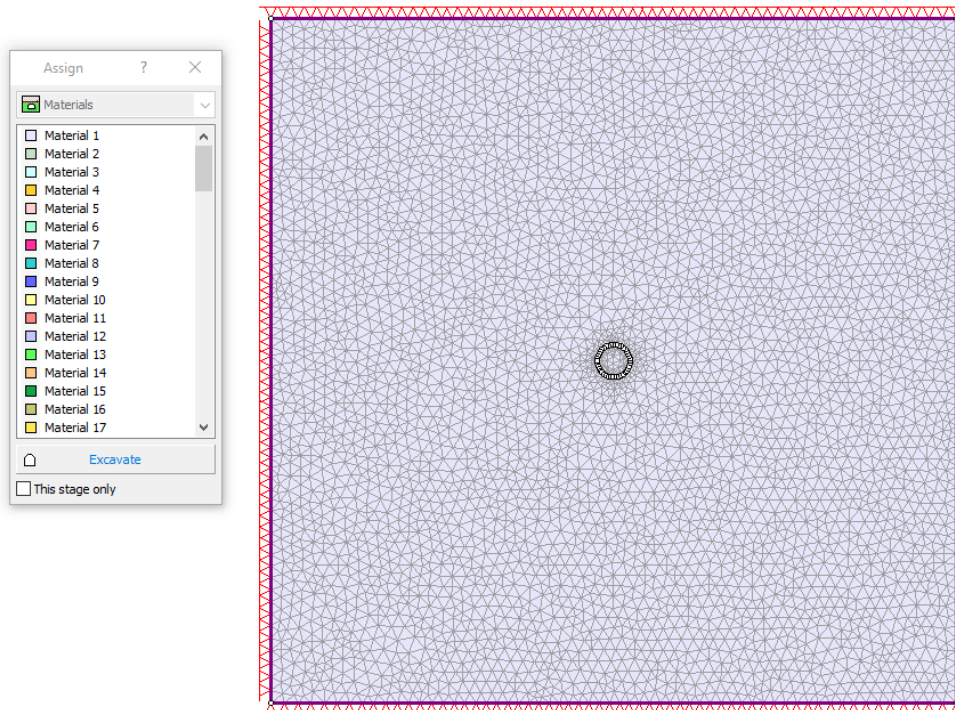
6.8. Якщо властивості вводити для вкладки одного матеріалу (однорідний породний масив) (Material 1), то не потрібно присвоювати ці властивості моделі. *Phase 2* автоматично присвоїть властивості.

Якщо досліджується неоднорідний породний масив, то слід задавати більше породних шарів (Material 2, Material 3, Material 4 і т.д.), і тоді потрібно присвоїти фізико-механічні властивості всім шарам через *Меню* присвоєння властивостей (*Assign option*).

## 7. Виїмка матеріалу з виробки

У нашому випадку слід використовувати меню присвоєння властивостей (*Assign Properties*), щоб видалити матеріал всередині границь виробки. Це зробити дуже легко.

Виберіть: *Властивості (Properties)* → *Присвоїти властивості (Assign Properties)*.



Діалог «Застосування властивостей» (*Assign Properties*), показаний ліворуч.

Використовуйте мишу, щоб вибрати кнопку «Виробка» (*Excavate*) внизу вікна діалогу.

На кінці курсора з'явиться маленький хрестик. Помістіть цей курсор всередині кордону виробки і клацніть лівою клавішею миші.

*Елементи всередині виробки зникнуть, що означає, що ця зона «відпрацьована».*

*Це все, що було потрібно. Виберіть значок × у верхньому кутку вікна і діалог закриється.*

## **8. Загальний вид створеної моделі**

Модель створена і повинна виглядати так (див. рис. 1):

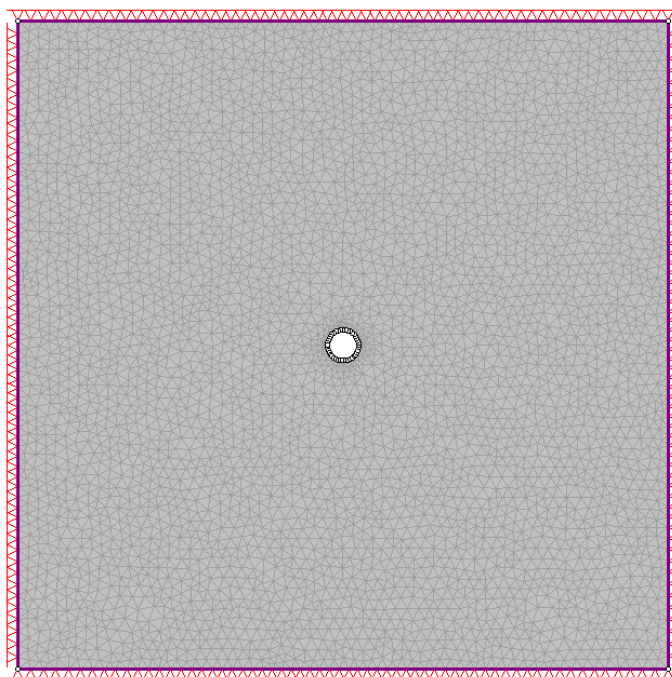


Рисунок 1.1. Розрахункова схема до задачі

## **9. Розрахунок**

Перед аналізом моделі необхідно зберегти файл під ім'ям quick.fez. (*Phase 2* файли мають розширення .fez).

Оберіть: *Файл (File) → Зберегти (Save)*



Після того, як Ви зберегли файл, доступний розрахунок моделі.

### **9.1. Розрахунковий модуль Phase 2 здійснює розрахунок моделі.**

Оберіть: *Аналіз (Analysis) → Розрахунок (Compute)*



Після розрахунку можна переглянути і проаналізувати результати в програмі Interpret.

## 10. Інтерпретація результатів



Щоб ознайомитись з результатами аналізу / розрахунку необхідно запустити програму-інтерпретатор:

Оберіть: *Аналіз (Analysis)* → *Інтерпретація (Interpret)*

Запуститься програма *Phase 2 Interpret*.

### Результати

**Важливо! Кожну картину інтерпретації результатів розрахунку необхідно зберігати під своєю назвою і представити їх у звіт до індивідуального розрахункового завданням № 2 (див. пункт 11).**

#### 10.1. Головні напруження (*Principal Stress*)

Автоматично, після запуску *Interpret* відображається картина розподілів головних напружень *Сигма 1 (Sigma 1)*, як показано на рис. 1.2.

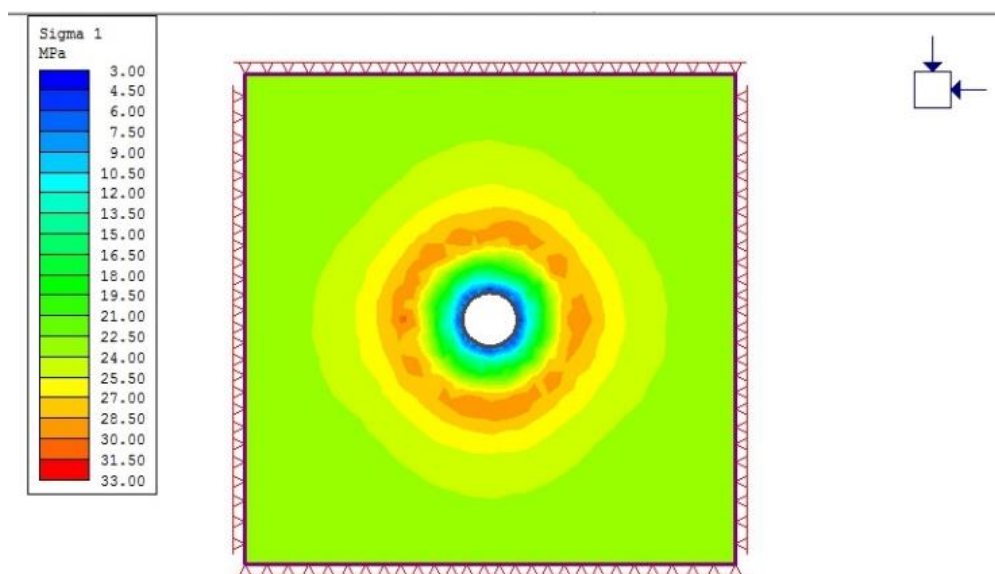
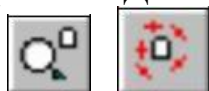


Рисунок 1.2. Картина розподілення головних напружень

Наблизимо виробку, щоб подивитися ближче на розподіл напружень навколо контуру виробки. Для цього служить кнопка «Наблизити виробку» (*Zoom Excavation*).



Оберіть: *Вид (View)* → *Зум (Zoom)* → *Наблизить виробку (Zoom Excavation)*

### 10.1.1. Траєкторія напружень (*Stress Trajectories*)

Тепер включимо відображення траєкторій головних напружень, вибравши кнопку «Траєкторії напружень» (*Stress Trajectories*) на панелі кнопок.

Траєкторії головних напружень показані як маленькі червоні хрестики, в яких довга перекладина хрестика орієнтована в напрямку найбільшого головного напруження в площині (*Sigma 1*), а менша перекладина хрестика - у напрямку найменшого головного напруження в площині (*Sigma 3*) (див. рис. 1.3).

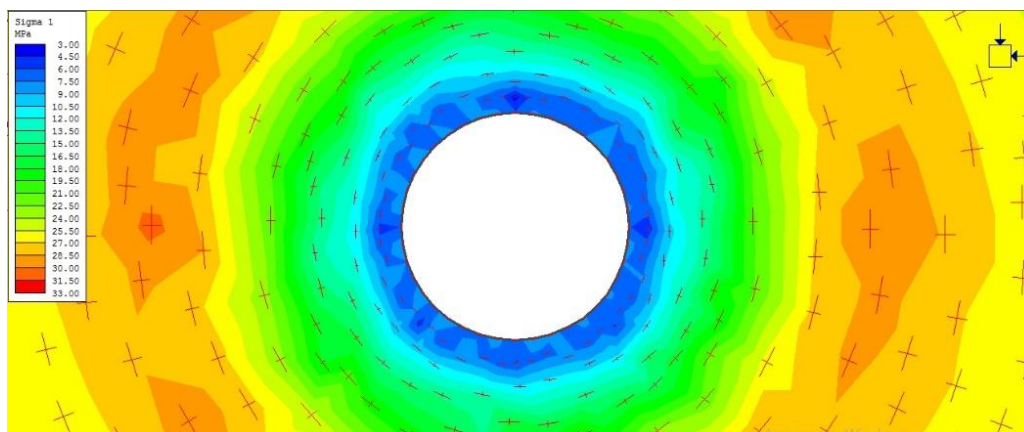


Рисунок 1.3. Відображення траєкторій головних напружень

Вимкнемо відображення траєкторій напружень, натиснувши ту ж кнопку «Траєкторії напружень» (*Stress Trajectories*) вдруге.

### 10.1.2. Графічні аналізи моделі

Графічний аналіз моделі показує, як розподіляються напруження на контурі виробки або в будь-якому іншому місці моделі. Для цього використовується «Опції запитів» (*Query option*). Запити дозволяють відображати і друкувати результати аналізу моделі.

Клацніть правою кнопкою миші по контуру виробки і в меню вибрати «Запит по межі» (*Query Boundary*).

Натисніть «Так» (*OK*) і побачите величини розподілу значень напружень уздовж границь виробки (рис. 1.4).



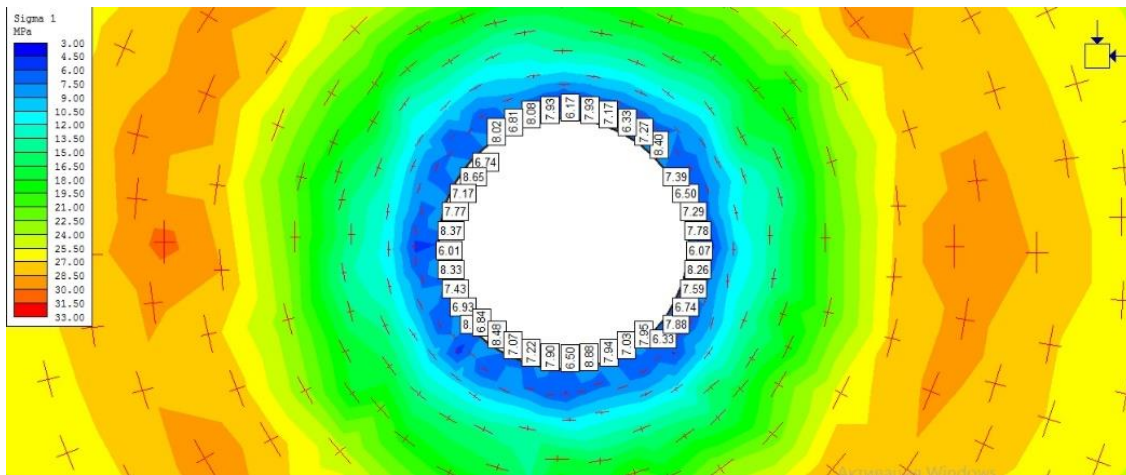


Рисунок 1.4. Величини розподілів напружень на контурі виробки

Натисніть повторно на границі виробки і виберіть «Побудувати графік» (*Graph Data*).

У меню оберіть «Створити графік» (*Create Plot*) і в результаті отримано графік (рис. 1.5).

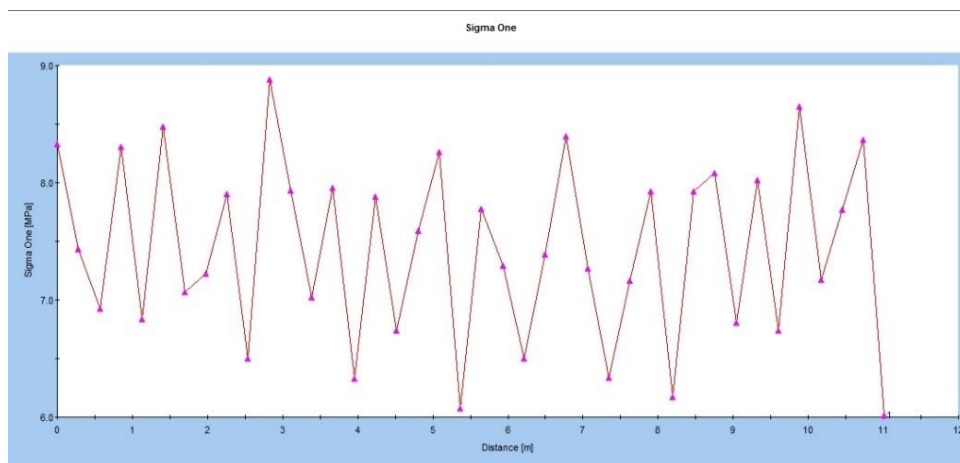


Рисунок 1.5. Головні напруження на контурі виробки

Максимальні напруження на графіку відповідають максимальним напруженням *Sigma 1* на розподілі напружень.

Закрийте вкладку запитів.

Правою клавішею миші клікніть по контуру виробки і виберіть «Значення запиту» (*Queried Values*), щоб видалити з екрану відображення значень напружень на контурі. Якщо відображається цифра 1 на контурі виробки, то це номер запиту, який також можна відключити в меню при натисканні правої кнопки миші.

## 10.2. Запас міцності (Strength Factor)

Тепер подивимося на розподіл запасу міцності. Виберіть «Запас міцності» (*Strength Factor*) зі списку в панелі завдань.

Оберіть: 

Оберіть «Масштаб всього» (*Zoom All*) (або натисніть F2), щоб побачити всю модель на екрані (рис. 1.6).

Оберіть: *Вид (View) → Масштаб (Zoom) → Масштаб всього (Zoom All)*

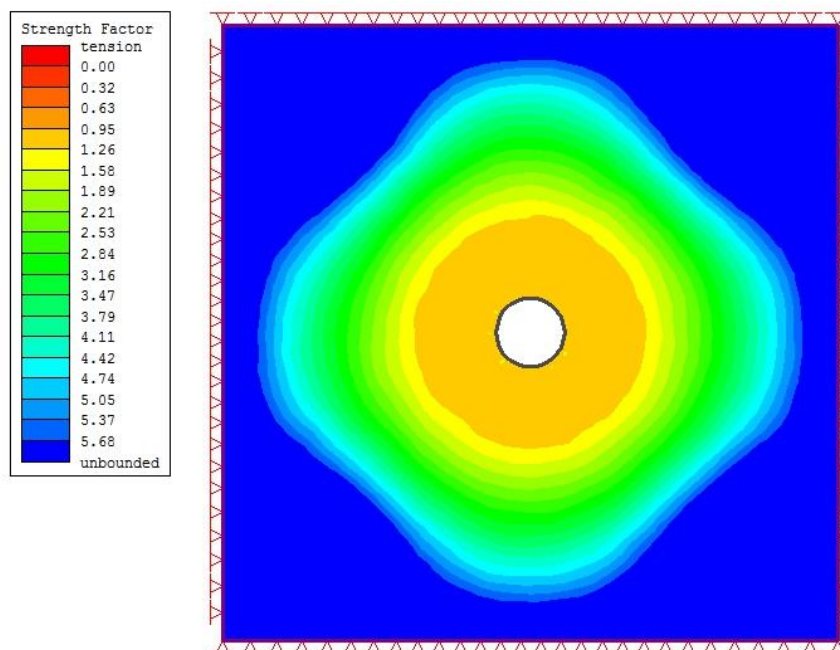


Рисунок 1.6. Розподіл запасу міцності

Відмітимо, що в даній моделі мінімальний запас міцності (жовтим кольором) знаходиться в діапазоні 1-2, це означає, що зон руйнування в моделі немає. Перевіримо це за допомогою параметрів запитів (*Query option*). Кликнемо правою кнопкою миші по межі виробки (вона все ще містить запит з попередніх пунктів опції) і виберіть «Намалювати графік» (*Graph Data*) з контекстного меню. Має вийти наступне (рис. 1.7).

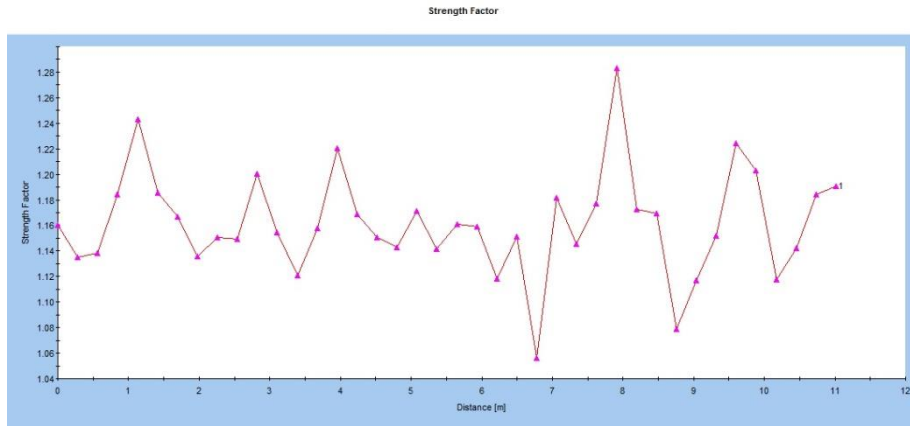


Рисунок 1.7. Запас міцності по межі виробки

Всі значення графіка перевищують 1, що підтверджується графіком розподілу напружень (рис. 1.5).

Закрийте вкладку графіка.

Клацніть правою кнопкою мишки по межі виробки і виберіть «Видалити запит» (*Delete Query*), щоб видалити запит з моделі.

### 10.3. Переміщення (Displacements)

Розглянемо картину переміщень. Виберемо «Повні переміщення» (*Total Displacement*) зі списку в панелі завдань.



Оберіть: 

З'являться повні переміщення і в рядку статусу виникне значення максимального переміщення в моделі (близько 40 мм).

*Maximum Total Displacement = 0.04 m*

або в українській версії

*Максимально повні переміщення = 0.04 м*

Знову натисніть кнопку «Наблизити виробку» (*Zoom Excavation*).

Виберіть: *Вид (View) → Масштаб (Zoom) → «Наблизити виробку» (Zoom Excavation)*.

Можна помітити, що максимальні переміщення будуть на контурі виробки. Тепер включимо відображення векторів переміщень і деформації контурів.

Параметри контурів доступні в контекстному меню.

На рис. 1.8 відображена картина переміщень з включеними опціями деформованих границь і векторами переміщень.



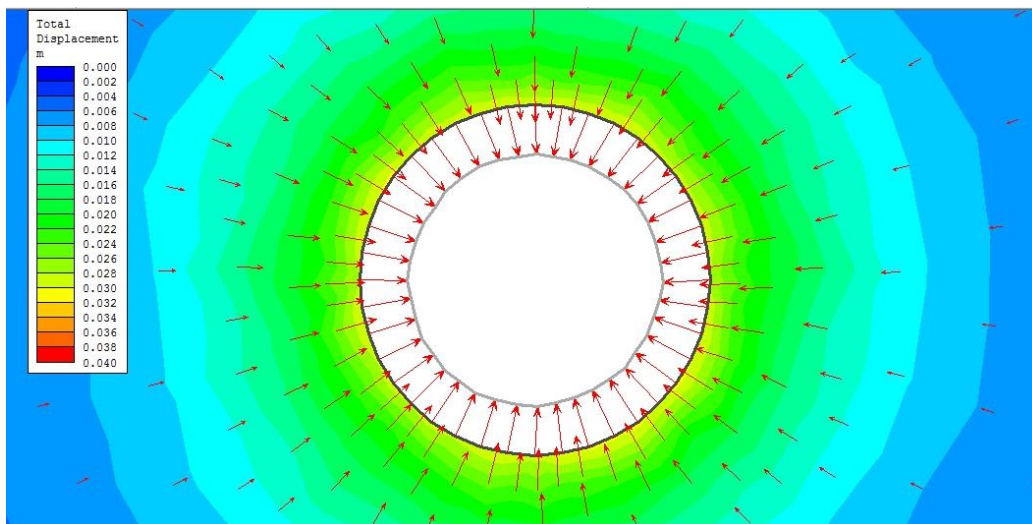


Рисунок 1.8. Контури повних переміщень з включеними опціями деформованого контуру і векторів переміщень

Деформації можуть бути візуально збільшені спеціальним коефіцієнтом в налаштуваннях відображення.

Повторне натискання кнопок призведе до вимикання цих опцій.

### 10.3.1. Ярлики контурів (Contour Labels)

Додаємо ярлики контурів, щоб легко побачити на малюнку зони різних значень.

Оберіть: *Інструменти (Tools) → Додати інструмент (Add Tool) → Ярлик контуру (Label Contour)*.

З'явиться курсор у вигляді тонкого хрестика. Клікнувши в будь-якому місці моделі, отримаємо значення переміщень в даній точці. На рис. 1.9 показані такі ярлики на моделі. Після закінчення нанесення ярликів натисніть кнопку ESC.

**ЗАУВАЖЕННЯ:** Точність і формат чисел на ярликах можуть налаштовуватися в параметрах легенди (*Legend Options*).

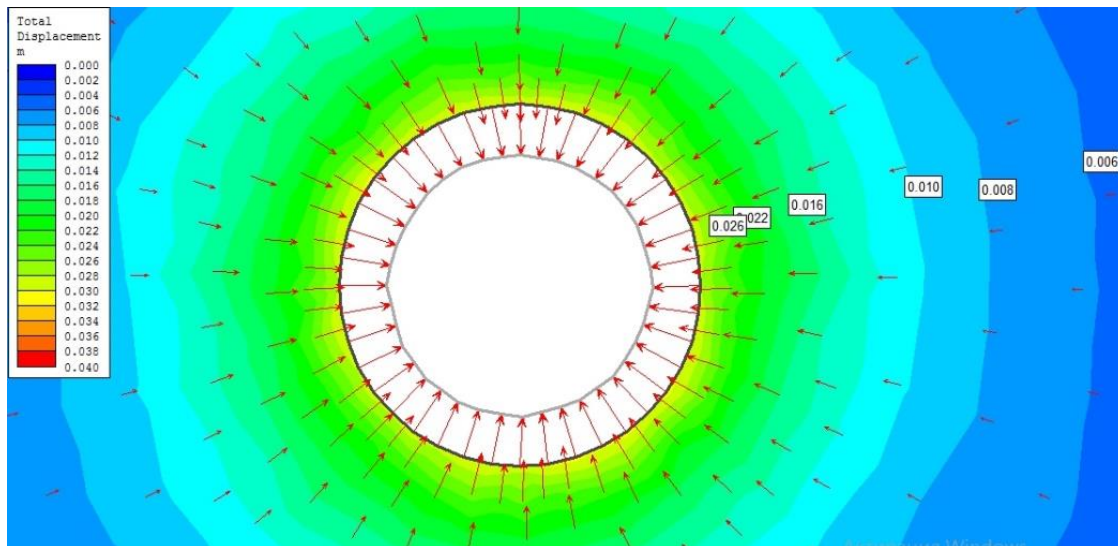


Рисунок 1.9. Відображення ярликів контурів

### 10.3.2. Додати ярлики значень величини зсувів ( $U_0$ ) на контурі виробки

Розглянемо картину переміщень на контурі виробки. Виберемо «Повні переміщення» (*Total Displacement*) зі списку в панелі завдань.

На контурі виробки правою клавішею мишки робимо клік. Висвічується вікно і лівою кнопкою мишки натискаємо на рядку «*Query Boundary*», далі натискаємо «*On the Boundary*». З'явилися ярлики із значеннями величин зсувів контуру виробки. Для більш зручної інформативності матеріалу залишимо 10 ярликів зі значеннями. Повторно правою кнопкою мишки клікаємо на ярликах, висвічується вікно і лівою кнопкою мишки натискаємо на рядку «*Edit Locations*». У наступному вікні лівою кнопкою мишки відзначаємо в верхньому рядку «*At*» і відповідно залишається 10 ярликів значень, далі «*Так*» (*OK*) (рис. 1.10).

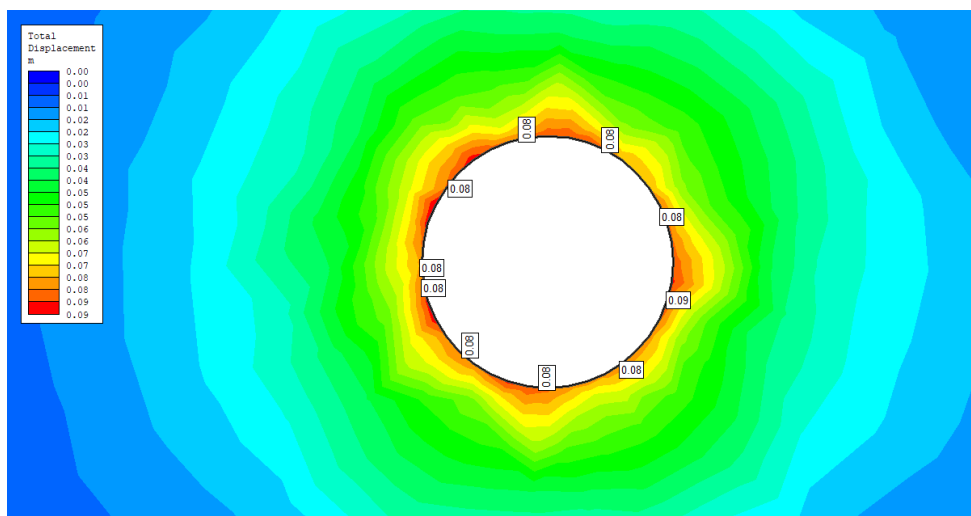


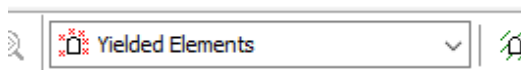
Рисунок 1.10. Картина величин зсувів на контурі виробки

Величини зсувів на контурі виробки необхідно порівняти з результатами аналітичних розрахунків (див. Індивідуальне завдання № 1 [1]). За результатами порівнянь написати висновок.

#### 10.4. Еквівалентні напруження

Розглянемо картину еквівалентних напружень. Виберемо «*Yielded Elements*» зі списку в панелі завдань.

Оберіть:



З'явиться картина розподілів еквівалентних напружень навколо виробки (рис. 1.11), де червоним кольором показана розмір відносного радіуса пластичних деформацій ( $r_L$ ).

**10.4.1. Визначити розмір відносного радіуса пластичних деформацій і порівняти його з результатами аналітичних розрахунків (див Індивідуальне завданні № 1 [1]. За результатами порівняння написати висновки.**

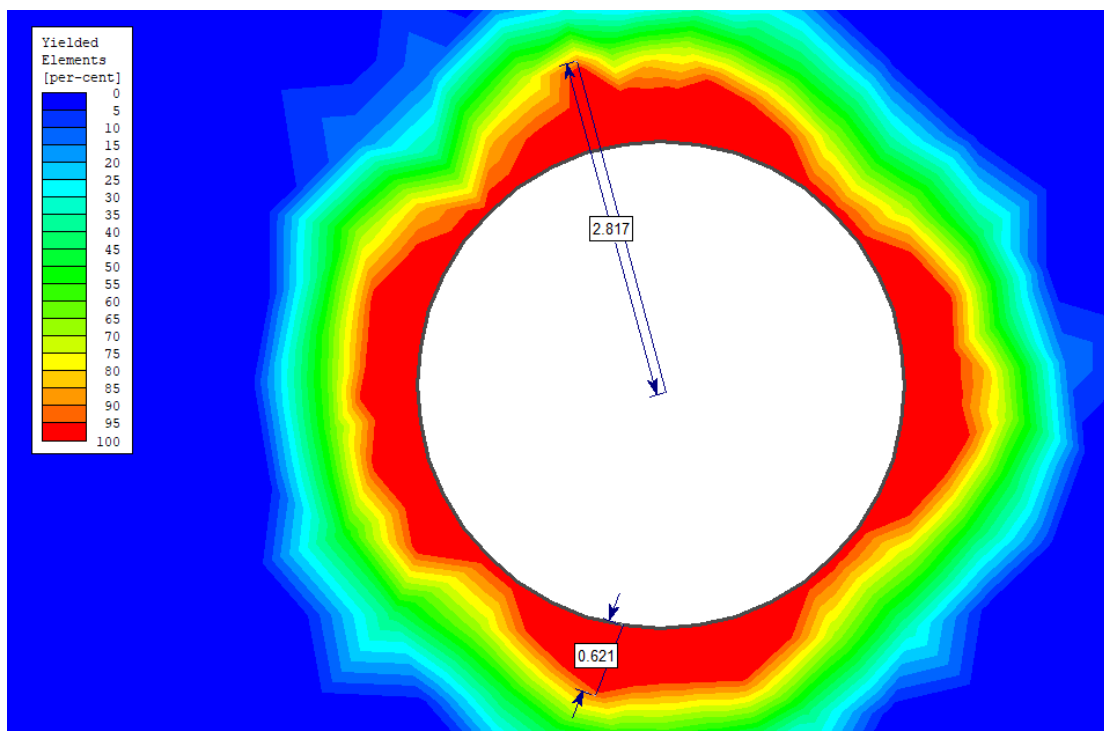


Рисунок 1.11. Картина розподілів еквівалентних напружень  
навколо виробки

## 11. Експорт відображень

У *Phase 2* існують різні можливості експорту зображень.

Експортувати можна або з меню «Файл» (*File*), або в меню при натисканні правою клавішею миші по зображенню. Допустимі формати експорту:

JPEG (\*.jpg)

Windows Bitmap (\*.bmp)

Windows Enhanced Metafile (\*.emf)

Windows Metafile (\*.wmf)

### 11.1. Копіювання в буфер



Поточний вигляд може бути скопійований в буфер обміну, використовуючи «Опцію копіювання» (*Copy option*) в панелі інструментів або меню «Правка» (*Edit*).

Зображення буде скопійовано в буфер обміну, звідки його можна просто вставити в текстовий або графічний редактор (*Word*, *Photoshop* і т.п.).

### 11.2. Чорно-білі зображення (відтінки сірого)



Опція «Відтінки сірого» (*Grayscale*) доступна в панелі інструментів і з меню «Вид» (*View*). Включивши її автоматично конвертуємо зображення з кольорового в чорно-біле. Це корисно, коли зображення буде друкуватися в чорно-білому варіанті.

На цьому виконання розрахункового завдання закінчено. Щоб закрити програму *Interpret* натисніть:

Виберіть: *Файл (File)* → *Вихід (Exit)*.

## 12. Загальний висновок. У цій частині слід відмітити:

- 1) досвід навичок роботи у ПП *Phase 2*, що реалізує метод скінченних елементів (МСЕ);
- 2) навести результати аналітичних обчислень та комп'ютерної симуляції і порівняти їх;
- 3) відзначити точність обчислень.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шашенко О.М. Визначення основних параметрів пружно-пластичного стану породного масиву навколо горизонтальної виробки. Методичні рекомендації до виконання практичних завдань дисципліни «Геомеханіка» для студентів спеціальності 184 Гірництво / Шашенко О.М., Хозяйкіна Н.В. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. – 37 с.
2. Шашенко А.Н. Геомеханика / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко, Е.А. Сдвижкова. – К. : Новий друк, 2016. – 258 с.
3. Шашенко А.Н. Механика горных пород / А.Н., Шашенко, В.П. Пустовойтенко.: Учебник для ВУЗов. – К. : Новий друк, 2004. – 400 с.
4. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К. : Університетське вид-во “Пульсари”, 2002. – 304 с.
5. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. – М. : Стройиздат, 1982. – 36 с.

## ДОДАТОК А

*Зразок титульного аркушу*

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**Кафедра будівництва,  
геотехніки і геомеханіки**

**Індивідуальне розрахункове завдання № 2  
до практичних занять  
з дисципліни «Геомеханіка»**

*Варіант №* \_\_\_\_

Виконав:  
студент групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
П.І.Б.

Перевірив:  
\_\_\_\_\_

**Дніпро  
2018**

Навчальне видання

**Шашенко** Олександр Миколайович  
**Хозяйкіна** Наталія Володимирівна  
**Чередник** Владислава Андріївна

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО  
СТАНУ ПОРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА НАВКОЛО ПІДЗЕМНОЇ ВИРОБКИ**

Методичні рекомендації  
до виконання практичних завдань дисципліни  
«Геомеханіка»  
для студентів спеціальності 184 Гірництво

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.

Видано  
у Національному технічному університеті  
«Дніпровська політехніка».  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.