

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



НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
Кафедра транспортних систем та енергомеханічних комплексів

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИДОБУВАННЯ РУД

**Методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів ступеня магістра
освітньо-професійної програми «Гірничорудна інженерія»
зі спеціальності 184 Гірництво**

Дніпро
НТУ «ДП»
2024

Кононенко М.М.

Цифрове моделювання процесів видобування руд [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми «Гірничорудна інженерія» зі спеціальності 184 Гірництво / М.М. Кононенко, О.Є. Хоменко, А.В. Косенко, І.В. Інюткін, Р.Р. Єгорченко ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 134 с.

Автори:

М.М. Кононенко, д-р техн. наук, проф.;

О.Є. Хоменко, д-р техн. наук, проф.;

А.В. Косенко, канд. техн. наук, доц.;

І.В. Інюткін, канд. техн. наук, асист.;

Р.Р. Єгорченко, PhD, асист.

Затверджено науково-методичною комісією зі спеціальності 184 Гірництво (протокол № 6 від 07.05.2024) за поданням кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів (протокол № 13 від 16.04.2024)

Уміщено теоретичні відомості за темами практичного курсу, варіанти практичних завдань з рекомендаціями до їх виконання, контрольні питання, список використаної та рекомендованої літератури.

Орієнтовано на активізацію навчальної діяльності здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми «Гірничорудна інженерія» спеціальності «Гірництво» та закріплення практичних навичок у засвоєнні дисципліни «Цифрове моделювання процесів видобування руд».

Відповідальний за випуск завідувач кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів Л.Н. Ширін, д-р техн. наук, проф.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	4
Практична робота № 1. Розрахунок та побудова моделі масиву навколо гірничої виробки	5
Практична робота № 2. Розрахунок та побудова моделі шаруватого масиву порід навколо гірничої виробки	13
Практична робота № 3. Розрахунок та побудова моделі масиву навколо очисної камери	19
Практична робота № 4. Розрахунок фізико-механічних властивостей масиву моделі	25
Практична робота № 5. Чисельне моделювання буропідривних робіт для проведення горизонтальної виробки	30
Практична робота № 6. Чисельне моделювання буропідривних робіт для проведення вертикальної виробки	44
Практична робота № 7. Чисельне моделювання процесу утворення відрізної щілини	58
Практична робота № 8. Чисельне моделювання процесу відбивання шару руди свердловинами	74
Практична робота № 9. Чисельне моделювання процесу відбивання уступу руди	88
Практична робота № 10. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану масиву порід навколо гірничої виробки без кріплення	100
Практична робота № 11. Визначення параметрів анкерного кріплення гірничої виробки	109
Практична робота № 12. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану масиву порід навколо очисної камери	121
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ...	133

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Цифрове (чисельне) моделювання – це дослідження на комп'ютері об'єктів, явищ, процесів тощо, за допомогою математичних моделей. Здатність ефективно оцінювати та ухвалювати інженерні рішення, з використанням чисельного моделювання за допомогою сучасного програмного забезпечення, є ключовим завданням у процесі видобування рудних і нерудних корисних копалин.

Дисципліна «Цифрове моделювання процесів видобування руд» – спеціальна освітня компонента за освітньою програмою «Гірничорудна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти.

Метою дисципліни є формування у здобувачів вищої освіти компетентностей щодо цифрового моделювання процесів видобування рудних і нерудних корисних копалин.

Методичні рекомендації призначені для формування практичних навичок, що пов'язані з чисельним моделюванням буропідривних робіт як при проведенні гірничих виробок, так і при веденні очисних робіт, а також оцінці напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо виробок під дією гірського тиску.

В методичних рекомендаціях представлено практичні роботи, текст яких викладено за типовою структурною схемою: тема, мета роботи, подання теоретичних положень за темою, завдання для самостійного виконання та питання для самоконтролю. Використання методичних рекомендацій полегшить сприйняття та рівень засвоєння навчального матеріалу, а також надасть змогу здобувачу освіти набути досвіду використання знань, вмінь і навичок з цифрового моделювання процесів видобування руд у безпосередній практичній діяльності.

В результаті виконання практичних робіт студенти мають досягти таких результатів навчання:

– обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання;

– розробляти робочі проєкти та креслення для технічних завдань і пропозицій щодо розробки рудних і нерудних родовищ корисних копалин;

– розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання;

– уміти проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА МОДЕЛІ МАСИВУ НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

Мета роботи: надбання навичок розрахунку та побудови у програмному продукті SolidWorks геометрії моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** розробляти робочі проекти та креслення для технічних завдань і пропозицій щодо розробки рудних і нерудних родовищ корисних копалин.

1.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Програмний продукт SolidWorks є конструкторською системою твердотілого параметричного моделювання спеціально розробленою для використання на персональних комп'ютерах під управлінням операційної системи Windows. Стандартний графічний користувальницький інтерфейс Windows і засоби твердотілого параметричного моделювання дозволяють швидко і легко створювати тривимірні моделі деталей, складальні одиниці, генерувати креслення, що значно знижує терміни проектування.

Програма SolidWorks у графічному режимі відображає структуру створюваної моделі на основі елементів у спеціальному вікні, яке називається *Деревом конструювання*. В Дереві конструювання відображається не тільки послідовність створення окремих елементів моделі, але й воно надає зручний доступ до всіх відомостей процесу моделювання.

Розміри і взаємозв'язки окремих елементів фіксуються і зберігаються в моделі, що дає можливість не тільки втілити ідею проекту але і швидко вносити зміни в модель.

Керуючі розміри. Це розміри, що використовуються при створенні елементу. Вони включають розміри, пов'язані із геометрією ескізу, а також розміри, пов'язані із самим елементом.

Взаємозв'язки. Вони містять таку інформацію, як паралельність, перпендикулярність, належність, дотичність, концентричність тощо. Завдяки введенню цих даних у ескіз, програма SolidWorks дає можливість повністю здійснити задум проекту в моделі.

Для ефективного використання засобів параметричного моделювання в SolidWorks необхідно добре обдумати задум проекту до початку процесу моделювання. Задум проекту – це план, який буде визначати поведінку моделі при внесенні до неї тих чи інших змін.

Створення ескізів – це основа проектування в SolidWorks. Ескізи використовуються для створення всіх просторових елементів через:

- витягування;
- обертання;
- створення об'єктів за заданій траєкторії;
- створення об'єктів за заданим перерізом.

Ескізи – це набори двовимірної геометрії, які можна використовувати для створення твердотільних деталей.

Процес побудови деталі починається із створення нового документа деталі. Для цього, натиснувши у меню кнопки «Деталь» і **ОК**.

Креслення ескізу – це робота зі створення двовимірного каркасного профілю майбутньої деталі. Звичайними елементами такого каркаса є лінії, кола, дуги, багатокутники тощо. Створення ескізу каркаса є динамічним процесом зі зворотнім зв'язком через курсив миші, що суттєво спрощує процес побудови.

Після вибору форми представлення деталі, натискаємо позначення «**Ескіз**» і отримуємо наступне вікно із трьома взаємно-перпендикулярними площинами. Для створення ескізу необхідно обрати площину, у якій він буде будуватися. Тому на питання про площину ескізу можна обрати одну із площин – Спереду, Справа, Зверху. Обравши одну з площин активується функція створення двовимірного профілю.

Символ у середині площини вказує на вихідну точку даного ескізу, до якої слід прив'язувати всі його елементи і він також показує, що ескіз активний. У правому верхньому кутку зображені позначення вибору.

SolidWorks пропонує чималу палітру інструментів **Ескізу**, за допомогою яких можна створювати двовимірні профілі.

Оптимальним способом початку роботи над ескізом є використання команди **Лінія**. Для цього на панелі інструментів ескізу слід натиснути лівою кнопкою миші команду **Лінія**. При викреслюванні лінії на екрані ви будете бачити довжину лінії і взаємозв'язки лінії або множини ліній, наприклад: горизонтальність, вертикальність, перпендикулярність, збіг тощо.

В інструментах креслення є безліч функцій зворотнього зв'язку. Курсив змінюється, показуючи який тип об'єкту створюється. Він також вказує на можливі варіанти вибору подальших дій: кінцева точка, середина відрізка, точки збігу – за допомогою червоної точки при наведенні курсора. Найбільш використовуваними позначеннями зворотнього зв'язку є: кінцева, середня точки на відрізку і збіг.

При викреслюванні поперечного профілю в ескізі не треба турбуватися про розміри кожного сегменту контуру. Замкнутий контур можна створити наближено, а потім розмірами і взаємозв'язками привести ескіз до потрібної геометрії контуру

Відображення взаємозв'язків може бути увімкнене або вимкнене за допомогою меню **Вид, Взаємозв'язки ескізу**. Відключення інструмента лінія відбувається шляхом натискання клавіші **Esc**.

У будь-який момент ескіз може знаходитись у п'яти станах визначеності. Стан ескізу визначається взаємозв'язками між геометрією та розмірами об'єкту. Найбільш розповсюдженими станами ескізу є:

Недовизначений. Елементи ескізу відображаються синім кольором. При цьому ескіз може використовуватись для створення елементів.

Повністю визначений. По загальному правилу, коли деталь йде у виробництво її геометрія повинна бути повністю визначена. У повністю визначеному ескізі всі елементи відображаються чорним кольором.

Перевизначений. В ескізі є дублюючі розміри або конфліктні взаємозв'язки. Елементи відображаються червоним кольором. Непотрібні розміри і взаємозв'язки повинні бути видалені.

Два інших стану ескізу **Рішення не було знайдено** або **Знайдено недопустиме рішення** потребують також виправлень взаємозв'язків чи розмірів.

Готовий ескіз можна витягнути для створення першого елемента майбутньої деталі. Для цього на панелі інструментів знаходимо вкладку **Елементи, Витягнута бобишка/основа**.

У Менеджері властивостей (зліва) виставляємо параметр на заданій відстані і вказуємо саму відстань, тобто товщину створюваного елемента. Тиснемо **ОК** і перший твердотільний елемент створено.

Перед створенням деталі у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі масиву навколо гірничої виробки. Параметри геометрії моделі однорідного масиву у якому проведено гірничу виробку розраховуються у наступній послідовності.

Розрахункова схема визначення розмірів поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої та аркової форми у проходці, що набули поширення на рудних шахтах України, подано на рис. 1.1.

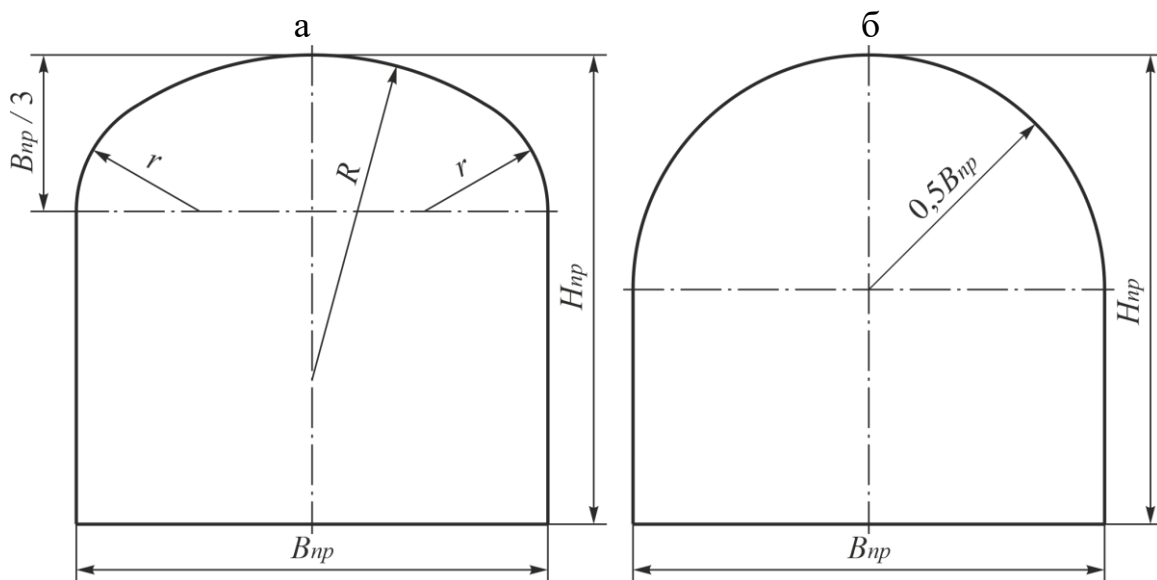


Рис. 1.1 – Розрахункова схема визначення розмірів поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої (а) та аркової (б) форми у проходці

Радіуси осьової та бокових дуг для виробок прямокутно-склепінчастої форми визначаються за формулами

$$R = 0,692 \cdot B_{пр}, \text{ м}; \quad (1.1)$$

$$r = 0,262 \cdot B_{пр}, \text{ м}, \quad (1.2)$$

де B_{np} – ширина виробки прямокутно-склепінчастої форми у проходці, м.

Площа поперечного перерізу виробки у проходці:

– для виробок прямокутно-склепінчастої форми

$$S_{np} = B_{np} \cdot \left(H_{np} - \frac{B_{np}}{3} + 0,26 \cdot B_{np} \right), \text{ м}^2; \quad (1.3)$$

– для виробок аркової форми

$$S_{np} = B_{np} \cdot (H_{np} - 0,5 \cdot B_{np}) + 0,125 \cdot \pi \cdot B_{np}^2, \text{ м}^2, \quad (1.4)$$

де H_{np} – висота виробки у проходці, м.

Приведений діаметр виробки визначається за виразом

$$D_e = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi}, \text{ м.} \quad (1.5)$$

Ширина моделі масиву визначається за формулою

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_e, \text{ м.} \quad (1.6)$$

Висота моделі масиву визначається за формулою

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_e, \text{ м.} \quad (1.7)$$

Параметри геометрії моделі приймаємо за максимальною розрахованою шириною або висотою моделі масиву.

Після розрахунку параметрів гірничої виробки та масиву будуємо геометрію моделі масиву з гірничою виробкою згідно розрахункової схеми поданої на рис. 1.2.

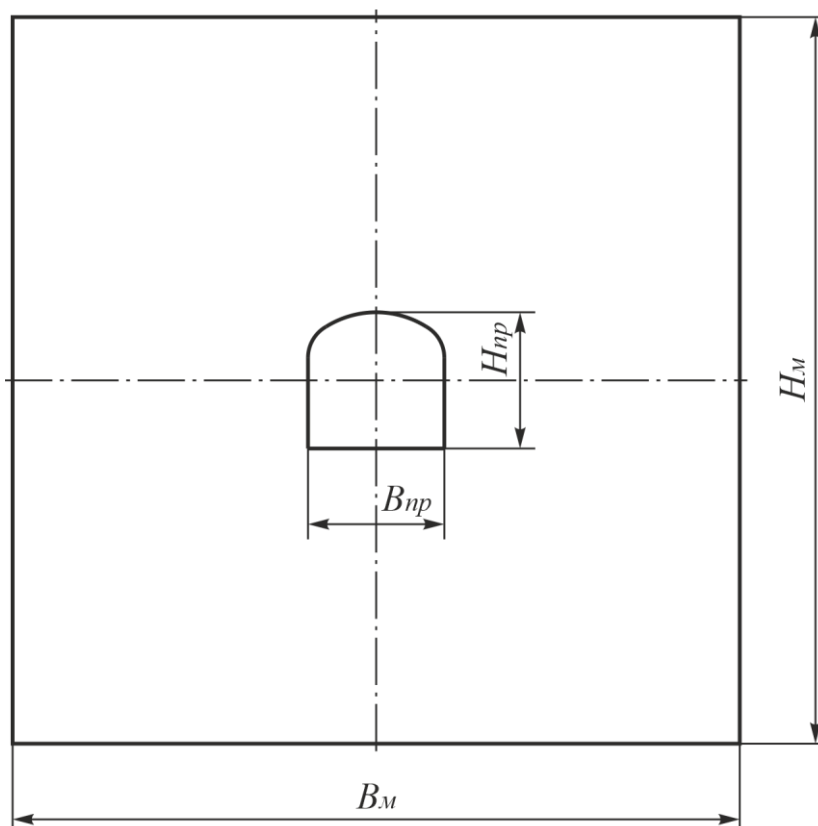


Рис. 1.2 – Розрахункова схема геометрії моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки

Процес створення деталі включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення першої бобишки.
3. Далі інструментом **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо квадрат. Далі у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді квадрату (рис. 1.3).

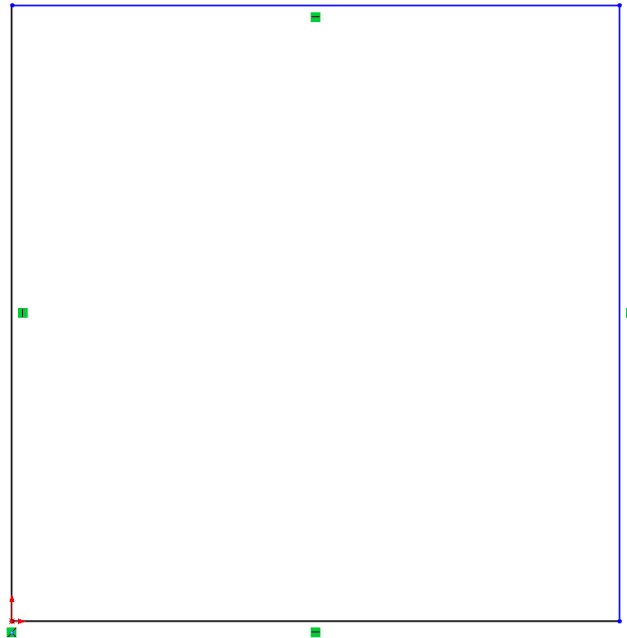


Рис. 1.3 – Ескіз моделі масиву порід у вигляді квадрату

4. У геометричному центрі **Квадрату**, у масштабі 1:1 викреслюємо контур гірничої виробки (рис. 1.4).

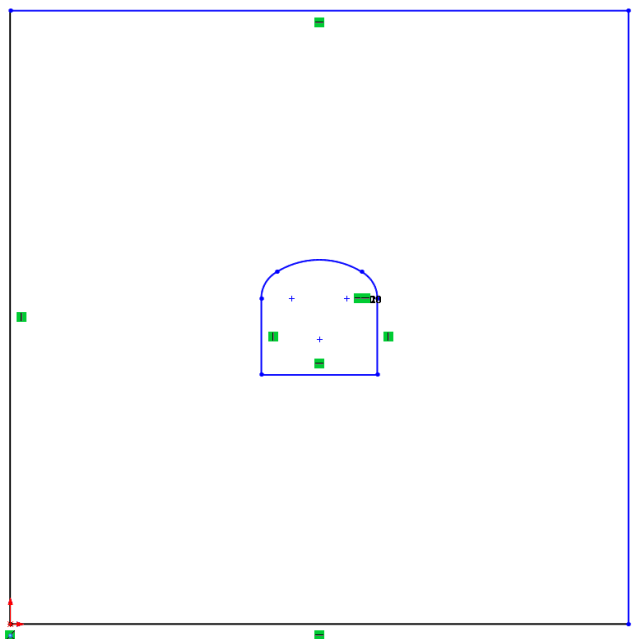


Рис. 1.4 – Ескіз моделі масиву порід з гірничою виробкою

5. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на задану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 1.5).

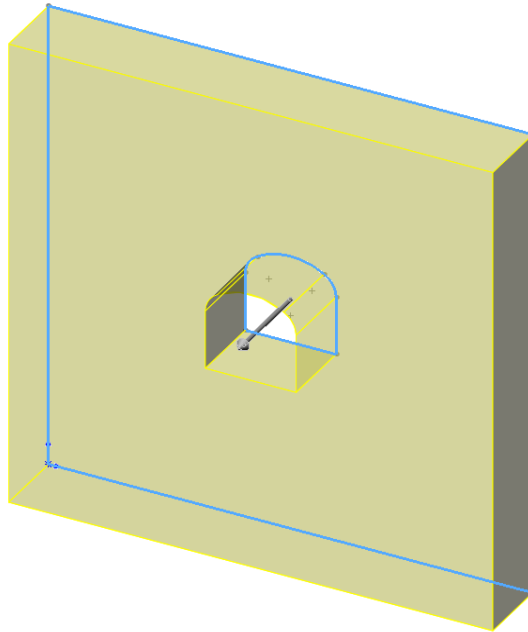


Рис. 1.5 – Витягнення профілю моделі однорідного масиву гірських порід з гірничою виробкою

6. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив гірських порід з гірничою виробкою (рис. 1.6).

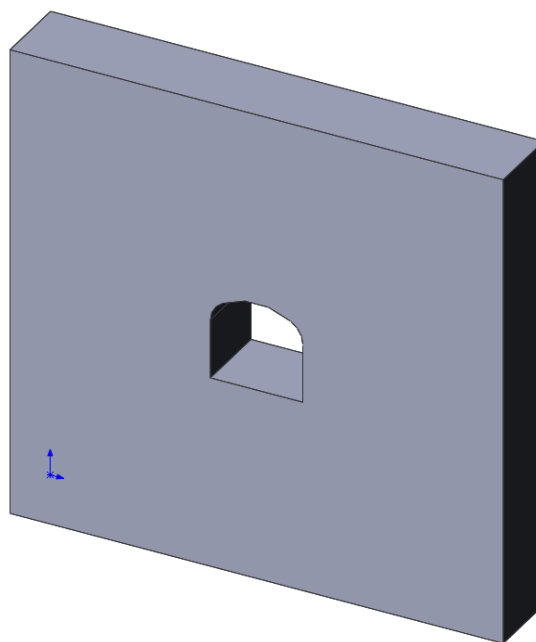


Рис. 1.6 – Модель однорідного масиву гірських порід з гірничою виробкою

1.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 1.1, розрахувати та графічно побудувати модель однорідного масиву з гірничою виробкою.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі однорідного масиву з гірничою виробкою

Варіант №	Форма поперечного перерізу виробки	Ширина виробки у проходці, B_{np} , м	Висота виробки у проходці, H_{np} , м
0	П-С	3,6	3,6
1	А	3,0	3,0
2	П-С	3,2	3,2
3	А	3,3	3,2
4	П-С	3,4	3,3
5	А	3,5	3,4
6	П-С	3,6	3,4
7	А	3,5	3,5
8	П-С	3,8	3,6
9	А	3,7	3,5
10	П-С	4,0	3,8
11	А	3,8	3,6
12	П-С	4,3	3,6
13	А	4,0	3,8
14	П-С	4,5	4,5
15	А	4,3	3,9
16	П-С	4,7	3,8
17	А	4,5	4,2
18	П-С	5,0	5,0
19	А	5,0	4,0
20	П-С	5,5	5,5

Примітка: П-С – прямокутно-склепінчаста форма поперечного перерізу гірничої виробки; А – аркова форма поперечного перерізу гірничої виробки.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

1.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудувати модель однорідного масиву з гірничою виробкою за варіантом №0.

Визначимо радіуси осьової та бокових дуг для виробок прямокутно-склепінчастої форми за формулами (1.1) і (1.2)

$$R = 0,692 \cdot B_{np} = 0,692 \cdot 3,6 = 2,4912 \text{ м};$$

$$r = 0,262 \cdot B_{np} = 0,262 \cdot 3,6 = 0,9432 \text{ м}.$$

Визначимо площу поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої форми у проходці за формулою (1.3)

$$S_{np} = B_{np} \cdot \left(H_{np} - \frac{B_{np}}{3} + 0,26 \cdot B_{np} \right) = 3,6 \cdot \left(3,6 - \frac{3,6}{3} + 0,26 \cdot 3,6 \right) = 12 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр виробки визначається за формулою (1.5)

$$D_{\epsilon} = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 12 / 3,14} = 3,9 \text{ м}.$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (1.6)

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_{\epsilon} = 3,6 + 4 \cdot 3,9 = 19,2 \text{ м}.$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (1.7)

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_{\epsilon} = 3,6 + 4 \cdot 3,9 = 19,2 \text{ м}.$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 19,2 \text{ м}$ і $H_m = 19,2 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:100 або 1:200 будуюмо геометрію моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 1.2. Побудована геометрія моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами подана на рис. 1.7.

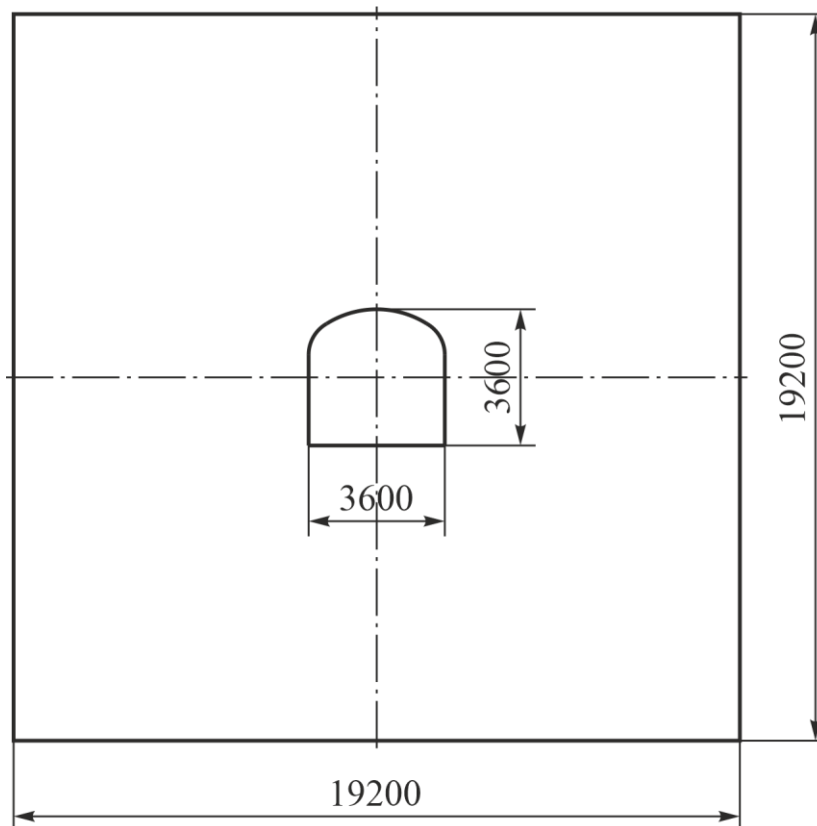


Рис. 1.7 – Геометрія моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами у масштабі 1:200

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану однорідного масиву гірських порід навколо гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми поперечного перерізу, що має розміри у проходці 3,6 м × 3,6 м, параметри моделі повинні бути не менше 19,2 м × 19,2 м.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть призначення програмного продукту SolidWorks.
2. Що таке «Ескіз» і «Креслення ескізу»?
3. Для чого призначена команда «Витягнута Бобишка»?
4. Наведіть послідовність створення деталі у програмного продукту SolidWorks.
5. Що впливає на параметри геометрії моделі однорідного масиву гірських порід?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА МОДЕЛІ ШАРУВАТОГО МАСИВУ ПОРІД НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

Мета роботи: надбання навичок розрахунку та побудови у програмному продукті SolidWorks геометрії моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** розробляти робочі проекти та креслення для технічних завдань і пропозицій щодо розробки рудних і нерудних родовищ корисних копалин.

2.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Програмний продукт SolidWorks, крім створення окремих деталей і їх креслень, дозволяє створювати так звані «зборки», які за своєю суттю аналогічні складальним кресленням у машинобудуванні. В SolidWorks можна побудувати складні зборки, що складаються як з окремих деталей, так і з інших зборок – вузлів.

Зборка створюється шляхом додавання і зміни існуючих деталей зборки. Додавання деталей відображається шляхом вставки нових компонентів.

Положення та розташування деталей у збірці виконується за допомогою спряжень. Спряженнями зв'язуються окремі грані і кромки деталей з площинами граней і кромками інших деталей.

Ключовими етапами процесу створення збоки є:

- створення нової зборки;
- додавання першої деталі (вузла);
- положення першої деталі (вузла);
- дерево конструювання FeatureManager;
- взаємне спряження деталей (вузлів).

Для створення зборки натисніть **Файл, Зборка** та **ОК**. Першим компонентом, доданим у зборку, повинна бути деталь, положення якої буде зафіксованим, тобто нерухожим. Після фіксації першого компонента можна будувати спряження його із іншими деталями, не боячись, що він зміститься.

Після того як базовий компонент буде встановлено та зафіксовано, можна до нього додавати інші деталі зборки та виконувати їх спряження із базовою деталлю. Положення деталей, які додаються має бути невизначеним, для того щоб кожна мала 6 ступенів свободи і могла переміщуватись.

Один або декілька вибраних деталей (компонентів) можна переміщати або обертати, щоб змінити їх положення для спряження. Такі дії можна виконати за допомогою миші або команд **Перемістити** та **Обертати компонент**. Однак, переміщати деталь (компонент) є недостатньо точною операцією для побудови зборки. Для спряження деталей використовують грані або кромки.

Інструмент **Вставити спряження** створює взаємозв'язок між деталями (компонентами) або між деталлю і зборкою. **Співпадання** і **Концентричність** – два найбільш часто використовуваних типи спряження.

Спряження можна створювати з використанням різних об'єктів деталі, наприклад, граней, площин, кромки, вершин та точок ескізу, осей та початкових точок. Більшість спряжень виконуються між парою об'єктів. В меню **Вставка** виберіть **Спряження** або на панелі інструментів зборки натисніть **Спряження**, або натисніть на деталі (компоненті) правою клавішею миші і виберіть **Спряження**.

Для спряження використовуються значки, від яких залежить від типу спряження: співпадання, паралельність, перпендикулярність, дотичність, концентричність. Спряження використовують для створення взаємозв'язків між деталями (компонентами).

Перед створенням зборки у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки. Параметри геометрії моделі шаруватого масиву у якому проведено гірничу виробку розраховуються у такій самій послідовності як подано у практичній роботі №1 за формулами (1.1)–(1.7).

Після розрахунку параметрів гірничої виробки та масиву будуюмо геометрію моделі шаруватого масиву з гірничою виробкою згідно розрахункової схеми поданої на рис. 2.1.

З рис. 2.1 видно, що зборка, тобто модель шаруватого масиву з гірничою виробкою буде мати чотири окремі деталі, а саме: породи лежачого і висячого боків, руда у покрівлі та підосви гірничої виробки.

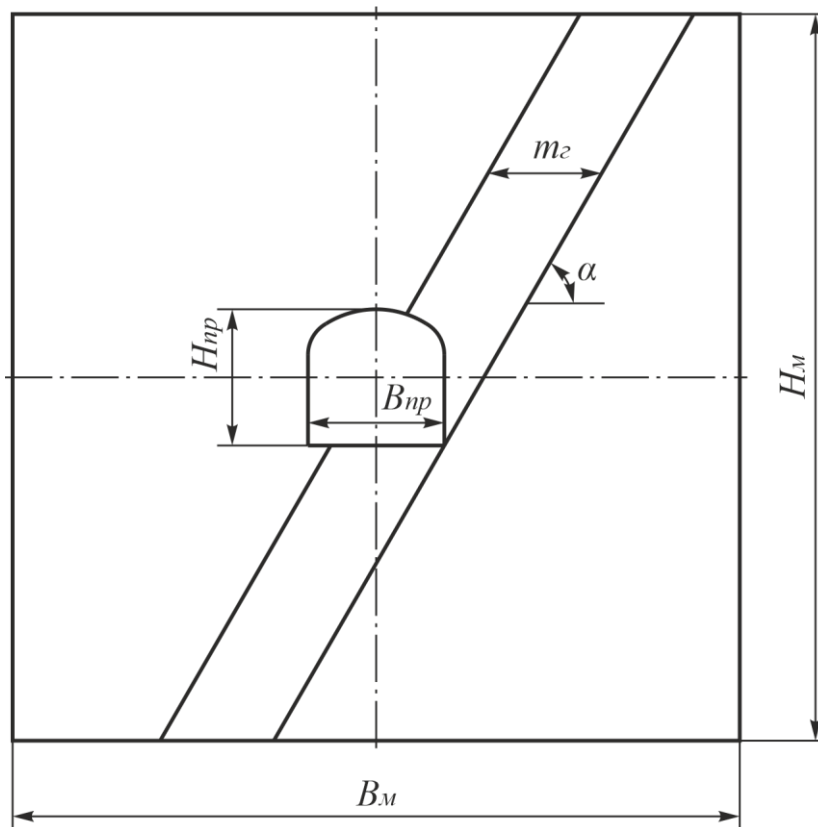


Рис. 2.1 – Розрахункова схема геометрії моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки

Процес створення зборки включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. Далі за розрахованими параметрами будуємо ескіз моделі шаруватого масиву з гірничою виробкою (рис. 2.2) і зберігаємо його як окремий файл.

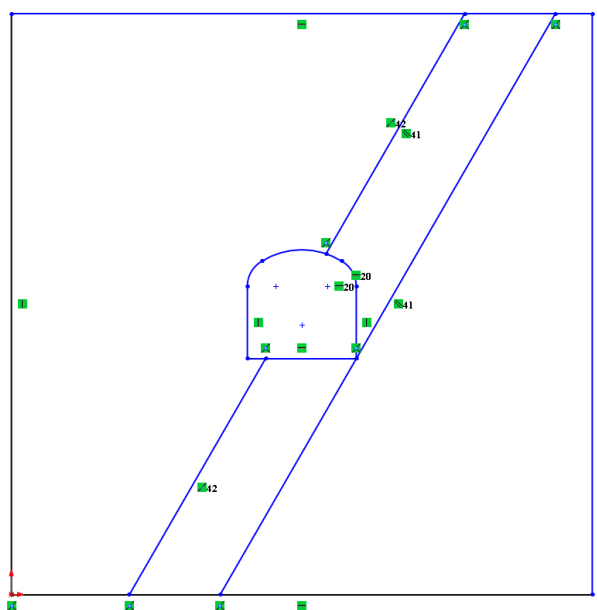


Рис. 2.2 – Ескіз геометрії моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки

4. Потім використовуючи збережений файл ескізу геометрії моделі шаруватого масиву та за допомогою інструмента **Витягнута Бобишка** будуємо і зберігаємо чотири окремі деталі: породи лежачого і висячого боків, руда у покрівлі та підшви гірничої виробки (рис. 2.3).

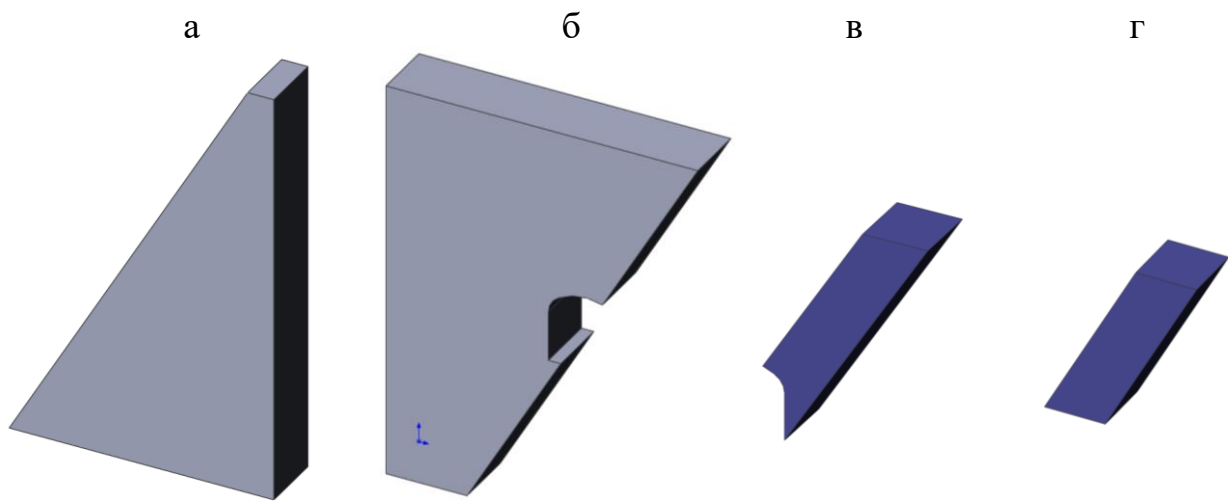


Рис. 2.3 – Деталі порід лежачого (а) і висячого (б) боків, руда у покрівлі (в) та підшви (г) гірничої виробки

5. Створюємо файл нової зборки. Обираємо першу деталь породи висячого боку, яка автоматично фіксується та стає нерухомою. Далі за допомогою команди **Вставка, Компонент, З файлу** почергово додаємо інші деталі зборки та виконуємо їх спряження із базовою деталлю. Після проведення спряження отримуємо готову збірку моделі шаруватого масиву гірських порід з гірничою виробкою (рис. 2.4).

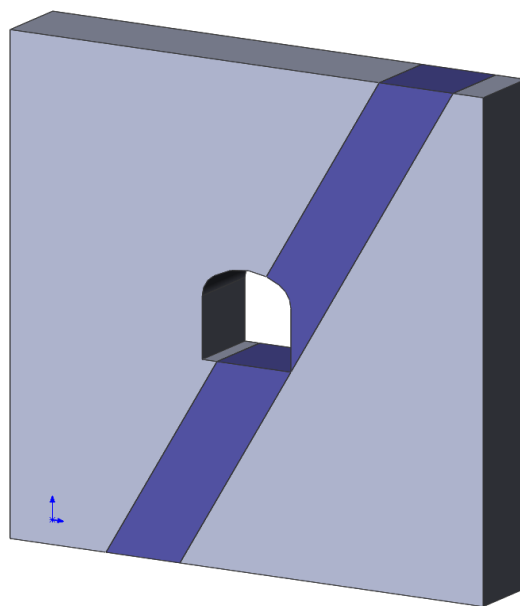


Рис. 2.4 – Модель шаруватого масиву гірських порід з гірничою виробкою

2.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 2.1, розрахувати та графічно побудувати модель шаруватого масиву з гірничою виробкою.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі шаруватого масиву з гірничою виробкою

Варіант №	Форма поперечного перерізу виробки	Ширина виробки у проходці, B_{np} , м	Висота виробки у проходці, H_{np} , м	Горизонтальна потужність рудного покладу, m_z , м	Кут падіння рудного покладу, α , град
0	П-С	3,6	3,6	3,0	60
1	А	3,2	3,2	2,0	65
2	П-С	3,3	3,3	2,2	70
3	А	3,4	3,4	2,4	75
4	П-С	3,5	3,5	2,6	60
5	А	3,6	3,6	2,8	65
6	П-С	3,7	3,7	3,0	70
7	А	3,8	3,8	3,2	75
8	П-С	3,9	3,9	3,4	60
9	А	4,0	4,0	3,6	65
10	П-С	3,2	3,2	2,0	70
11	А	3,3	3,3	2,2	75
12	П-С	3,4	3,4	2,4	60
13	А	3,5	3,5	2,6	65
14	П-С	3,6	3,6	2,8	70
15	А	3,7	3,7	3,0	75
16	П-С	3,8	3,8	3,2	60
17	А	3,9	3,9	3,4	65
18	П-С	4,0	4,0	3,6	70
19	А	4,1	4,1	3,8	75
20	П-С	4,2	4,2	4,0	60

Примітка: П-С – прямокутно-склепінчаста форма поперечного перерізу гірничої виробки; А – аркова форма поперечного перерізу гірничої виробки.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

2.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудувати модель шаруватого масиву з гірничою виробкою за варіантом №0.

Визначимо радіуси осьової та бокових дуг для виробок прямокутно-склепінчастої форми за формулами (1.1) і (1.2)

$$R = 0,692 \cdot B_{np} = 0,692 \cdot 3,6 = 2,4912 \text{ м};$$

$$r = 0,262 \cdot B_{np} = 0,262 \cdot 3,6 = 0,9432 \text{ м}.$$

Визначимо площу поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої форми у проходці за формулою (1.3)

$$S_{np} = B_{np} \cdot \left(H_{np} - \frac{B_{np}}{3} + 0,26 \cdot B_{np} \right) = 3,6 \cdot \left(3,6 - \frac{3,6}{3} + 0,26 \cdot 3,6 \right) = 12 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр виробки визначається за формулою (1.5)

$$D_{\epsilon} = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 12 / 3,14} = 3,9 \text{ м}.$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (1.6)

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_{\epsilon} = 3,6 + 4 \cdot 3,9 = 19,2 \text{ м}.$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (1.7)

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_{\epsilon} = 3,6 + 4 \cdot 3,9 = 19,2 \text{ м}.$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 19,2 \text{ м}$ і $H_m = 19,2 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:200 будуюмо геометрію моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 2.1. Побудована геометрія моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами подана на рис. 2.5.

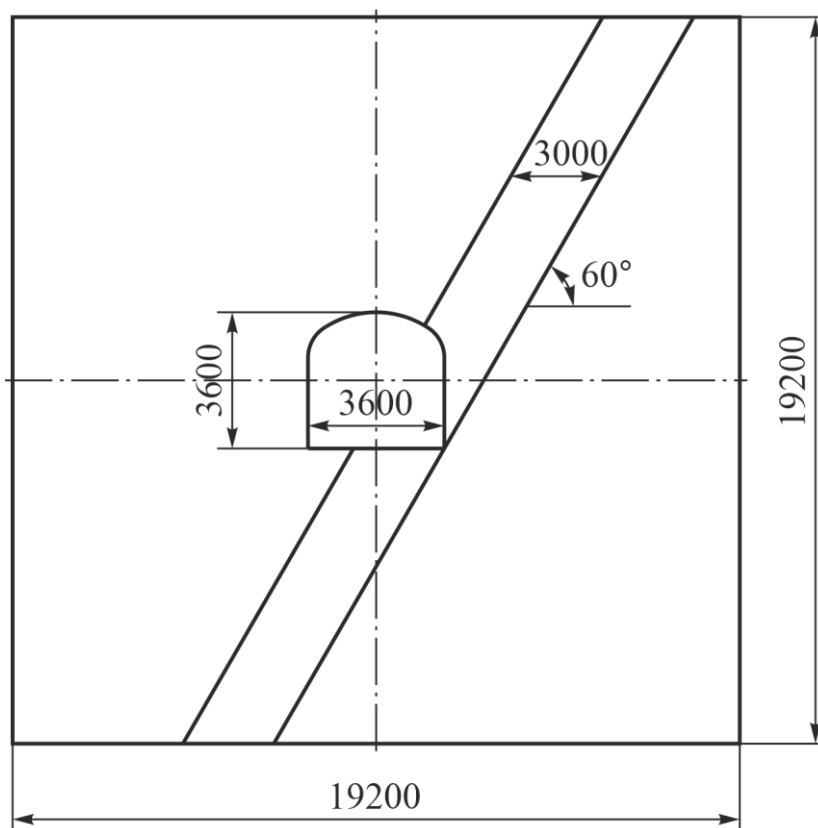


Рис. 2.5 – Геометрія моделі шаруватого масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами у масштабі 1:200

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану шаруватого масиву гірських порід навколо гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми поперечного перерізу, що має розміри у проходці 3,6 м × 3,6 м, параметри моделі повинні бути не менше 19,2 м × 19,2 м.

Питання для самоконтролю

1. За допомогою якого інструменту створюється зборка?
2. Для чого призначено інструмент «Спряження»?
3. Наведіть послідовність створення зборки у програмного продукту SolidWorks.
4. Що впливає на параметри геометрії моделі шаруватого масиву гірських порід?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3 РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА МОДЕЛІ МАСИВУ НАВКОЛО ОЧИСНОЇ КАМЕРИ

Мета роботи: надбання навичок розрахунку та побудови у програмному продукті SolidWorks геометрії моделі масиву навколо очисної камери.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** розробляти робочі проекти та креслення для технічних завдань і пропозицій щодо розробки рудних і нерудних родовищ корисних копалин.

3.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Підземна розробка рудних родовищ супроводжується використанням різноманітних систем розробки. Найбільшого розповсюдження отримали камерні системи розробки.

При камерних системах розробки для очисного виймання руд використовують очисні камери. **Очисна камера** – очисна виробка значних розмірів (при камерних або камерно-стовпових системах розробки корисних копалин з вибоєм невеликої довжини), яка обмежена з боків масивом або ціликами.

Модель шаруватого масиву навколо очисної камери буде уявляти собою «зборку» з деталей. Перед створенням зборки у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі шаруватого масиву навколо очисної камери. Параметри геометрії моделі шаруватого масиву у якому розташовується очисна камера розраховуються у наступній послідовності.

Площа описаного прямокутника навколо очисної камери визначається за формулою

$$S_{н.к.} = b_k \cdot h_k, \text{ м}^2, \quad (3.1)$$

де b_k – ширина камери вхрест простягання, визначається при кресленні геометрії очисної камери, м; h_k – висота камери, м.

Приведений діаметр очисної камери визначається за виразом

$$D_k = \sqrt{4 \cdot S_{n.k.} / \pi}, \text{ м.} \quad (3.2)$$

Ширина моделі масиву визначається за формулою

$$B_m = b_k + 4 \cdot D_k, \text{ м.} \quad (3.3)$$

Висота моделі масиву визначається за формулою

$$H_m = h_k + 4 \cdot D_k, \text{ м.} \quad (3.4)$$

Параметри геометрії моделі приймаємо за максимальною розрахованою шириною або висотою моделі масиву.

Після розрахунку параметрів масиву будемо геометрію моделі шаруватого масиву з очисною камерою згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 3.1.

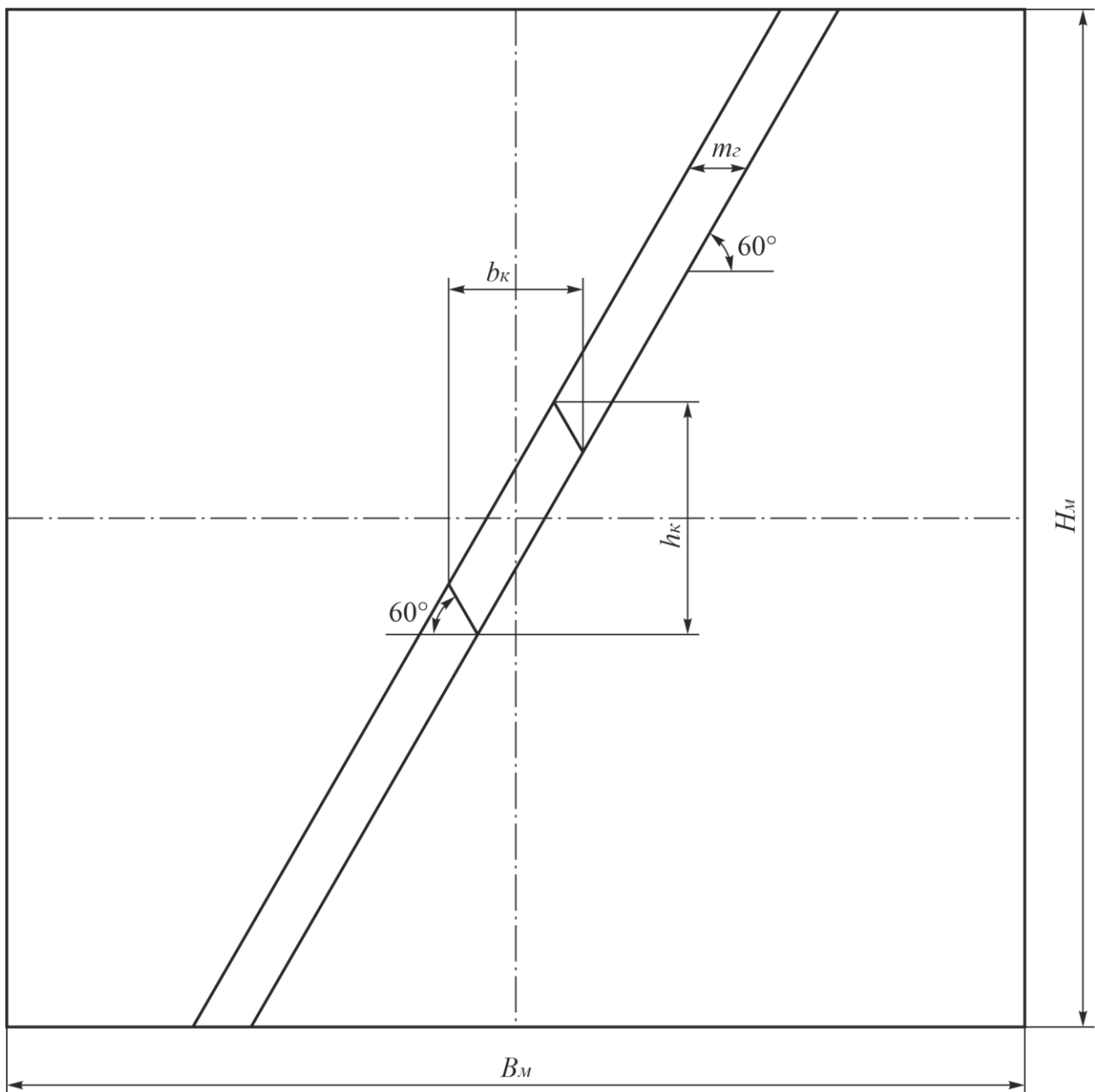


Рис. 3.1 – Розрахункова схема геометрії моделі шаруватого масиву навколо очисної камери

З рис. 3.1 видно, що зборка, тобто модель шаруватого масиву з очисною камерою має чотири окремі деталі, а саме: породи лежачого і висячого боків, руда у покрівлі та підшви очисної камери.

Процес створення зборки включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. Далі за розрахованими параметрами будуємо ескіз моделі шаруватого масиву з очисною камерою (рис. 3.2) і зберігаємо його як окремий файл.

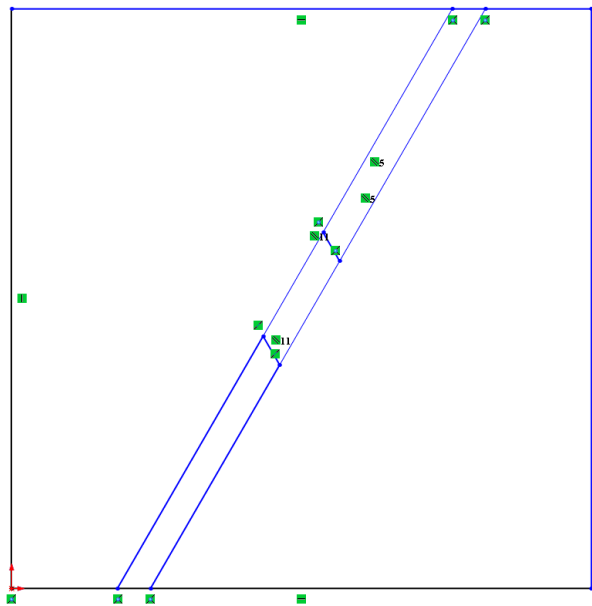


Рис. 3.2 – Ескіз геометрії моделі шаруватого масиву навколо очисної камери

4. Потім використовуючи збережений файл ескізу геометрії моделі шаруватого масиву та за допомогою інструмента **Витягнута Бобишка** будуємо і зберігаємо чотири окремі деталі: породи лежачого і висячого боків, руда у покрівлі та підшви очисної камери (рис. 3.3).

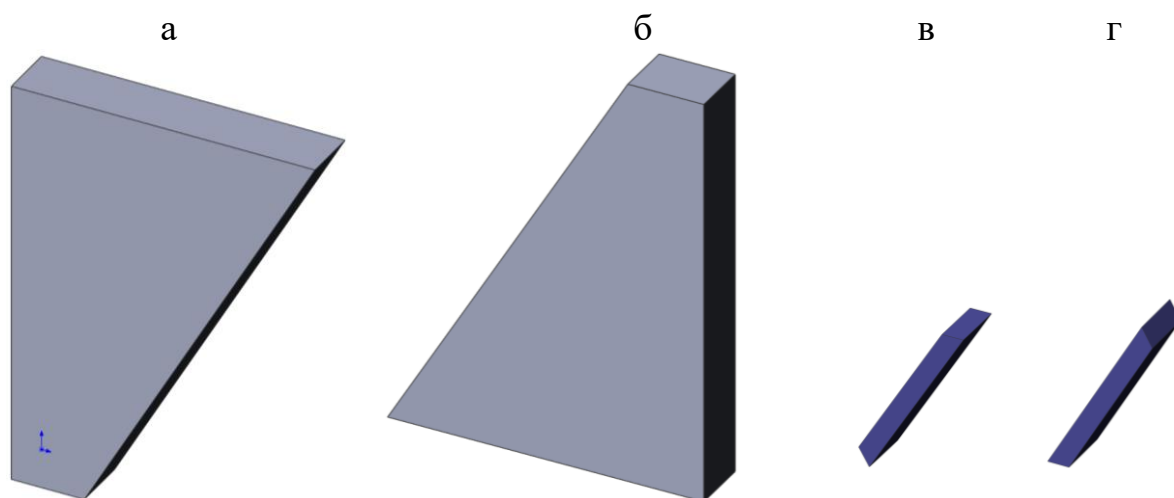


Рис. 3.3 – Деталі порід висячого (а) і лежачого (б) боків, руда у покрівлі (в) та підшви (г) очисної камери

5. Створюємо файл нової зборки. Обираємо першу деталь породи висячого боку, яка автоматично фіксується та стає нерухомою. Далі за допомогою команди **Вставка, Компонент, З файлу** по чергово додаємо інші деталі зборки та виконуємо їх спряження із базовою деталлю. Після проведення спряження отримуємо готову збірку моделі шаруватого масиву гірських порід з очисною камерою (рис. 3.4).

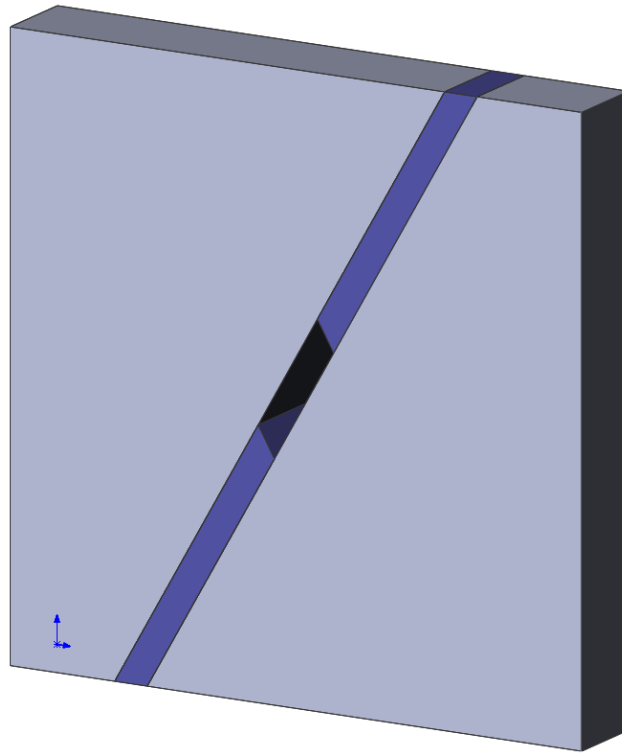


Рис. 3.4 – Модель шаруватого масиву гірських порід з очисною камерою

3.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 3.1, розрахувати та графічно побудувати модель шаруватого масиву з очисною камерою.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі однорідного масиву з очисною камерою

Варіант №	Горизонтальна потужність рудного покладу, m_z , м	Висота очисної камери, h_k , м
1	2	3
0	20	80
1	15	75
2	16	80
3	17	85
4	18	90
5	19	95

1	2	3
6	20	100
7	21	75
8	22	80
9	23	85
10	24	90
11	25	95
12	15	100
13	16	75
14	17	80
15	18	85
16	19	90
17	20	95
18	21	100
19	22	75
20	23	80

Примітка: П-С – прямокутно-склепінчаста форма поперечного перерізу гірничої виробки; А – аркова форма поперечного перерізу гірничої виробки.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

3.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудувати модель шаруватого масиву з очисною камерою за варіантом №0.

Визначимо площу описаного прямокутника навколо очисної камери за формулою (3.1)

$$S_{н.к.} = b_k \cdot h_k = 46 \cdot 80 = 3680 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр очисної камери за формулою (3.2)

$$D_k = \sqrt{4 \cdot S_{н.к.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 3680 / 3,14} = 68 \text{ м.}$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (3.3)

$$B_m = b_k + 4 \cdot D_k = 46 + 4 \cdot 68 = 318 \text{ м.}$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (3.4)

$$H_m = h_k + 4 \cdot D_k = 80 + 4 \cdot 68 = 350 \text{ м.}$$

Приймаємо наступні параметри моделі $B_m = 350$ м і $H_m = 350$ м.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:2000 будуємо геометрію моделі шаруватого масиву навколо очисної камери згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 3.1. Побудована геометрія моделі шаруватого масиву навколо очисної камери за прийнятими параметрами подана на рис. 3.5.

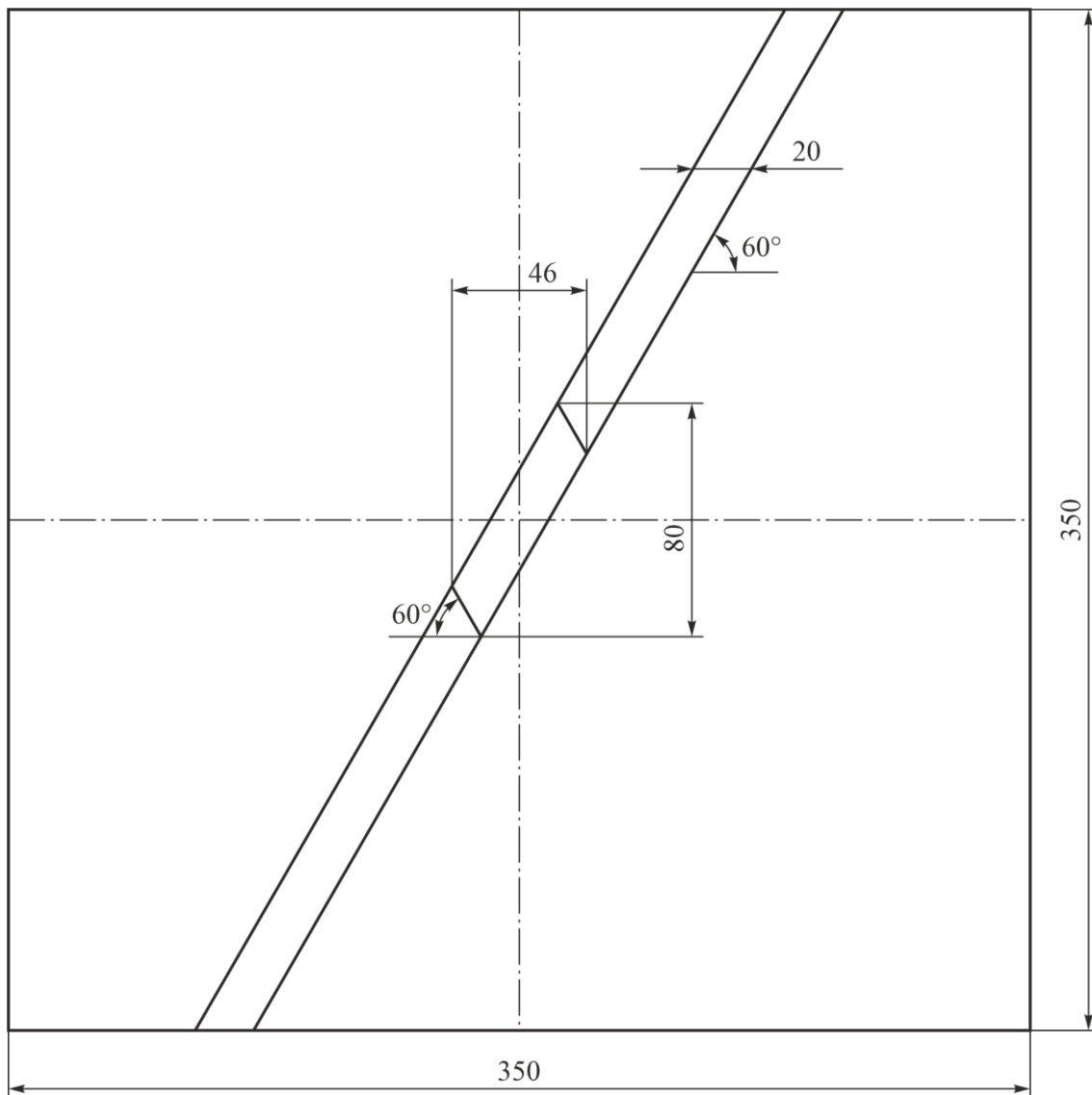


Рис. 3.5 – Геометрія моделі шаруватого масиву навколо очисної камери за прийнятими параметрами у масштабі 1:2000

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану шаруватого масиву гірських порід навколо очисної камери, що має висоту 80 м, параметри моделі повинні бути не менше 350 м × 350 м.

Питання для самоконтролю

1. Що таке «очисна камера»?
2. З яких деталей складається модель шаруватого масиву навколо очисної камери?
3. Наведіть послідовність створення зборки моделі шаруватого масиву навколо очисної камери у програмного продукту SolidWorks.
4. Що впливає на параметри геометрії моделі шаруватого масиву гірських порід навколо очисної камери?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

РОЗРАХУНОК ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСИВУ МОДЕЛІ

Мета роботи: надбання навичок розрахунку фізико-механічних властивостей матеріалу деталі для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання.

4.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Модуль SolidWorks Simulation – універсальний інструмент для аналізу методом скінченних елементів. Моделювання методом скінченних елементів – це дискретизація проєктованих компонентів в тверде тіло, оболонку або балковий елемент, що використовує лінійний аналіз напружень для визначення реакції деталей і вузлів під впливом:

- сили;
- тиску;
- прискорення;
- температури;
- контакт між компонентами.

Для проведення аналізу напружень, повинні бути відомими дані матеріалів компонентів.

Перед початком дослідження слід встановити всі необхідні властивості матеріалу, необхідні для відповідного типу аналізу. Всі властивості матеріалу встановлюються за допомогою діалогового вікна **Матеріал**. Наприклад, модуль пружності потрібний для статичного, частотного та дослідження поздовжнього вигину, а теплопровідність потрібна для термічних досліджень.


У діалоговому вікні **Матеріал** можна створити та відредагувати матеріали або бібліотеки користувача, застосувати матеріали з бібліотеки матеріалів SolidWorks або створити список матеріалів, що часто використовуються.

У діалоговому вікні **Матеріал** виділяються обов'язкові та необов'язкові властивості. Опис **червоним** кольором вказує, що властивість є обов'язковою, на основі типу активного дослідження та моделі матеріалу. Опис **синім** кольором показує, що властивість не є обов'язковою. Властивості матеріалу можуть бути встановлені у будь-який час, до початку аналізу.

Можна застосувати матеріал до деталі, одного або кількох тіл багатотільної деталі або одного або кількох компонентів деталі у зборці.

Щоб застосувати матеріал:

1. Відобразити контекстне меню для матеріалів:

– «*Деталь*». У документі деталі натисніть правою кнопкою миші на Матеріал у дереві конструювання **FeatureManager** .

– «**Багатотільна деталь**». У дереві проектування **FeatureManager** у папці **Solid Bodies (Тверді тіла)** натисніть правою кнопкою миші на тіло та виберіть пункт **Матеріал**. Для застосування матеріалу до кількох тіл виберіть кілька компонентів, перш ніж натиснути правою кнопкою миші.

– «**Зборка**». У дереві конструювання **FeatureManager** натисніть правою кнопкою миші компонент деталі та виберіть **Матеріал**. Щоб застосувати матеріал до кількох компонентів, виберіть кілька компонентів, перш ніж натиснути правою кнопкою миші.

2. Виберіть матеріал:

– Виберіть у списку «**Обране**».

– Виберіть **Редагувати матеріал**, вкажіть матеріал у дереві матеріалів, натисніть кнопку **Застосувати** і натисніть кнопку **Закрити**.

Створення бібліотеки матеріалів. **Бібліотека матеріалів** – це база даних, що містить інформацію про кожний матеріал. У SolidWorks є бібліотека «**Матеріали SolidWorks**», доступна тільки для читання, та бібліотека «**Матеріали користувача**», в якій користувач може створювати свої матеріали. Можна створити додаткові бібліотеки для зберігання матеріалів.

Щоб створити бібліотеку, виконайте наведені нижче дії.

У документі деталі клацніть правою кнопкою миші **Матеріал** у дереві конструювання **FeatureManager** та виберіть **Редагувати матеріал**.

У діалоговому вікні **Матеріал** клацніть будь-який елемент у дереві матеріалів правою кнопкою миші та виберіть **Нова бібліотека**.

У діалоговому вікні **Зберегти** вкажіть ім'я файлу, в якому буде збережено бібліотеку.

Використовуйте змістовне ім'я. Вказане ім'я буде відображено ім'ям бібліотеки. Пізніше перейменувати бібліотеку буде неможливо.

Клацніть правою кнопкою миші нову бібліотеку у дереві матеріалів, виберіть **Нова категорія** та введіть ім'я для категорії.

Тепер можна копіювати матеріали з інших бібліотек у дереві матеріалів, вставляти їх у категорію та адаптувати.

Модель матеріалу описує взаємозв'язок розтягання-стискання матеріалу. Доступність моделей матеріалів залежить від типу активного дослідження.

Ізотропні та ортотропні матеріали. Матеріал вважається *ізотропним*, при ідентичності механічних та термічних властивостей вздовж усіх напрямків. Матеріал вважається *ортотропним*, у разі унікальності та незалежності механічних та термічних властивостей вздовж трьох взаємно перпендикулярних напрямків.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

Основні фізико-механічні властивості гірських порід (матеріалу), які необхідні для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану у модулі SolidWorks Simulation: модуль пружності (Юнга), коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву, щільність, межа міцності на розтягання та стискання.

Модуль пружності (E) вздовж глобальних осей X , Y і Z . Для лінійно пружного матеріалу модуль пружності вздовж окремої осі визначається значенням напруження вздовж даної осі, що викликає деформацію об'єкта вздовж зазначеної осі. Також модуль пружності дорівнює відношенню напруги і супутньої деформації вздовж даної осі. Модулі пружності застосовуються в статичному, нелінійному, частотному, динамічному та аналізі поздовжнього вигину. Вперше, поняття модуля пружності було використано Юнгом і найчастіше називається «Модулем Юнга».

Приблизно модуль пружності масиву гірських порід можна визначити за формулою

$$E \approx \frac{\sigma_p}{0,0001}, \text{ МПа}, \quad (4.1)$$

де σ_p – межа міцності гірських порід на розтягання, МПа.

Коефіцієнт Пуассона (μ) – це міра зміни поперечних розмірів ізотропного тіла при деформації розтягання. Коефіцієнти Пуассона є безрозмірними величинами. Для ізотропних матеріалів коефіцієнти Пуассона у всіх площинах рівні. Коефіцієнт Пуассона застосовується в статичному, нелінійному, частотному, динамічному та аналізі поздовжнього вигину.

Модуль зсуву (G), також називається модулем жорсткості, визначається відношенням напруження зсуву в площині значення асоційованого напруженню зсуву. Модуль зсуву застосовуються в статичному, нелінійному, частотному, динамічному та аналізі поздовжнього вигину.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}, \text{ МПа}, \quad (4.2)$$

Щільністю (γ) називається відношення маси на одиницю об'єму речовини. Як одиниці вимірювання щільності, використовуються $\text{кг}/\text{м}^3$ в системі СІ. Щільність застосовується у статичному, нелінійному, частотному, динамічному, термічному та аналізі поздовжнього вигину.

Межа міцності на розтягання (σ_p) та стискання (σ_{cm}). Під межею міцності на розтягання або стискання розуміють граничне напруження, при якому зразок гірської породи руйнується при розтяганні або стисканні.

Межа міцності гірських порід на стискання визначається за виразом

$$\sigma_{cm} = 10 \cdot f, \text{ МПа}. \quad (4.3)$$

де f – коефіцієнт міцності гірських порід за шкалою проф. Протод'яконова М.М.

Для практичних розрахунків коли не відомі дані випробувань гірських порід на розтягання межа міцності порід на розтягання визначається за формулою

$$\sigma_p = 0,1 \cdot \sigma_{cm}, \text{ МПа}. \quad (4.4)$$

У зв'язку з присутністю тріщинуватості міцність масиву гірських порід зазвичай менша ніж окремих кусок, що складає сам масив. Зі збільшенням ступеня тріщинуватості міцнісні характеристики масиву порід зменшуються, а деформаційні – збільшуються. Для отримання міцнісних характеристик масиву

через міцність зразків у розрахунки вводять коефіцієнт структурного ослаблення, який дорівнює відношенню міцності породи в масиві до міцності у зразку.

З урахуванням вище означеного, для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c, \text{ МПа}, \quad (4.5)$$

де K_c – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, що дорівнює 0,2–0,9.

Розрахунок вище означених фізико-механічні властивостей матеріалу моделі потрібно розраховувати за межею міцності масиву гірських порід.

4.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 4.1, розрахувати фізико-механічні властивості матеріалу моделі.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку фізико-механічних властивостей матеріалу моделі

Варіант №	Коефіцієнт Пуассона, μ		Коефіцієнт міцності порід, f		Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	
	порода	руда	порода	руда	порода	руда
0	0,25	0,18	8	4	0,8	0,6
1	0,24	0,20	10	6	0,6	0,4
2	0,23	0,22	12	8	0,8	0,6
3	0,25	0,24	14	10	0,6	0,4
4	0,24	0,18	16	12	0,8	0,6
5	0,23	0,20	8	4	0,6	0,4
6	0,25	0,22	10	6	0,8	0,6
7	0,24	0,24	12	8	0,6	0,4
8	0,23	0,18	14	10	0,8	0,6
9	0,25	0,20	16	12	0,6	0,4
10	0,24	0,22	8	4	0,8	0,6
11	0,23	0,24	10	6	0,6	0,4
12	0,25	0,18	12	8	0,8	0,6
13	0,24	0,20	14	10	0,6	0,4
14	0,23	0,22	16	12	0,8	0,6
15	0,25	0,24	8	4	0,6	0,4
16	0,24	0,18	10	6	0,8	0,6
17	0,23	0,20	12	8	0,6	0,4
18	0,25	0,22	14	10	0,8	0,6
19	0,24	0,24	16	12	0,6	0,4
20	0,23	0,18	8	4	0,8	0,6

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

4.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо фізико-механічні властивості матеріалу моделі за варіантом №0.

Визначимо межу міцності на стискання за формулою (4.3) для:

– породи

$$\sigma_{cm} = 10 \cdot f = 10 \cdot 8 = 80 \text{ МПа};$$

– руди

$$\sigma_{cm} = 10 \cdot f = 10 \cdot 4 = 40 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву за формулою (4.5) для:

– породи

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c = 80 \cdot 0,8 = 64 \text{ МПа};$$

– руди

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c = 40 \cdot 0,6 = 24 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву порід на розтягання за формулою (4.4) для:

– породи

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 64 = 6,4 \text{ МПа};$$

– руди

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 24 = 2,4 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1) для:

– породи

$$E \approx \frac{\sigma_p^M}{0,0001} = \frac{6,4}{0,0001} = 64000 \text{ МПа};$$

– руди

$$E \approx \frac{\sigma_p^M}{0,0001} = \frac{2,4}{0,0001} = 24000 \text{ МПа};$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2) для

– породи

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{64000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 25600 \text{ МПа};$$

– руди

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{24000}{2 \cdot (1 + 0,18)} = 10170 \text{ МПа};$$

Висновок. Для породи з коефіцієнтом міцності $f = 8$ за розрахунками межа міцності масиву породи на стискання дорівнює $\sigma_{cm} = 64$ МПа, а на розтягання – $\sigma_p = 6,4$ МПа, модуль пружності $E = 64000$ МПа, модуль зсуву $G = 25600$ МПа.

Для руди з коефіцієнтом міцності $f = 4$ за розрахунками межа міцності масиву породи на стискання дорівнює $\sigma_{cm} = 24$ МПа, а на розтягання – $\sigma_p = 2,4$ МПа, модуль пружності $E = 24000$ МПа, модуль зсуву $G = 10170$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Вкажіть призначення модуля SolidWorks Simulation?
2. Наведіть послідовність застосування матеріалу для деталі.
3. Що таке ізотропний та ортотропний матеріал?
4. Перелічити основні фізико-механічні властивості гірських порід, які необхідні для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану у модулі SolidWorks Simulation.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ВИРОБКИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання буропідливних робіт для проведення горизонтальної виробки у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

5.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Лінійний статичний аналіз у модулі SolidWorks Simulation. Тіло, коли до нього застосовуються навантаження, деформується і вплив навантажень передається через тіло. Зовнішні навантаження включають внутрішні сили і реакції, які компенсують вплив і повертають тіло в стан рівноваги. Лінійний статичний аналіз у модулі **SolidWorks Simulation** розраховує сили переміщень, напруження, навантаження та реакції при дії прикладених навантажень.

Послідовність виконання статичного аналізу:

1. Створіть статичне дослідження. Щоб відкрити PropertyManager Дослідження, клацніть правою кнопкою миші вкладку Дослідження Simulation і виберіть **Створити нове дослідження Simulation**. Вкажіть властивості дослідження.

2. Визначте матеріал для кожного твердого тіла, оболонки та балки. Щоб визначити матеріал для твердого тіла, оболонки або балки, натисніть правою кнопкою миші його значок у дереві дослідження Simulation та виберіть **Застосувати/редагувати матеріал**.

3. Визначте обмеження. Клацніть правою кнопкою миші піктограму **Кріплення** у дереві дослідження Simulation та виберіть зі списку. Застосуйте адекватні обмеження для стабілізації кожного тіла, оболонки та компонента на

ньому самому або через умови контакту та з'єднувачі, що зв'язують його з іншими об'єктами або з основою.

4. Визначте зовнішні навантаження.

5. Для зборки та багатокomпонентних частин використовуйте контакт компонентів та набори контактів для моделювання поведінки моделі.

6. Створіть сітку моделі та проведіть дослідження. Якщо запустити дослідження перед створенням сітки, програма автоматично створить сітку дослідження перед запуском. Команду запуску дослідження також можна активувати, встановивши прапорець **Запуск аналізу після створення сітки** у вікні PropertyManager «Сітка».

7. Перегляд результатів:

– двічі клацніть піктограму в папці результатів, щоб відобразити пов'язану епюру;

– щоб визначити нову епюру, натисніть правою кнопкою миші на папку Результати та виберіть потрібний параметр. Можна побудувати епюру переміщення, напруження, деформації та повної деформації.

– для оцінки відмови на основі критерію плинності клацніть правою кнопкою миші на папці Результати та виберіть **Визначити епюру коефіцієнтів запасу міцності**.

Для виконання чисельного моделювання руйнування масиву порід вибухом при проведенні горизонтальної виробки буропідричним способом необхідно провести розрахунки параметрів геометрії моделі, розташування шпурів у вибої виробки, фізико-механічних властивостей порід та навантаження.

При проведенні гірничих виробок буропідричним способом буріння шпурів необхідно виконувати у чіткій відповідності з паспортом буропідричних робіт (БПР). *Паспортом БПР* називають інструктивну карту (технічний документ), який визначає основні параметри вибуху. Це число, напрям і глибина шпурів, маса зарядів та послідовність їх висадження, тип вибухової речовини (ВР) і засобів ініціювання (ЗІ) зарядів, схема та розрахунок підривної мережі, матеріал та розмір забивки, вказівки про місце укриття підривників та робітників, тривалість провітрювання вибою після вибуху, заходи техніки безпеки.

Розрахунок параметрів БПР для проведення горизонтальних гірничих виробок виконується за методикою в основу якої покладено принцип розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибої виробки та розташування їх за відбійними контурами. Розташування шпурів у вибої виробці та врубі виконується згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 5.1.

Перед створенням деталі у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі масиву навколо вибою гірничої виробки. Параметри геометрії моделі масиву розраховуються у такій самій послідовності як подано у практичній роботі №1 за формулами (1.1)–(1.3) та (1.4)–(1.7).

Довжина моделі масиву визначається за формулою

$$L_m = 5 \cdot l_{ep}, \text{ м}, \quad (5.1)$$

де l_{ep} – довжина врубових шпурів, м.

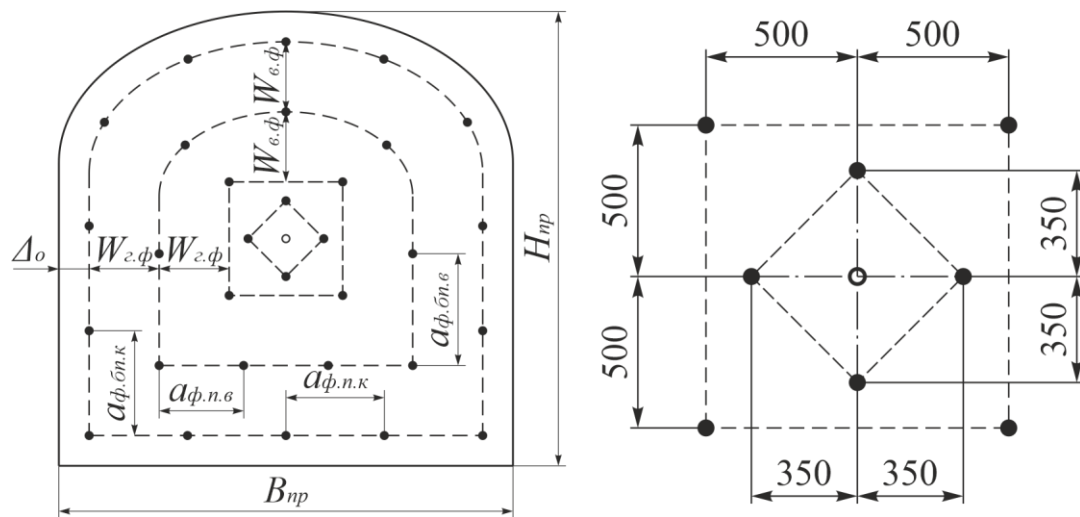


Рис. 5.1 – Розрахункова схема розташування шпурів у вибої виробки та врубі: B_{np} і H_{np} – відповідно ширина і висота виробки у проходці, м; Δ_o – відстань від контуру виробки до лінії контурних шпурів, що дорівнює 0,15–0,25 м; $W_{z.ph}$ і $W_{v.ph}$ – відповідно фактична відстань між рядами відбійних шпурів за шириною та висотою виробки, м; $a_{ф.н.с}$ і $a_{ф.б.н.с}$ – відповідно фактична відстань між відбійними шпурами у контурі підшви та з боків і у покрівлі, м; $a_{ф.н.к}$ і $a_{ф.б.н.к}$ – відповідно фактична відстань між контурними шпурами підшви та в боках і покрівлі, м

Після розрахунку параметрів будуємо геометрію моделі масиву з шпурами, що пробурені у вибої гірничої виробки згідно розрахункової схеми поданої на рис. 5.2.

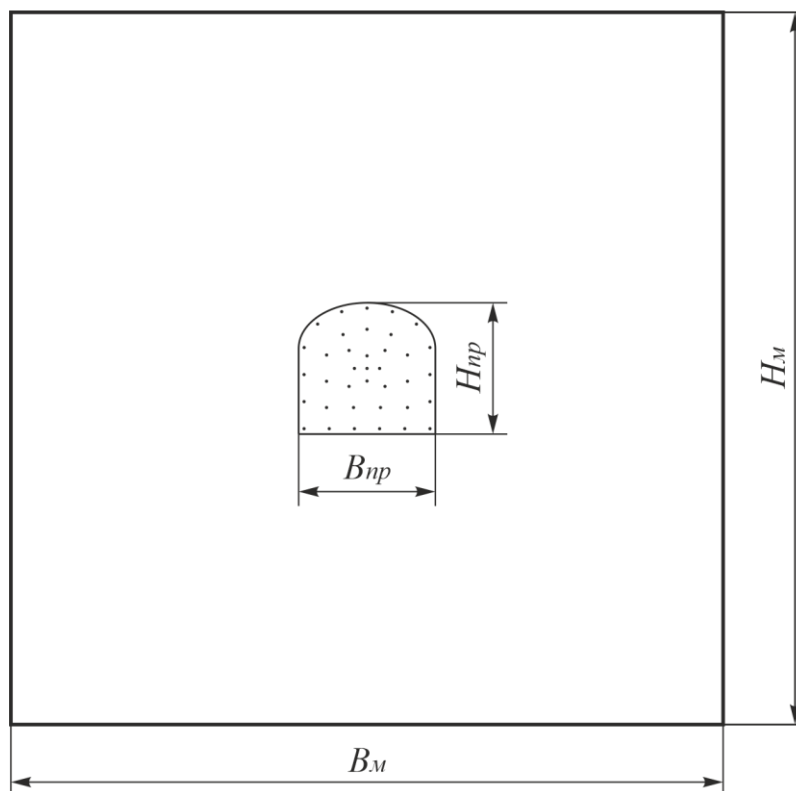


Рис. 5.2 – Розрахункова схема геометрії моделі масиву з шпурами, що пробурені у вибої гірничої виробки

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії вибуху на масив гірських порід, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y, \text{ МПа}, \quad (5.2)$$

де σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, МПа; K_{cn} – коефіцієнт структури породи, який залежить від властивостей масиву, що дорівнює 0,8–2; K_c – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, що дорівнює 0,2–0,9; K_y – емпіричний коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску, що розраховується за формулою

$$K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H) / \gamma, \quad (5.3)$$

де γ – щільність порід, кг/м³; H – глибина гірничих робіт, м.

Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву гірських порід.

Так, як вибух уявляє собою удар, а потім дію тиску продуктів вибуху, то для імітації цього процесу потрібно задати тиск, який направлений перпендикулярно граням та вибою у всіх шпурах з урахуванням динамічного коефіцієнту. Величина тиску продуктів вибуху у шпурах для чисельного моделювання підривання вибою гірничої виробки з урахування діаметру заряду визначається за формулою

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{dz} \cdot K_d}{8}, \text{ Па}, \quad (5.4)$$

де ρ – щільність ВР або густина ЕВР, кг/м³; D – швидкість детонації ВР, м/с; K_d – динамічний коефіцієнт, що дорівнює 2; K_{dz} – коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини залежно від діаметру заряду ВР визначається за формулою

$$K_{dz} = (d_s / d)^3, \quad (5.5)$$

де d – діаметр шпуру, що дорівнює 0,043 м; d_s – діаметр заряду (патрону) ВР, м.

Характеристика ВР подано у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристика ВР

ВР	Діаметр, патрону мм	Вага, г	Довжина, мм	Щільність ВР, кг/м ³	Швидкість детонації, м/с
Амоніт №6ЖВ	32	200	200	1100	4100
Україніт-П-СА	32	200	210	1150	5100

Процес проведення статичного аналізу у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. Далі за допомогою інструмента **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо квадрат. Потім у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту геометрії моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді квадрату (рис. 5.3).

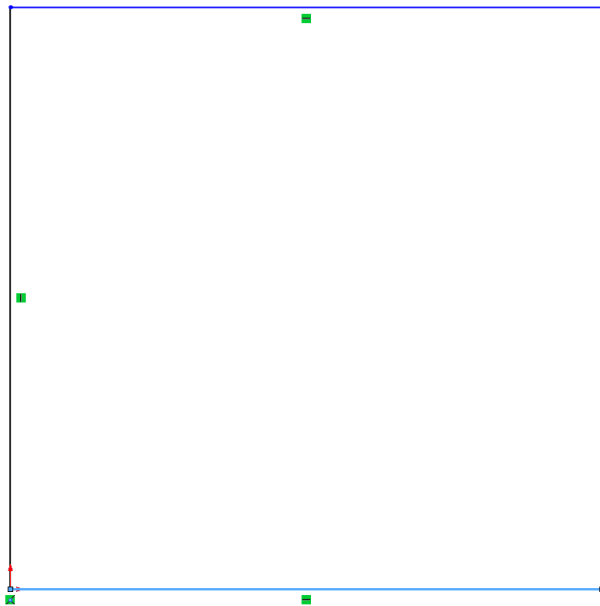


Рис. 5.3 – Ескіз геометрії моделі масиву

4. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на розраховану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 5.4).

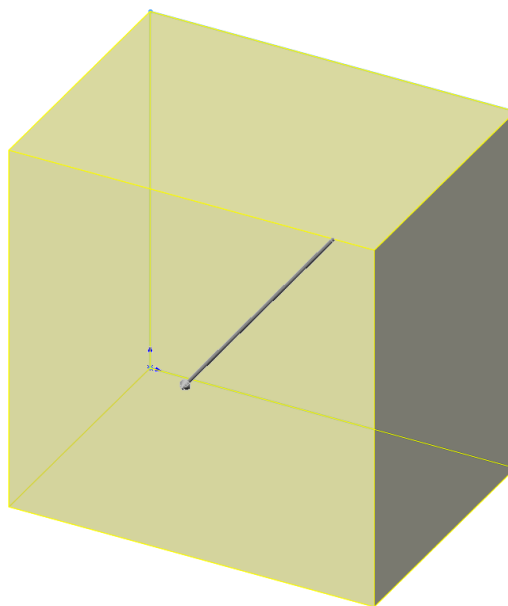


Рис. 5.4 – Витягнення профілю моделі масиву гірських порід

5. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив гірських порід за розрахованими параметрами (рис. 5.5).

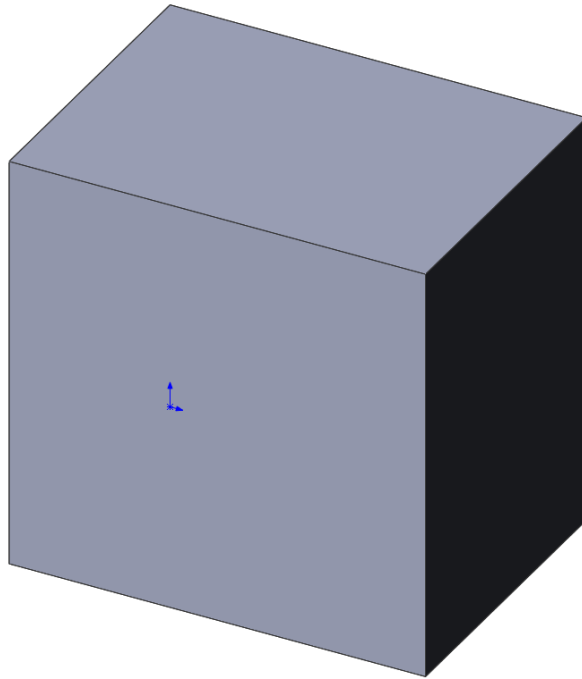


Рис. 5.5 – Модель однорідного масиву гірських порід

6. Натиснувши лівою клявішою миші обраємо необхідну грань деталі де будуть розташовані шпури у вибої виробки (рис.5.6). Потім обираємо вкладку **Ескіз**.

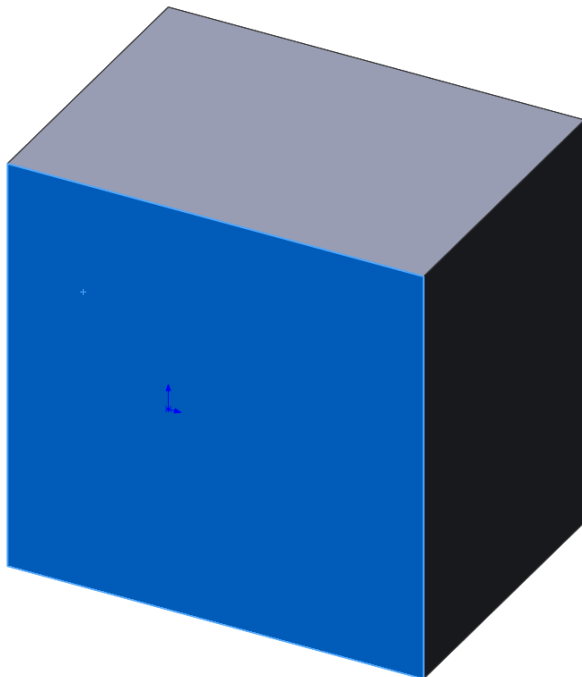


Рис. 5.6 – Виділена грань деталі де будуть розташовані шпури у вибої гірничої виробки

7. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами розташовують врубіві шпури (рис. 5.7).

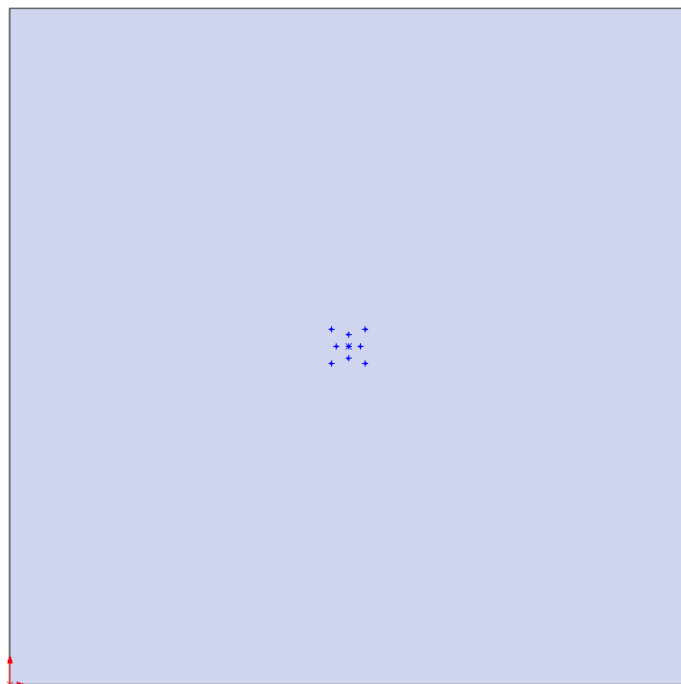


Рис. 5.7 – Розташування врубівіх шпурі у масиві моделі

8. Після побудови врубівіх шпурів, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює $3l_{вр}$, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 5.8).

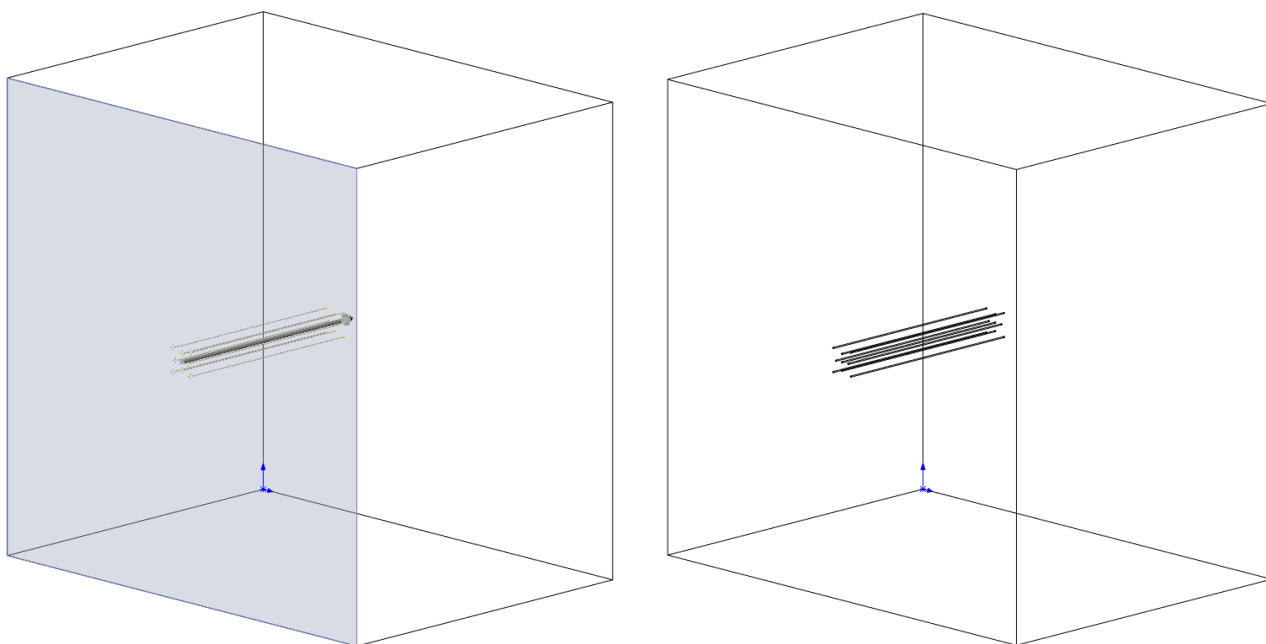


Рис. 5.8 – Викреслені врубіві шпури у масиві моделі

9. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами розташовують інші групи шпурів (рис. 5.9).

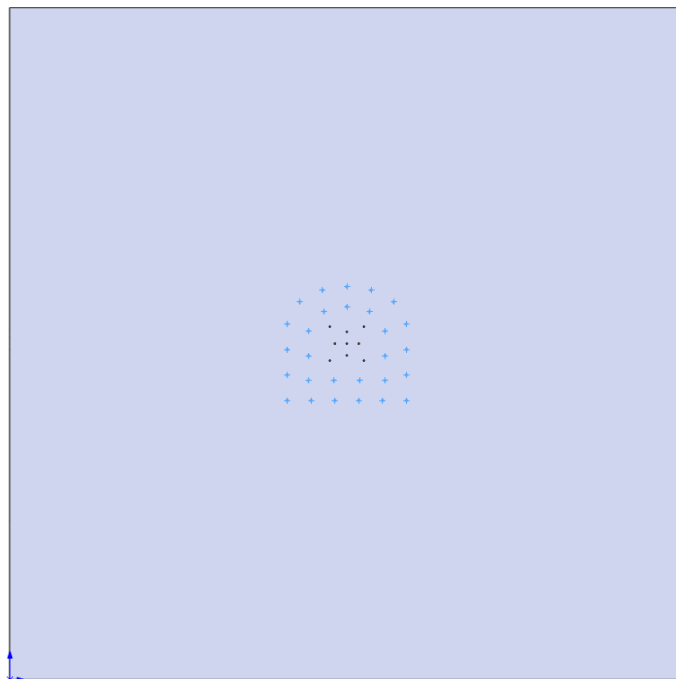


Рис. 5.9 – Розташування врубових шпурів у масиві моделі

10. Після побудови відбійних і контурних шпурів, виходять з режиму **Ескіз**. Далі натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину $3 \cdot l_{вр} - (l_{вр} - l_{ш})$, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 5.10).

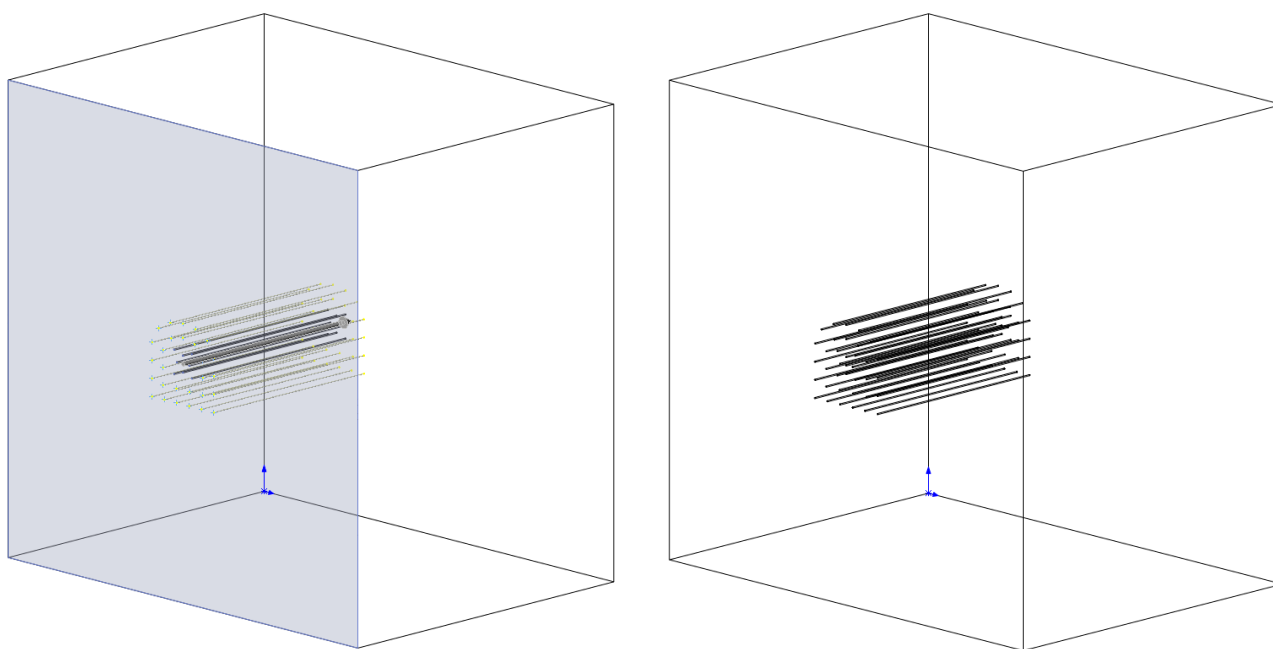


Рис. 5.10 – Викреслені шпури у масиві моделі

11. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами викреслюють контур виробки у проходці (рис. 5.11).

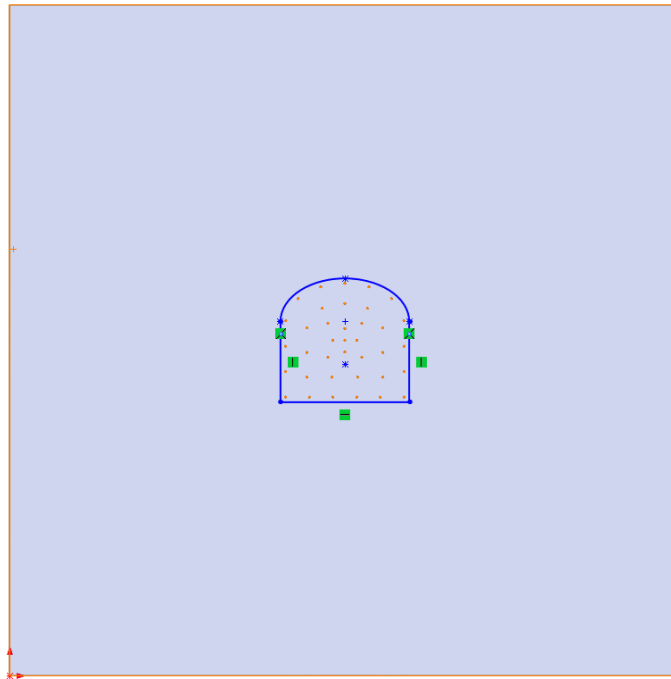


Рис. 5.11 – Викреслений контур виробки

12. Після побудови контуру виробки, виходять з режиму **Ескіз**. Далі натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину $2l_{вр}$, роблять виріз контуру виробки і натискають **ОК** (рис. 5.12).

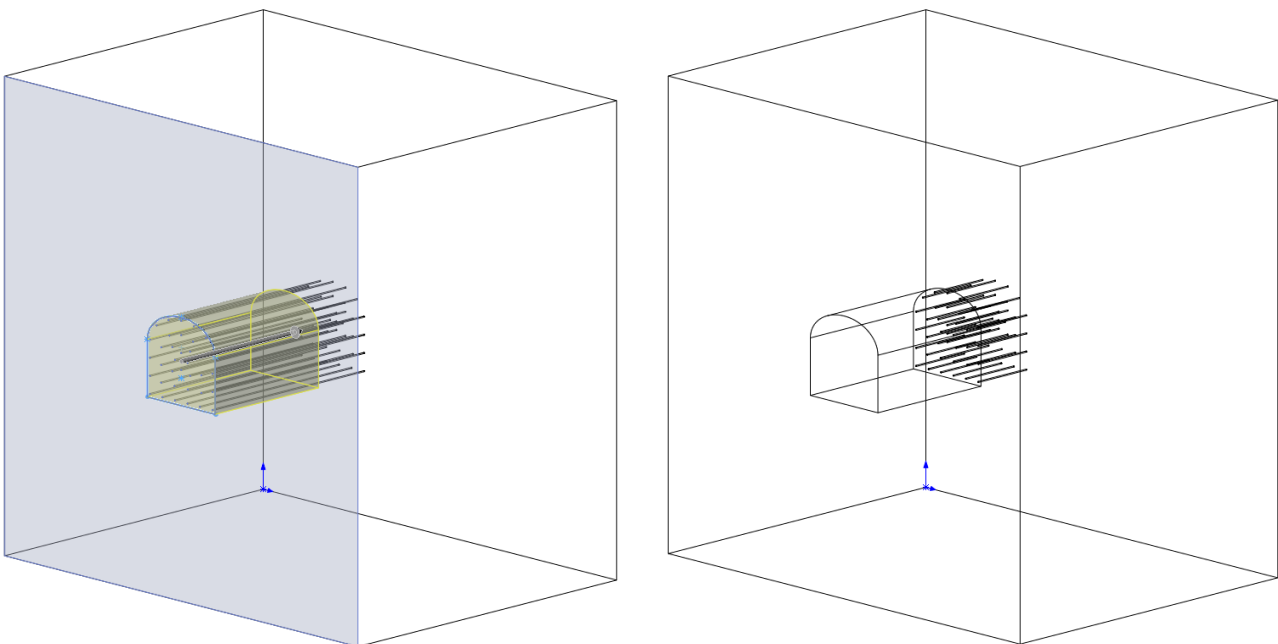


Рис. 5.12 – Викреслені виробка та шпури у масиві моделі

13. Далі натискають на вкладку **Simulation** і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**. Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на всі бокові грані моделі, окрім вибою виробки, та натискають на ліву клавішу миші. Потім натискають **ОК**. Для встановлення тиску продуктів вибуху у шпурах наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім у кожному шпурі окрім врубового холостого, натискають лівою клавішою миші на вибій та стінки шпуру. Далі натискають **ОК**. Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Після чого модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 5.13).

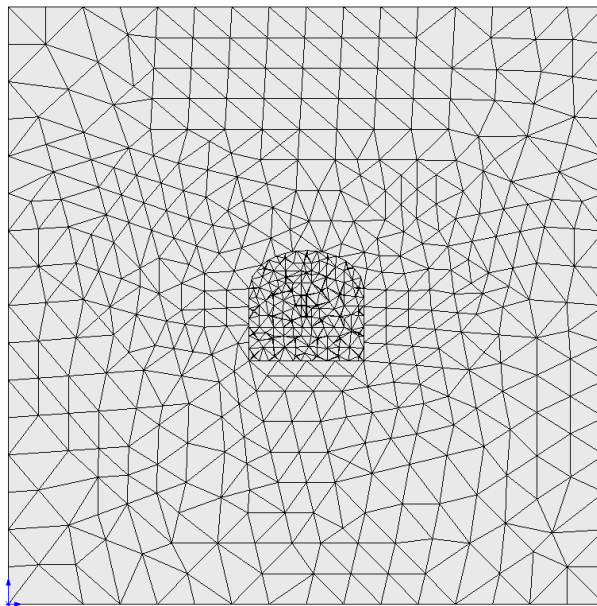


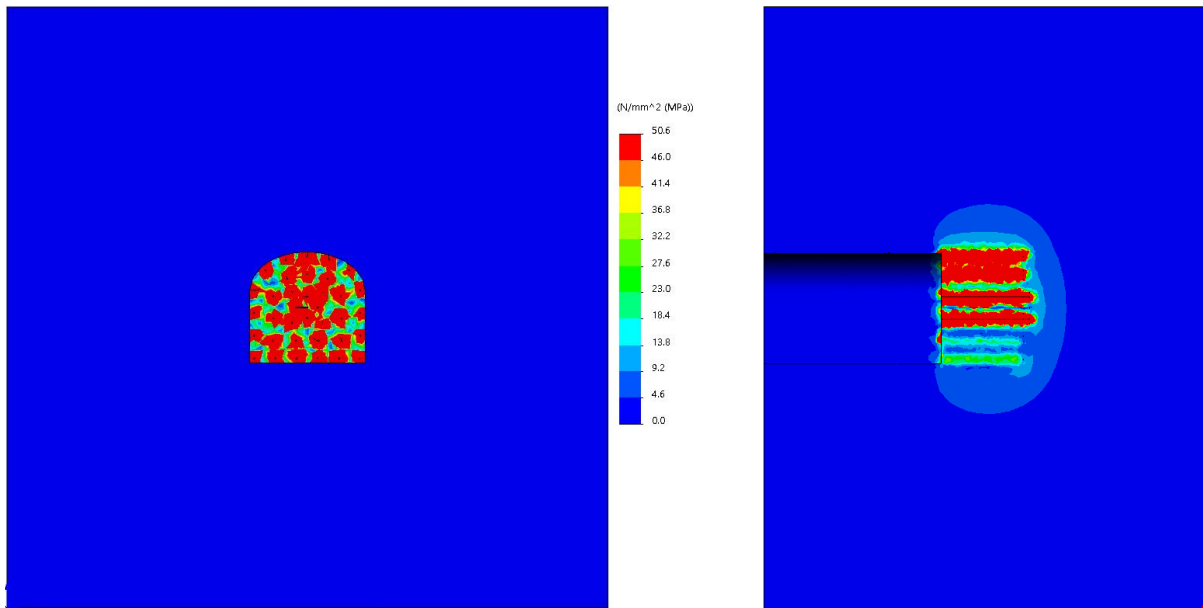
Рис. 5.13 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

14. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являться **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву гірських порід у вибої гірничої виробки необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На

Кроці 2 – встановлюють одиницю виміру МПа та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони непружних деформацій, що утворюються в масиві гірських порід під дією вибуху у вибої гірничої виробки подано на рис. 5.14.

а



б

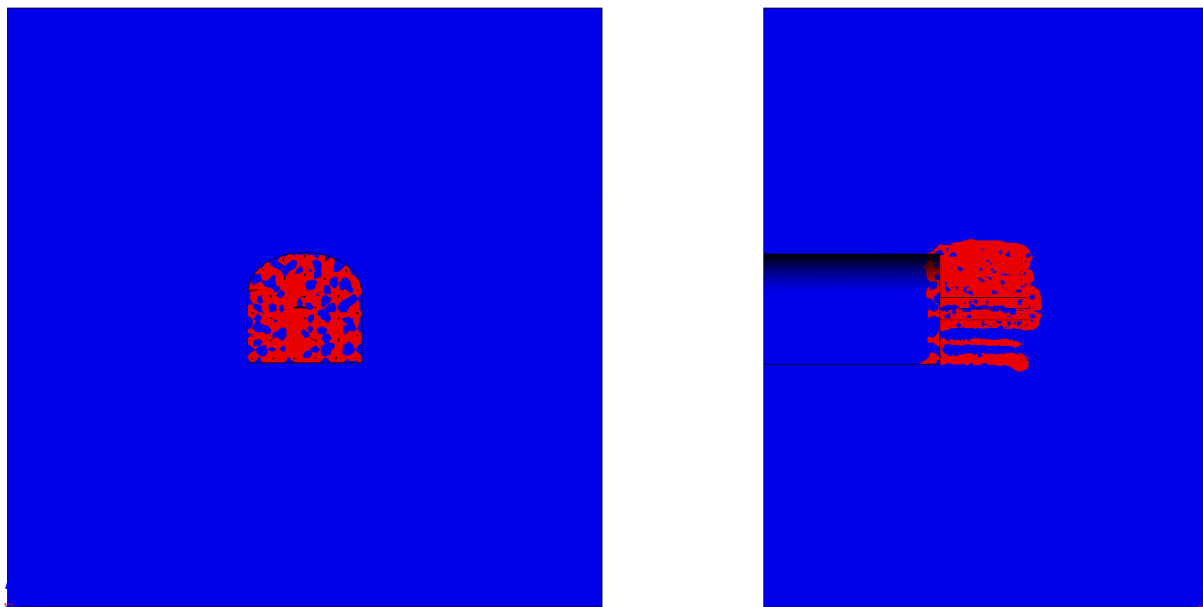


Рис. 5.14 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що утворюються в масиві гірських порід під дією вибуху у вибої гірничої виробки

5.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 5.2, побудувати розташування шпурів у вибої гірничої виробки, розрахувати параметри геометрії моделі, фізико-механічні властивостей матеріалу моделі та тиск продуктів вибуху.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для чисельного моделювання буропідричних робіт при проведенні горизонтальної виробки

Варіант №	Ширина виробки у проходці, B_{np} , м	Висота виробки у проходці, H_{np} , м	Межа міцності порід на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт структури породи, $K_{ст}$	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Щільність порід, γ , кг/м ³	Глибина гірничих робіт, H , м	ВР	Довжина врубових шпурів, $L_{вр}$, м	Відстань від контуру виробки до лінії контурних шпурів, L_0 , м	Відстань між рядами відбійних шпурів за шириною, $W_{с.фб}$, м	Відстань між рядами відбійних шпурів за висотою, $W_{в.фб}$, м	Відстань між відбійними шпурами у підлошви контуру, $a_{ф.п.с}$, м	Відстань між відбійними шпурами з боків і у покрівлі контуру, $a_{ф.бп.с}$, м	Відстань між контурними шпурами підлошви, $a_{ф.п.к}$, м	Відстань між контурними шпурами в боках і покрівлі, $a_{ф.бп.к}$, м
0	3,8	3,65	70	0,25	0,8	0,8	3950	1000	У	2,9	0,15	0,625	0,588	0,75	0,73	0,7	0,75
1	3,4	3,4	80	0,22	0,8	0,6	2600	600	А	2,5	0,2	0,5	0,5	0,67	0,66	0,6	0,57
2	3,5	3,5	100	0,24	1,0	0,8	2800	700	У	2,6	0,15	0,55	0,55	0,53	0,56	0,53	0,53
3	3,6	3,6	120	0,25	0,8	0,6	3000	800	А	2,7	0,2	0,55	0,55	0,53	0,56	0,46	0,47
4	3,7	3,7	140	0,27	1,0	0,8	3400	900	У	2,8	0,15	0,6	0,6	0,55	0,59	0,57	0,57
5	3,8	3,8	160	0,22	0,8	0,6	3600	1000	А	2,9	0,2	0,6	0,6	0,44	0,49	0,43	0,46
6	3,4	3,4	80	0,24	1,0	0,8	2600	600	У	2,5	0,15	0,525	0,525	0,68	0,69	0,62	0,69
7	3,5	3,5	100	0,25	0,8	0,6	2800	700	А	2,6	0,2	0,525	0,525	0,51	0,55	0,52	0,52
8	3,6	3,6	120	0,27	1,0	0,8	3000	800	У	2,7	0,15	0,575	0,575	0,72	0,71	0,66	0,63
9	3,7	3,7	140	0,22	0,8	0,6	3400	900	А	2,8	0,2	0,575	0,575	0,54	0,48	0,47	0,49
10	3,8	3,8	160	0,24	1,0	0,8	3600	1000	У	2,9	0,15	0,625	0,625	0,56	0,6	0,58	0,58
11	3,4	3,4	80	0,25	0,8	0,6	2600	600	А	2,5	0,2	0,5	0,5	0,67	0,66	0,6	0,67
12	3,5	3,5	100	0,27	1,0	0,8	2800	700	У	2,6	0,15	0,55	0,55	0,7	0,7	0,64	0,71
13	3,6	3,6	120	0,22	0,8	0,6	3000	800	А	2,7	0,2	0,55	0,55	0,53	0,56	0,53	0,53
14	3,7	3,7	140	0,24	1,0	0,8	3400	900	У	2,8	0,15	0,6	0,6	0,55	0,59	0,57	0,57
15	3,8	3,8	160	0,25	0,8	0,6	3600	1000	А	2,9	0,2	0,6	0,6	0,55	0,49	0,43	0,46
16	3,4	3,4	80	0,27	1,0	0,8	2600	600	У	2,5	0,15	0,525	0,525	0,68	0,69	0,62	0,69
17	3,5	3,5	100	0,22	0,8	0,6	2800	700	А	2,6	0,2	0,525	0,525	0,51	0,55	0,52	0,52
18	3,6	3,6	120	0,24	1,0	0,8	3000	800	У	2,7	0,15	0,575	0,575	0,72	0,71	0,66	0,63
19	3,7	3,7	140	0,25	0,8	0,6	3400	900	А	2,8	0,2	0,575	0,575	0,54	0,48	0,47	0,49
20	3,8	3,8	160	0,27	1,0	0,8	3600	1000	У	2,9	0,15	0,625	0,625	0,56	0,6	0,58	0,58

Примітка: А – патронована ВР Амоніт №6 ЖВ; У – патронована емульсійна ВР Україніт-П-СА.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

5.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудуємо модель масиву з шпурами, що пробурені у вибої гірничої виробки за варіантом №0.

Визначимо радіуси осьової та бокових дуг для виробок прямокутно-склепінчастої форми за формулами (1.1) і (1.2)

$$R = 0,692 \cdot B_{np} = 0,692 \cdot 3,8 = 2,6296 \text{ м};$$

$$r = 0,262 \cdot B_{np} = 0,262 \cdot 3,8 = 0,9956 \text{ м}.$$

За вихідними даними, що надано у табл. 5.1 та згідно розрахункової схеми (рис. 5.1) побудуємо розташування шпурів у вибої гірничої виробки у масштабі 1:50, що подано на рис. 5.15.

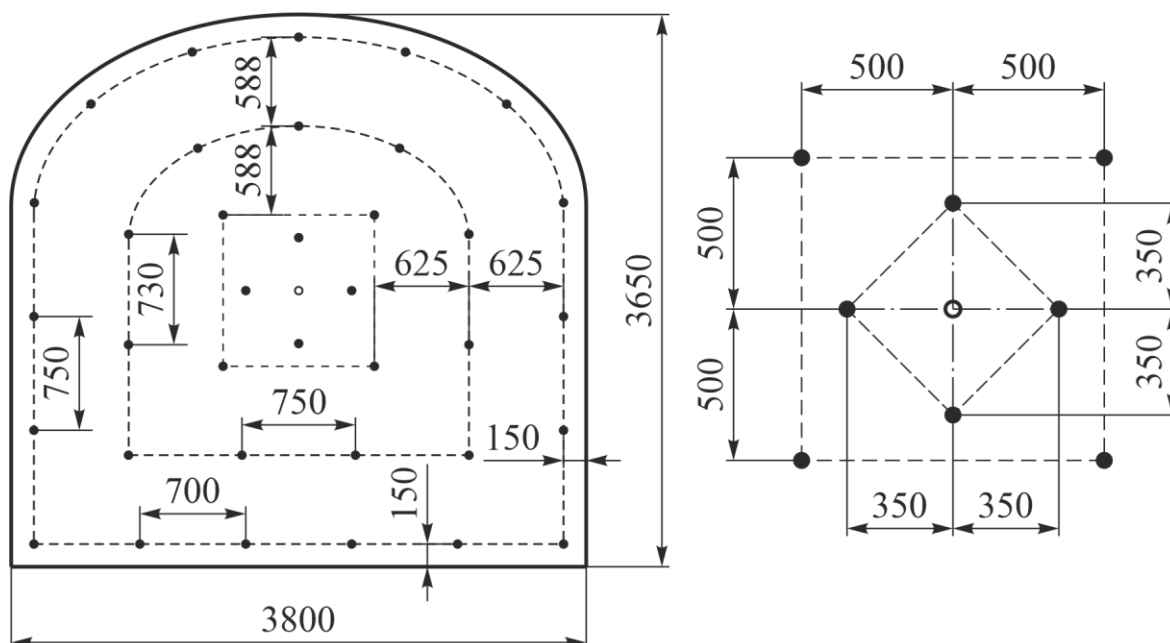


Рис. 5.15 – Розташування шпурів у вибої гірничої виробки

Визначимо площу поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої форми у проходці за формулою (1.3)

$$S_{np} = B_{np} \cdot \left(H_{np} - \frac{B_{np}}{3} + 0,26 \cdot B_{np} \right) = 3,8 \cdot \left(3,65 - \frac{3,8}{3} + 0,26 \cdot 3,8 \right) = 12,8 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр виробки визначається за формулою (1.5)

$$D_e = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 12,8 / 3,14} = 4 \text{ м}.$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (1.6)

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_e = 3,8 + 4 \cdot 4 = 19,8 \text{ м}.$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (1.7)

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_g = 3,65 + 4 \cdot 4 = 19,65 \text{ м.}$$

Визначимо довжину моделі масиву за формулою (5.1)

$$L_m = 5 \cdot l_{gp} = 3 \cdot 2,9 = 14,5 \text{ м.}$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 19,8 \text{ м}$; $H_m = 19,8 \text{ м}$; $L_m = 14,5 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:200 будуємо геометрію моделі масиву з шпурами, що пробурені у вибої гірничої виробки згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 5.2. Побудована геометрія моделі масиву за прийнятими параметрами подана на рис. 5.16.

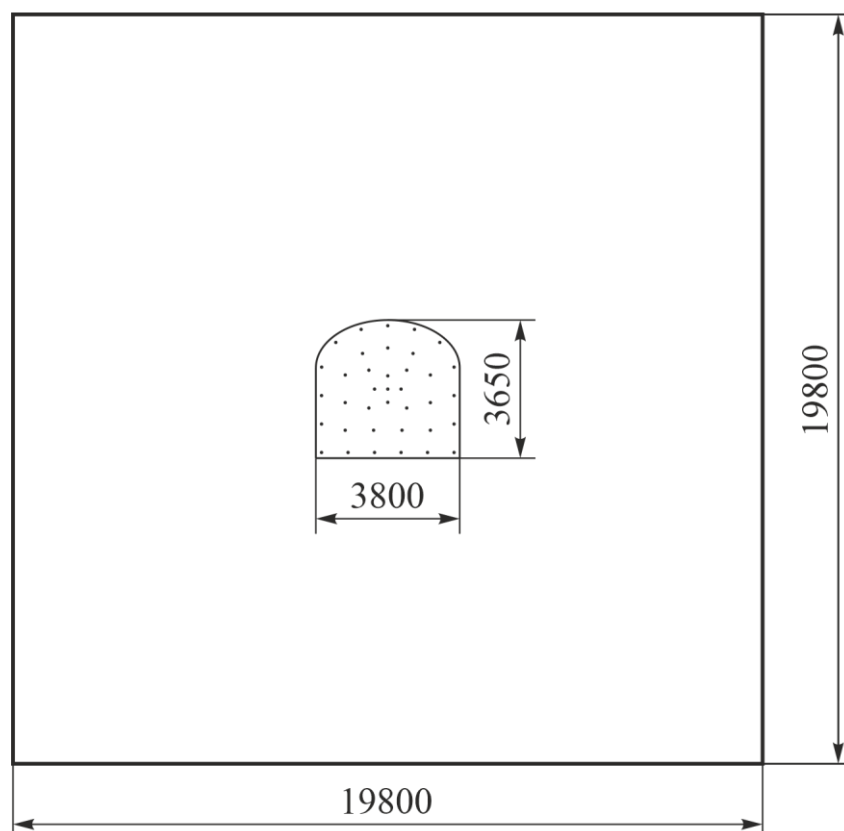


Рис. 5.16 – Геометрія моделі масиву за прийнятими параметрами у масштабі 1:200

Визначимо коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску за формулою (5.3)

$$K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H) / \gamma = (3950 + 0,1 \cdot 1000) / 3950 = 1,025.$$

Визначимо межу міцності масиву гірських порід за формулою (5.2)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y = 70 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,025 = 46 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву гірських порід на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 60 = 4,6 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{4,6}{0,0001} = 46000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{46000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 18400 \text{ МПа.}$$

Визначимо коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини залежно від діаметру заряду ВР за формулою (5.5)

$$K_{03} = (d_3 / d)^3 = (0,032 / 0,043)^3 = 0,41.$$

Визначимо величину тиску у шпурах за формулою (5.4)

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{03} \cdot K_d}{8} = \frac{1150 \cdot 5100^2 \cdot 0,41 \cdot 2}{8} = 3066000000 \text{ Па.}$$

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання буропідливних робіт при проведенні горизонтальної виробки прямокутно-склепінчастої форми поперечного перерізу, що має розміри у проходці 3,8 м × 3,65 м, параметри (ширина × висота) моделі повинні бути не менше 19,8 м × 19,8 м, а довжина – 14,5 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву гірських порід на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 46$ МПа, на розтягання – $\sigma_p = 4,6$ МПа, модуль пружності $E = 46000$ МПа, модуль зсуву $G = 18400$ МПа, величина тиску продуктів вибуху $P_m = 3066$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Вкажіть, що розраховує лінійний статичний аналіз у модулі SolidWorks Simulation?
2. Наведіть послідовність виконання статичного аналізу.
3. Що називають паспортом БПР?
4. Що впливає на величину тиску продуктів вибуху у шпурах при чисельному моделюванні підривання вибою гірничої виробки?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ВИРОБКИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання буропідливних робіт для проведення підняттяєвого у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

6.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Підняттява гірничя виробка (підняттявий) – це вертикальна або крутопохила виробка, яка не має безпосереднього виходу на земну поверхню та слугує для перепуску корисних копалин або породи, доставки закладних і інших матеріалів з одного горизонту на інший, пересування людей, вентиляції, прокладки трубопроводів та електричних кабелів, а також для розвідувальних цілей. Залежно від призначення, підняттявий проводять по корисній копалині або пустим породам, обладнують одним, двома або трьома відділеннями (для корисної копалини, породи, сходових ходів тощо). Підняттяві поділяються на вентиляційні, ходові, закладні, перепускні, матеріально-господарські, бурові та відрізні.

Сьогодні існують два способи проведення підняттявих – буропідливний і машинний (комбайновий). До буропідливного способу проведення підняттявих відносяться: шпуровий з обладнанням тимчасових полків і сходів та за допомогою прохідницьких комплексів типу КПВ або КПН, і секційний з підриванням глибоких свердловинних зарядів.

Для виконання чисельного моделювання руйнування масиву порід вибухом при проведенні вертикальної виробки буропідливним способом необхідно провести розрахунки параметрів геометрії моделі, розташування шпурів у вибої виробки, фізико-механічних властивостей порід та навантаження.

Розрахунок параметрів БПР, для проведення вертикальних гірничих виробок виконується у такій само послідовності як і при проведенні горизонтальних гірничих виробок, але відрізняється тим, що при проведенні підняттявих відсутня група відбійних шпурів. Це пов'язано з тим, що площа підняттявих не має суттєвого значення. Розташування шпурів у вибої підняттявого прямокутної та квадратної форми виконується згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 6.1.

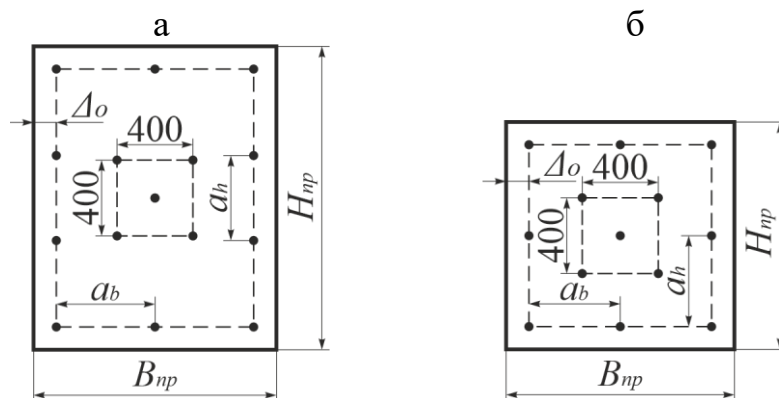


Рис. 6.1 – Розрахункова схема розташування шпурів у вибою підняттявої виробки прямокутної (а) або квадратної (б) форми: B_{np} і H_{np} – відповідно ширина і довжина виробки у проходці, м; a_b і a_h – відповідно фактична відстань між контурними шпурами за шириною і довжиною підняттявого; Δ_o – відстань від контуру виробки до лінії контурних шпурів, що дорівнює 0,15–0,25 м

Перед створенням деталі у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі масиву навколо вибою підняттявого. Параметри геометрії моделі масиву розраховуються у такій самій послідовності як подано у практичній роботі №1 за формулами (1.5)–(1.7).

Площа поперечного перерізу підняттявого прямокутної або квадратної форми

$$S_{np} = B_{np} \cdot H_{np}, \text{ м}^2. \quad (6.1)$$

Довжина моделі масиву визначається за формулою (5.1).

Після розрахунку параметрів будуємо геометрію моделі масиву з шпурами, що пробурені у вибої підняттявого згідно розрахункової схеми, що наведена на рис. 6.2.

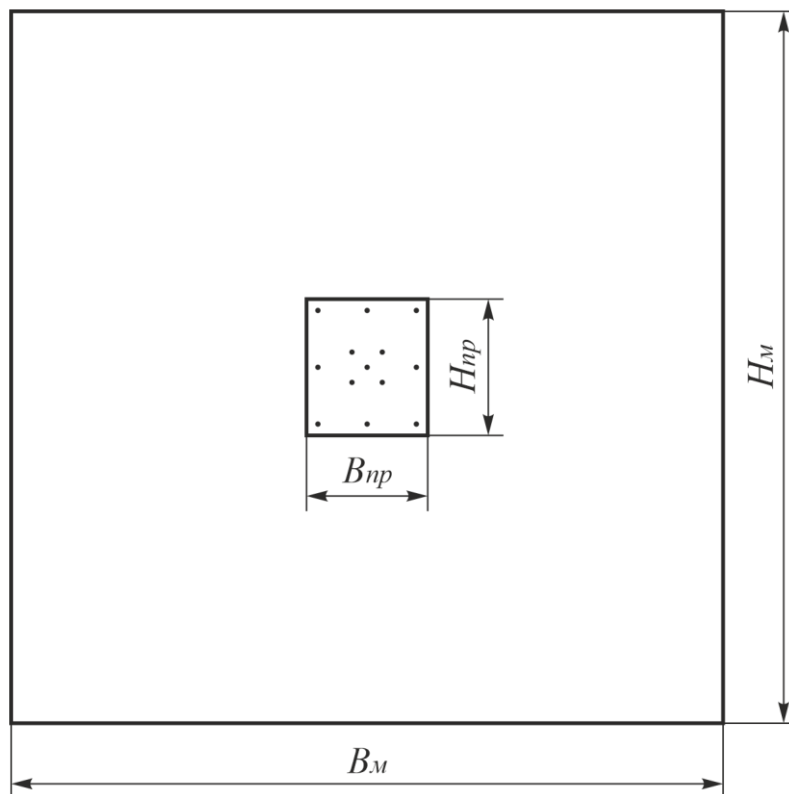


Рис. 6.2 – Розрахункова схема геометрії моделі масиву з шпурами, що пробурені у вибої підняттявого

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії вибуху на масив гірських порід, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою (5.2).

Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених

фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву гірських порід.

Так, як вибух уявляє собою удар, а потім дію тиску продуктів вибуху, то для імітації цього процесу потрібно задати тиск, який направлений перпендикулярно граням та вибою у всіх шпурах з урахуванням динамічного коефіцієнту. Величина тиску продуктів вибуху у шпурах для чисельного моделювання підривання вибою гірничої виробки з урахування діаметру заряду визначається за формулою (5.4).

Характеристика ВР подано у табл. 5.1.

Процес проведення статичного аналізу у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. Далі за допомогою інструмента **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо квадрат. Потім у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту геометрії моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді квадрату (рис. 6.3).

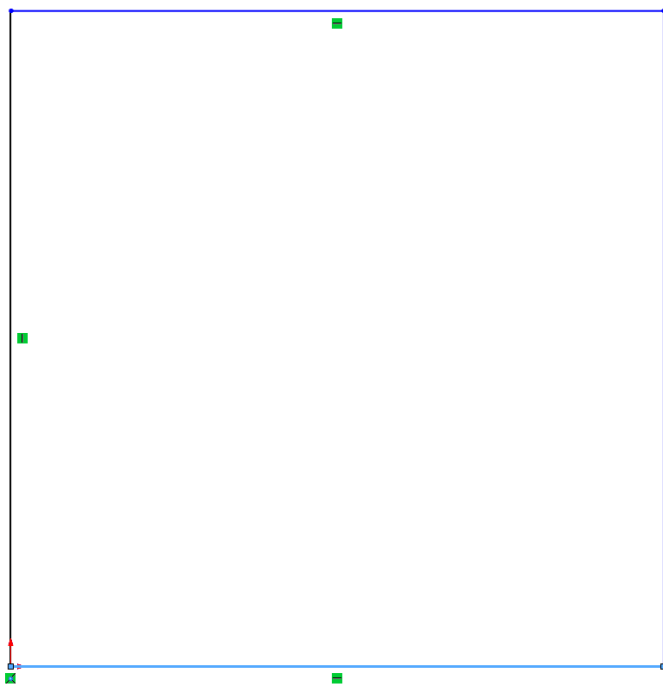


Рис. 6.3 – Ескіз геометрії моделі масиву

4. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на розраховану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 6.4).

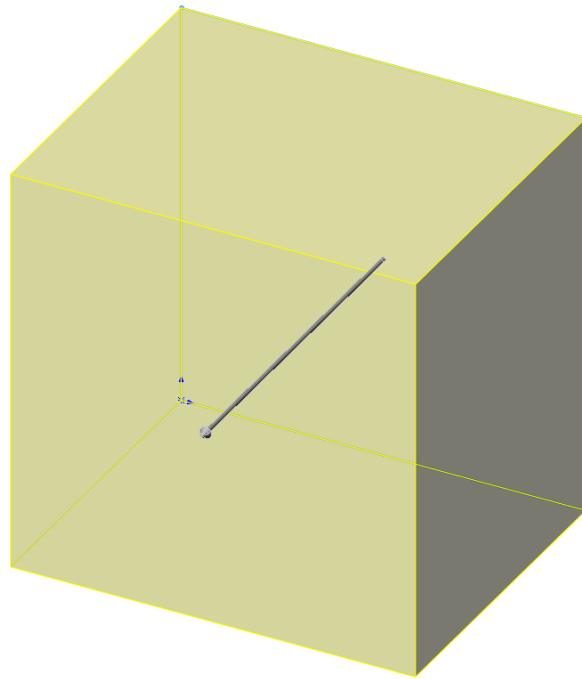


Рис. 6.4 – Витягнення профілю моделі масиву гірських порід

5. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив гірських порід за розрахованими параметрами (рис. 6.5).

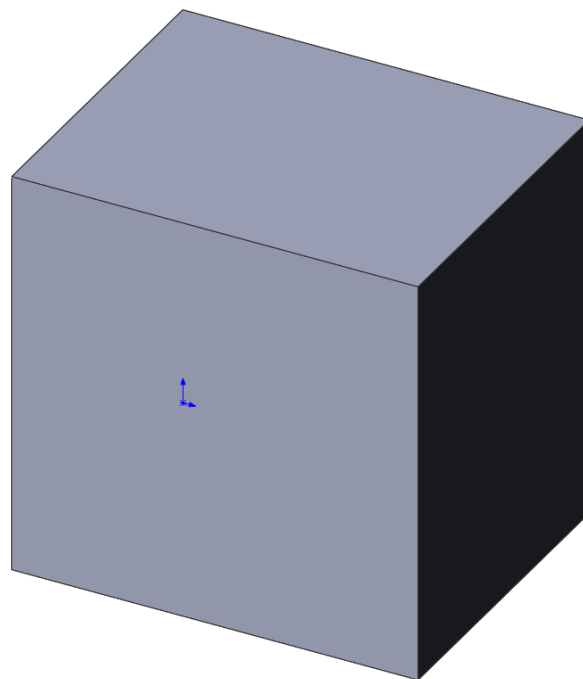


Рис. 6.5 – Модель однорідного масиву гірських порід

6. Натиснувши лівою клавішою миші обраємо необхідну грань деталі де будуть розташовані шпури у вибої піднягтевого (рис. 6.6). Потім обираємо вкладку **Ескіз**.

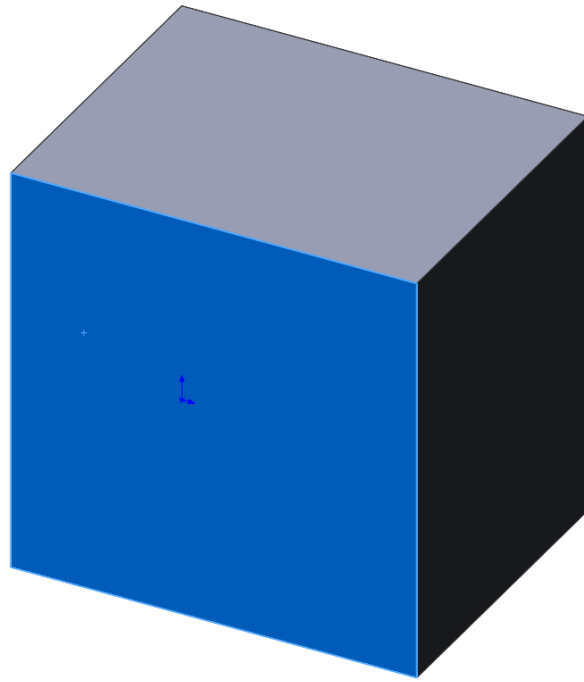


Рис. 6.6 – Виділена грань деталі де будуть розташовані шпури у вибої піднягтєвої виробки

7. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами розташовують врубіві шпури (рис. 6.7).

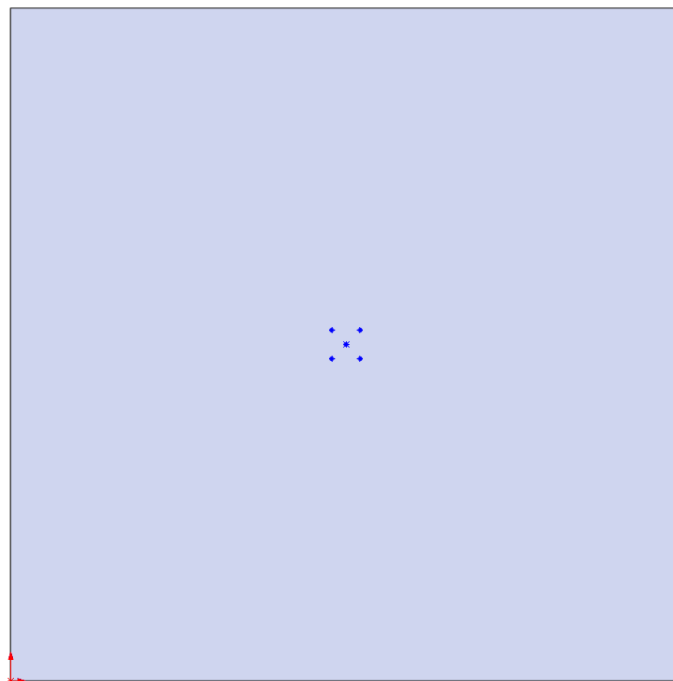


Рис. 6.7 – Розташування врубівіх шпури у масиві моделі

8. Після побудови врубівіх шпурів, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за

допомогою якого на глибину, що дорівнює $3l_{вр}$, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 6.8).

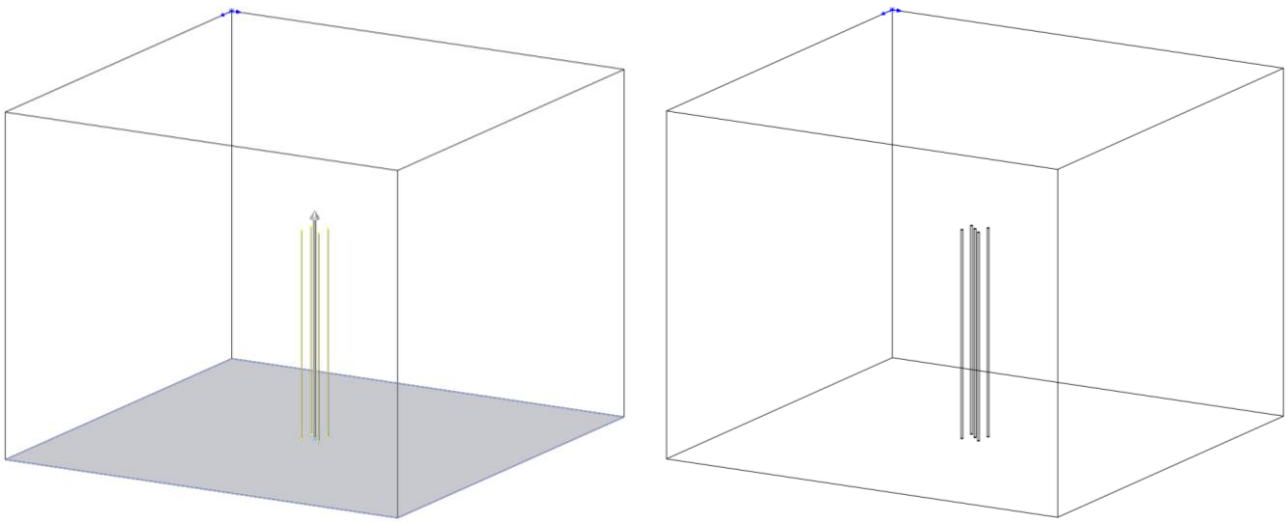


Рис. 6.8 – Викреслені врубові шпури у масиві моделі

9. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами розташовують контурні шпури (рис. 6.9).

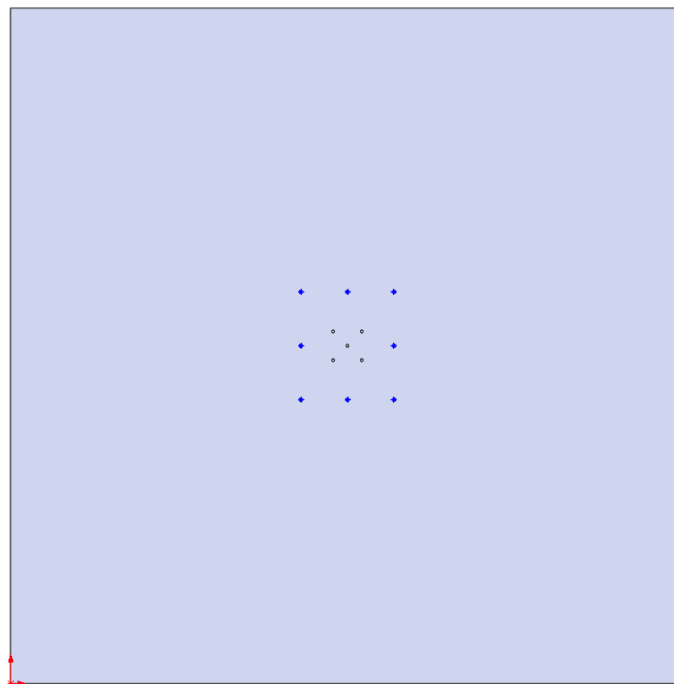


Рис. 6.9 – Розташування шпурів у масиві моделі

10. Після побудови контурних шпурів, виходять з режиму **Ескіз**. Далі натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину $3 \cdot l_{вр} - (l_{вр} - l_{ш})$, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 6.10).

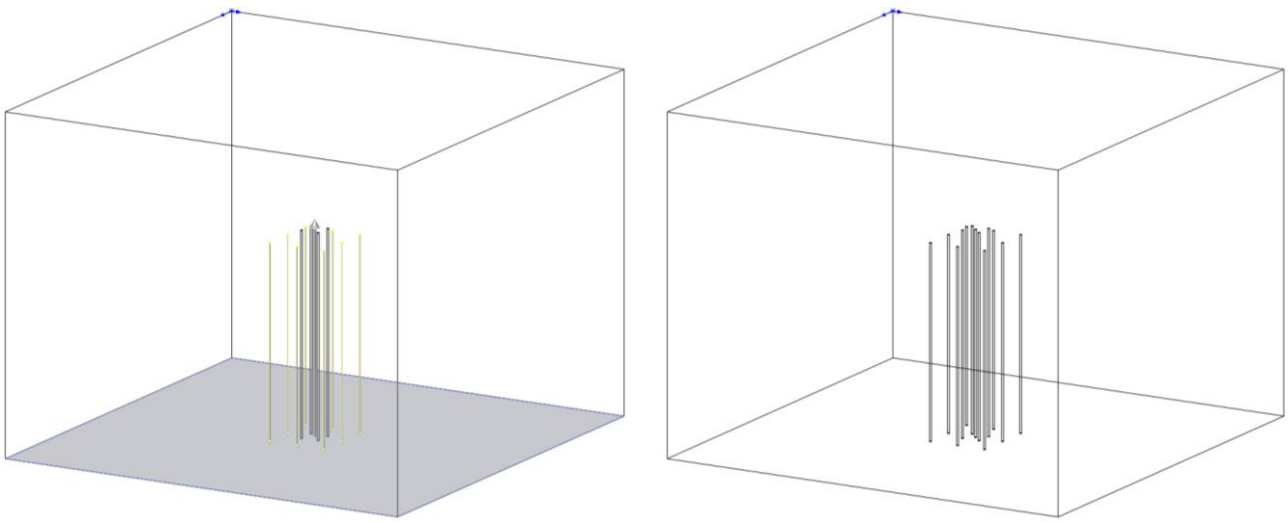


Рис. 6.10 – Викреслені шпури у масиві моделі

11. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструмента **Прямокутник** за заданими параметрами викреслюють контур піднятцевого у проходці (рис. 6.11).

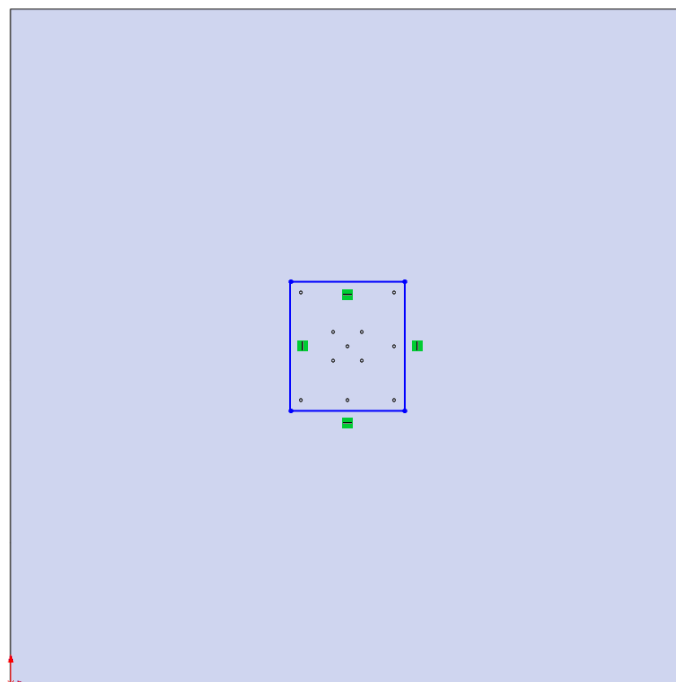


Рис. 6.11 – Викреслений контур піднятцевого

12. Після побудови контуру піднятцевого, виходять з режиму **Ескіз**. Далі натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину $2l_{вр}$, роблять виріз контуру піднятцевого і натискають **ОК** (рис. 6.12).

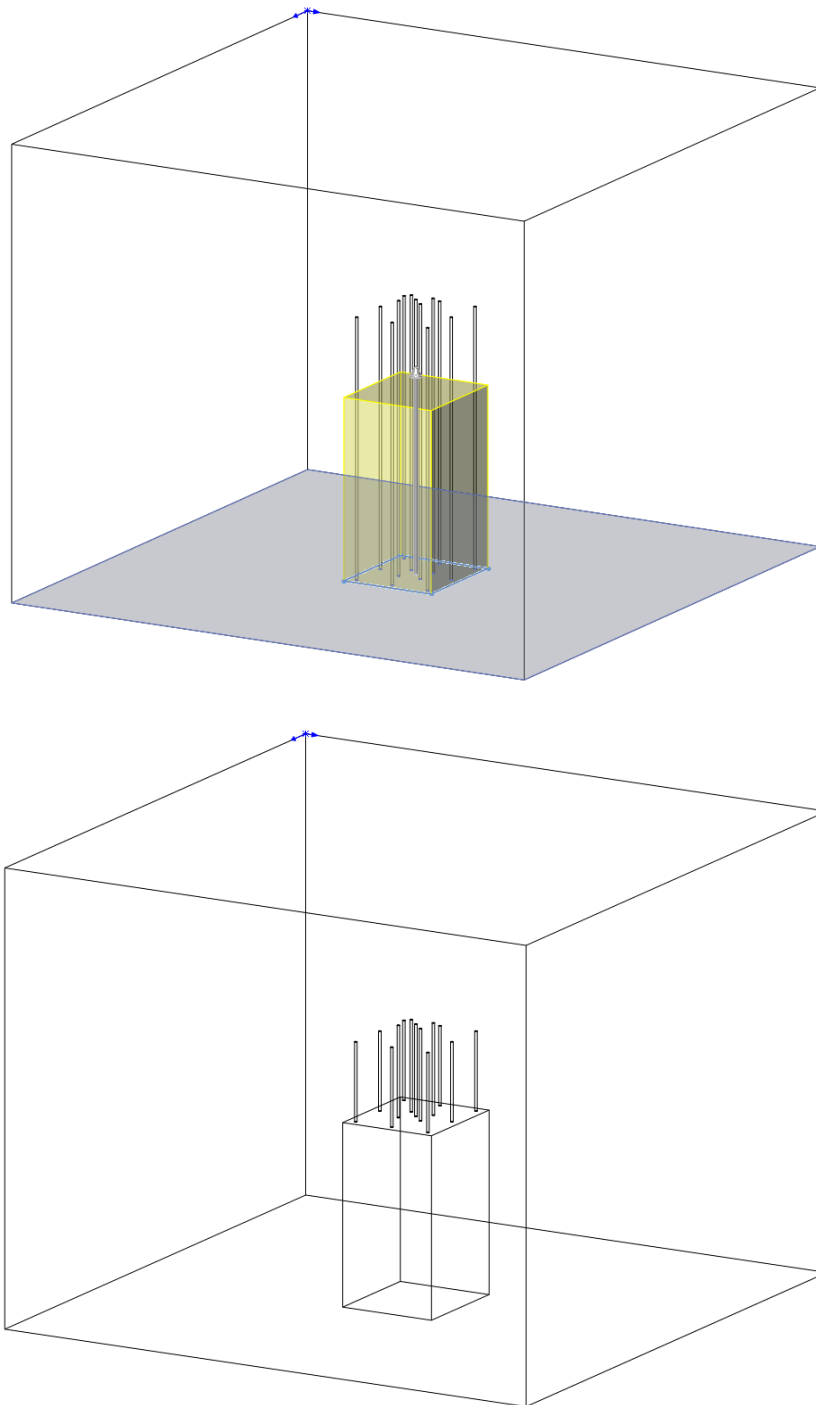


Рис. 6.12 – Викреслені підняттявий та шпури у масиві моделі

13. Далі натискають на вкладку Simulation і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**.

Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на всі бокові грані моделі, окрім вибою підняттявого, та натискають

ОК. Для встановлення тиску продуктів вибуху у шпурах наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім у кожному шпурі натискають лівою клавішою миші на вибій та стінки шпуру. Далі натискають **ОК**.

Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Після чого модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 6.13).

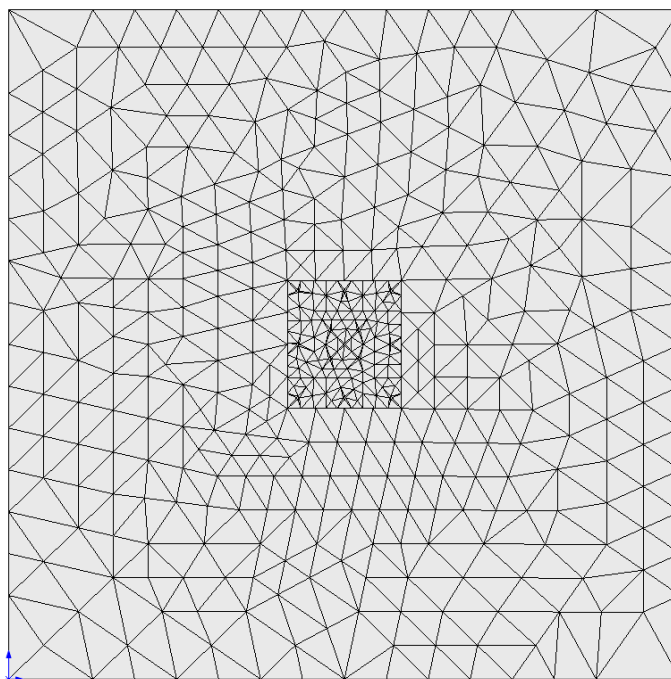


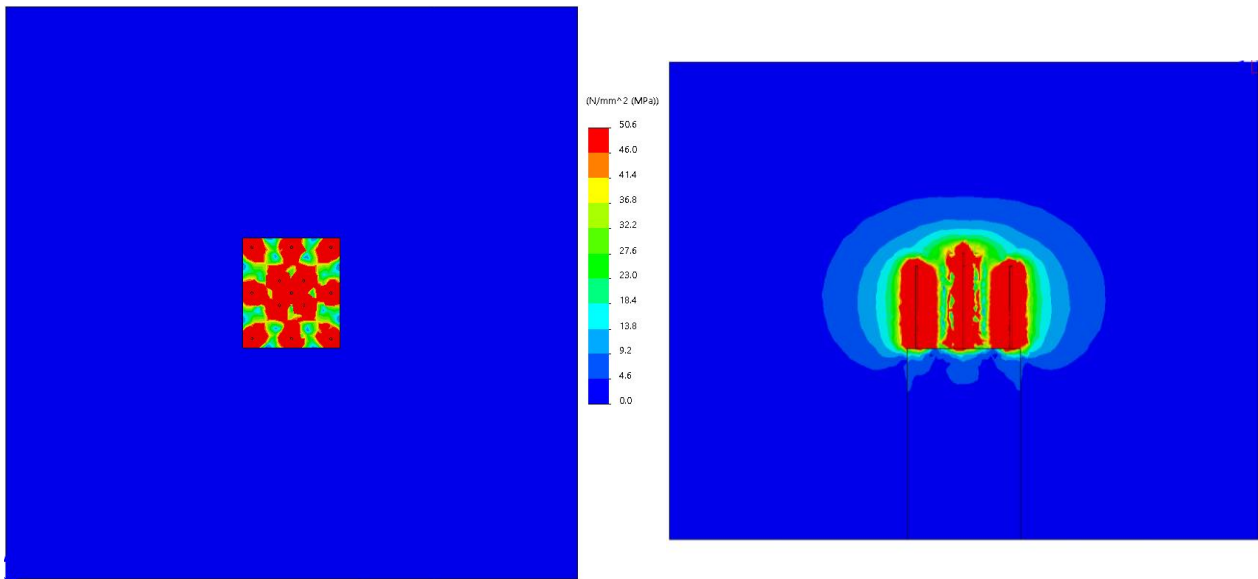
Рис. 6.13 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

14. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являться **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву гірських порід у вибої гірничої виробки необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На **Кроці 2** – встановлюють одиницю виміру МПа та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони

непружних деформацій, що утворюються в масиві гірських порід під дією вибуху у вибої піднягтєвого подано на рис. 6.14.

а



б

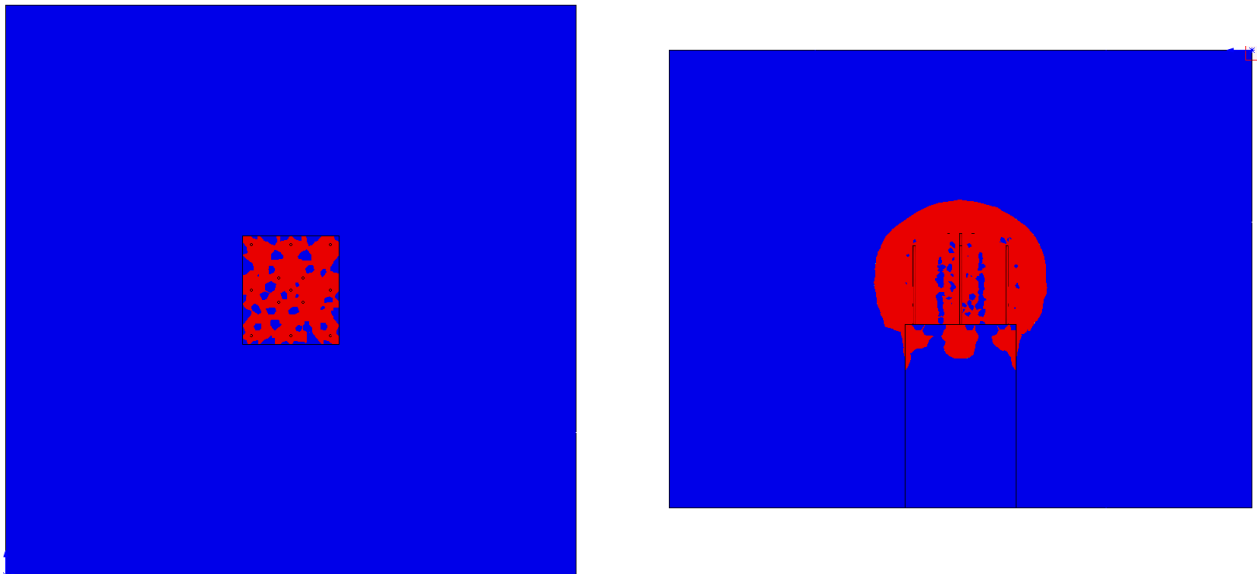


Рис. 6.14 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що утворюються в масиві гірських порід під дією вибуху у вибої піднягтєвого

6.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 6.2, побудувати розташування шпурів у вибої піднягтєвого, розрахувати параметри геометрії моделі, фізико-механічні властивостей матеріалу моделі та тиск продуктів вибуху.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані для чисельного моделювання буропідричних робіт при проведенні підняттяєвого

Варіант №	Ширина виробки у проходці, $V_{пр}$, м	Довжина виробки у проходці, $H_{пр}$, м	Межа міцності порід на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт структури породи, $K_{сп}$	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Щільність порід, γ , кг/м ³	Глибина гірничих робіт, H , м	ВР	Довжина врубів шпурів, $l_{ер}$, м	Відстань від контуру виробки до лінії контурних шпурів, A_o , м	Відстань між контурними шпурами за шириною підняттяєвого, a_b , м	Відстань між контурними шпурами за довжиною підняттяєвого, a_h , м
0	1,6	1,8	100	0,25	1,1	0,4	3600	1420	У	1,5	0,15	0,65	0,75
1	1,5	1,5	80	0,22	1,0	0,6	2600	600	А	1,5	0,15	0,4	0,4
2	1,6	1,6	100	0,24	1,0	0,8	2800	700	У	1,5	0,15	0,43	0,43
3	1,7	1,7	120	0,25	1,0	0,6	3000	800	А	1,5	0,15	0,35	0,35
4	1,5	1,5	140	0,27	1,0	0,8	3400	900	У	1,5	0,15	0,4	0,4
5	1,6	1,6	160	0,22	1,0	0,6	3600	1000	У	1,5	0,15	0,43	0,43
6	1,7	1,7	80	0,24	1,0	0,8	2600	600	У	1,5	0,15	0,47	0,47
7	1,5	1,5	100	0,25	1,0	0,6	2800	700	А	1,5	0,15	0,4	0,4
8	1,6	1,6	120	0,27	1,0	0,8	3000	800	У	1,5	0,15	0,43	0,43
9	1,7	1,7	140	0,22	1,0	0,6	3400	900	У	1,5	0,15	0,47	0,47
10	1,5	1,5	160	0,24	1,0	0,8	3600	1000	У	1,5	0,15	0,4	0,4
11	1,6	1,6	80	0,25	1,0	0,6	2600	600	А	1,5	0,15	0,43	0,43
12	1,7	1,7	100	0,27	1,0	0,8	2800	700	У	1,5	0,15	0,47	0,47
13	1,5	1,5	120	0,22	1,0	0,6	3000	800	А	1,5	0,15	0,4	0,4
14	1,6	1,6	140	0,24	1,0	0,8	3400	900	У	1,5	0,15	0,43	0,43
15	1,7	1,7	160	0,25	1,0	0,6	3600	1000	У	1,5	0,15	0,47	0,47
16	1,5	1,5	80	0,27	1,0	0,8	2600	600	У	1,5	0,15	0,6	0,6
17	1,6	1,6	100	0,22	1,0	0,6	2800	700	А	1,5	0,15	0,43	0,43
18	1,7	1,7	120	0,24	1,0	0,8	3000	800	У	1,5	0,15	0,47	0,47
19	1,5	1,5	140	0,25	1,0	0,6	3400	900	У	1,5	0,15	0,4	0,4
20	1,6	1,6	160	0,27	1,0	0,8	3600	1000	У	1,5	0,15	0,33	0,33

Примітка: А – патрована ВР Амоніт №6 ЖВ; У – патрована емульсійна ВР Україніт-П-СА.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

6.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудуємо модель масиву з шпурами, що пробурені у вибої підняттявого за варіантом №0.

За вихідними даними, що надано у табл. 6.1 та згідно розрахункової схеми (рис. 6.1) побудуємо розташування шпурів у вибої підняттявого у масштабі 1:50, що подано на рис. 6.15.

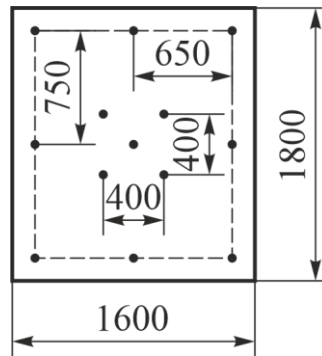


Рис. 6.15 – Розташування шпурів у вибої підняттявого

Визначимо площу поперечного перерізу підняттявого прямокутної форми за формулою (6.1)

$$S_{np} = B_{np} \cdot H_{np} = 1,6 \cdot 1,8 = 2,88 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр виробки визначається за формулою (1.5)

$$D_e = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 2,88 / 3,14} = 1,9 \text{ м}.$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (1.6)

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_e = 1,6 + 4 \cdot 1,9 = 9,2 \text{ м}.$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (1.7)

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_e = 1,8 + 4 \cdot 1,9 = 9,4 \text{ м}.$$

Визначимо довжину моделі масиву за формулою (5.1)

$$L_m = 5 \cdot l_{gp} = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ м}.$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 9,4 \text{ м}$; $H_m = 9,4 \text{ м}$; $L_m = 7,5 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:100 будуємо геометрію моделі масиву з шпурами, що пробурені у вибої підняттявого згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 6.2. Побудована геометрія моделі масиву за прийнятими параметрами подана на рис. 6.16.

Визначимо коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску за формулою (5.3)

$$K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H) / \gamma = (3600 + 0,1 \cdot 1420) / 3600 = 1,04.$$

Визначимо межу міцності масиву гірських порід за формулою (5.2)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y = 100 \cdot 1,1 \cdot 0,4 \cdot 1,04 = 46 \text{ МПа}.$$

Визначимо межу міцності масиву гірських порід на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 46 = 4,6 \text{ МПа}.$$

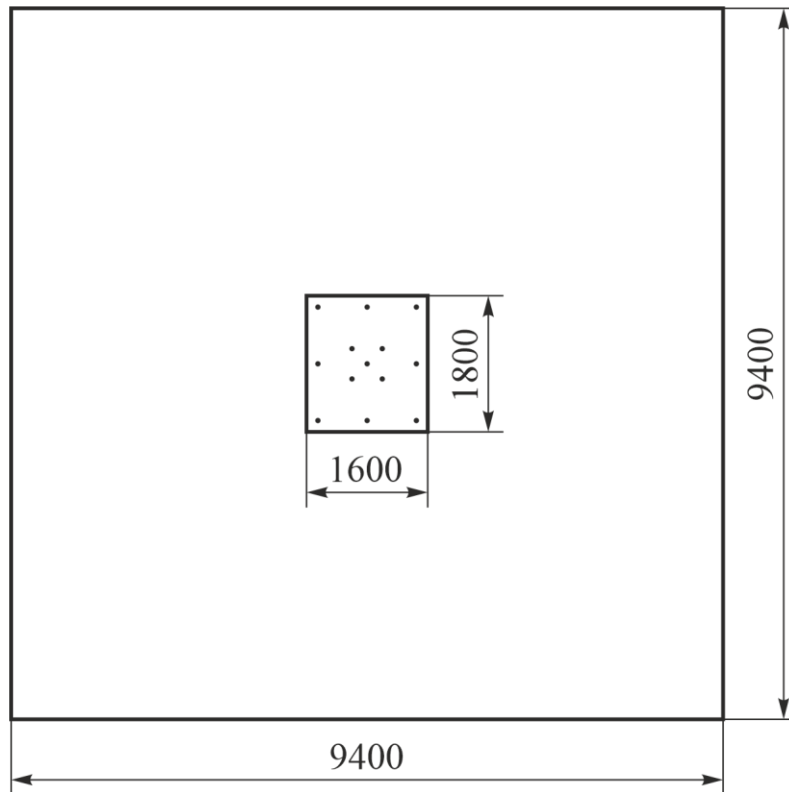


Рис. 6.16 – Геометрія моделі масиву за прийнятими параметрами у масштабі 1:100

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{4,6}{0,0001} = 46000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{46000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 18400 \text{ МПа.}$$

Визначимо коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки шпуру діаметром 0,04 м залежно від діаметру заряду ВР за формулою (5.5)

$$K_{\partial z} = (d_3 / d)^3 = (0,032 / 0,04)^3 = 0,51.$$

Визначимо величину тиску у шпурах за формулою (5.4)

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\partial z} \cdot K_{\partial}}{8} = \frac{1150 \cdot 5100^2 \cdot 0,51 \cdot 2}{8} = 3800000000 \text{ Па.}$$

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання буропідривних робіт при проведенні горизонтальної виробки прямокутної форми поперечного перерізу, що має розміри у проходці 1,6 м × 1,8 м, параметри (ширина × висота) моделі повинні бути не менше 9,4 м × 9,4 м, а довжина – 7,5 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву гірських порід на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 46$ МПа,

на розтягання – $\sigma_p = 4,6$ МПа, модуль пружності $E = 46000$ МПа, модуль зсуву $G = 18400$ МПа, величина тиску продуктів вибуху $P_m = 3800$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під терміном підняттява гірничавиробка?
2. Які існують способи проведення підняттявих?
3. Перелічите, які параметри необхідно розрахувати для проведення чисельного моделювання буропідричних робіт при проведенні підняттявого у модулі SolidWorks Simulation?
4. Який критерій руйнування встановлюють для матеріалу моделі масиву гірських порід?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ВІДРІЗНОЇ ЩІЛИНИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання буропідричних робіт для утворення відрізної щілини у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

7.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Під *відрізкою запасів руди* в блоці розуміють гірничі роботи як стадію очисних робіт, що призначені для утворення відрізної щілини. **Відрізна щілина** – це вертикальна площина відслонення (компенсаційний простір), що необхідна для подальшого відбивання руди вертикальними шарами в межах заданого контуру блоку. Відрізку застосовують при таких системах розробки: камерно-стовповій, поверхово-камерній, підповерхово-камерній, підповерхового та поверхового обвалення тощо. Залежно від обраного способу відбивання руди, відрізні щілини утворюють шпурами, штанговими шпурами та глибокими свердловинами. Для утворення відрізної щілини необхідно проведення нарізних виробок, до яких належать відрізні штреки та орти, підняттяві.

Відрізна щілина утворюється послідовним висадженням на відрізний підняттявий паралельних штангових шпурів або свердловин, які пробурені з відрізних штреків або ортів. Також можуть використовувати пучки паралельних свердловин у кількості 2–4 шт. у пучку. Для розширення відрізної щілини можуть висаджувати віяла штангових шпурів або свердловин, що пробурені з відрізних штреків або ортів, на вже утворену невелику відрізну щілину.

Для виконання чисельного моделювання руйнування масиву руди вибухом при утворенні відрізної щілини необхідно провести розрахунки параметрів геометрії моделі, розташування паралельних свердловин, фізико-механічних властивостей руди та навантаження.

Розрахунок параметрів геометрії моделі та розташування паралельних свердловин для утворення відрізної щілини виконується згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 7.1.

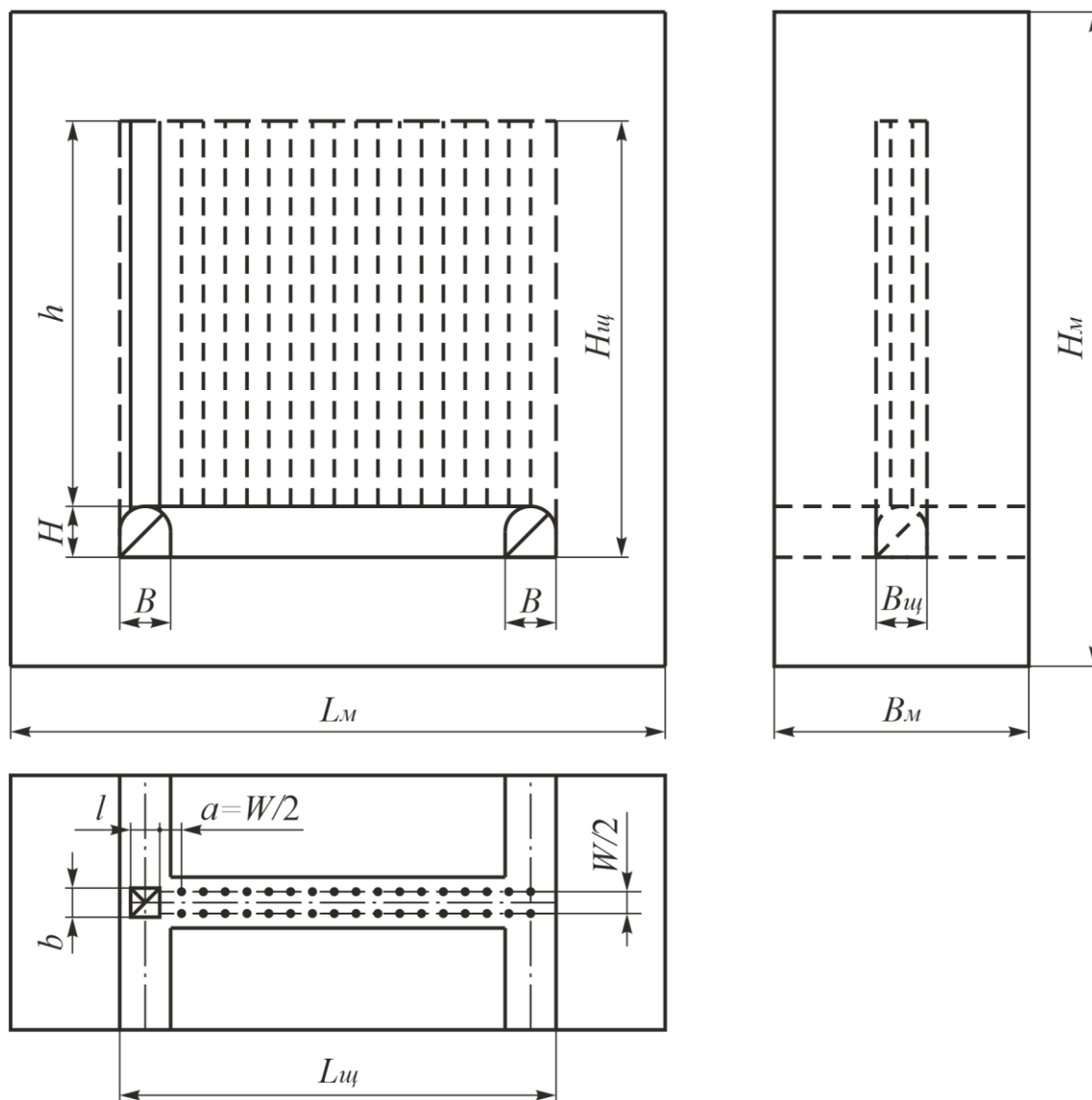


Рис. 7.1 – Розрахункова схема параметрів геометрії моделі та розташування паралельних свердловин для утворення відрізної щілини:

- B і H – відповідно ширина і висота відрізного штреку або орту, м;**
- b , l і h – відповідно ширина, довжина і висота відрізного підняттевого, м;**
- $B_{щ}$, $L_{щ}$ і $H_{щ}$ – відповідно ширина, довжина і висота відрізної щілини, м;**
- B_m , H_m і L_m – відповідно ширина, висота і довжина моделі, м;**
- W – лінія найменшого опору (ЛНО), м;**
- a – відстань між вибоями свердловин, м**

Площа поперечного перерізу відрізної щілини вхрест простягання

$$S_{щ.вхр.} = B_{щ} \cdot H_{щ}, \text{ м}^2. \quad (7.1)$$

Площа поперечного перерізу відрізної щілини за простяганням

$$S_{щ.нр.} = L_{щ} \cdot H_{щ}, \text{ м}^2. \quad (7.2)$$

Приведений діаметр відрізної щілини вхрест простягання визначається за виразом

$$D_{щ.вхр.} = \sqrt{4 \cdot S_{щ.вхр.} / \pi}, \text{ м}. \quad (7.3)$$

Приведений діаметр відрізної щілини за простяганням визначається за формулою

$$D_{щ.нр.} = \sqrt{4 \cdot S_{щ.нр.} / \pi}, \text{ м}. \quad (7.4)$$

Ширина моделі масиву руди визначається за формулою

$$B_m = B + 4 \cdot D_{щ.вхр.}, \text{ м}. \quad (7.5)$$

Висота моделі масиву руди визначається за формулою

$$H_m = H_{щ} + 4 \cdot D_{щ.нр.}, \text{ м}. \quad (7.6)$$

Довжина моделі масиву руди визначається за формулою

$$L_m = L_{щ} + 4 \cdot D_{щ.нр.}, \text{ м}. \quad (7.7)$$

Кількість рядів свердловин

$$N = \frac{L_{щ} - (B + 0,5 \cdot l)}{0,5 \cdot W}, \text{ шт.} \quad (7.8)$$

Після розрахунку параметрів будується геометрія моделі та розташування паралельних свердловин для утворення відрізної щілини.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії вибуху на масив гірських порід, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою (5.2). Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву гірських порід. Так, як вибух уявляє собою удар, а потім дію тиску продуктів вибуху, то для імітації цього процесу потрібно задати тиск, який направлений перпендикулярно граням та вибою у всіх свердловинах з урахуванням динамічного коефіцієнту. Величина тиску продуктів вибуху для чисельного моделювання підривання свердловин при утворенні відрізної щілини визначається за формулою (5.4). Характеристика ВР подано у табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Характеристика ВР

ВР	Щільність ВР, кг/м ³	Швидкість детонації, м/с
Грамоніт 79/21	1000	3600
Україніт-ПП-2	1000	4900

Процес проведення статичного аналізу у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. За допомогою інструмента **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо прямокутник. Потім у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту геометрії моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді прямокутника (рис. 7.2).

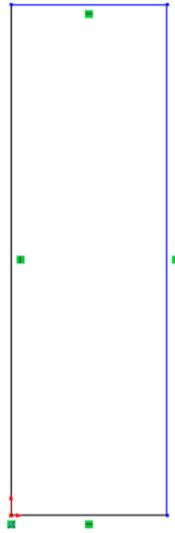


Рис. 7.2 – Ескіз геометрії моделі масиву

4. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на розраховану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 7.3).

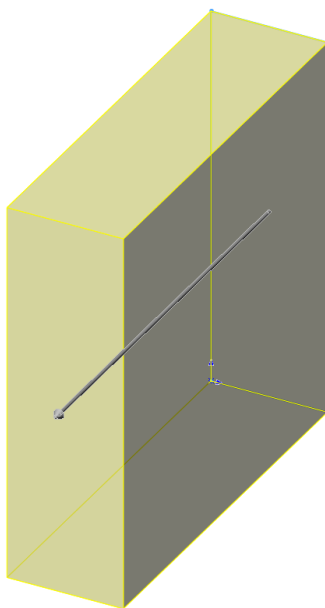


Рис. 7.3 – Витягнення профілю моделі масиву руди

5. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив руди за розрахованими параметрами (рис. 7.4).

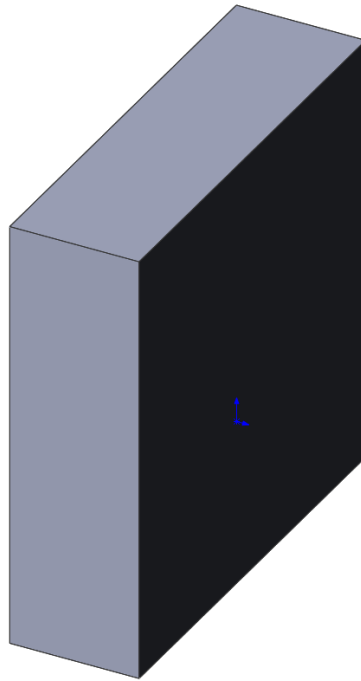


Рис. 7.4 – Модель однорідного масиву руди

6. Натиснувши лівою клавiшею миші обраємо необхідну грань деталі де будуть розташовані два бурових орта (рис. 7.5). Потім обираємо вкладку **Ескіз**.

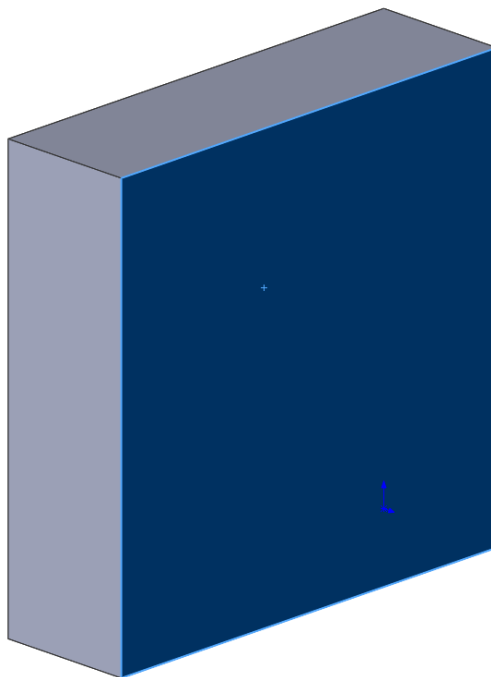


Рис. 7.5 – Виділена грань деталі де будуть розташовані два бурових орта

7. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами викреслюють контури двох бурових ортів (рис. 7.6).

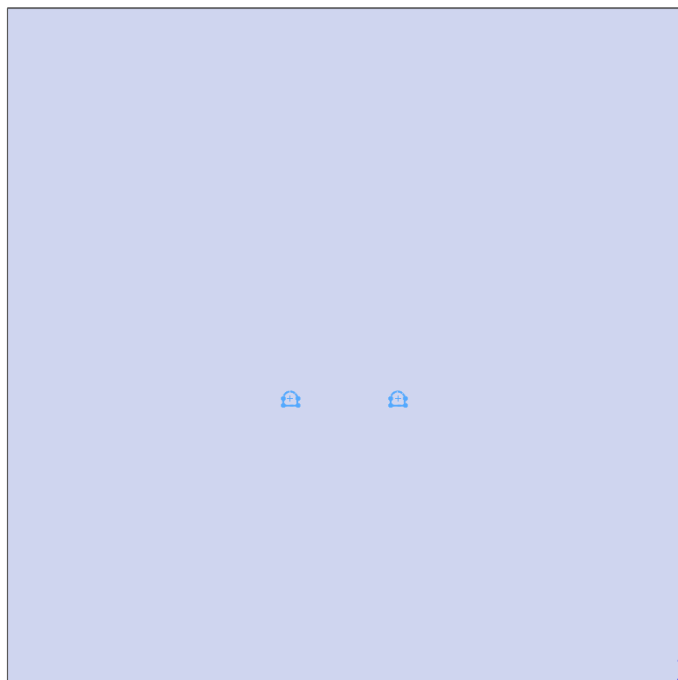


Рис. 7.6 – Розташування контурів бурових ортів у масиві моделі

8. Після побудови двох бурових ортів, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює V_m , роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 7.7).

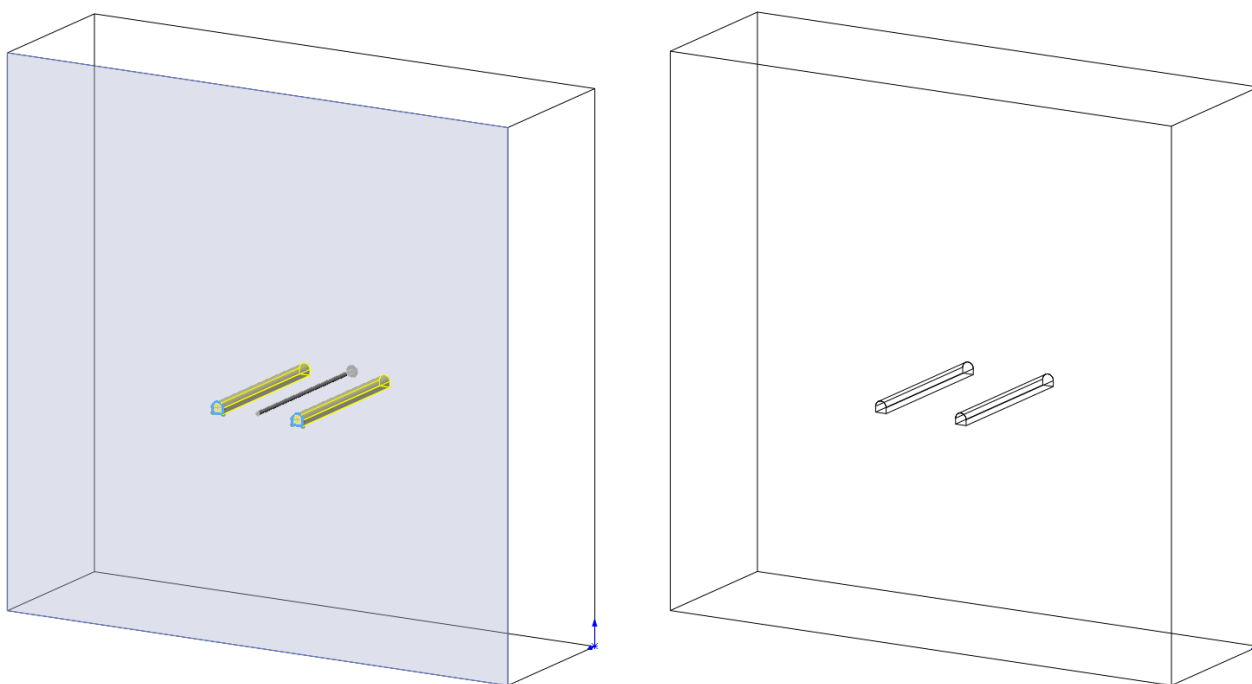


Рис. 7.7 – Викреслені бурові орти у масиві моделі

9. Для того щоб викреслити відрізний штрек, що розташований між двома буровими ортами необхідно створити додаткову вертикальну площину послідовно натиснувши **Вставка, Довідкова геометрія, Площина**. Потім задати місце її розташування в геометрії моделі (рис. 7.8) і натискаємо **ОК**.

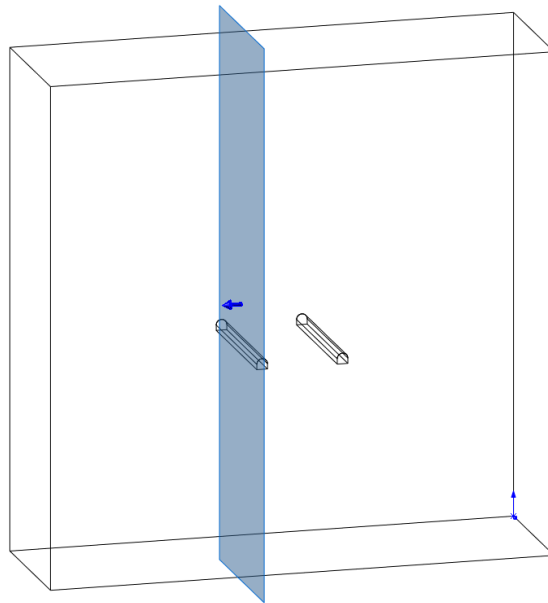


Рис. 7.8 – Додаткова вертикальна площина у масиві моделі, яка необхідна для створення контуру відрізного штреку

10. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** на новій площині викреслюють контур відрізного штреку (рис. 7.9).

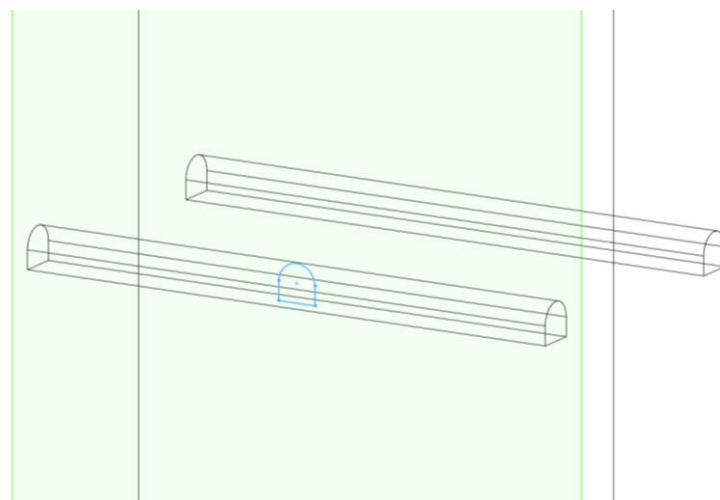


Рис. 7.9 – Викреслений контур відрізного штреку на новій площині

11. Після побудови контуру відрізного штреку, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює відстані між центрами бурових ортів, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 7.10).

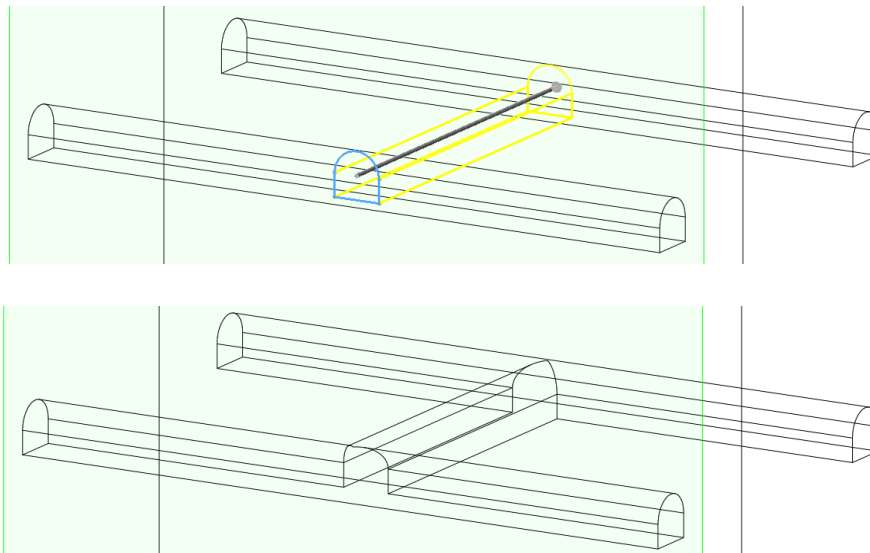


Рис. 7.10 – Викреслений відрізний штрек у масиві моделі між двома ортами

12. Для того щоб викреслити відрізний підняттявий, що розташований у покрівлі бурового орта необхідно створити додаткову горизонтальну площину послідовно натиснувши **Вставка, Довідкова геометрія, Площина**. Потім задати місце її розташування в геометрії моделі (рис. 7.11) і натискаємо **ОК**.

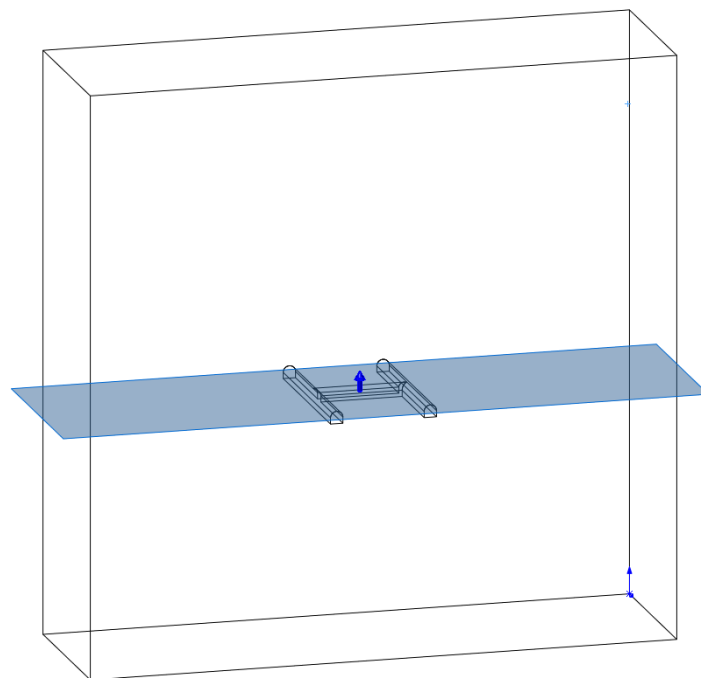


Рис. 7.11 – Додаткова горизонтальна площина у масиві моделі, яка необхідна для створення контуру відрізного підняттявого

13. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструмента **Прямокутник** на новій горизонтальній площині викреслюють контур відрізного підняттявого (рис. 7.12).

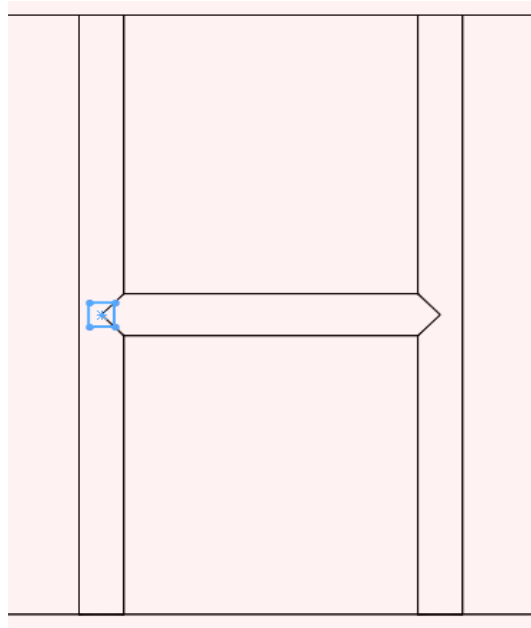


Рис. 7.12 – Викреслений контур відрізного підняттевого на новій площині

14. Після побудови контуру відрізного підняттевого, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою на задану висоту підняттевого роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 7.13).

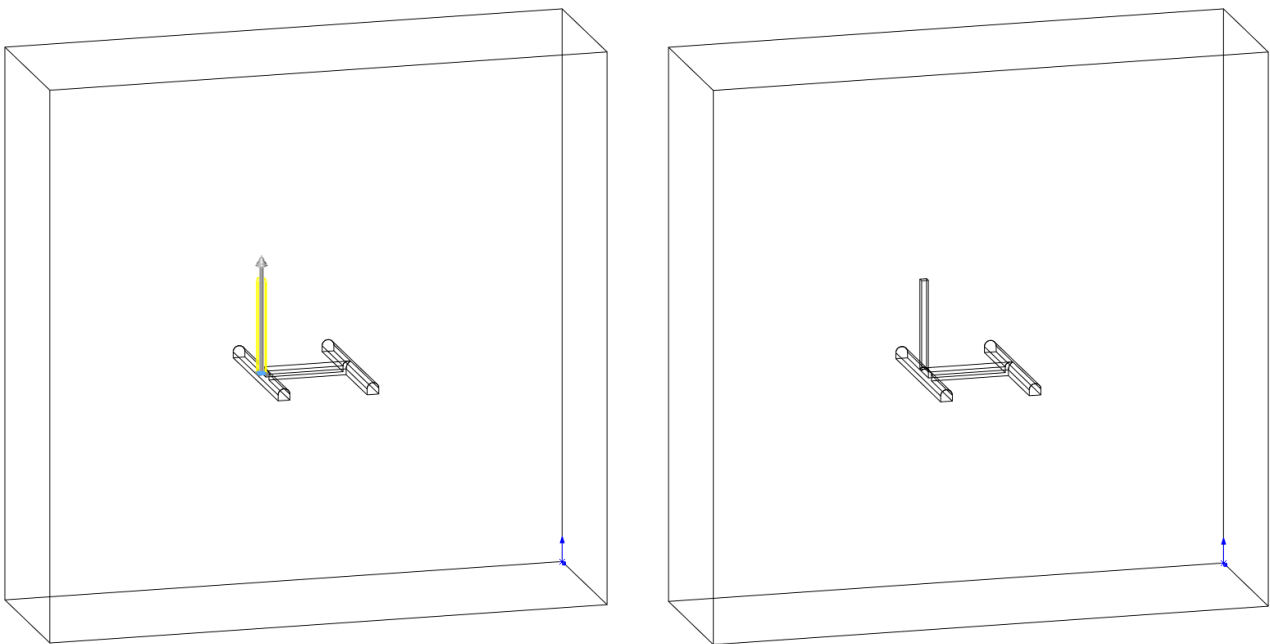


Рис. 7.13 – Викреслений відрізний підняттевий у масиві моделі з бурового орта

15. Для того щоб викреслити паралельні свердловини, що розташовані на рівні вибою відрізного підняттевого необхідно створити додаткову горизонтальну площину послідовно натиснувши **Вставка, Довідкова**

геометрія, Площина. Потім задати місце її розташування в геометрії моделі (рис. 7.14) і натискаємо **ОК**.

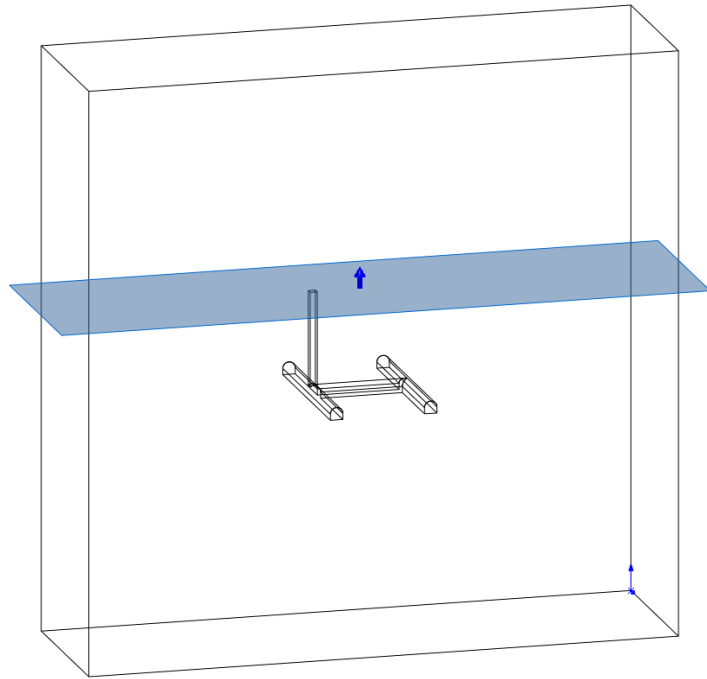


Рис. 7.14 – Додаткова горизонтальна площина у масиві моделі, яка необхідна для створення контурів паралельних свердловин

16. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** на новій горизонтальній площині викреслюють контури свердловин (рис. 7.15).

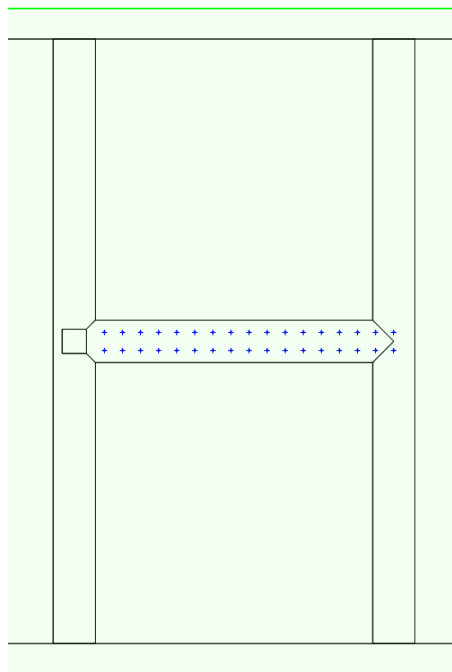


Рис. 7.15 – Викреслені контури паралельних свердловин на новій площині

17. Після побудови паралельних свердловин, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на задану глибину, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 7.16).

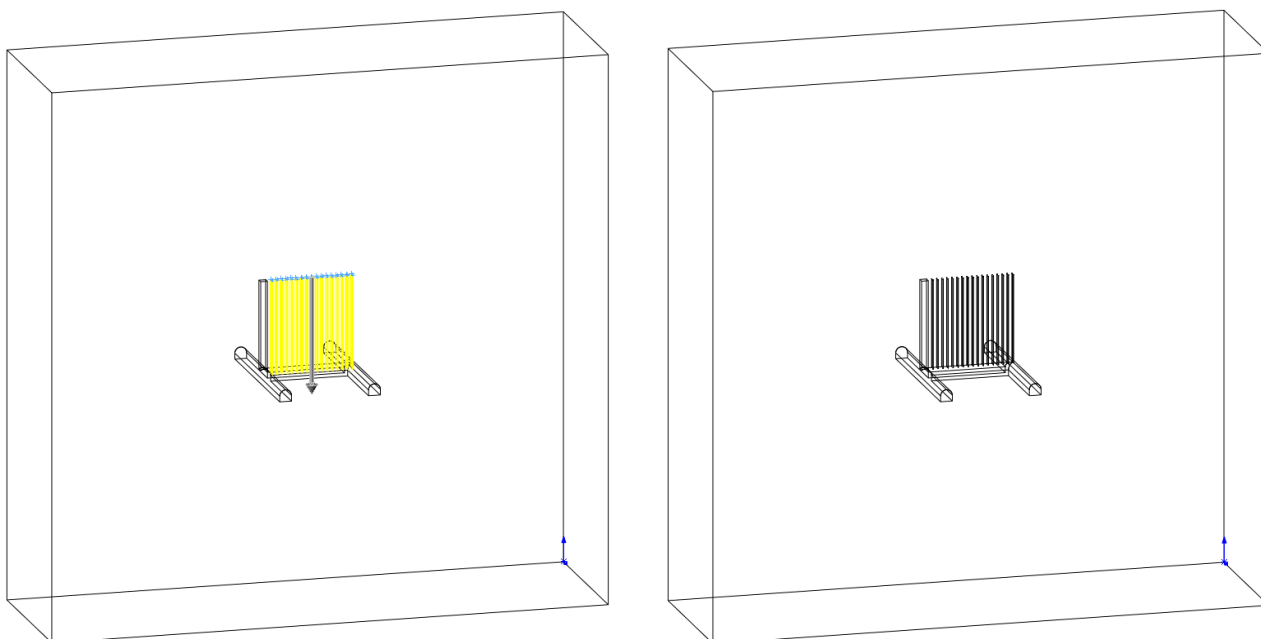


Рис. 7.16 – Викреслені у масиві моделі паралельні свердловини, відрізний штрек і підняттєвий та бурові орти

18. Далі натискають на вкладку **Simulation** і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**.

Потім у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на всі бокові грані моделі і натискають лівою клавішею миші. Після обрання граней натискають **ОК**.

Для встановлення тиску продуктів вибуху у свердловинах наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім у кожній свердловині, натискають лівою клавішою миші на її вибій та стінки. Далі натискають **ОК**.

Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Після чого модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 7.17).

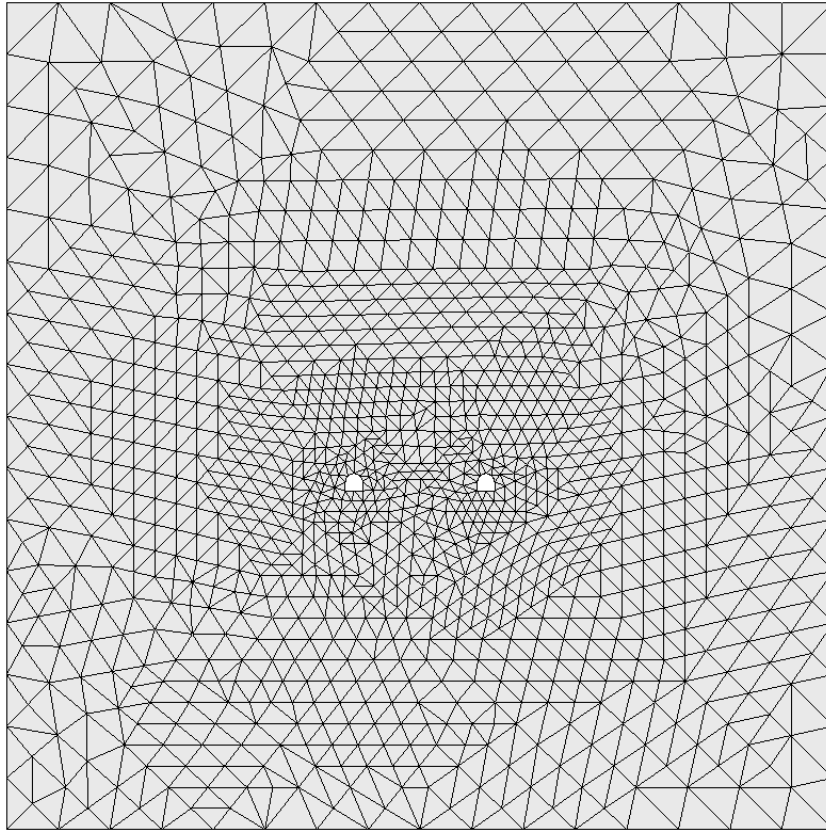


Рис. 7.17 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

14. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являється **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву руди при утворенні відрізної щілини необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На **Кроці 2** – встановлюють одиницю виміру МПа та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони непружних деформацій, що виникнуть в масиві руди під дією вибуху при утворенні відрізної щілини подано на рис. 7.18.

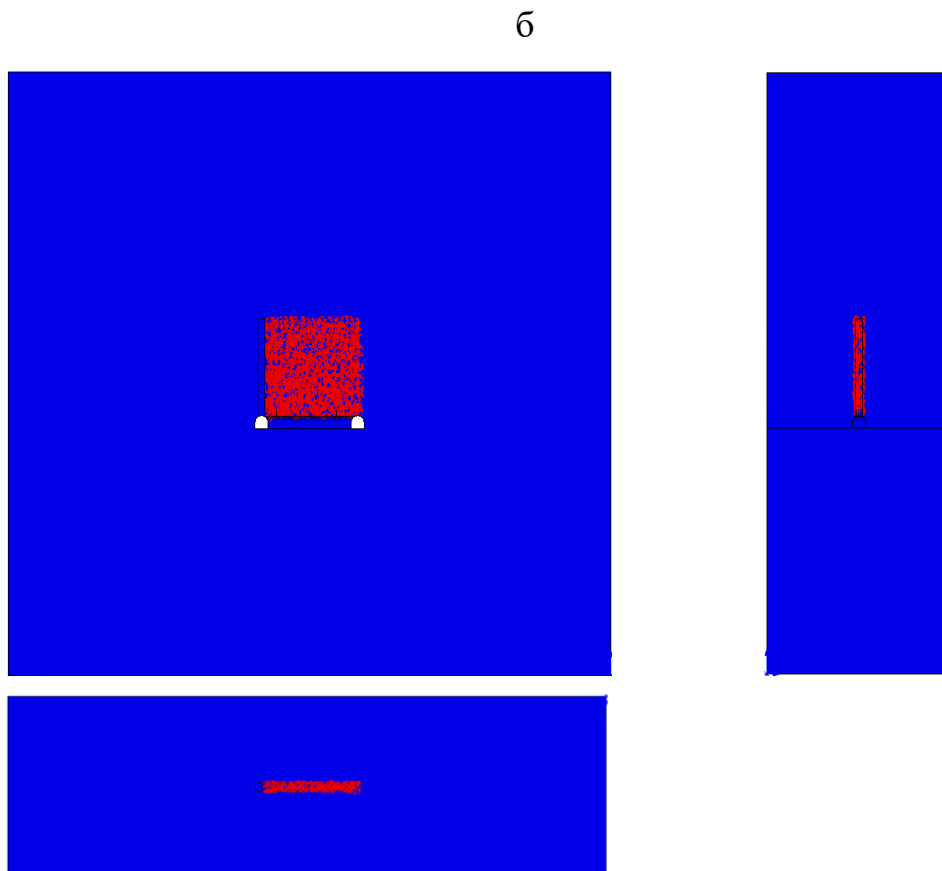
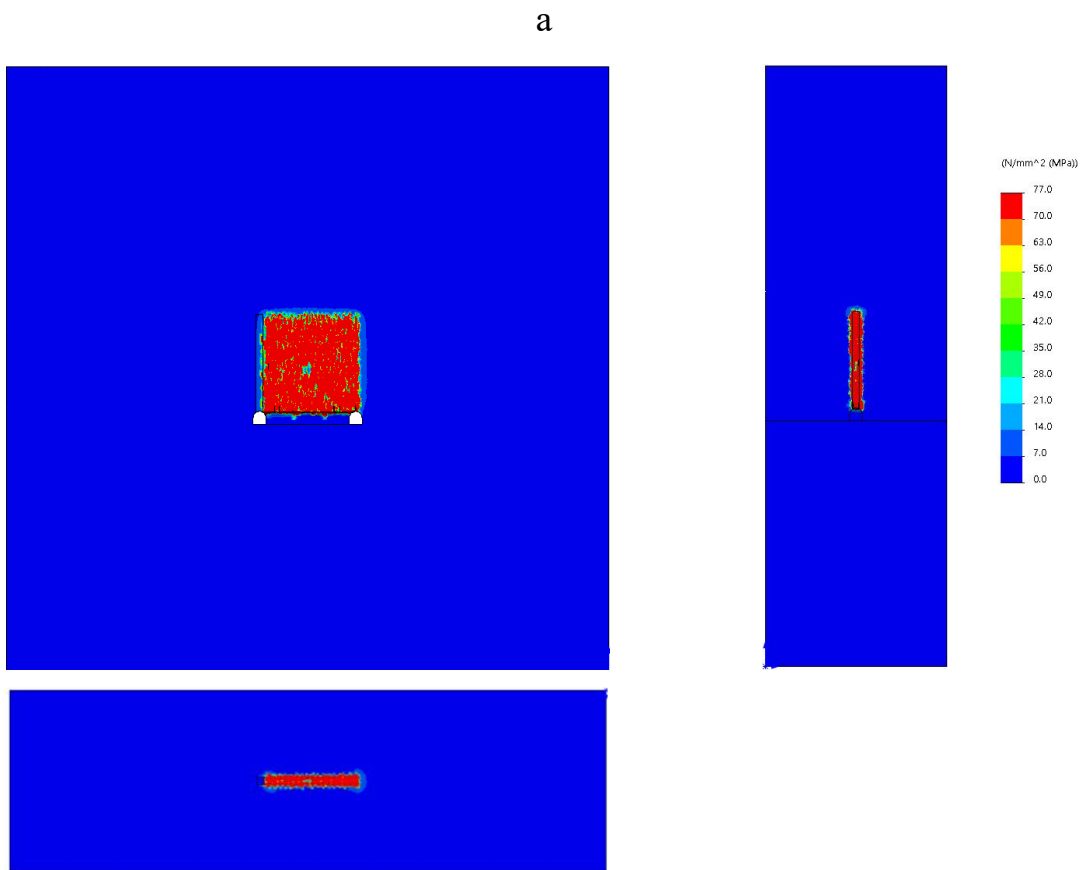


Рис. 7.18 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що виникнуть в масиві руди під дією вибуху при утворенні відрізної щілини

7.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 7.2, для чисельного моделювання буропідривних робіт при утворенні відрізної щілини необхідно розрахувати параметри і побудувати геометрію моделі, визначити фізико-механічні властивості матеріалу моделі та тиск продуктів вибуху.

Таблиця 7.2 – Вихідні дані для чисельного моделювання буропідривних робіт при утворенні відрізної щілини

Варіант №	Розміри відрізної виробки (ширина, $B \times$ висота, H), м	Розміри відрізного піднятого (ширина, $b \times$ довжина, l), м	Межа міцності руди на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт структури породи, $K_{сп}$	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Щільність порід, γ , кг/м ³	Глибина гірничих робіт, H , м	ВР	ЛНО, W , м	Діаметр свердловини, d , м	Висота відрізної щілини, $H_{щ}$, м	Довжина відрізної щілини, $L_{щ}$, м
0	3,5 × 3,5	2,0 × 2,0	60	0,25	1,4	0,8	3950	1000	У	3,0	0,102	30	30
1	3,6 × 3,6	2,0 × 2,0	70	0,24	1,3	0,9	3950	900	Г	3,0	0,105	20	20
2	3,7 × 3,7	2,0 × 2,0	80	0,23	1,1	0,8	3950	800	У	3,0	0,102	25	20
3	3,8 × 3,8	2,0 × 2,0	90	0,22	1,1	0,9	3950	700	Г	3,0	0,105	25	25
4	3,5 × 3,5	2,0 × 2,0	100	0,25	1,0	0,8	3950	1000	У	2,8	0,102	30	25
5	3,6 × 3,6	2,0 × 2,0	110	0,24	1,0	0,9	3950	900	Г	2,8	0,105	30	30
6	3,7 × 3,7	2,0 × 2,0	120	0,23	1,0	0,8	3950	800	У	2,8	0,102	20	20
7	3,8 × 3,8	2,0 × 2,0	60	0,22	1,4	0,9	3950	700	Г	3,0	0,105	25	20
8	3,5 × 3,5	2,0 × 2,0	70	0,25	1,3	0,8	3950	1000	У	3,0	0,102	25	25
9	3,6 × 3,6	2,0 × 2,0	80	0,24	1,1	0,9	3950	900	Г	3,0	0,105	30	25
10	3,7 × 3,7	2,0 × 2,0	90	0,23	1,1	0,8	3950	800	У	3,0	0,102	30	30
11	3,8 × 3,8	2,0 × 2,0	100	0,22	1,0	0,9	3950	700	Г	2,8	0,105	20	20
12	3,5 × 3,5	2,0 × 2,0	110	0,25	1,0	0,8	3950	1000	У	2,8	0,102	25	20
13	3,6 × 3,6	2,0 × 2,0	120	0,24	1,0	0,9	3950	900	Г	2,8	0,105	25	25
14	3,7 × 3,7	2,0 × 2,0	60	0,23	1,4	0,8	3950	800	У	3,0	0,102	30	25
15	3,8 × 3,8	2,0 × 2,0	70	0,22	1,3	0,9	3950	700	Г	3,0	0,105	30	30
16	3,5 × 3,5	2,0 × 2,0	80	0,25	1,1	0,8	3950	1000	У	3,0	0,102	20	20
17	3,6 × 3,6	2,0 × 2,0	90	0,24	1,1	0,9	3950	900	Г	3,0	0,105	25	20
18	3,7 × 3,7	2,0 × 2,0	100	0,23	1,0	0,8	3950	800	У	2,8	0,102	25	25
19	3,8 × 3,8	2,0 × 2,0	110	0,22	1,0	0,9	3950	700	Г	2,8	0,105	30	25
20	3,5 × 3,5	2,0 × 2,0	120	0,25	1,0	0,8	3950	1000	У	2,8	0,102	30	30

Примітка: Г – Грамоніт 79/21; У – наливна емульсійна ВР Україніт-ПП-2.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

7.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудуємо модель масиву руди для чисельного моделювання буропідривних робіт при утворенні відрізної щілини за варіантом №0.

Визначимо площу поперечного перерізу відрізної щілини вхрест простягання за формулою (7.1)

$$S_{щ.вхр.} = B_{щ} \cdot H_{щ} = 3,5 \cdot 30 = 105 \text{ м}^2.$$

Визначимо площу поперечного перерізу відрізної щілини за простяганням за формулою (7.2)

$$S_{щ.пр.} = L_{щ} \cdot H_{щ} = 30 \cdot 30 = 900 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр відрізної щілини вхрест простягання за формулою (7.3)

$$D_{щ.вхр.} = \sqrt{4 \cdot S_{щ.вхр.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 105 / 3,14} = 11,6 \text{ м.}$$

Визначимо приведений діаметр відрізної щілини за простяганням за формулою (7.4)

$$D_{щ.пр.} = \sqrt{4 \cdot S_{щ.пр.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 900 / 3,14} = 34 \text{ м.}$$

Визначимо ширину моделі масиву руди за формулою (7.5)

$$B_m = B + 4 \cdot D_{щ.вхр.} = 3,5 + 4 \cdot 11,6 = 50 \text{ м.}$$

Визначимо висоту моделі масиву руди за формулою (7.6)

$$H_m = H_{щ} + 4 \cdot D_{щ.пр.} = 30 + 4 \cdot 34 = 166 \text{ м.}$$

Визначимо довжину моделі масиву руди за формулою (7.7)

$$L_m = L_{щ} + 4 \cdot D_{щ.пр.} = 30 + 4 \cdot 34 = 166 \text{ м.}$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 50$ м; $H_m = 166$ м; $L_m = 166$ м.

Визначимо кількість рядів свердловин за формулою (7.8)

$$N = \frac{L_{щ} - (B + 0,5 \cdot l)}{0,5 \cdot W} = \frac{30 - (3,5 + 0,5 \cdot 2)}{0,5 \cdot 3} = 17 \text{ шт.}$$

Приймаємо кількість рядів свердловин 17 шт.

За прийнятими параметрами будуємо геометрію моделі та розташування паралельних свердловин для утворення відрізної щілини згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 7.1. Побудована геометрія моделі масиву руди за прийнятими параметрами подано на рис. 7.19.

Визначимо коефіцієнт ущільнення руди під дією гірського тиску за формулою (5.3)

$$K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H) / \gamma = (3950 + 0,1 \cdot 1000) / 3950 = 1,025.$$

Визначимо межу міцності масиву руди за формулою (5.2)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y = 60 \cdot 1,4 \cdot 0,8 \cdot 1,025 = 70 \text{ МПа.}$$

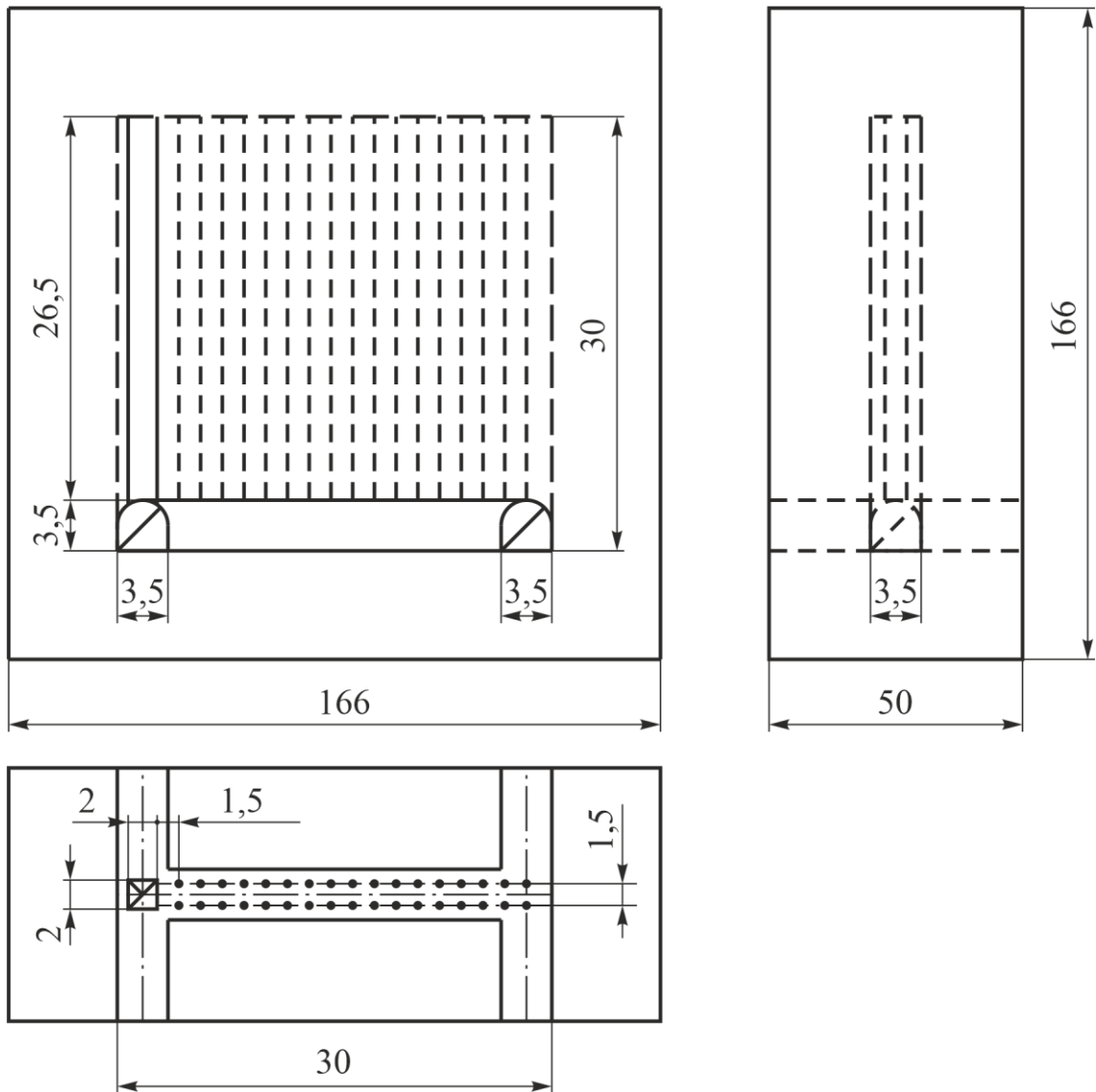


Рис. 7.19 – Геометрія моделі масиву руди за прийнятими параметрами

Визначимо межу міцності масиву руди на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^m = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^m = 0,1 \cdot 70 = 7 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{7}{0,0001} = 70000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{70000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 28000 \text{ МПа.}$$

Визначимо величину тиску у свердловинах за формулою (5.4)

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{dz} \cdot K_d}{8} = \frac{1000 \cdot 4900^2 \cdot 2}{8} = 6000000000 \text{ Па.}$$

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання буропідричних робіт при утворенні відрізної щілини, шириною 3,5 м, висотою – 30 м і довжиною – 30 м, параметри геометрії моделі повинні бути не менше: ширина 50 м, висота – 166 м і довжина 166 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву руди на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 70$ МПа, на розтягання – $\sigma_p = 7$ МПа, модуль пружності $E = 70000$ МПа, модуль зсуву $G = 28000$ МПа, величина тиску продуктів вибуху $P_m = 6000$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під терміном відрізка запасів руди?
2. Що розуміють під терміном відрізна щілина?
3. Які показники впливають на параметри геометрії моделі при чисельному моделюванні буропідричних робіт для утворення відрізної щілини?
4. Перелічіть, які параметри необхідно розрахувати для чисельного моделювання буропідричних робіт при утворенні відрізної щілини у модулі SolidWorks Simulation?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДБИВАННЯ ШАРУ РУДИ СВЕРДЛОВИНАМИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання буропідричних робіт для відбивання шару руди віялом свердловин у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

8.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

При підземній розробці відбивання руди підриванням свердловин набуло поширення при розробці потужних родовищ, не дуже тріщинуватих і шаруватих руд з межею міцності ≥ 30 МПа. За взаємним розташуванням розрізняють такі схеми розташування свердловин (рис. 8.1): паралельна, віялова, віялово-пучкова та паралельно-пучкова.

Паралельну схему розташування свердловин (рис. 8.1, а) застосовують при міцності руди 100–200 МПа з такими перевагами. Це мінімальна сумарна довжина свердловин, рівномірний розподіл заряду в масиві, унаслідок чого – рівномірне подрібнення руди. Недоліки: велика довжина бурових виробок і велика кількість перестановок бурового верстата.

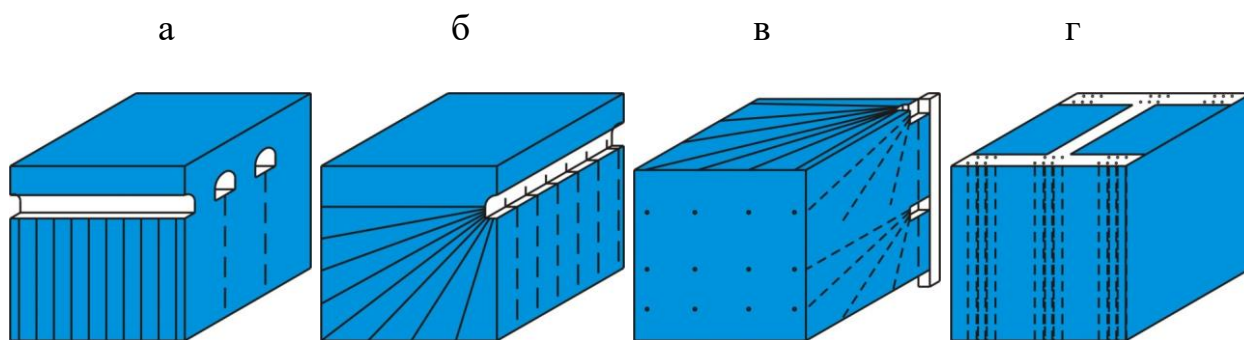


Рис. 8.1 – Схеми розташування свердловин: а – паралельна; б – віялова; в – віялово-пучкова; г – паралельно-пучкова

Віялову схему розташування свердловин (рис. 8.1, б) застосовують при міцності руди ≥ 30 МПа з такими перевагами. Це менша довжина бурових виробок, мінімальна кількість перестановок бурового верстата, середня сумарна довжина свердловин порівняно з іншими схемами. Недоліки: нерівномірний розподіл зарядів і нерівномірне подрібнення руди.

Віялово-пучкову схему розташування свердловин (рис. 8.1, в) застосовують при міцності руди ≥ 30 МПа з такими перевагами. Це мінімальна довжина бурових виробок, мінімальна кількість перестановок бурового верстата. Недоліки: максимальна сумарна довжина свердловин; нерівномірний розподіл зарядів і нерівномірне подрібнення руди.

Паралельно-пучкова схема розташування свердловин (рис. 8.1, г) застосовується при міцності руди 100–200 МПа і має такі переваги. Це середня сумарна довжина свердловин порівняно з іншими схемами. Недоліки: велика довжина бурових виробок, велика кількість перестановок бурового верстата, нерівномірний розподіл зарядів і нерівномірне подрібнення руди.

Відбивання руди свердловинами залежно від розташування відслоненої площини очисного вибою здійснюють вертикальними, горизонтальними або похилими шарами. Свердловини в площині шару розташовують паралельно або віялоподібно.

При відбиванні масиву руди найбільшого розповсюдження отримала віялова схема розташування свердловин.

Побудову віяла свердловин починають з креслення меж шару, що відбивається. При побудові віяла враховують такі умови:

- кути шару, що відбивається, повинні опрацьовуватися кожен своєю свердловиною;
- побудову віяла починають зі свердловин, що обрамлюють;
- відстань між вибоями свердловин відкладають за перпендикуляром, що опущений з кінця коротшої свердловини на сусідню, більш довгу;
- всі свердловини віяла будують з геометричного центру бурової виробки.

З першої та останньої свердловини за перпендикуляром відкладають відстань a . З точки перетину межі розташування свердловин і кінця відрізка відстані a проводять свердловину до центру бурової виробки. Устя свердловин розташовують по контуру виробки. Аналогічно будують інші свердловини до

суміжного кута межі розташування свердловин щодо бурової виробки. Межу шару при досить міцній та стійкій руді може бути збільшено на відстань $a/2$, а при м'якій нестійкій руді або шар, який відбивають межує з закладкою, межа шару може бути зменшена на відстань $a/2$. Відстань між двома свердловинами в суміжному куті може становити $0,5W-1,7W$. Коли виконано побудову сітки свердловин, то у віялі показують довжини зарядів.

Віялові схеми розташування свердловин нерівномірно розподіляють ВР у масиві. Для зменшення цього недоліку устя свердловин у певному порядку недозаряджають на різну довжину з таким розрахунком, щоб відстань між сусідніми зарядами ВР у зоні їх зближення приблизно дорівнювала $(0,5-0,7)W$. Довжину заряду свердловини знаходять графічним способом. Для спрощення зарядки приймають 2-4 довжини недозаряду, які кратні лінії найменшого опору. Однакову величину недозаряду приймають через одну або через дві свердловини. Після закінчення побудови свердловин за кресленням визначають кількість свердловин у віялі, їх загальну довжину та сумарну довжину зарядженої частини свердловин, яка зображується потовщеними лініями.

Для виконання чисельного моделювання руйнування масиву вибухом при відбиванні шару руди віялом свердловин необхідно провести розрахунки параметрів геометрії моделі, розташування свердловин у віялі, фізико-механічних властивостей руди та навантаження.

Розрахунок параметрів геометрії моделі та розташування свердловин у віялі для відбивання шару руди виконується згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 8.2.

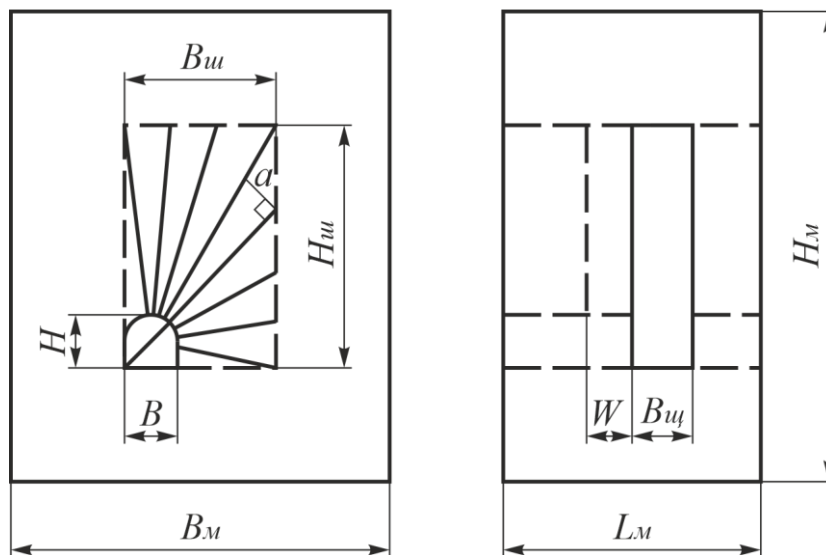


Рис. 8.2 – Розрахункова схема параметрів геометрії моделі та розташування віяла свердловин для відбивання шару руди:
 B і H – відповідно ширина і висота бурового орту, м;
 $B_{ш}$ і $H_{ш}$ – відповідно ширина і висота шару руди, що відбивається, м;
 B_m , H_m і L_m – відповідно ширина, висота і довжина моделі, м;
 $B_{щ}$ – ширина відрізняючої щілини, м; W – ЛНО, м;
 a – відстань між вибоями свердловин, м

Площа поперечного перерізу шару руди, що висаджується, за простяганням

$$S_{ш.пр.} = B_{ш} \cdot H_{ш}, \text{ м}^2. \quad (8.1)$$

Площа поперечного перерізу шару руди, що висаджується, вхрест простягання

$$S_{ш.вхр.} = H_{ш} \cdot (W + B_{ш}), \text{ м}^2. \quad (8.2)$$

Приведений діаметр шару руди, що висаджується, за простяганням визначається за формулою

$$D_{ш.пр.} = \sqrt{4 \cdot S_{ш.пр.} / \pi}, \text{ м}. \quad (8.3)$$

Приведений діаметр шару руди, що висаджується, вхрест простягання визначається за формулою

$$D_{ш.вхр.} = \sqrt{4 \cdot S_{ш.вхр.} / \pi}, \text{ м}. \quad (8.4)$$

Ширина моделі масиву руди визначається за формулою

$$B_m = B_{ш} + 4 \cdot D_{ш.пр.}, \text{ м}. \quad (8.5)$$

Висота моделі масиву руди визначається за формулою

$$H_m = H_{ш} + 4 \cdot D_{ш.пр.}, \text{ м}. \quad (8.6)$$

Довжина моделі масиву руди визначається за формулою

$$L_m = W + B_{ш} + 4 \cdot D_{ш.вхр.}, \text{ м}. \quad (8.7)$$

Після розрахунку параметрів будуватиметься геометрія моделі та розташування віяла свердловин для відбивання шару руди.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії вибуху на масив гірських порід, межа міцності масиву руди визначається за формулою (5.2).

Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву руди.

Так, як вибух уявляє собою удар, а потім дію тиску продуктів вибуху, то для імітації цього процесу потрібно задати тиск, який направлений перпендикулярно граням та вибою у всіх свердловинах з урахуванням динамічного коефіцієнту. Величина тиску продуктів вибуху для чисельного моделювання підривання свердловин при відбиванні шару руди визначається за формулою (5.4). Характеристику ВР подано у табл. 7.1.

Процес проведення статичного аналізу у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. За допомогою інструмента **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо прямокутник. Потім у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та

висоту геометрії моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді прямокутника (рис. 8.3).

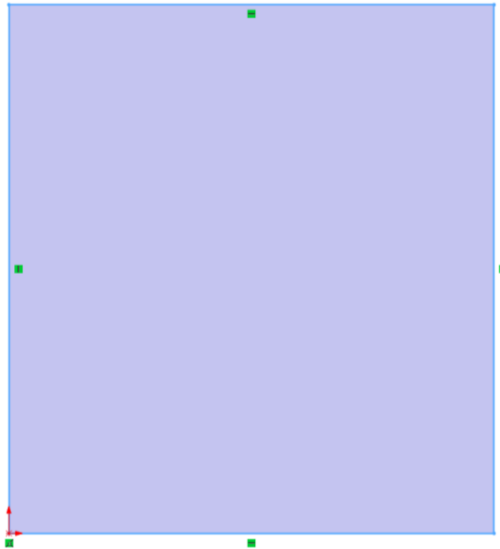


Рис. 8.3 – Ескіз геометрії масиву моделі

4. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на розраховану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 8.4).

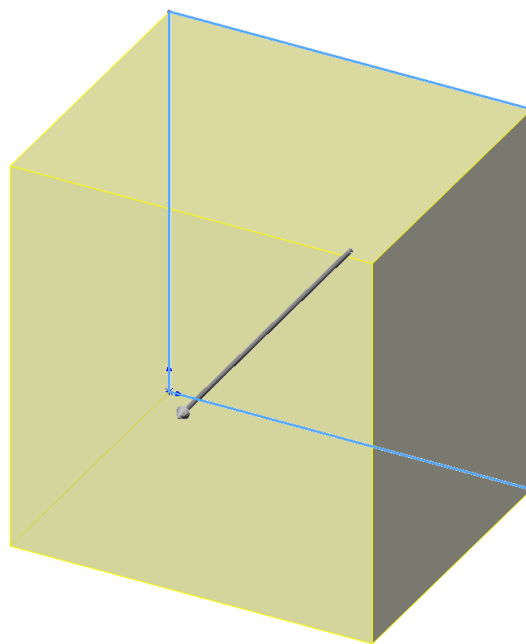


Рис. 8.4 – Витягнення профілю моделі масиву руди

5. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив руди за розрахованими параметрами (рис. 8.5).

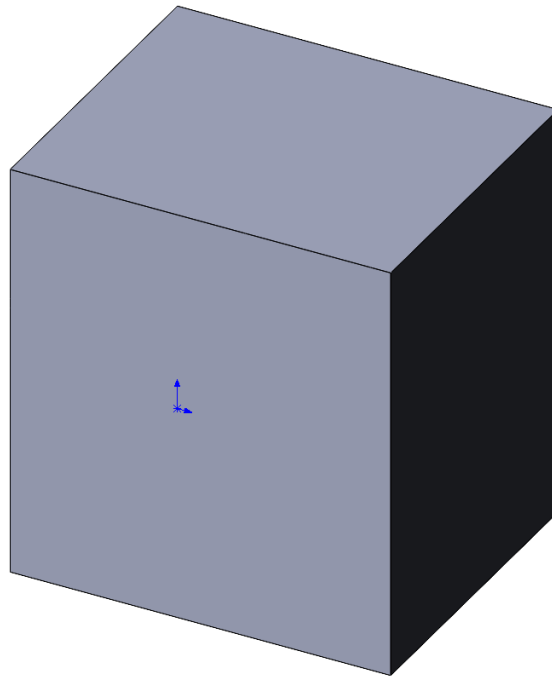


Рис. 8.5 – Модель однорідного масиву руди

6. Натиснувши лівою клавiшою миші обраємо необхідну грань деталі де буде розташовано буровий орт (рис. 8.6). Потім обираємо вкладку **Ескіз**.

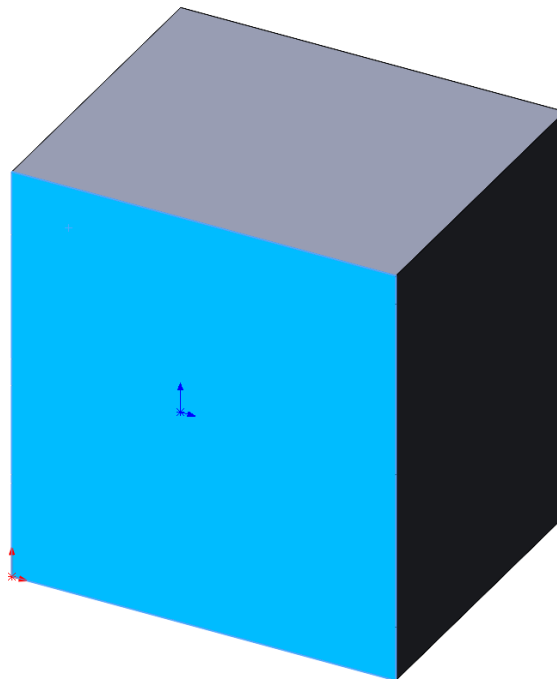


Рис. 8.6 – Виділена грань деталі де буде розташовано буровий орт

7. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами викреслюють контур бурового орта (рис. 8.7).

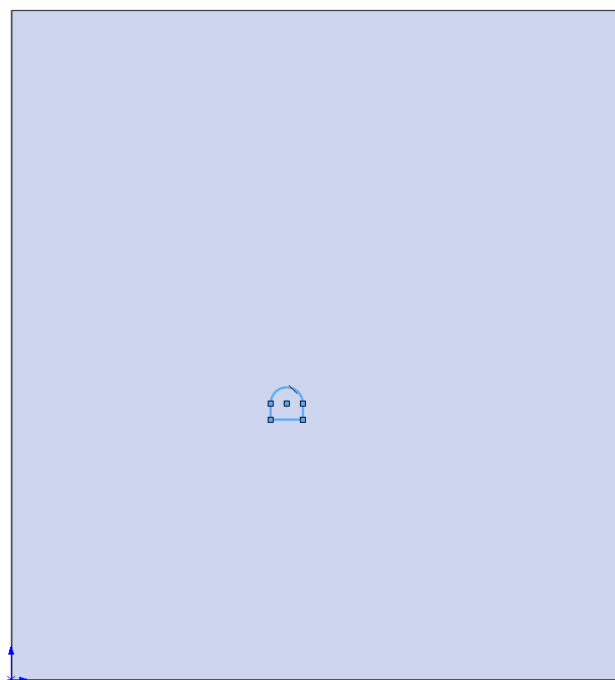


Рис. 8.7 – Розташування контуру бурового орта у масиві моделі

8. Після побудови бурового орта, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює L_m , роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 8.8).

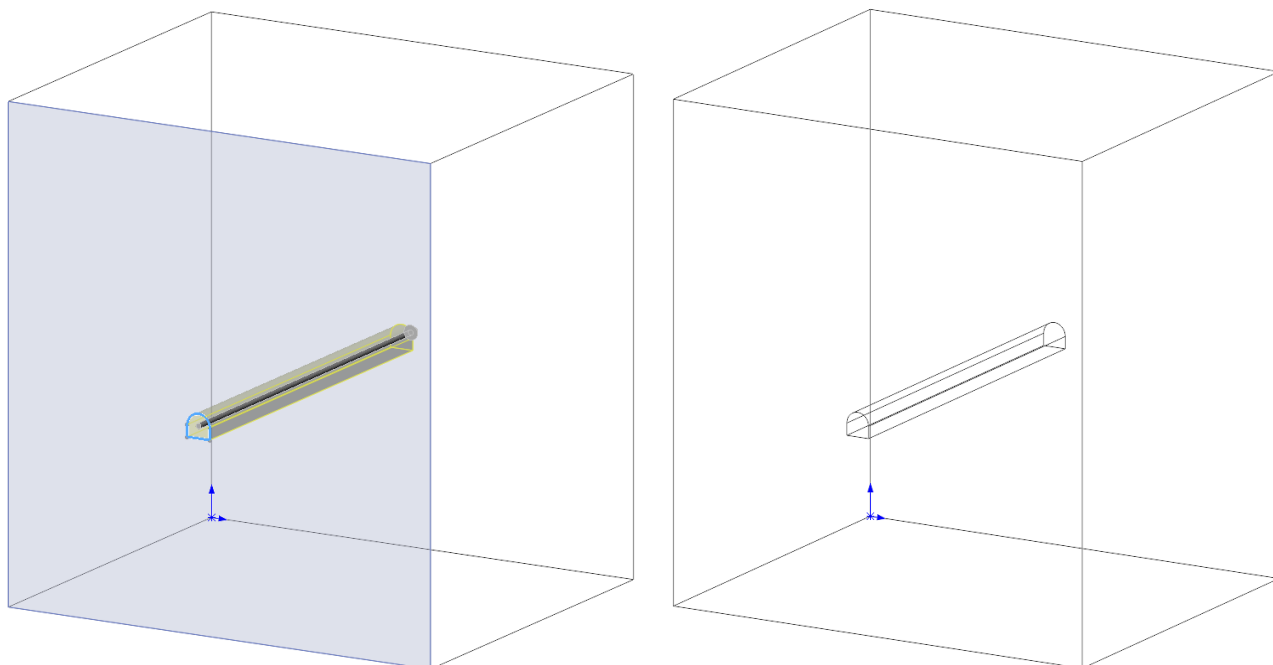


Рис. 8.8 – Викреслені бурові орти у масиві моделі

9. Для того щоб викреслити відрізню щілину необхідно створити додаткову горизонтальну площину послідовно натиснувши **Вставка, Довідкова геометрія,**

Площина. Потім задати місце її розташування в геометрії моделі (рис. 8.9) і натискаємо **ОК**.

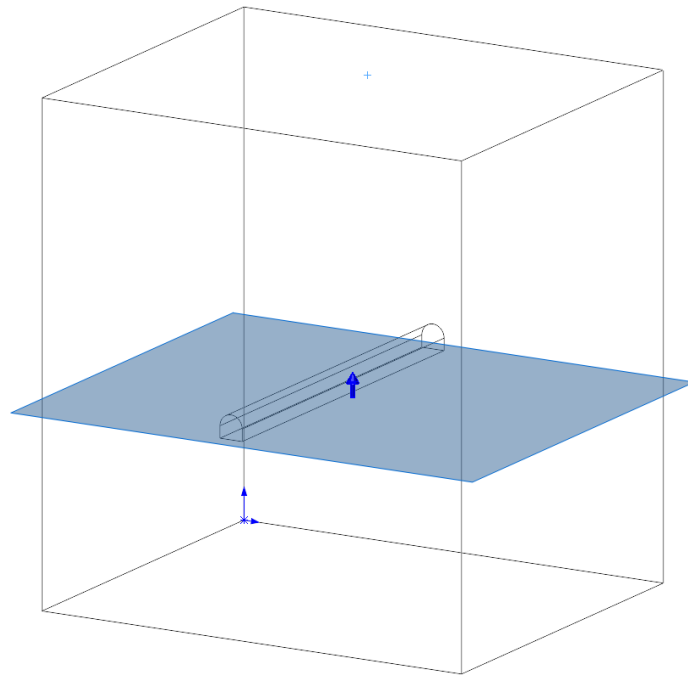


Рис. 8.9 – Додаткова горизонтальна площина у масиві моделі, яка необхідна для створення відрізної щілини

10. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Прямокутник** на новій площині викреслюють контур відрізної щілини (рис. 8.10).

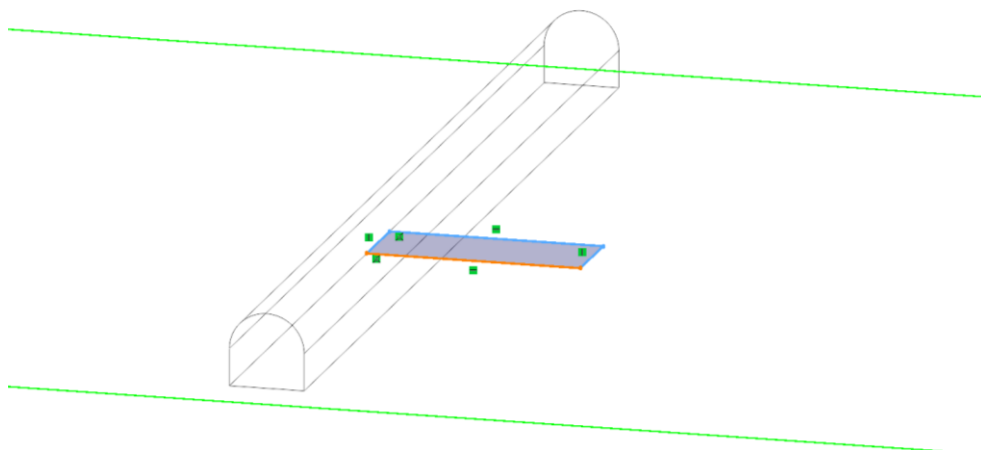


Рис. 8.10 – Викреслений контур відрізної щілини на новій площині

11. Після побудови контуру відрізної щілини, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює висоті шару руди, що висаджується, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 8.11).

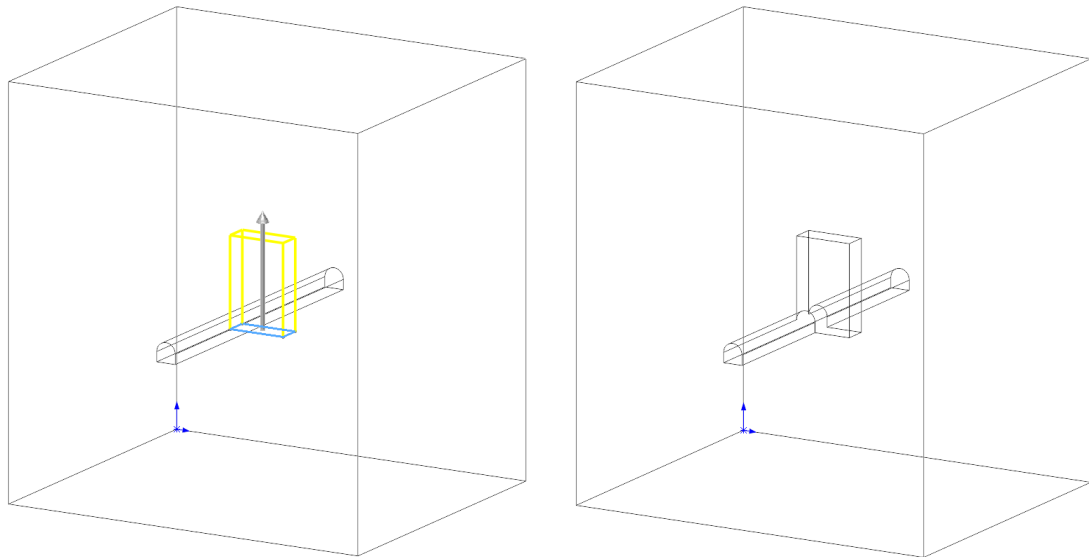


Рис. 8.11 – Викреслена відрізна щілина у масиві моделі

12. Для того щоб викреслити віяло свердловин, що пробурене з бурового орта, необхідно створити додаткову вертикальну площину послідовно натиснувши **Вставка, Довідкова геометрія, Площина**. Потім задати місце її розташування в геометрії моделі (рис. 8.12) і натискаємо **ОК**.

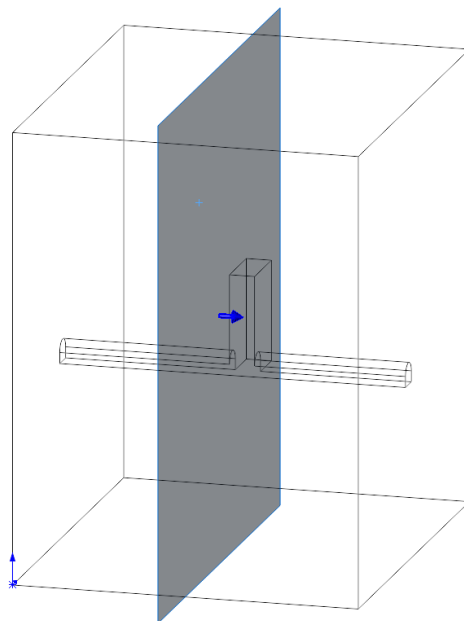


Рис. 8.12 – Додаткова вертикальна площина у масиві моделі, яка необхідна для побудови віяла свердловин

13. Потім у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** і **Прямокутник** на новій вертикальній площині викреслюють ось свердловин. Далі за допомогою **Елементи, Виріз** за траєкторією і **Круговий профіль** будують віяло свердловин (рис. 8.13).

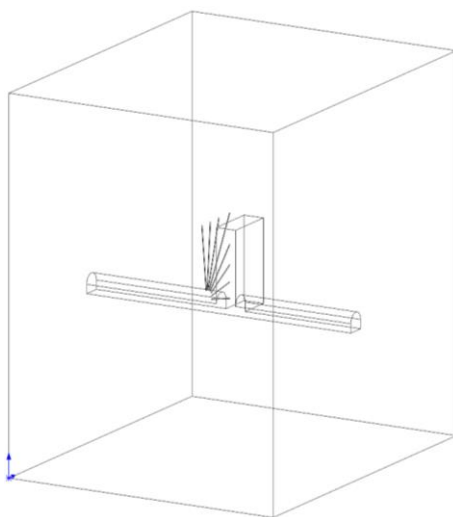


Рис. 8.13 – Викреслені у масиві моделі віяло свердловин, буровий орт і відрізна щілина

14. Далі натискають на вкладку Simulation і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**.

Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на всі бокові грані моделі і натискають лівою клавішею миші. Після обрання граней натискають **ОК**.

Для встановлення тиску продуктів вибуху у свердловинах наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім у кожній свердловині, натискають лівою клавішою миші на її вибій та стінки. Далі натискають **ОК**.

Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Після чого модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 8.14).

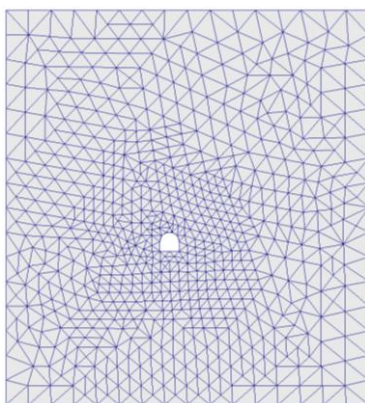


Рис. 8.14 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

15. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являться **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву руди при підриванні віяла свердловин необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На **Кроці 2** – встановлюють одиницю виміру МПа та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони непружних деформацій, що виникнуть в масиві руди під дією вибуху при підриванні віяла свердловин подано на рис. 8.15.

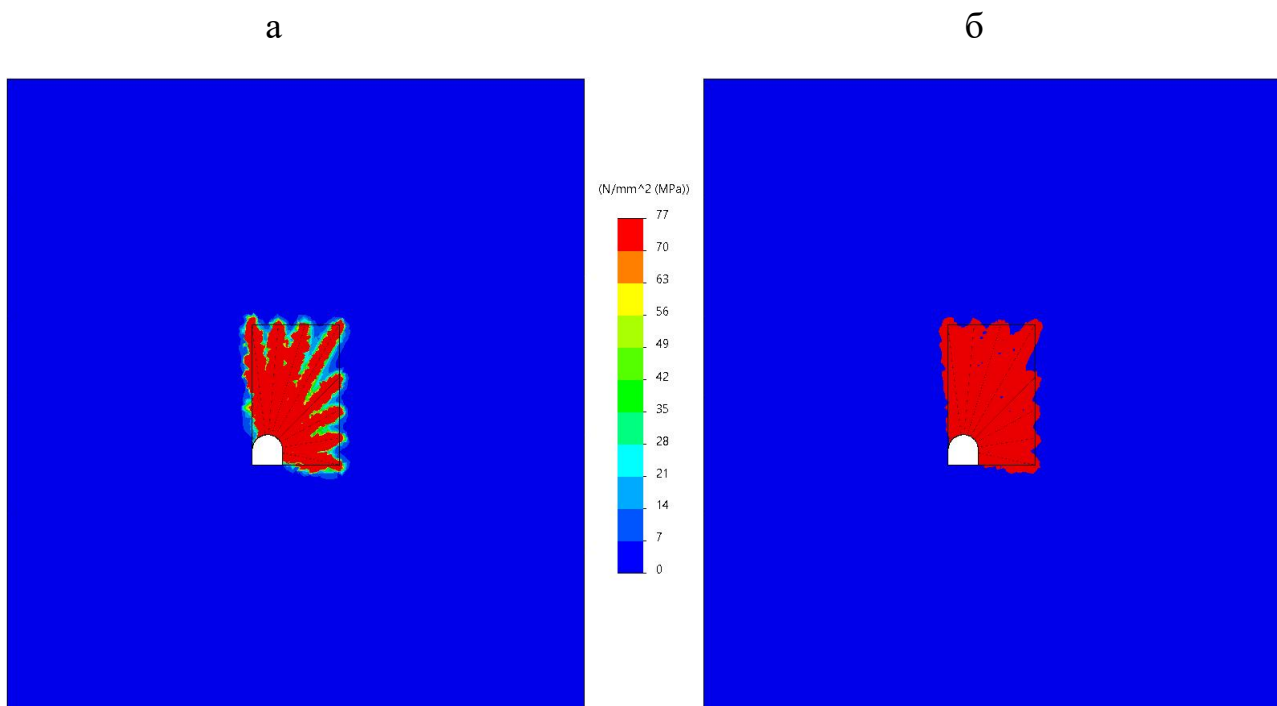


Рис. 8.15 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що виникнуть в масиві руди під дією вибуху при підриванні віяла свердловин

8.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 8.2, для чисельного моделювання буропідривних робіт для відбивання масиву руди віялом свердловин необхідно розрахувати параметри і побудувати геометрію моделі,

визначити фізико-механічні властивості матеріалу моделі та тиск продуктів вибуху.

Таблиця 8.2 – Вихідні дані для чисельного моделювання буропідривних робіт при відбиванні масиву руди віялом свердловин

Варіант №	Розміри бурового орта (ширина, $B \times$ висота, H), м	Ширина відрізної цилінди, $V_{цр}$, м	Межа міцності руди на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт структури породи, $K_{сп}$	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Щільність порід, γ , кг/м ³	Глибина гірничих робіт, H , м	ВР	ЛНО, W , м	Відстань між вибоями свердловин, a , м	Діаметр свердловини, d , м	Ширина шару руди, що висаджується, $V_{шр}$, м	Висота шару руди, що висаджується, $H_{шр}$, м
0	3,5 × 3,5	4,0	60	0,25	1,4	0,8	3950	1000	У	3,0	3,0	0,102	10	16
1	3,6 × 3,6	3,8	70	0,24	1,3	0,8	3950	900	Г	3,0	3,0	0,105	10	17
2	3,5 × 3,5	3,6	80	0,23	1,3	0,8	3950	800	У	3,0	3,0	0,102	12	18
3	3,6 × 3,6	4,0	90	0,22	1,1	0,8	3950	1000	Г	3,0	3,0	0,105	13	20
4	3,5 × 3,5	3,8	60	0,26	1,4	0,8	3950	900	У	3,0	3,0	0,102	15	21
5	3,6 × 3,6	3,6	70	0,25	1,3	0,8	3950	800	Г	3,0	3,0	0,105	10	16
6	3,5 × 3,5	4,0	80	0,24	1,3	0,8	3950	1000	У	3,0	3,0	0,102	10	17
7	3,6 × 3,6	3,8	90	0,23	1,1	0,8	3950	900	Г	3,0	3,0	0,105	12	18
8	3,5 × 3,5	3,6	60	0,22	1,4	0,8	3950	800	У	3,0	3,0	0,102	13	20
9	3,6 × 3,6	4,0	70	0,26	1,3	0,8	3950	1000	Г	3,0	3,0	0,105	15	21
10	3,5 × 3,5	3,8	80	0,25	1,3	0,8	3950	900	У	3,0	3,0	0,102	10	16
11	3,6 × 3,6	3,6	90	0,24	1,1	0,8	3950	800	Г	3,0	3,0	0,105	10	17
12	3,5 × 3,5	4,0	60	0,23	1,4	0,8	3950	1000	У	3,0	3,0	0,102	12	18
13	3,6 × 3,6	3,8	70	0,22	1,3	0,8	3950	900	Г	3,0	3,0	0,105	13	20
14	3,5 × 3,5	3,6	80	0,26	1,3	0,8	3950	800	У	3,0	3,0	0,102	15	21
15	3,6 × 3,6	4,0	90	0,25	1,1	0,8	3950	1000	Г	3,0	3,0	0,105	10	16
16	3,5 × 3,5	3,8	60	0,24	1,4	0,8	3950	900	У	3,0	3,0	0,102	10	17
17	3,6 × 3,6	3,6	70	0,23	1,3	0,8	3950	800	Г	3,0	3,0	0,105	12	18
18	3,5 × 3,5	4,0	80	0,22	1,3	0,8	3950	1000	У	3,0	3,0	0,102	13	20
19	3,6 × 3,6	3,8	90	0,26	1,1	0,8	3950	900	Г	3,0	3,0	0,105	15	21
20	3,5 × 3,5	3,6	60	0,25	1,4	0,8	3950	800	У	3,0	3,0	0,102	10	16

Примітка: Г – Грамоніт 79/21; У – наливна емульсійна ВР Україніт-ПП-2.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

8.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудуємо модель масиву руди для чисельного моделювання буропідричних робіт при відбиванні масиву руди віялом свердловин за варіантом №0.

Визначимо поперечного перерізу шару руди, що висаджується, за простяганням за формулою (8.1)

$$S_{ш.нр.} = B_{ш.} \cdot H_{ш.} = 10 \cdot 16 = 160 \text{ м}^2.$$

Визначимо площу поперечного перерізу шару руди, що висаджується, вхрест простягання за формулою (8.2)

$$S_{ш.вхр.} = H_{ш.} \cdot (W + B_{ш.}) = 16 \cdot (3 + 4) = 112 \text{ м}^2.$$

Визначимо діаметр шару руди, що висаджується, за простяганням за формулою (8.3)

$$D_{ш.нр.} = \sqrt{4 \cdot S_{ш.нр.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 160 / 3,14} = 14 \text{ м.}$$

Визначимо приведеній діаметр шару руди, що висаджується, вхрест простягання за формулою (8.4)

$$D_{ш.вхр.} = \sqrt{4 \cdot S_{ш.вхр.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 112 / 3,14} = 12 \text{ м.}$$

Визначимо ширину моделі масиву руди за формулою (8.5)

$$B_m = B_{ш.} + 4 \cdot D_{ш.нр.} = 10 + 4 \cdot 14 = 66 \text{ м.}$$

Визначимо висоту моделі масиву руди за формулою (8.6)

$$H_m = H_{ш.} + 4 \cdot D_{ш.нр.} = 16 + 4 \cdot 14 = 72 \text{ м.}$$

Визначимо довжину моделі масиву руди за формулою (8.7)

$$L_m = W + B_{ш.} + 4 \cdot D_{ш.вхр.} = 3 + 4 + 4 \cdot 12 = 55 \text{ м.}$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 66 \text{ м}$; $H_m = 72 \text{ м}$; $L_m = 55 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами будуємо геометрію моделі та розташування паралельних свердловин для відбивання шару руди віялом свердловин згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 8.2. Побудована геометрія моделі масиву руди за прийнятими параметрами подано на рис. 8.16.

Визначимо коефіцієнт ущільнення руди під дією гірського тиску за формулою (5.3)

$$K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H) / \gamma = (3950 + 0,1 \cdot 1000) / 3950 = 1,025.$$

Визначимо межу міцності масиву руди за формулою (5.2)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y = 60 \cdot 1,4 \cdot 0,8 \cdot 1,025 = 70 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву руди на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 70 = 7 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^M}{0,0001} = \frac{7}{0,0001} = 70000 \text{ МПа.}$$

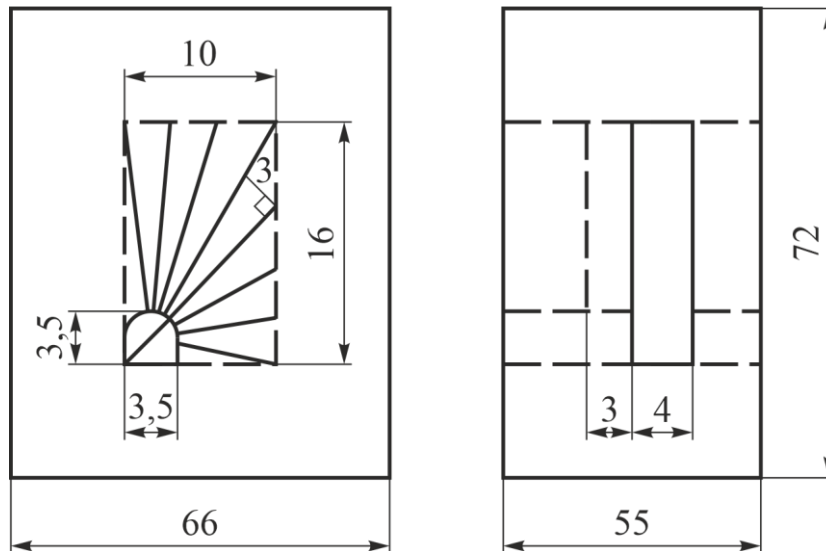


Рис. 8.16 – Геометрія моделі масиву руди за прийнятими параметрами

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{70000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 28000 \text{ МПа.}$$

Визначимо величину тиску у свердловинах за формулою (5.4)

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{dz} \cdot K_d}{8} = \frac{1000 \cdot 4900^2 \cdot 2}{8} = 6000000000 \text{ Па.}$$

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання буропідривних робіт для відбивання шару руди віялом свердловин, шириною 10 м, висотою – 16 м і довжиною – 3 м, параметри геометрії моделі повинні бути не менше: ширина 66 м, висота – 72 м і довжина 55 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву руди на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 70$ МПа, на розтягання – $\sigma_p = 7$ МПа, модуль пружності $E = 70000$ МПа, модуль зсуву $G = 28000$ МПа, величина тиску продуктів вибуху $P_m = 6000$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Які схеми розташування свердловин для відбивання масиву руди набули поширення?
2. Перелічіть переваги та недоліки паралельної та віялової схем розташування свердловин?
3. Які показники впливають на параметри геометрії моделі при чисельному моделюванні буропідривних робіт для відбивання масиву руди віялом свердловин?
4. Перелічіть, які параметри необхідно розрахувати для чисельного моделювання буропідривних робіт для відбивання масиву руди віялом свердловин у модулі SolidWorks Simulation?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДБИВАННЯ УСТУПУ РУДИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання буропідривних робіт для відбивання уступу руди свердловинами у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

9.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

На кар'єрах залежно від типу екскаватора метод свердловинних зарядів застосовується на уступах висотою понад 5–7 м, найбільш доцільно його застосовувати на уступах висотою від 10 м до 20 м. Для розміщення зарядів ВР в уступі, що підлягає висадженню, бурять похилі чи вертикальні свердловини. Діаметр свердловин становить від 75 мм до 310 мм (у слабких породах – до 150 мм, у більш міцних – більше 200 мм). Свердловини розташовують в один чи кілька рядів паралельно фронту вибою (рис. 9.1).

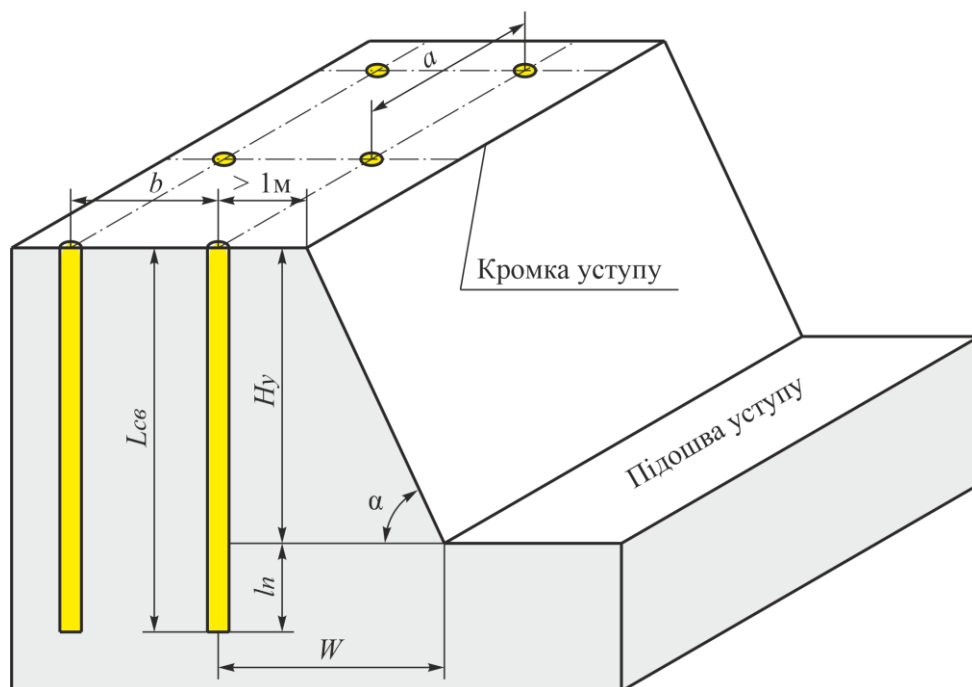


Рис. 9.1 – Схема розташування свердловин на уступі:

H_y – висота уступу, м; α – кут укосу уступу, що дорівнює $70 - 80^\circ$;
 $L_{св}$ – довжина свердловини, м; l_n – довжина перебуру, м; W – ЛНО, м;
 a – відстань між свердловинами у ряду, м;
 b – відстань між рядами свердловин, м

Одночасно підривають кілька десятків свердловин за фронтом вибою довжиною 100–300 м для забезпечення безперебійної роботи екскаватора протягом тривалого періоду часу. Для гарного подрібнення у зоні підосви уступу і попередження утворення порогів, свердловини бурять глибше рівня підосви вибою. Частина свердловини, що знаходиться нижче підосви уступу, зветься перебуrom.

Довжина перебура залежить від міцності породи і величини ЛНО та розраховується за формулою

$$l_n = (0,1 \div 0,2) \cdot W, \text{ м.} \quad (9.1)$$

Довжина свердловини визначається за формулою

$$L_{cv} = H_y + l_n, \text{ м.} \quad (9.2)$$

Відстань між свердловинами у ряді розраховується за формулою

$$a = 0,9 \cdot W, \text{ м.} \quad (9.3)$$

Загальна кількість свердловин у ряді розраховується за формулою

$$N_{cv} = \frac{A - W}{a} + 1, \text{ шт.}, \quad (9.4)$$

де A – довжина фронту вибою, м.

Відстань між рядами свердловин розраховується за формулою

$$b = (0,9 \div 1,0) \cdot W, \text{ м.} \quad (9.5)$$

Для виконання чисельного моделювання руйнування масиву вибухом при відбиванні уступу руди необхідно провести розрахунки параметрів геометрії моделі, розташування свердловин в уступі, фізико-механічних властивостей масиву руди та навантаження.

Розрахунок параметрів геометрії моделі та розташування свердловин для відбивання уступу руди виконується згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 9.2.

Площа поперечного перерізу сітки свердловин за довжиною блока визначається за формулою

$$S_{\partial.вб.} = (W + a \cdot (N_{cv} - 1)) \cdot (W + b \cdot (n_p - 1)), \text{ м}^2, \quad (9.6)$$

де n_p – кількість рядів свердловин, що дорівнює 3 шт.

Площа поперечного перерізу сітки свердловин за шириною блока визначається за формулою

$$S_{ш.вб.} = (W + b \cdot (n_p - 1)) \cdot L_{cv}, \text{ м}^2. \quad (9.7)$$

Приведений діаметр за довжиною блока визначається за формулою

$$D_{\partial.вб.} = \sqrt{4 \cdot S_{\partial.вб.} / \pi}, \text{ м.} \quad (9.8)$$

Приведений діаметр за шириною блока визначається за формулою

$$D_{ш.вб.} = \sqrt{4 \cdot S_{ш.вб.} / \pi}, \text{ м.} \quad (9.9)$$

Ширина моделі визначається за формулою

$$B_m = (W + b \cdot (n_p - 1)) + 4 \cdot D_{ш.вб.}, \text{ м.} \quad (9.10)$$

Висота моделі визначається за формулою

$$H_m = 4 \cdot L_{cv}, \text{ м.} \quad (9.11)$$

Довжина моделі визначається за формулою

$$L_m = (W + a \cdot (N_{cs} - 1)) + 4 \cdot D_{\text{д.сб.}}, \text{ м.} \quad (9.12)$$

Після розрахунку параметрів будується геометрія моделі та розташування свердловин для відбивання уступу руди.

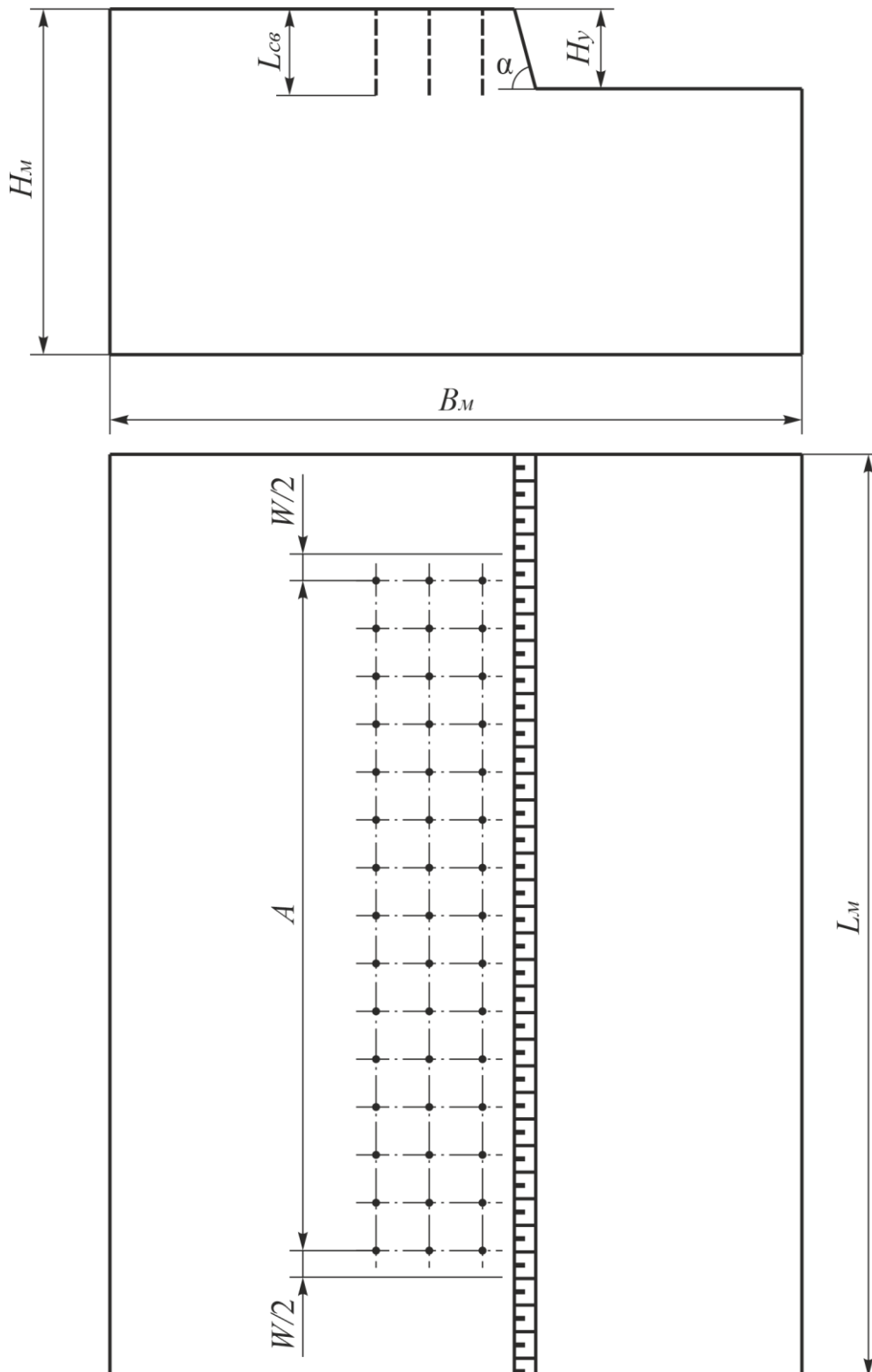


Рис. 9.2 – Розрахункова схема параметрів геометрії моделі та розташування свердловин для відбивання уступу руди

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії вибуху на масив гірських порід, межа міцності масиву руди визначається за формулою (5.2). При відбиванні уступу руди у формулі (5.2) коефіцієнт ущільнення руди під дією гірського тиску буде дорівнювати $K_y = 1,0$.

Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву руди.

Так, як вибух уявляє собою удар, а потім дію тиску продуктів вибуху, то для імітації цього процесу потрібно задати тиск, який направлений перпендикулярно граням та вибою у всіх свердловинах з урахуванням динамічного коефіцієнту. Величина тиску продуктів вибуху для чисельного моделювання підривання свердловин при відбивання уступу руди визначається за формулою (5.4). Характеристику ВР подано у табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Характеристика ВР

ВР	Щільність ВР, кг/м ³	Швидкість детонації, м/с
Грамоніт 79/21	1000	3600
Україніт-ПП-2Б	900	5200

Процес проведення статичного аналізу у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу моделі.
3. За допомогою інструменту **Лінія** із базової точки у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту геометрії моделі та будуємо уступ (рис. 9.3).

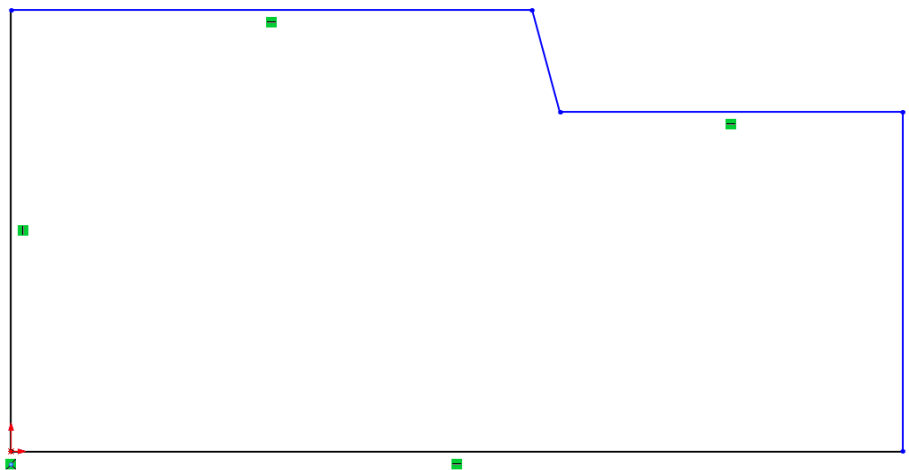


Рис. 9.3 – Ескіз геометрії масиву моделі

4. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на розраховану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 9.4).

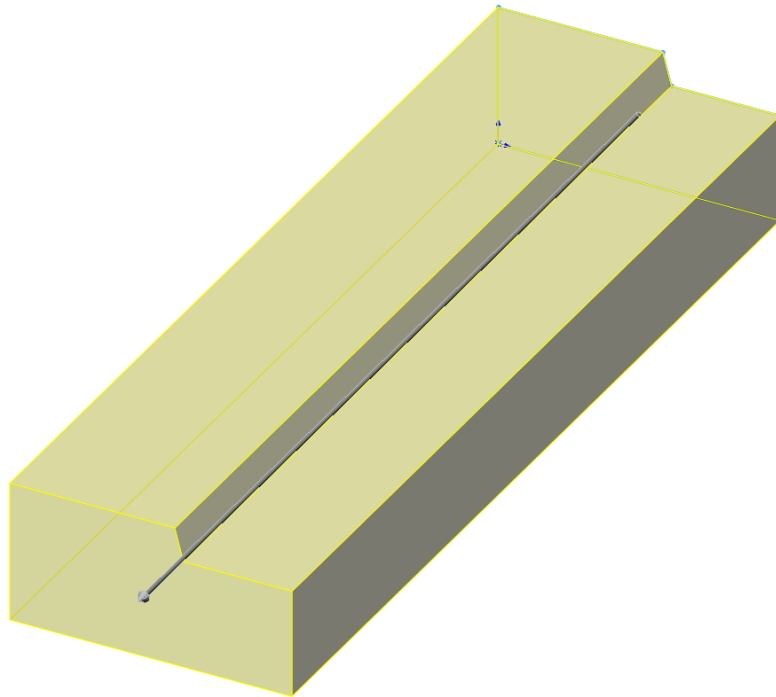


Рис. 9.4 – Витягнення профілю моделі уступу руди

5. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив руди з уступом за розрахованими параметрами (рис. 9.5).

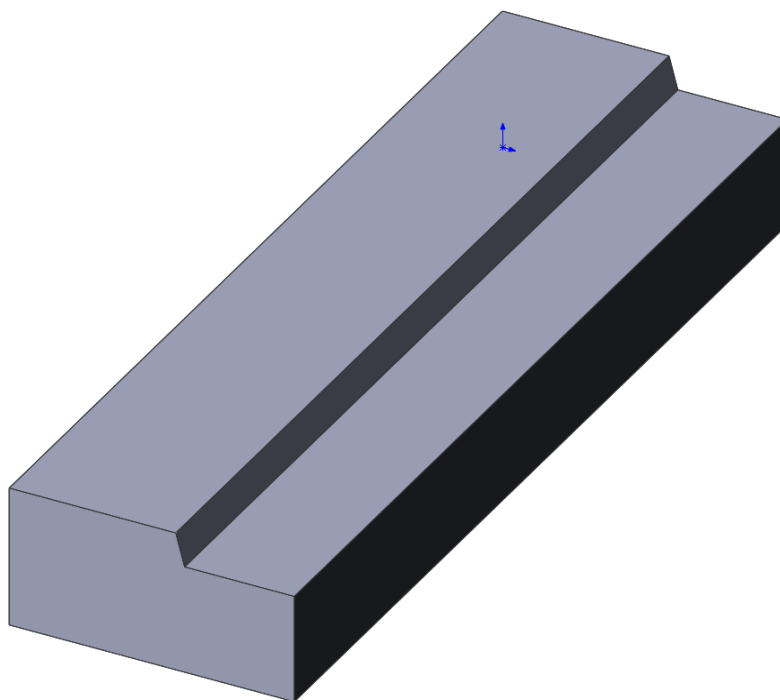


Рис. 9.5 – Модель однорідного масиву руди з уступом

6. Натиснувши лівою клавiшою миші обраємо необхідну грань деталі де буде розташовано свердловини (рис. 9.6). Потім обираємо вкладку **Ескіз**.

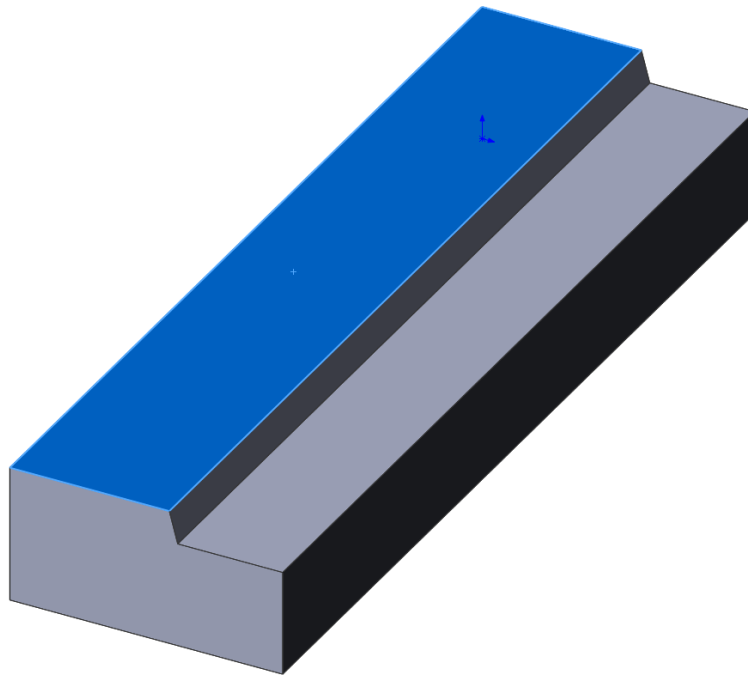


Рис. 9.6 – Виділена грань деталі де буде розташовано свердловини

7. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** та **Коло** за заданими параметрами викреслюють контури свердловин (рис. 9.7).

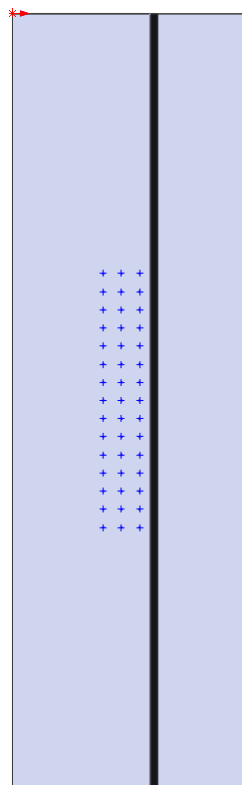


Рис. 9.7 – Розташування контурів свердловин на уступі в масиві моделі

8. Після побудови контурів свердловин, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює довжині свердловини $L_{св}$, роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 9.8).

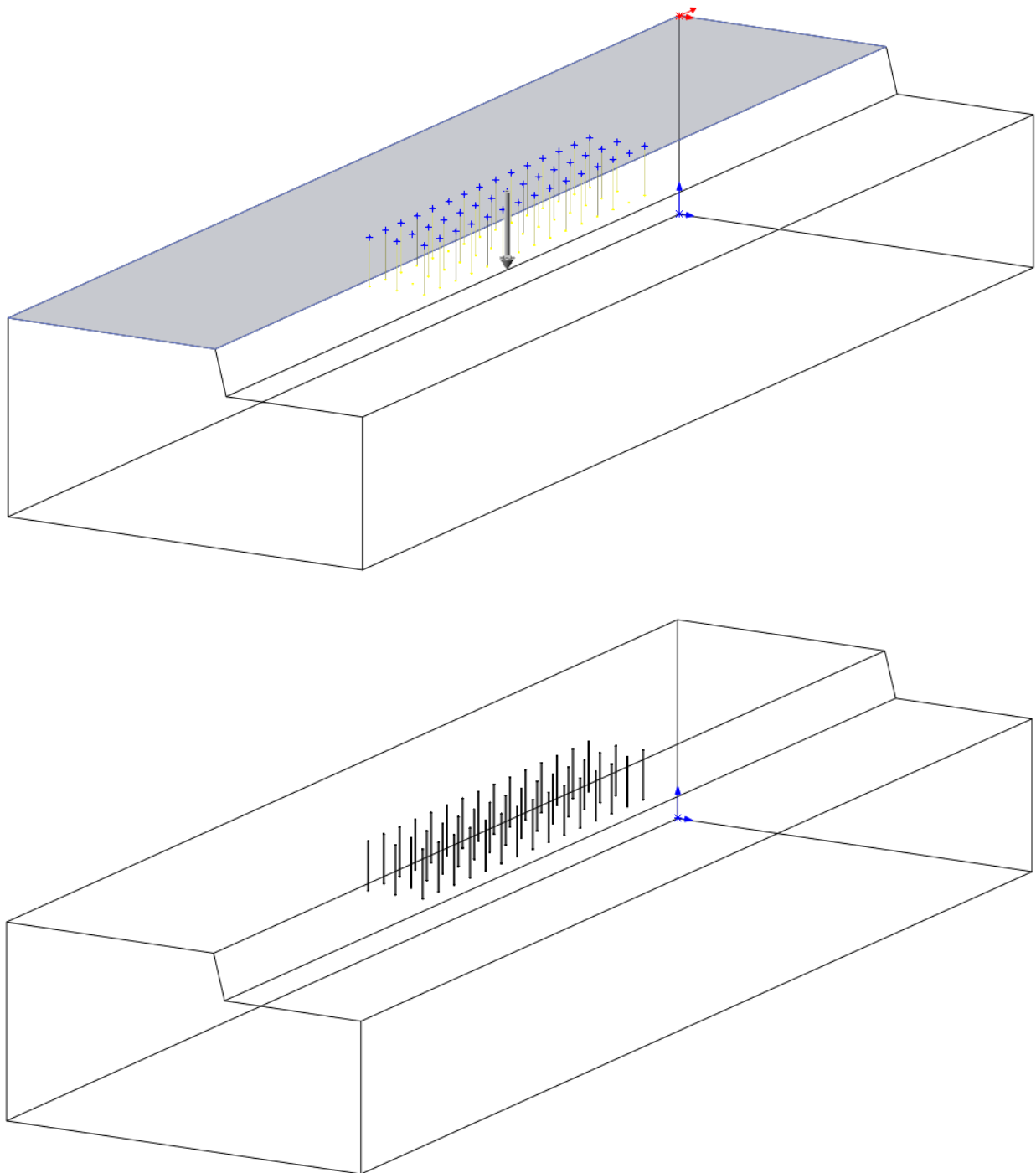


Рис. 9.8 – Викреслені свердловини у масиві моделі

9. Далі натискають на вкладку **Simulation** і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою кlawішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-

механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**.

Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішею миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на всі бокові та нижні грані моделі і натискають лівою клавішею миші. Після обрання граней натискають **ОК**.

Для встановлення тиску продуктів вибуху у свердловинах наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім у кожній свердловині, натискають лівою клавішею миші на її вибій та стінки. Далі натискають **ОК**.

Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішею миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Після чого модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 9.9).

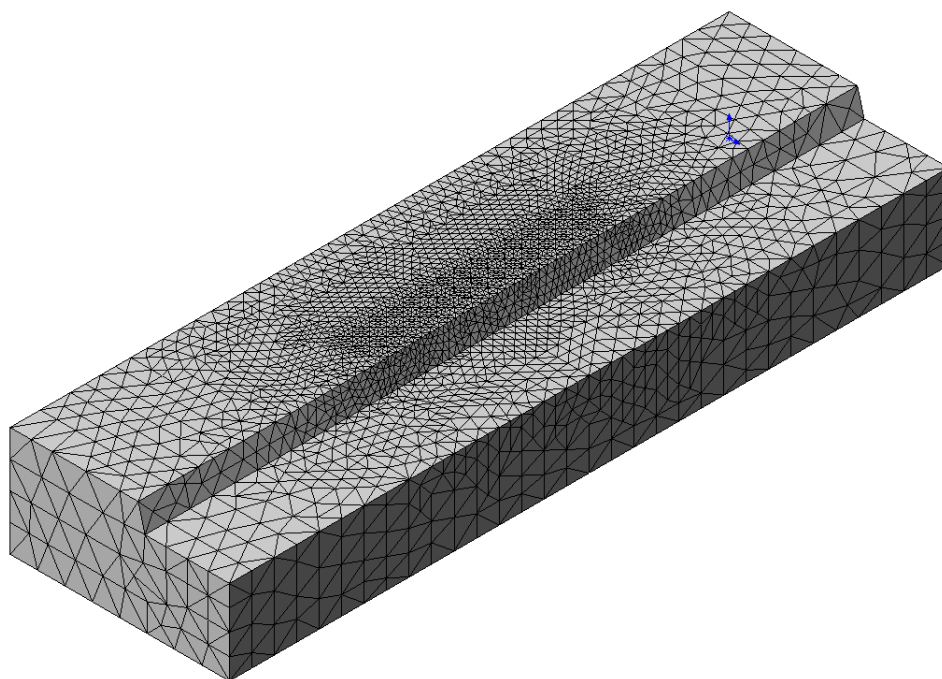


Рис. 9.9 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

10. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являться **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву руди при висаджені уступу руди необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на Результат та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На

Кроці 2 – встановлюють одиницю виміру МПа та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони непружних деформацій, що виникнуть в масиві під дією вибуху при відбиванні уступу руди подано на рис. 9.10.

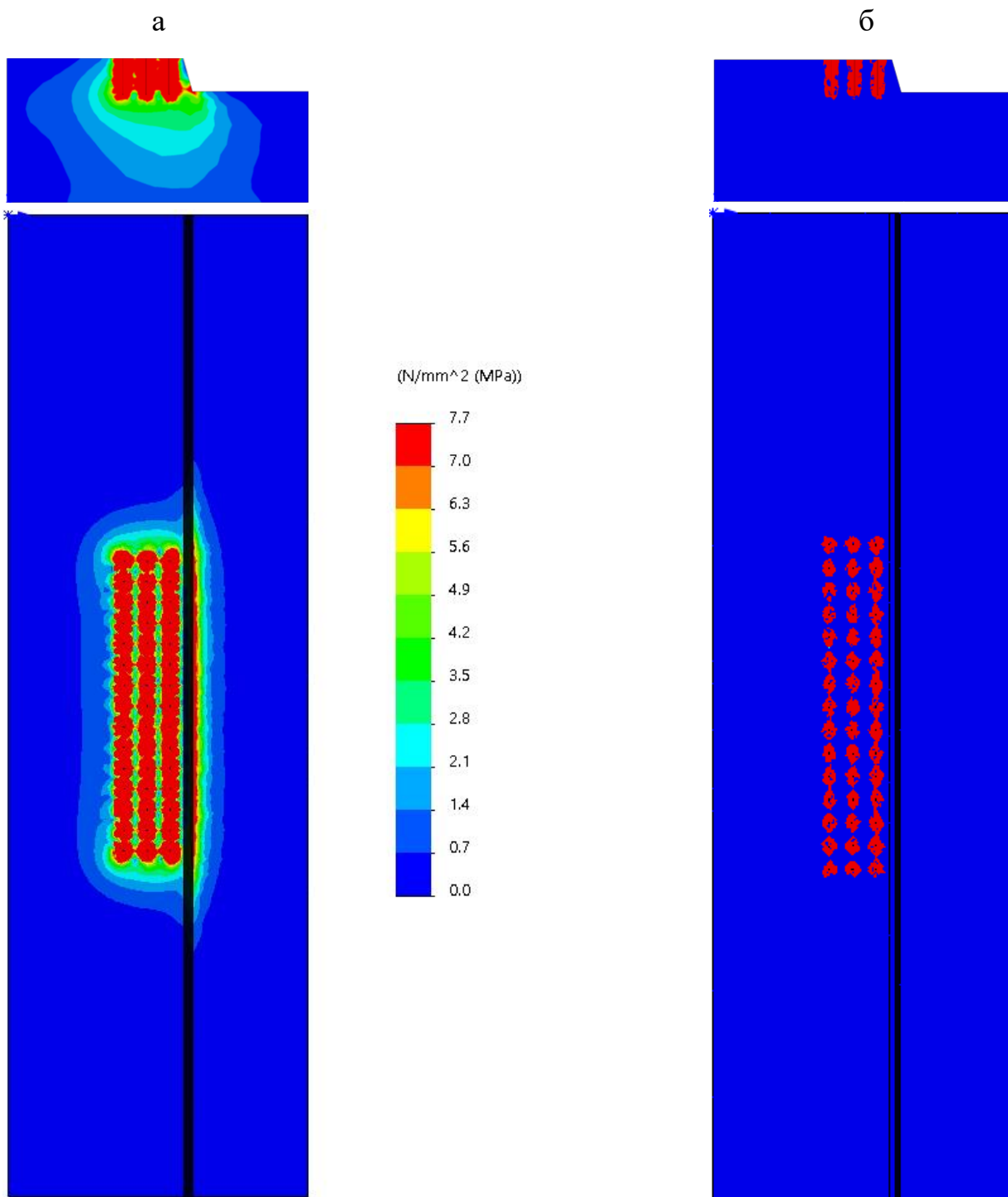


Рис. 9.10 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що виникнуть в масиві під дією вибуху при відбиванні уступу руди

9.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 9.2, для чисельного моделювання буропідривних робіт для відбивання уступу руди необхідно розрахувати параметри і побудувати геометрію моделі, визначити фізико-механічні властивості матеріалу моделі та тиск продуктів вибуху.

Таблиця 9.2 – Вихідні дані для чисельного моделювання буропідривних робіт при відбиванні масиву руди віялом свердловин

Варіант №	Висота уступу, H_y , м	Кут укосу уступу, α , град	Довжина фронту вибою, A , м	Межа міцності руди на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт структури породи, $K_{сп}$	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Щільність порід, γ , кг/м ³	ВР	ЛНО, W , м	Діаметр свердловини, d , м
0	12	75	108,8	80	0,25	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
1	13	80	124,8	100	0,24	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
2	14	75	108,8	80	0,23	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
3	15	80	124,8	100	0,22	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
4	16	75	108,8	80	0,26	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
5	12	80	124,8	100	0,25	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
6	13	75	108,8	80	0,24	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
7	14	80	124,8	100	0,23	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
8	15	75	108,8	80	0,22	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
9	16	80	124,8	100	0,26	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
10	12	75	108,8	80	0,25	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
11	13	80	124,8	100	0,24	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
12	14	75	108,8	80	0,23	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
13	15	80	124,8	100	0,22	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
14	16	75	108,8	80	0,26	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
15	12	80	124,8	100	0,25	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
16	13	75	108,8	80	0,24	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
17	14	80	124,8	100	0,23	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
18	15	75	108,8	80	0,22	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25
19	16	80	124,8	100	0,26	1,0	0,8	3500	Г	6,0	0,32
20	12	75	108,8	80	0,25	1,1	0,8	3500	У	8,0	0,25

Примітка: Г – Грамоніт 79/21; У – наливна емульсійна ВР Україніт-ПП-2.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

9.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудуємо модель масиву руди для чисельного моделювання буропідривних робіт при відбиванні уступу руди свердловинами за варіантом №0.

Визначимо довжину перебура за формулою (9.1)

$$l_n = (0,1 \div 0,2) \cdot W = 0,12 \cdot 8 = 1 \text{ м.}$$

Визначимо довжину свердловини за формулою (9.2)

$$L_{св} = H_y + l_n = H_y + l_n = 12 + 1 = 13 \text{ м.}$$

Визначимо відстань між свердловинами у ряді за формулою (9.3)

$$a = 0,9 \cdot W = 0,9 \cdot 8 = 7,2 \text{ м.}$$

Визначимо загальну кількість свердловин у ряді за формулою (9.4)

$$N_{св} = \frac{A - W}{a} + 1 = \frac{108,8 - 8}{7,2} + 1 = 15 \text{ шт.}$$

Визначимо відстань між рядами свердловин за формулою (9.5)

$$b = (0,9 \div 1,0) \cdot W = 1 \cdot 8 = 8 \text{ м.}$$

Визначимо площу поперечного перерізу сітки свердловин за довжиною блока за формулою (9.6)

$$S_{д.сб.} = (W + a \cdot (N_{св} - 1)) \cdot (W + b \cdot (n_p - 1)) = (8 + 7,2 \cdot 14) \cdot (8 + 8 \cdot 2) = 2611,2 \text{ м}^2.$$

Визначимо площа поперечного перерізу сітки свердловин за шириною блока за формулою (9.7)

$$S_{ш.сб.} = (W + b \cdot (n_p - 1)) \cdot L_{св} = (8 + 8 \cdot (3 - 1)) \cdot 13 = 312 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр за довжиною блока за формулою (9.8)

$$D_{д.сб.} = \sqrt{4 \cdot S_{д.сб.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 2611,2 / 3,14} = 58 \text{ м.}$$

Визначимо приведений діаметр за шириною блока за формулою

$$D_{ш.сб.} = \sqrt{4 \cdot S_{ш.сб.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 312 / 3,14} = 20 \text{ м.}$$

Визначимо ширину моделі за формулою (9.10)

$$B_m = (W + b \cdot (n_p - 1)) + 4 \cdot D_{ш.сб.} = (8 + 8 \cdot (3 - 1)) + 4 \cdot 20 = 104 \text{ м.}$$

Визначимо висоту моделі за формулою (9.11)

$$H_m = 5 \cdot L_{св} = 4 \cdot 13 = 52 \text{ м.}$$

Визначимо довжину моделі за формулою (9.12)

$$L_m = (W + a \cdot (N_{св} - 1)) + 4 \cdot D_{д.сб.} = (8 + 7,2 \cdot 14) + 4 \cdot 58 = 341 \text{ м.}$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = 104$ м; $H_m = 52$ м; $L_m = 341$ м.

За прийнятими параметрами будуємо геометрію моделі та розташування паралельних свердловин для відбивання уступу руди згідно розрахункової

схеми, що подано на рис. 9.2. Побудована геометрія моделі за прийнятими параметрами подано на рис. 9.16.

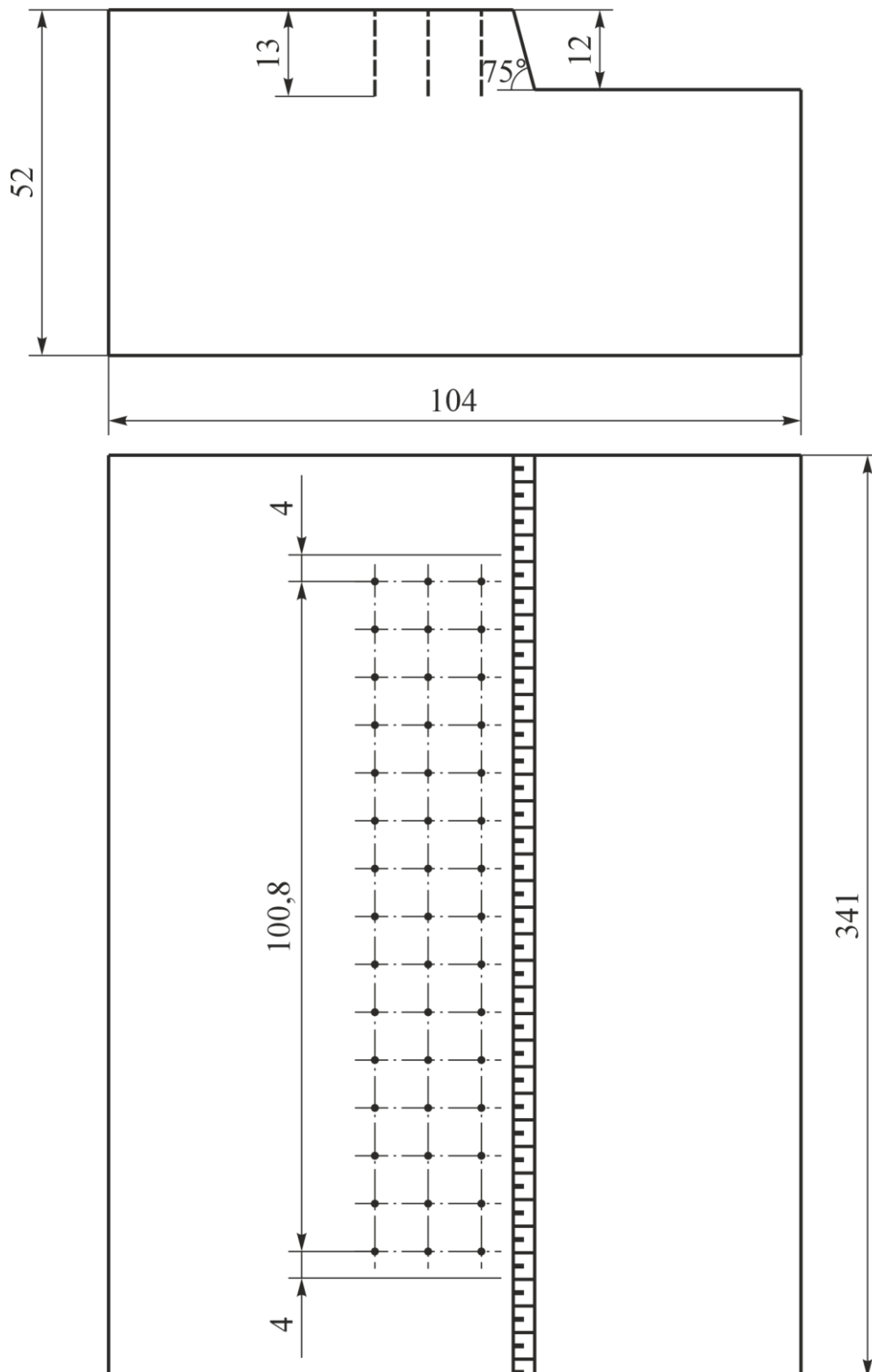


Рис. 9.16 – Геометрія моделі уступу руди за прийнятими параметрами

Визначимо межу міцності масиву руди за формулою (5.2)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y = 80 \cdot 1,1 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 70 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву руди на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^m = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^m = 0,1 \cdot 70 = 7 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{7}{0,0001} = 70000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{70000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 28000 \text{ МПа.}$$

Визначимо величину тиску у свердловинах за формулою (5.4)

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{dz} \cdot K_d}{8} = \frac{900 \cdot 5200^2 \cdot 2}{8} = 6084000000 \text{ Па.}$$

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання буропідричних робіт для відбивання уступу руди висотою 12 м, параметри геометрії моделі повинні бути не менше: ширина 104 м, висота – 52 м і довжина – 341 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву руди на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 70$ МПа, на розтягання – $\sigma_p = 7$ МПа, модуль пружності $E = 70000$ МПа, модуль зсуву $G = 28000$ МПа, величина тиску продуктів вибуху $P_m = 6084$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. При якій висоті уступу найбільш доцільно застосовувати метод свердловинних зарядів?
2. Як розраховується довжина свердловини для відбивання уступу?
3. Які показники впливають на параметри геометрії моделі при чисельному моделюванні буропідричних робіт для відбивання уступу руди?
4. Перелічите, які параметри необхідно розрахувати для чисельного моделювання буропідричних робіт для відбивання уступу руди у модулі SolidWorks Simulation?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 10 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ ПОРІД НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ БЕЗ КРІПЛЕННЯ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву порід навколо гірничої виробки без кріплення у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове

моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

10.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Гірський тиск – тиск гірських порід уздовж вертикалі, під яким знаходяться гірські породи в надрах Землі на певній глибині і який зумовлюється силою ваги вищезалеглих порід та тектонічними зусиллями. Гірський тиск чиниться на стінки й кріплення гірничих виробок.

Напружено-деформований стан масиву гірських порід навколо гірничої виробки це сукупність внутрішніх напружень і деформацій, що виникають під дією гірського тиску. Напружено-деформований стан визначається за допомогою розрахункових та експериментальних методів, які відображають розподіл напружень, деформацій та переміщень у масиві порід навколо гірничої виробки.

Перед створенням деталі у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі масиву навколо вибою гірничої виробки. Параметри геометрії моделі однорідного масиву розраховуються у такій самій послідовності як подано у практичній роботі №1 за формулами (1.1)–(1.7).

Параметри геометрії моделі (ширина, висота та довжина) приймаємо за максимальною розрахованою шириною або висотою моделі масиву.

Після розрахунку параметрів будуємо геометрію моделі масиву з гірничою виробкою згідно розрахункової схеми поданої на рис. 10.1.

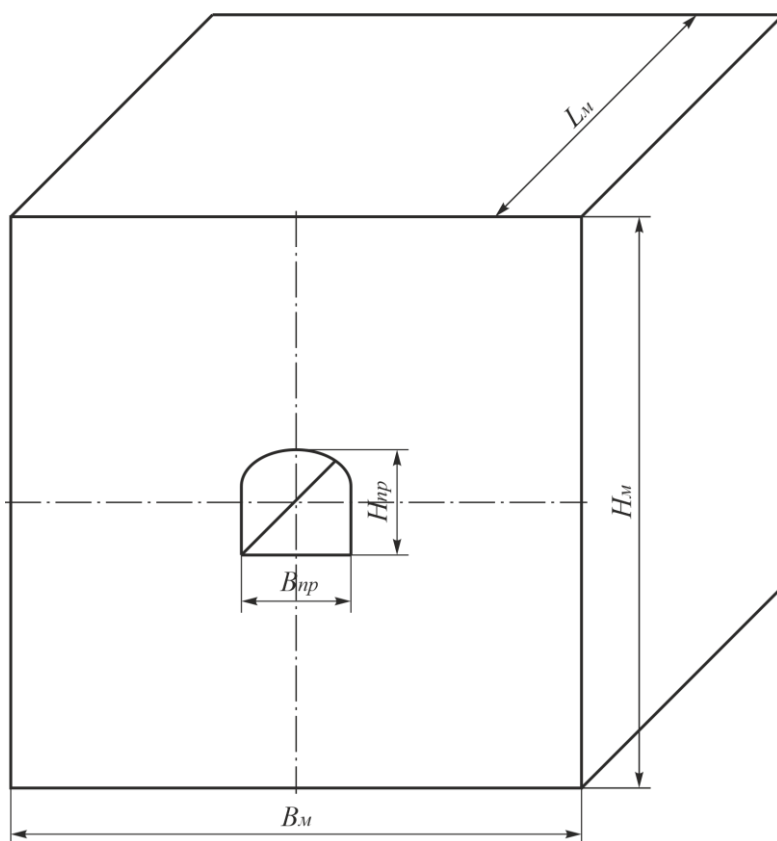


Рис. 10.1 – Розрахункова схема геометрії моделі однорідного масиву з гірничою виробкою

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії гірського тиску, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c, \text{ МПа}, \quad (10.1)$$

де σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, МПа; K_c – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, що дорівнює 0,2–0,9.

Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву гірських порід.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки величина гірського тиску визначається за формулою

$$P_m = 10 \cdot \gamma \cdot H, \text{ Па}, \quad (10.2)$$

де γ – середня щільність гірських порід, що дорівнює $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$; H – глибина розташування гірничої виробки, м.

Процес проведення статичного аналізу напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення першої бобишки.
3. Далі за допомогою інструмента **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо квадрат. Потім у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді квадрату (рис. 10.2).

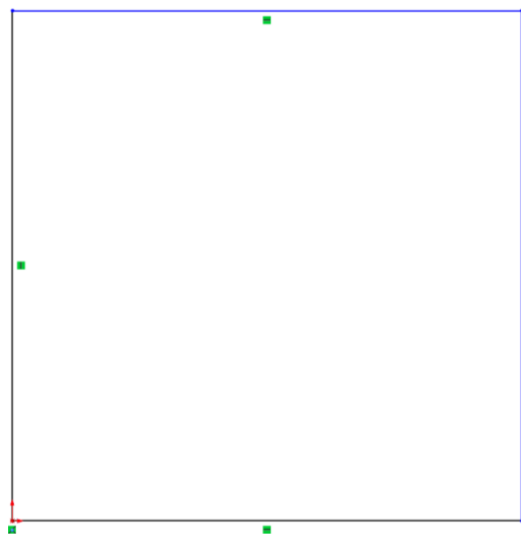


Рис. 10.2 – Ескіз моделі масиву порід у вигляді квадрату

4. У геометричному центрі **Квадрату**, у масштабі 1:1 викреслюємо контур гірничої виробки (рис. 10.3).

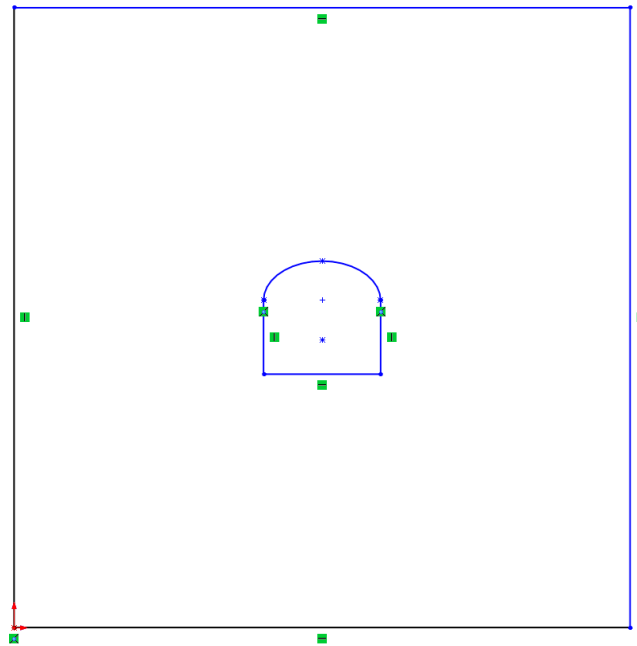


Рис. 10.3 – Ескіз моделі масиву порід з гірничою виробкою

5. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на задану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 10.4).

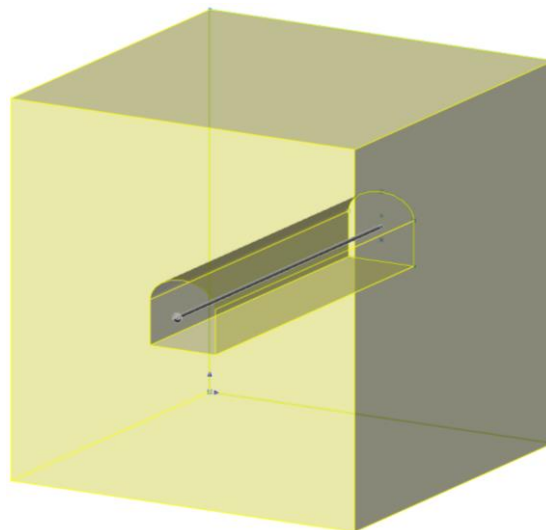


Рис. 10.4 – Витягнення профілю моделі однорідного масиву гірських порід з гірничою виробкою

6. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив гірських порід з гірничою виробкою (рис. 10.5).

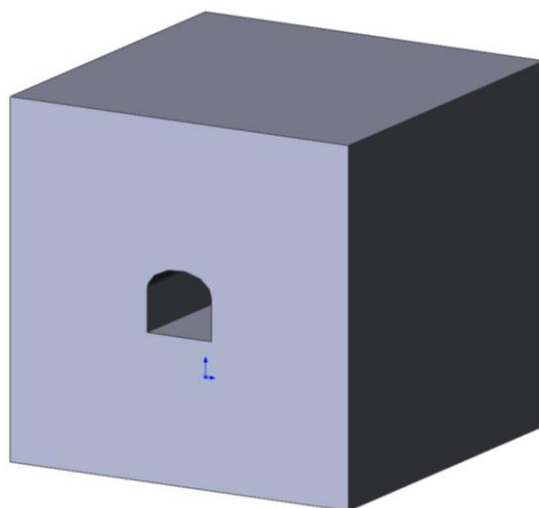


Рис. 10.5 – Готова модель однорідного масиву гірських порід з гірничою виробкою

7. Далі натискають на вкладку Simulation і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**. Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на нижню грань моделі та натискають на ліву клавішу миші. Далі натискають **ОК**. Для встановлення гірського тиску наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім натисканням лівої клавіши миші вказують грані де діє гірський тиск. Потім натискають **ОК**. Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Далі модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 10.6).

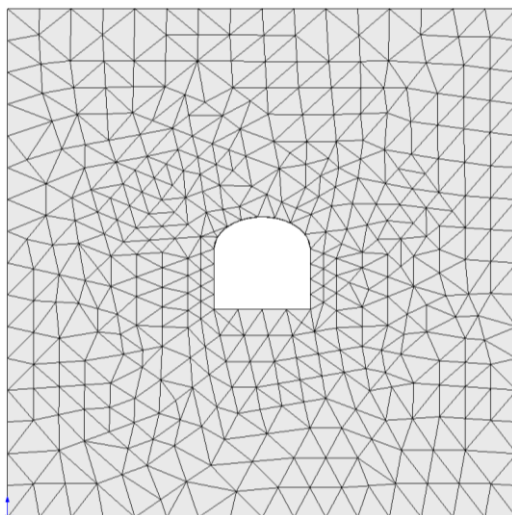


Рис. 10.6 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

8. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являється **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву гірських порід навколо гірничої виробки необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На **Кроці 2** – встановлюють одиницю виміру МПа та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони непружних деформацій, що утворюються в масиві гірських порід навколо гірничої виробки під дією гірського тиску подано на рис. 10.7.

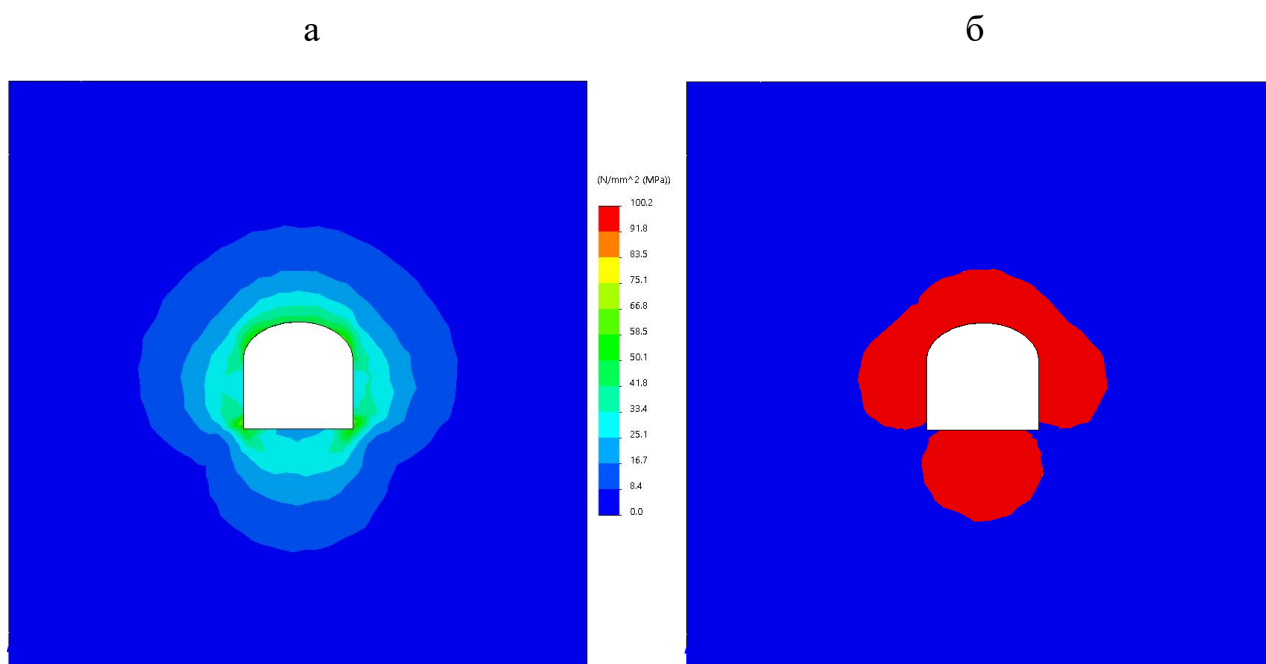


Рис. 10.7 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що утворюються в масиві гірських порід навколо гірничої виробки під дією гірського тиску

10.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 10.1, розрахувати фізико-механічні властивості масиву гірських порід, величину гірського тиску та графічно побудувати модель однорідного масиву з гірничою виробкою.

Таблиця 10.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі однорідного масиву з гірничою виробкою

Варіант №	Форма поперечного перерізу виробки	Ширина виробки у проходці, $B_{пр}$, м	Висота виробки у проходці, $H_{пр}$, м	Глибина розташування гірничої виробки, H , м	Межа міцності порід на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Коефіцієнт Пуассона, μ	Щільність порід, γ , кг/м ³
0	П-С	3,8	3,65	1000	100	0,8	0,25	2850
1	А	3,0	3,0	950	70	0,9	0,24	3000
2	П-С	3,2	3,2	900	120	0,6	0,23	3150
3	А	3,3	3,2	850	140	0,8	0,22	3300
4	П-С	3,4	3,3	800	80	0,9	0,25	2850
5	А	3,5	3,4	1000	110	0,6	0,24	3000
6	П-С	3,6	3,4	950	90	0,8	0,23	3150
7	А	3,5	3,5	900	70	0,9	0,22	3300
8	П-С	3,8	3,6	850	120	0,6	0,25	2850
9	А	3,7	3,5	800	140	0,8	0,24	3000
10	П-С	4,0	3,8	1000	80	0,9	0,23	3150
11	А	3,8	3,6	950	110	0,6	0,22	3300
12	П-С	4,3	3,6	900	90	0,8	0,25	2850
13	А	4,0	3,8	850	70	0,9	0,24	3000
14	П-С	4,5	4,5	800	120	0,6	0,23	3150
15	А	4,3	3,9	1000	140	0,8	0,22	3300
16	П-С	4,7	3,8	950	80	0,9	0,25	2850
17	А	4,5	4,2	900	110	0,6	0,24	3000
18	П-С	5,0	5,0	850	90	0,8	0,23	3150
19	А	5,0	4,0	800	70	0,9	0,22	3300
20	П-С	5,5	5,5	1000	120	0,6	0,25	2850

Примітка: П-С – прямокутно-склепінчаста форма поперечного перерізу гірничої виробки; А – аркова форма поперечного перерізу гірничої виробки.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

10.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо фізико-механічні властивості масиву гірських порід, величину гірського тиску та графічно побудуємо модель однорідного масиву з гірничою виробкою за варіантом №0.

Визначимо радіуси осьової та бокових дуг для виробок прямокутно-склепінчастої форми за формулами (1.1) і (1.2)

$$R = 0,692 \cdot B_{np} = 0,692 \cdot 3,8 = 2,6296 \text{ м};$$

$$r = 0,262 \cdot B_{np} = 0,262 \cdot 3,8 = 0,9956 \text{ м}.$$

Визначимо площу поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої форми у проходці за формулою (1.3)

$$S_{np} = B_{np} \cdot \left(H_{np} - \frac{B_{np}}{3} + 0,26 \cdot B_{np} \right) = 3,8 \cdot \left(3,65 - \frac{3,8}{3} + 0,26 \cdot 3,8 \right) = 12,8 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр виробки визначається за формулою (1.5)

$$D_e = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 12,8 / 3,14} = 4 \text{ м}.$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (1.6)

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_e = 3,8 + 4 \cdot 4 = 19,8 \text{ м}.$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (1.7)

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_e = 3,65 + 4 \cdot 4 = 19,65 \text{ м}.$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = H_m = L_m = 20 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:100 або 1:200 будуємо геометрію моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 10.1. Побудована геометрія моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами подана на рис. 10.8.

Визначимо межу міцності масиву гірських порід за формулою (10.1)

$$\sigma_{cm}^m = \sigma_{cm} \cdot K_c = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ МПа}.$$

Визначимо межу міцності масиву гірських порід на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^m = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^m = 0,1 \cdot 80 = 8 \text{ МПа}.$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{8}{0,0001} = 80000 \text{ МПа}.$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{80000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 32000 \text{ МПа}.$$

Визначимо величину гірського тиску за формулою (10.2)

$$P_m = 10 \cdot \gamma \cdot H = 10 \cdot 2500 \cdot 1000 = 25000000 \text{ Па}.$$

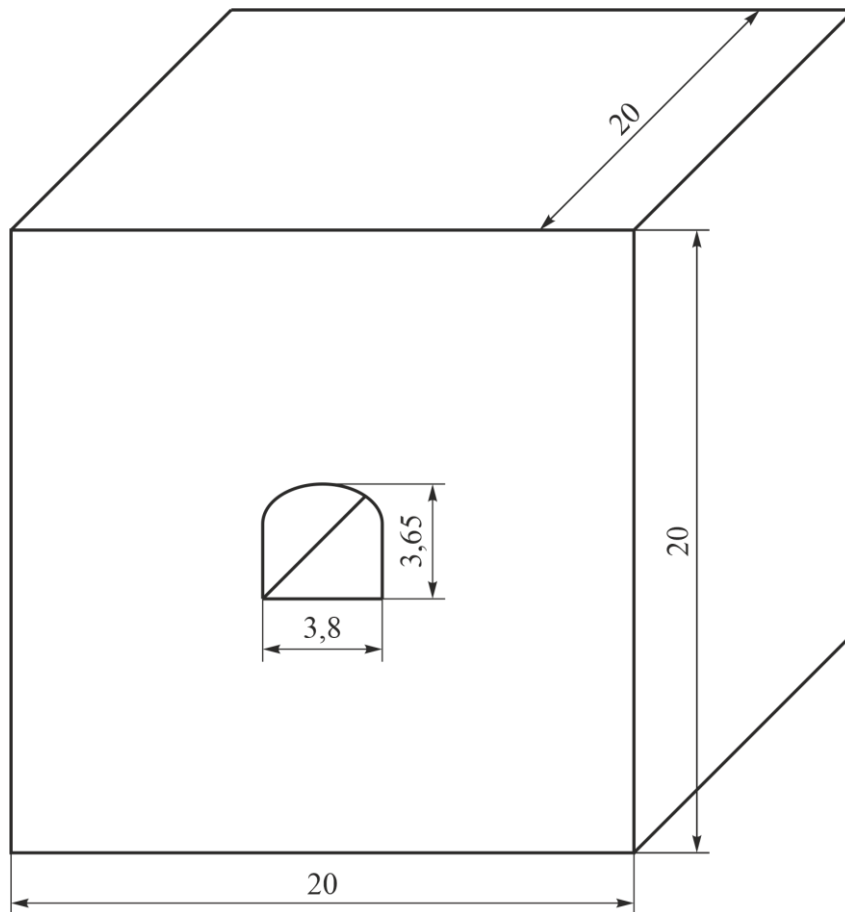


Рис. 10.8 – Геометрія моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами у масштабі 1:200

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану однорідного масиву гірських порід навколо гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми поперечного перерізу, що має розміри у проходці 3,8 м × 3,65 м, параметри моделі повинні бути не менше 20 м × 20 м × 20 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву гірських порід на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 80$ МПа, на розтягання – $\sigma_p = 8$ МПа, модуль пружності $E = 80000$ МПа, модуль зсуву $G = 32000$ МПа, величина гірського тиску $P_m = 25$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення терміну «Гірський тиск»?
2. Що розуміють під терміном напружено-деформований стан масиву гірських порід навколо гірничої виробки?
3. Які показники впливають на параметри геометрії моделі при чисельному моделюванні напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки?
4. Перелічите, які параметри необхідно розрахувати для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки у модулі SolidWorks Simulation?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 11 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву порід навколо гірничої виробки у модулі SolidWorks Simulation для визначення параметрів анкерного кріплення.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розробляти робочі проекти та креслення для технічних завдань і пропозицій щодо розробки рудних і нерудних родовищ корисних копалин; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

11.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Гірниче кріплення – штучна споруда, що зводиться у підземних гірничих виробках з метою запобігання обваленню оточуючого масиву гірських порід і збереження необхідних розмірів поперечного перерізу виробок.

Анкерне кріплення – це система закріплених у шпурах анкерів (штанг), що розташовані у масиві гірських порід за контуром виробки та призначених спільно з підтримуючими елементами (підхватами або опорними плитками) зміцнювати масив. Найбільшого поширення набули наступні анкерні кріплення: замкові (клинощілинні), залізобетонні, сталеполімерні, анкера системи «split-set» (трубчасті).

Замкові (клинощілинні) анкери виготовляють з круглої сталі діаметром 22–25 мм та довжиною 1,5–2,5 м. У замковій частині анкера згідно його діаметру розташована щілина шириною 2–4 мм і довжиною 150–200 мм, у яку при установці анкера вводиться клин довжиною 120–180 мм і товщиною 25–35 мм. Щілинний кінець і клин складають замок анкера. З іншого боку анкера нарізана різьба під гайку.

Залізобетонні анкери утворюються у результаті заповнення бетоном або цементним розчином шпуру, у який до або після цього вводять сталеву арматуру. Кінець арматури може бути з різьбою під гайку, що виступає у виробку та слугує для закріплення на ньому опорної плитки або підхоплення.

Сталеполімерні анкери складаються зі сталеві штанги з кільцем-ущільнювачем. На кінці штанги, що знаходиться у контурі виробки, також є різьба для гайки й опорна плитка або шайба. Глибинний кінець штанги закріплюється у шпурі за допомогою полімербетону, який складається зі смоли, загущувача, прискорювача твердіння та дрібного наповнювача. Для подачі полімерної суміші до вибою шпуру застосовують скляні або поліетиленові ампули.

Трубчастий анкер фрикційного зачеплення системи «split-set» – це армований елемент системи – тонкостінна сталева трубка, яку забивають у шпур, що має менший діаметр.

Довжина анкерів приймається 1,6–2,4 м, які розташовують за сіткою, що визначена паспортом кріплення. У масивах великоблочної та середньоблочної структури – 1 м × 1 м, дрібноблочної, а також у тонкошаруватих породах при проведенні гірничої виробки за простяганням – 0,75 м × 0,75 м.

Для визначення параметрів анкерного кріплення гірничої виробки необхідно встановити величину зони непружних деформацій у покрівлі гірничої виробки. Перед створенням деталі у програмі SolidWorks, необхідно розрахувати основні параметри геометрії моделі масиву навколо вибою гірничої виробки. Параметри геометрії моделі однорідного масиву з гірничою виробкою прямокутно-склепінчастої форми розраховуються у такій самій послідовності як подано у практичній роботі №1 за формулами (1.1)–(1.3) та (1.5)–(1.7).

Параметри геометрії моделі (ширина, висота та довжина) приймаємо за максимальною розрахованою шириною або висотою моделі масиву.

Після розрахунку параметрів будують геометрію моделі масиву з гірничою виробкою згідно розрахункової схеми поданої на рис. 11.1.

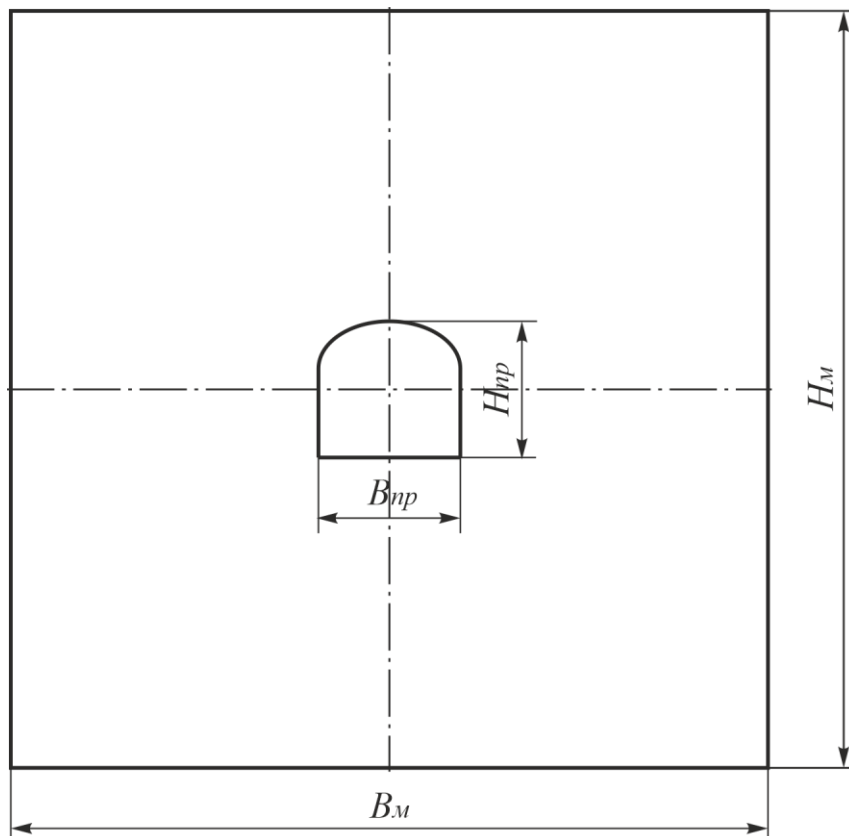


Рис. 11.1 – Розрахункова схема геометрії моделі однорідного масиву з гірничою виробкою прямокутно-склепінчастої форми

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід встановлюється ізотропний матеріал. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалу моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії гірського тиску, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою (10.1). Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалу моделі розраховуються за межею міцності масиву гірських порід. Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки величина гірського тиску визначається за формулою (10.2).

У процесі складання паспорта кріплення, на щільність розташування анкерів впливає їх конструкція, що має свою несучу здатність. Вибір типу анкера, залежно від межі міцності гірських порід на стискання, подано в табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Типи анкерів та їх несуча здатність

Анкери	Залізо-бетонні	Замкові (клино-щілинні)	З розпірним замком (трубчастий)	Сталево-полімерні
Межа міцності гірських порід на стискання, σ_{cm} , МПа	> 20	60–100	> 40	Будь-яка
Несуча здатність анкера, P_a , кН	100	40–80	60–120	140 (середня)

Розрахунок параметрів анкерного кріплення для виробок прямокутно-склепінчастої форми виконують у такій послідовності.

Довжина анкера визначається за формулою

$$l_a = U + l_z + l_n, \text{ м}, \quad (11.1)$$

Де U – величина зони непружних деформацій (руйнування масиву порід) у покрівлі виробки, м; l_z – величина заглиблення анкера в стійку зону масиву гірських порід, становить 0,3–0,5 м; l_n – довжина частини анкера, що виступає зі шпур, яка залежить від його конструкції та товщини опорно-підтримуючих елементів, становить 0,05 – 0,2 м.

Щільність встановлення анкерів визначається за формулою

$$n_a = \frac{P_\epsilon \cdot U \cdot \gamma \cdot k_n}{P_a}, \text{ шт.}, \quad (11.2)$$

де γ – об’ємна вага гірських порід в межах зони можливого обвалення, кН/м³; k_n – коефіцієнт переважання, що дорівнює 1,2; P_a – несуча здатність анкера, кН; P_ϵ – активний периметр виробки з коробовим склепінням

$$P_\epsilon = 3,18 + 1,33 \cdot B_{np}, \text{ м}, \quad (11.3)$$

де B_{np} – ширина гірничої виробки в проходці, м.

Відстань між анкерами визначається за формулою

$$a_a = \sqrt{\frac{P_a}{U \cdot \gamma \cdot k_n}}, \text{ м.} \quad (11.4)$$

Після визначення основних параметрів анкерного кріплення виконують побудову паспорта кріплення гірничої виробки відповідно до розрахункової схеми, що подана на рис. 11.2.

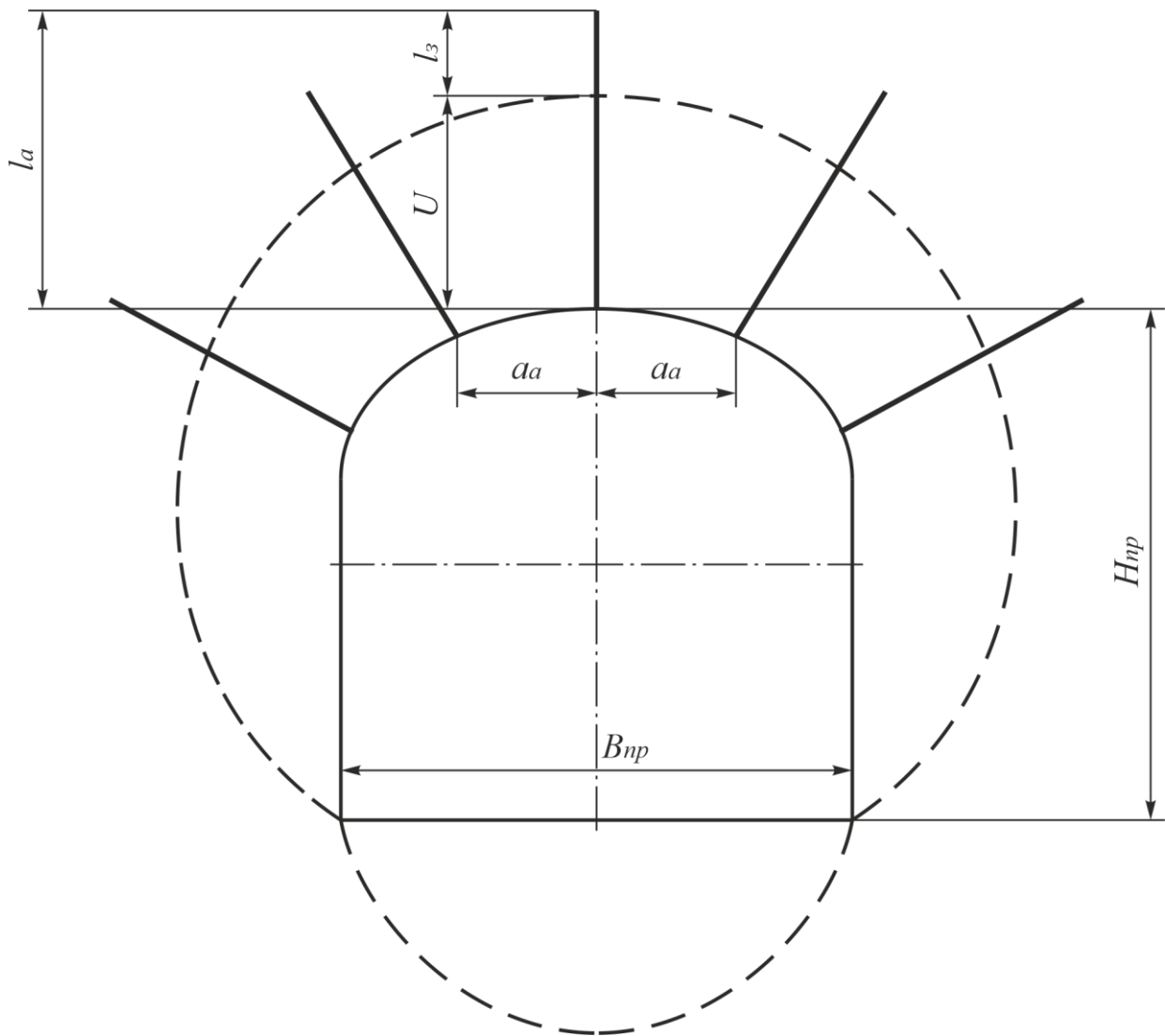


Рис. 11.2 – Розрахункова схема параметрів анкерного кріплення гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми

Так як дії напружень спрямовані в геометричний центр виробки, буріння шпурів і відповідно установка анкерів здійснюється від центру виробки, під кутом до вертикальної осі.

Процес проведення статичного аналізу напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.

2. Обираємо площину ескізу для створення першої бобишки.

3. Далі за допомогою інструмента **Прямокутник** із базової точки, наближено, будуємо квадрат. Потім у масштабі 1:1 задаємо розраховані ширину та висоту моделі й отримуємо ескіз майбутнього масиву у вигляді квадрату (рис. 11.3).

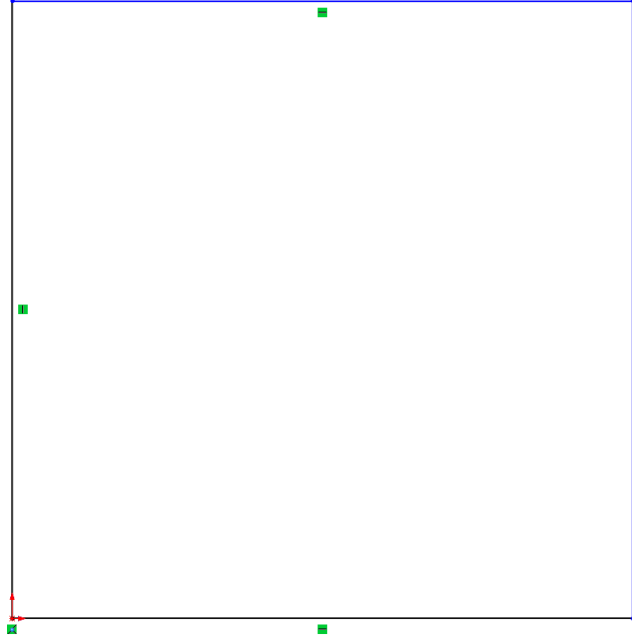


Рис. 11.3 – Ескіз моделі масиву порід у вигляді квадрату

4. У геометричному центрі **Квадрату**, у масштабі 1:1 викреслюємо контур гірничої виробки (рис. 11.4).

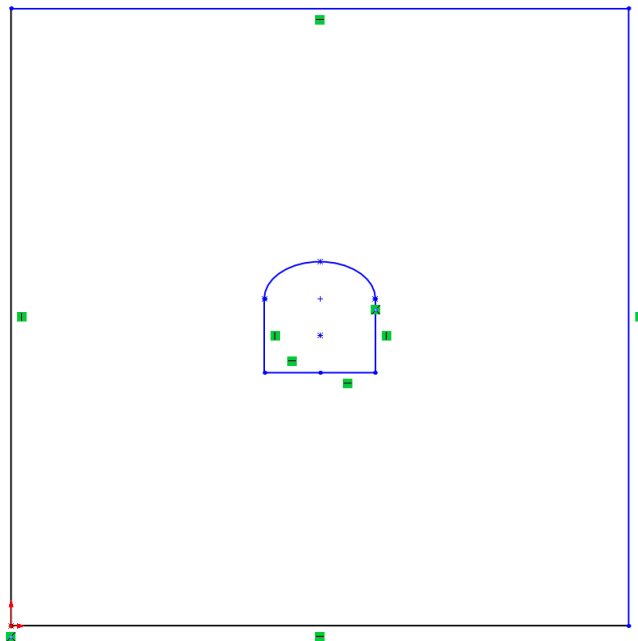


Рис. 11.4 – Ескіз моделі масиву порід з гірничою виробкою

5. Інструментом **Витягнута Бобишка** витягуємо даний профіль на задану довжину у потрібному напрямі, використовуючи для цього вікно **Менеджера властивостей** (рис. 11.5).

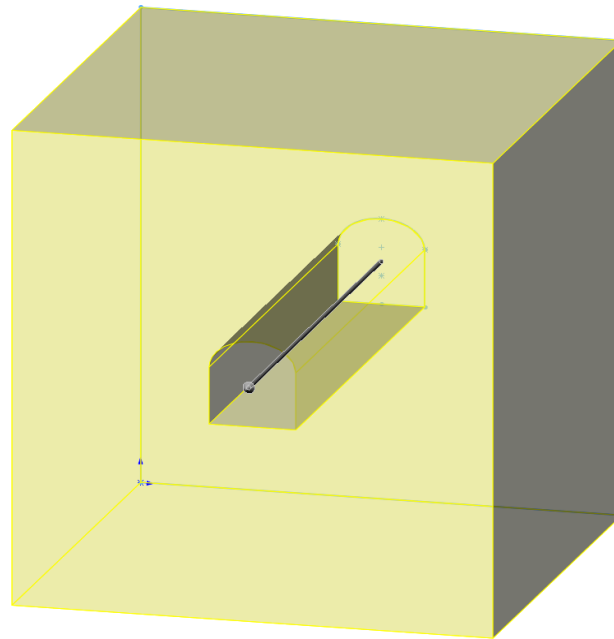


Рис. 11.5 – Витягнення профілю моделі однорідного масиву гірських порід з гірничою виробкою

6. Натискаємо кнопку **ОК** і отримуємо готовий однорідний масив гірських порід з гірничою виробкою прямокутно-склепінчастої форми (рис. 11.6).

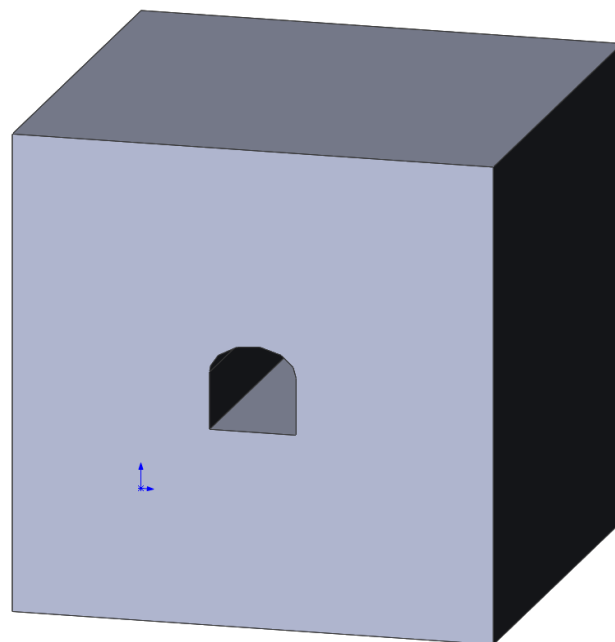


Рис. 11.6 – Готова модель однорідного масиву гірських порід з гірничою виробкою прямокутно-склепінчастої форми

7. Далі натискають на вкладку **Simulation** і на кнопку **Нове дослідження**, після чого обирають **Статичний аналіз** і **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву гірських порід задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**. Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на нижню грань моделі та натискають на ліву клавішу миші. Далі натискають **ОК**. Для встановлення гірського тиску наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім натисканням лівою клавішою миші на грані де діє гірський тиск. Потім натискають **ОК**. Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Далі модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 11.7).

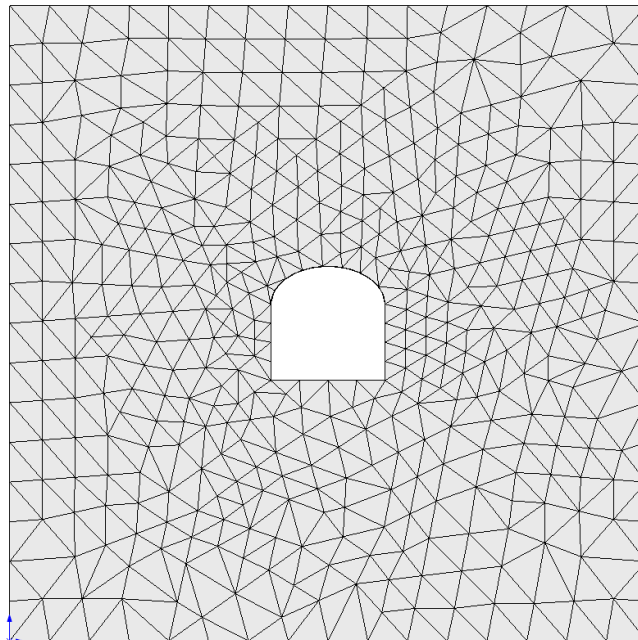


Рис. 11.7 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

8. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являться **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву гірських порід навколо гірничої виробки необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути

Далі. На **Кроці 2** – встановлюють одиницю виміру **МПа** та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Зони непружних деформацій, що утворюються в масиві гірських порід навколо гірничої виробки під дією гірського тиску подано на рис. 11.8.

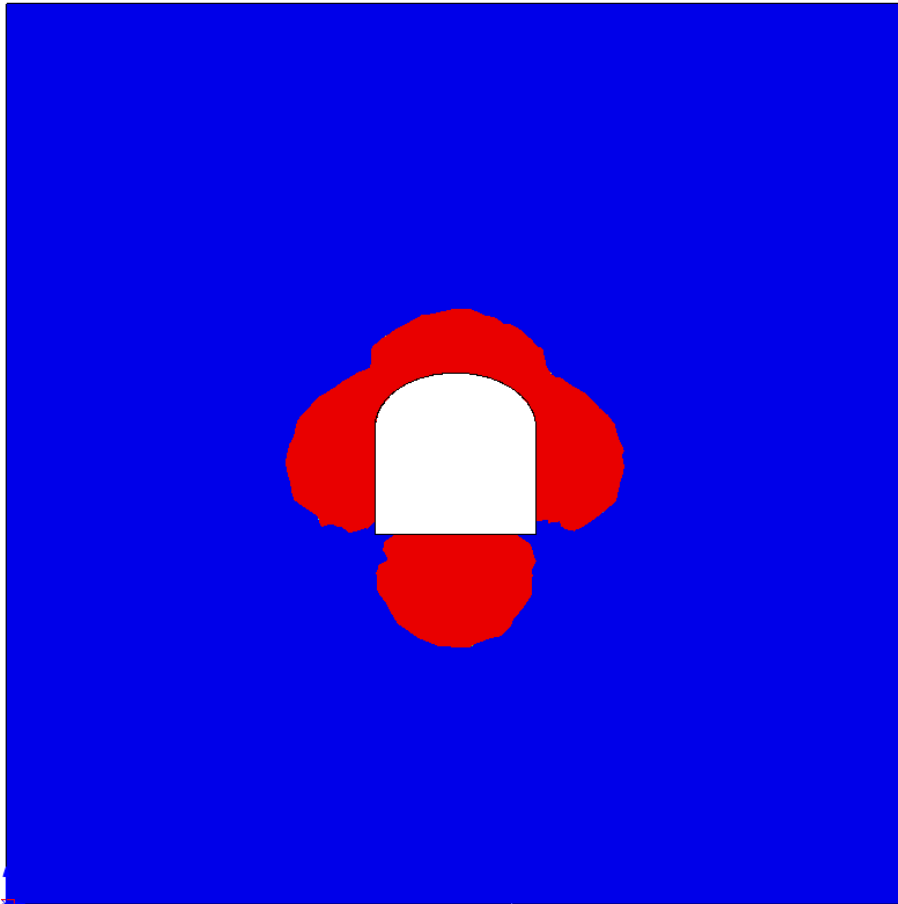


Рис. 11.8 – Зони непружних деформацій, що утворюються в масиві гірських порід навколо гірничої виробки під дією гірського тиску

11.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 11.1, розрахувати фізико-механічні властивості масиву гірських порід, величину гірського тиску, параметри анкерного кріплення та графічно побудувати модель однорідного масиву з гірничою виробкою прямокутно-склепінчастої форми та розташування анкерів у виробці.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

Таблиця 11.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі однорідного масиву з гірничою виробкою прямокутно-склепінчастої форми та параметрів анкерного кріплення

Варіант №	Ширина виробки у проходці, $V_{пр}$, м	Висота виробки у проходці, $H_{пр}$, м	Глибина розташування гірничої виробки, H , м	Межа міцності порід на стискання, $\sigma_{ст}$, МПа	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	Коефіцієнт Пуассона, μ	Щільність порід, γ , кг/м ³	Величина зони непружних деформацій у покрівлі виробки, U , м	Тип анкера
0	3,6	3,6	800	100	0,8	0,25	2850	1,5	3-Б
1	3,0	3,0	900	70	0,9	0,24	3000	1,6	Т
2	3,3	3,3	1000	120	0,6	0,23	3150	1,8	3-Б
3	3,9	3,9	800	140	0,8	0,22	3300	1,0	Т
4	3,6	3,6	900	80	0,9	0,25	2850	1,6	3-Б
5	3,0	3,0	1000	110	0,6	0,24	3000	1,7	Т
6	3,3	3,3	800	90	0,8	0,23	3150	1,5	3-Б
7	3,9	3,9	900	70	0,9	0,22	3300	1,8	Т
8	3,6	3,6	1000	120	0,6	0,25	2850	1,8	3-Б
9	3,0	3,0	800	140	0,8	0,24	3000	0,8	Т
10	3,3	3,3	900	80	0,9	0,23	3150	1,5	3-Б
11	3,9	3,9	1000	110	0,6	0,22	3300	1,6	Т
12	3,6	3,6	800	90	0,8	0,25	2850	1,6	3-Б
13	3,0	3,0	900	70	0,9	0,24	3000	1,7	Т
14	3,3	3,3	1000	120	0,6	0,23	3150	1,5	3-Б
15	3,9	3,9	800	140	0,8	0,22	3300	1,0	Т
16	3,6	3,6	900	80	0,9	0,25	2850	1,5	3-Б
17	3,0	3,0	1000	110	0,6	0,24	3000	1,6	Т
18	3,3	3,3	800	90	0,8	0,23	3150	1,5	3-Б
19	3,9	3,9	900	70	0,9	0,22	3300	1,8	Т
20	3,6	3,6	1000	120	0,6	0,25	2850	1,7	3-Б

Примітка: 3-Б – залізо-бетонний анкер; Т – трубчастий анкер.

11.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо фізико-механічні властивості масиву гірських порід, величину гірського тиску та графічно побудуємо модель однорідного масиву з гірничою виробкою за варіантом №0.

Визначимо радіуси осьової та бокових дуг для виробок прямокутно-склепінчастої форми за формулами (1.1) і (1.2)

$$R = 0,692 \cdot B_{np} = 0,692 \cdot 3,6 = 2,4912 \text{ м};$$

$$r = 0,262 \cdot B_{np} = 0,262 \cdot 3,6 = 0,9432 \text{ м}.$$

Визначимо площу поперечного перерізу виробки прямокутно-склепінчастої форми у проходці за формулою (1.3)

$$S_{np} = B_{np} \cdot \left(H_{np} - \frac{B_{np}}{3} + 0,26 \cdot B_{np} \right) = 3,6 \cdot \left(3,6 - \frac{3,6}{3} + 0,26 \cdot 3,6 \right) = 12 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведений діаметр виробки визначається за формулою (1.5)

$$D_g = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 12 / 3,14} = 3,9 \text{ м}.$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (1.6)

$$B_m = B_{np} + 4 \cdot D_g = 3,6 + 4 \cdot 3,9 = 19,2 \text{ м}.$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (1.7)

$$H_m = H_{np} + 4 \cdot D_g = 3,6 + 4 \cdot 3,9 = 19,2 \text{ м}.$$

Приймаємо наступні параметри моделі: $B_m = H_m = L_m = 20 \text{ м}$.

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:100 або 1:200 будуємо геометрію моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 11.1. Побудована геометрія моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами подана на рис. 11.9.

Визначимо межу міцності масиву гірських порід за формулою (10.1)

$$\sigma_{cm}^m = \sigma_{cm} \cdot K_c = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ МПа}.$$

Визначимо межу міцності масиву гірських порід на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^m = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^m = 0,1 \cdot 80 = 8 \text{ МПа}.$$

Визначимо модуль пружності за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{8}{0,0001} = 80000 \text{ МПа}.$$

Визначимо модуль зсуву за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{80000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 32000 \text{ МПа}.$$

Визначимо величину гірського тиску за формулою (10.2)

$$P_m = 10 \cdot \gamma \cdot H = 10 \cdot 2500 \cdot 800 = 20000000 \text{ Па}.$$

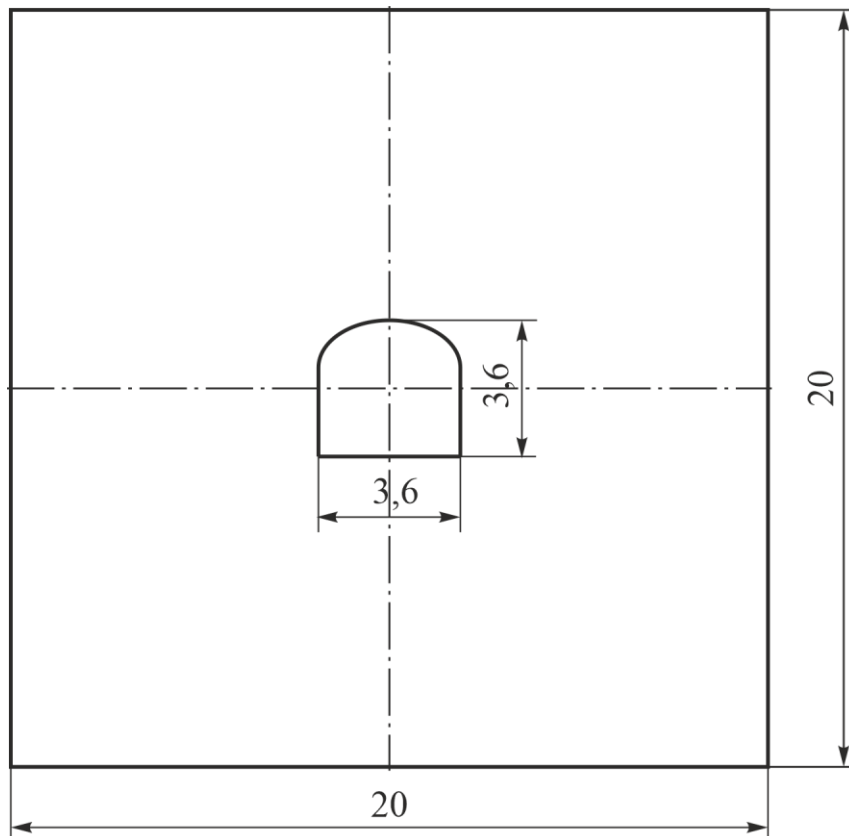


Рис. 11.9 – Геометрія моделі однорідного масиву навколо гірничої виробки за прийнятими параметрами у масштабі 1:200

Визначимо довжину анкера за формулою (11.1)

$$l_a = U + l_3 + l_n = 1,5 + 0,5 + 0,15 = 2,15 \text{ м.}$$

Так, як профіль прокату арматури має довжину 12 м, то $12 \text{ м} / 5 \text{ шт.} = 2,4 \text{ м}$ тому приймаємо довжину залізо-бетонного анкеру $l_a = 2,4 \text{ м}$.

Визначимо активний периметр виробки з коробовим склепінням за формулою (11.3)

$$P_6 = 3,18 + 1,33 \cdot B_{np} = 3,18 + 1,33 \cdot 3,6 = 8 \text{ м.}$$

Визначимо щільність встановлення анкерів за формулою (11.2)

$$n_a = \frac{P_6 \cdot U \cdot \gamma \cdot k_n}{P_a} = \frac{8 \cdot 1,5 \cdot 28,5 \cdot 1,2}{100} = 4,1 \text{ шт.}$$

Приймаємо кількість анкерів $n_a = 5 \text{ шт.}$

Визначимо відстань між анкерами за формулою (11.4)

$$a_a = \sqrt{\frac{P_a}{U \cdot \gamma \cdot k_n}} = \sqrt{\frac{100}{1,5 \cdot 28,5 \cdot 1,2}} = 1,4 \text{ м.}$$

Приймаємо відстань між анкерами $a_a = 1,4 \text{ м}$.

Після визначення основних параметрів анкерного кріплення виконуємо побудову паспорта кріплення гірничої виробки відповідно до розрахункової схеми, що подана на рис. 11.2. Параметри анкерного кріплення гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми за величиною зони непружних деформацій подано на рис. 11.10.

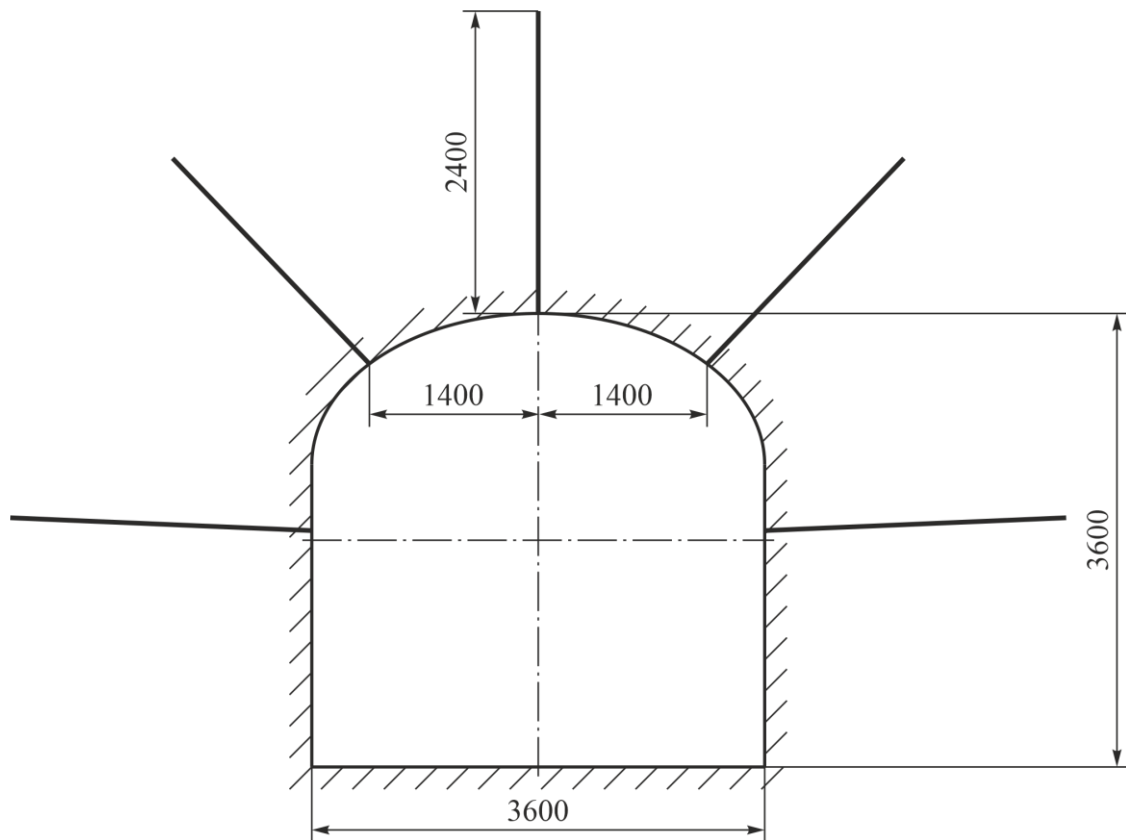


Рис. 11.10 – Параметри анкерного кріплення гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми за величиною зони непружних деформацій

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану однорідного масиву гірських порід навколо гірничої виробки прямокутно-склепінчастої форми поперечного перерізу, що має розміри у проходці 3,6 м × 3,6 м, параметри моделі повинні бути не менше 20 м × 20 м × 20 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву гірських порід на стискання, що дорівнює $\sigma_{cm} = 80$ МПа, на розтягання – $\sigma_p = 8$ МПа, модуль пружності $E = 80000$ МПа, модуль зсуву $G = 32000$ МПа, величина гірського тиску $P_m = 20$ МПа. За величиною зони непружних деформацій у покрівлі гірничої виробки розраховано довжину залізо-бетонного анкеру $l_a = 2,4$ м, кількість анкерів $n_a = 5$ шт. та відстань між анкерами у ряду $a_a = 1,4$ м.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення терміну «Анкерне кріплення»?
2. Наведіть яке анкерне кріплення набула найбільшого поширення?
3. Які показники впливають на параметри геометрії моделі при чисельному моделюванні напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки?
4. Перелічите, які параметри впливають на визначення довжини анкеру?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 12

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ ПОРІД НАВКОЛО ОЧИСНОЇ КАМЕРИ

Мета роботи: надбання навичок чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву порід навколо очисної камери у модулі SolidWorks Simulation.

В результаті виконання практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання** обґрунтовувати параметри технологічних схем на основі аналізу результатів чисельного моделювання; розраховувати та задавати вихідні дані для проведення чисельного моделювання; проводити цифрове моделювання технологічних параметрів та процесів розробки рудних родовищ для конкретних гірничотехнічних та гірничо-геологічних умов.

12.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Виробленим простором при розробці рудних родовищ підземним способом називають простір, що утворюється після видобування рудної корисної копалини внаслідок ведення очисних робіт. *Очисними роботами* називають комплекс робочих процесів, який виконують в очисних виробках з метою вилучення корисних копалин. *Очисні виробки* – це виробки, що проводять по покладу корисної копалини, в яких здійснюють їх виймання. Вони безперервно або періодично переміщуються у просторі, а форма їх поперечного перерізу і довжина залежать від потужності і кута падіння рудних тіл, пластів, покладів і технології видобування корисної копалини. До очисних виробок при камерних системах розробки відносяться очисні камери.

Підземний видобуток руд здійснюється переважно за допомогою камерних систем розробки. Формування очисних камер, під час ведення очисних робіт, сприяє проявам гірського тиску в прилеглому масиві гірських порід у вигляді вивалів, відшарування й обвалення руди або порід. Для визначення зон непружних деформацій у масиві гірських порід навколо очисної камери використовується чисельне моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву.

Модель масиву порід навколо очисної камери у програмі SolidWorks буде уявляти собою шаруватий масив гірських порід, який складається з наступних твердих тіл: рудного покладу, порід висячого і лежачого боків. Параметри геометрії моделі шаруватого масиву у якому розташовується очисна камера розраховуються у наступній послідовності.

Площа описаного прямокутника навколо очисної камери вхрест простягання визначається за формулою

$$S_{п.к.вхр.} = b_k \cdot h_k, \text{ м}^2, \quad (12.1)$$

де b_k – ширина камери вхрест простягання, визначається при кресленні геометрії очисної камери, м; h_k – висота камери, м.

Площа описаного прямокутника навколо очисної камери за простяганням визначається за формулою

$$S_{n.k.прост.} = l_k \cdot h_k, \text{ м}^2, \quad (12.2)$$

де l_k – довжина камери за простяганням, визначається при кресленні геометрії очисної камери, м.

Приведений діаметр очисної камери вхрест простягання визначається за формулою

$$D_{к.вхр.} = \sqrt{4 \cdot S_{n.k.вхр.} / \pi}, \text{ м.} \quad (12.3)$$

Приведений діаметр очисної камери вхрест простягання визначається за формулою

$$D_{к.прост.} = \sqrt{4 \cdot S_{n.k.прост.} / \pi}, \text{ м.} \quad (12.4)$$

Ширина моделі масиву визначається за формулою

$$B_m = b_k + 4 \cdot D_{к.вхр.}, \text{ м.} \quad (12.5)$$

Висота моделі масиву визначається за формулою

$$H_m = h_k + 4 \cdot D_{к.вхр.}, \text{ м.} \quad (12.6)$$

Довжина моделі масиву визначається за формулою

$$L_m = l_k + 4 \cdot D_{к.прост.}, \text{ м.} \quad (12.7)$$

Після розрахунку параметрів масиву будують геометрію моделі шаруватого масиву з очисною камерою згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 3.1.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо очисної камери встановлюється ізотропний матеріал для кожного матеріалу моделі. Так, як гірська порода не однаково реагує на стискання та розтягання, тому для матеріалів моделі встановлюється критерій руйнування – Кулона-Мора.

При статичному аналізі у модулі SolidWorks Simulation дії гірського тиску, межа міцності масиву гірських порід визначається за формулою (10.1). Межа міцності масиву моделі на розтягання, модулі пружності (Юнга) та зсуву визначаються за формулами (4.1), (4.2) і (4.4). Розрахунок означених фізико-механічних властивостей матеріалів моделі розраховуються за межею міцності масиву гірських порід. Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо очисної камери величина гірського тиску визначається за формулою (10.2).

Процес проведення статичного аналізу напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо очисної камери у модулі SolidWorks Simulation включає ряд етапів:

1. Спочатку створюємо файл нової деталі.
2. Обираємо площину ескізу для створення ескізу деталі порід висячого боку.
3. Далі за розрахованими параметрами будуюмо ескіз деталі порід висячого боку. Потім за допомогою інструмента **Витягнута Бобишка** витягуємо ескіз на прийнятну довжину моделі (рис. 12.1).

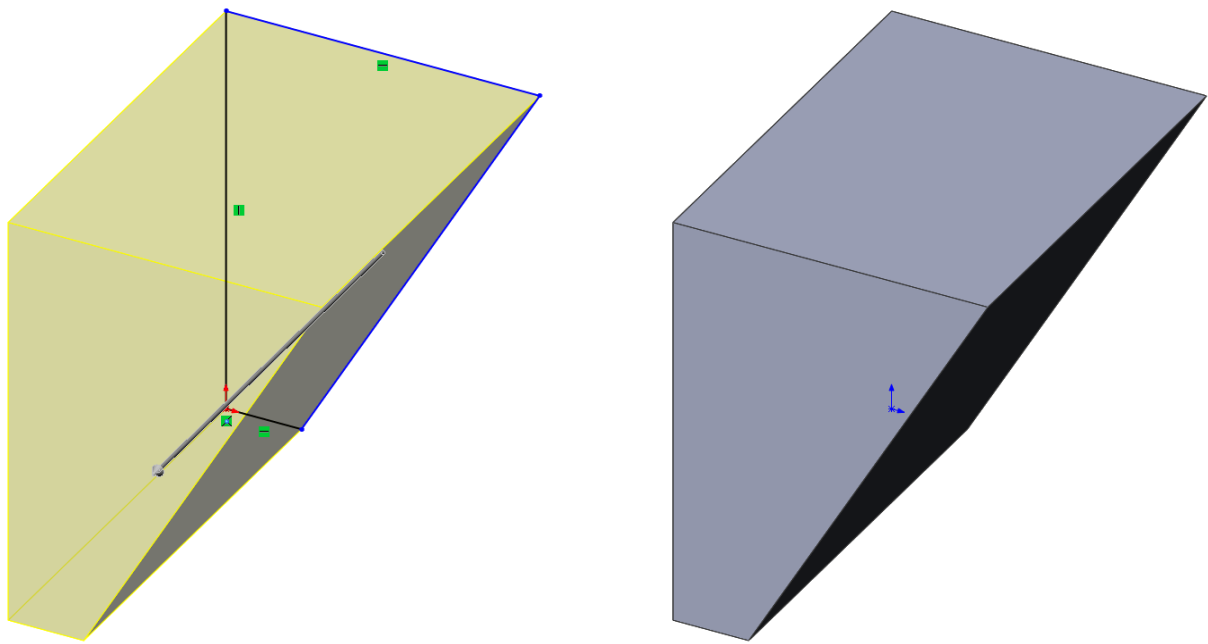


Рис. 12.1 – Деталь геометрії моделі масиву порід висячого боку

4. Після побудови деталі порід висячого боку, обираємо площину на якій буде викреслено ескіз рудного покладу, для цього натискаємо лівою клавiшею миші на грань деталі порід висячого боку. Далі активують режим **Ескіз**, у якому будують рудний поклад. Потім за допомогою інструмента **Витягнута Бобишка** витягуємо ескіз рудного покладу на прийнятну довжину моделі, при цьому потрібно прибрати галочку з **Об'єднати результати**, та натиснути **ОК** (рис. 12.2).

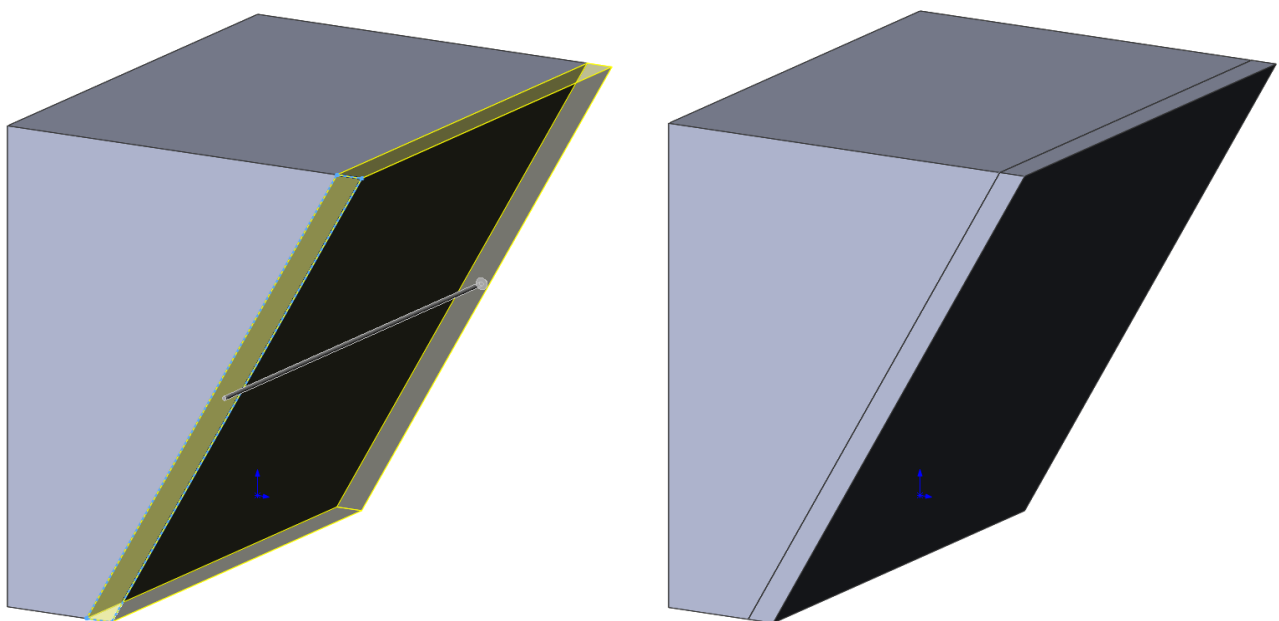


Рис. 12.2 – Деталі порід висячого боку та рудного покладу

5. Далі обираємо площину на якій буде викреслено ескіз порід лежачого боку, для цього натискаємо лівою клявішею миші на грань деталі порід рудного покладу. Далі активують режим **Ескіз**, у якому будують породи лежачого боку. Потім за допомогою інструмента **Витягнута Бобишка** витягуємо ескіз порід лежачого боку на прийнятну довжину моделі, при цьому потрібно прибрати галочку з **Об'єднати результати**, та натиснути **ОК** (рис. 12.3).

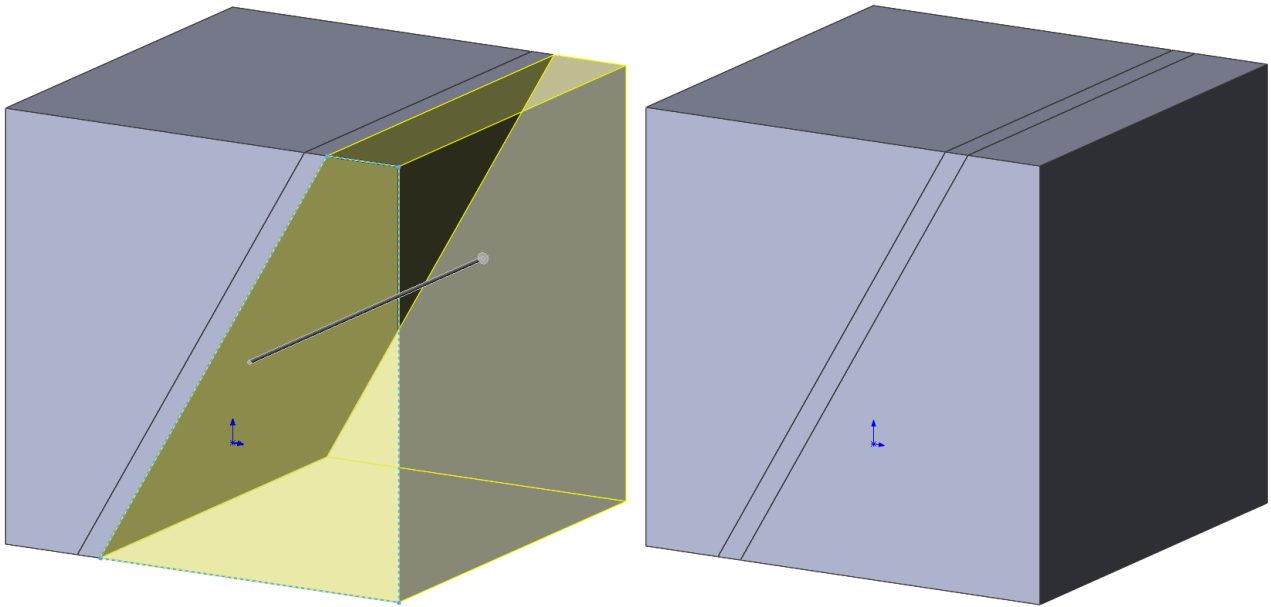


Рис. 12.3 – Готова геометрія моделі шаруватого масиву без очисної камери

6. Для того щоб викреслити очисну камеру необхідно створити додаткову вертикальну площину послідовно натиснувши **Вставка, Довідкова геометрія, Площина**. Потім задати місце її розташування в геометрії моделі (рис. 12.4) і натискаємо **ОК**.

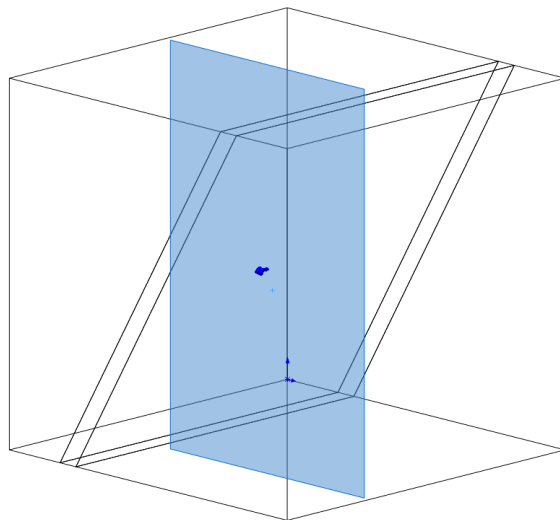


Рис. 12.4 – Додаткова вертикальна площина у масиві моделі, яка необхідна для побудови очисної камери

7. Далі у вкладці **Ескіз** за допомогою інструментів **Лінія** на новій площині викреслюють контур очисної камери (рис. 12.5).

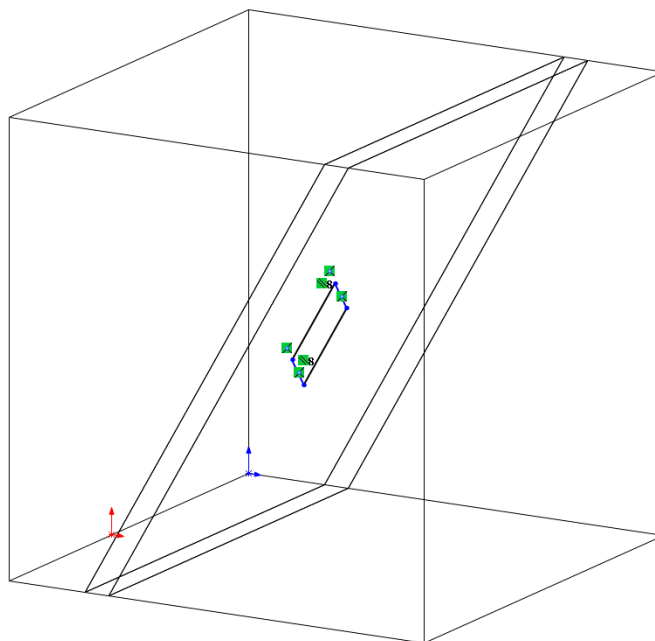


Рис. 12.5 – Викреслений контур очисної камери на новій площині

8. Після побудови контуру очисної камери, виходять з режиму **Ескіз**. Потім натиснувши вкладку **Елементи** обирають інструмент **Витягнутий виріз**, за допомогою якого на глибину, що дорівнює довжині очисної камери роблять виріз і натискають **ОК** (рис. 12.6).

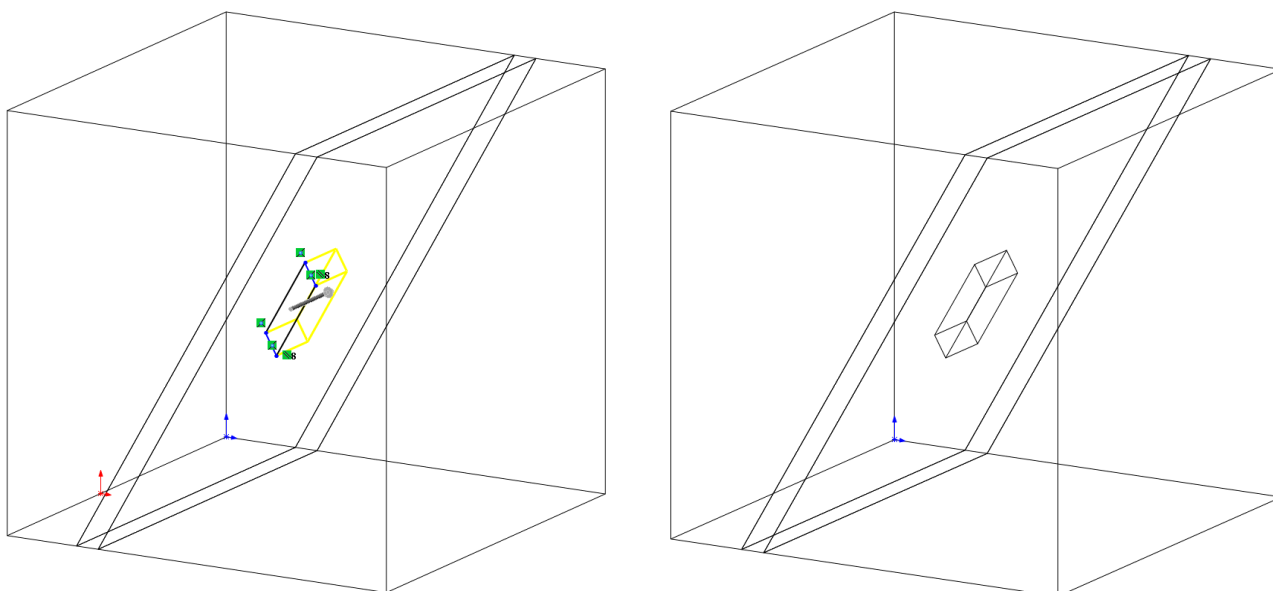


Рис. 12.6 – Готова геометрія моделі шаруватого масиву гірських порід з очисною камерою

9. Далі натискають на вкладку **Simulation** і на кнопку **Нове дослідження**, обирають **Статичний аналіз** і натискають **ОК**. У дереві **Статичний аналіз** наводять курсив на **Деталь** і натискають правою клавішою миші та обирають **Прийняти/Редагувати матеріал**. Потім згідно розрахованих фізико-механічних властивостей масиву для кожної деталі гірських порід і руди задають матеріал моделі і натискають **Прийняти**. Далі у дереві наводять курсив на **Кріплення**, натискають правою клавішою миші та обирають **Зафіксована геометрія**. Після чого курсивом наводять на нижню грань моделі та натискають на ліву клавішу миші. Далі натискають **ОК**. Для встановлення гірського тиску наводять курсив на **Зовнішні навантаження** та вводять розраховану його величину в МПа. Потім натисканням лівої клавіші миші вказують грані де діє гірський тиск. Потім натискають **ОК**. Для створення сітки скінченних елементів наводять курсив миші на **Сітка**, натискають правою клавішою миші та обирають **Створити сітку**. Після чого виконують налаштування сітки скінченних елементів і натискають **ОК**. Далі модуль **SolidWorks Simulation** створить сітку (рис. 12.7).

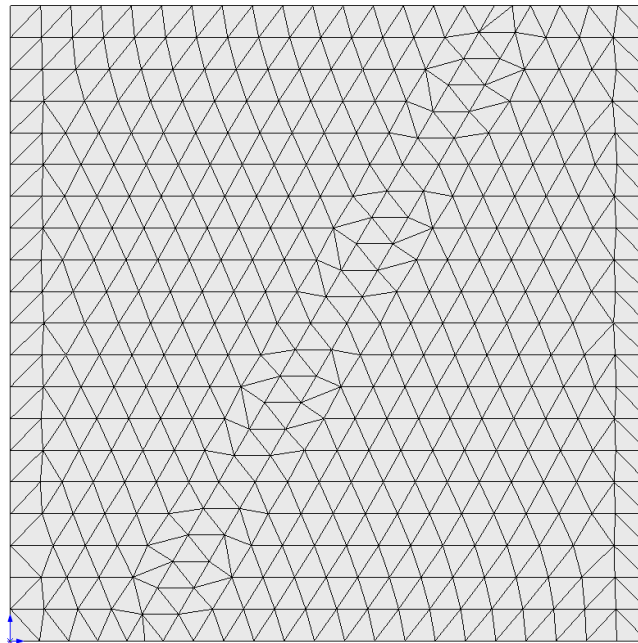


Рис. 12.7 – Сітка скінченних елементів у масиві моделі

10. Потім на вкладці **Simulation** натискають **Запуск**. Після розрахунку у дереві **Статичного аналізу** з'являться **Результати** дослідження, а саме: напруження, переміщення та деформації. Для налаштування результатів дослідження необхідно навести курсив миші на необхідний результат та натиснути праву клавішу і обрати **Редагувати визначення**. У налаштуваннях виставляють необхідні параметри.

Для визначення зон непружних деформацій масиву гірських порід навколо гірничої виробки необхідно визначити епюру перевірки запасу міцності. Для цього необхідно навести курсив миші на **Результат** та натиснути праву клавішу. Далі обрати **Визначити епюру перевірки запасу міцності**. У новому

вікні на **Кроці 1** потрібно обрати **Напруження Кулона-Мора** та натиснути **Далі**. На **Кроці 2** – встановлюють одиницю виміру **МПа** та вказують **Межа міцності** й натискають **Далі**. На **Кроці 3** встановлюють позначку на **Області нижче запасу міцності** й натискають **ОК**. Для налаштування результатів необхідно навести курсив миші у **Результатах** на **Запас міцності** та натиснути праву клавішу. За допомогою **Параметри** та **Обмежений переріз** виконати налаштування результатів. Епюри різниці головних напружень та зони непружних деформацій, що утворюються в масиві гірських порід навколо очисної камери під дією гірського тиску подано на рис. 12.8.

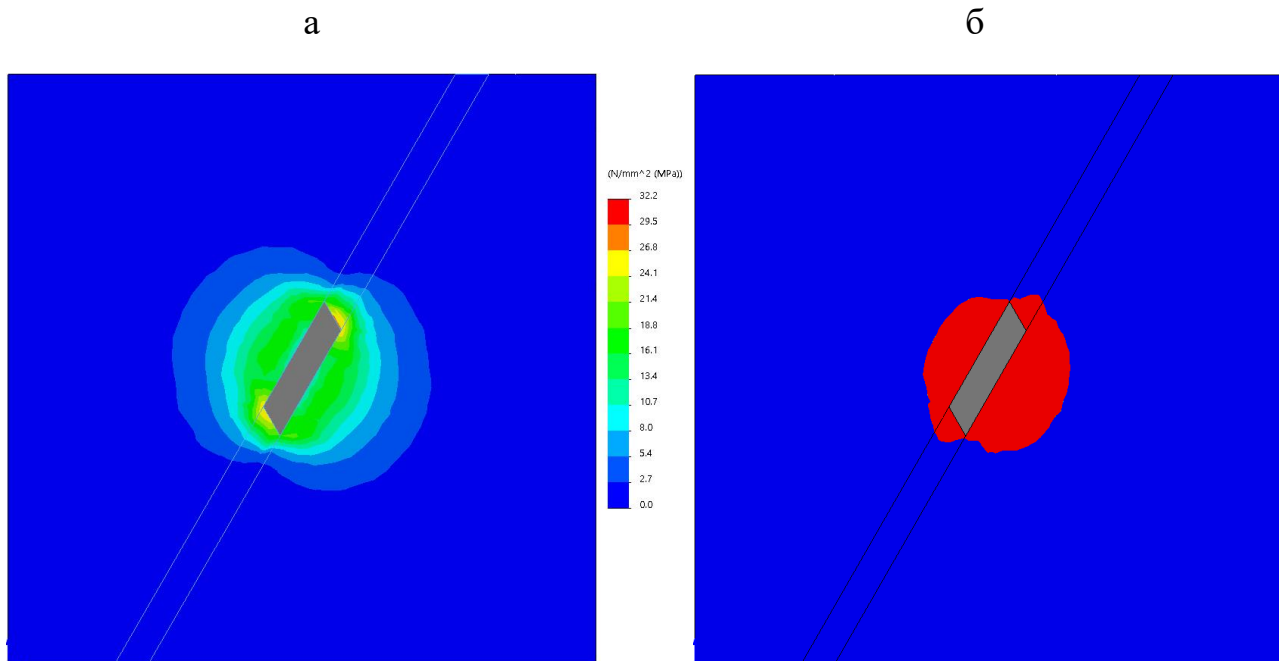


Рис. 12.8 – Епюри різниці головних напружень (а) та зони непружних деформацій (б), що утворюються в масиві гірських порід навколо очисної камери під дією гірського тиску

12.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. За вихідними даними, що подано у табл. 12.1, розрахувати фізико-механічні властивості масиву гірських порід, величину гірського тиску та графічно побудувати модель шаруватого масиву з очисною камерою.

Завдання 2. Надати письмові відповіді на питання для самоконтролю.

Зміст практичної роботи повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання на практичну роботу, розрахунки, письмові відповіді на питання для самоконтролю, висновки.

Таблиця 12.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі шаруватого масиву з очисною камерою

Варіант №	Горизонтальна потужність рудного покладу, m_e , м	Висота очисної камери, h_k , м	Довжина очисної камери, l_k , м	Глибина гірничих робіт, H , м	Щільність руди, γ_r , кг/м ³	Щільність порід висячого боку, γ_e , кг/м ³	Щільність порід лежачого боку, γ_l , кг/м ³	Межа міцності руди на стискання, $\sigma_{ст,r}$, МПа	Межа міцності порід висячого боку на стискання, $\sigma_{ст,e}$, МПа	Межа міцності порід лежачого боку на стискання, $\sigma_{ст,l}$, МПа	Коефіцієнт структурного ослаблення масиву руди і порід, K_c	Коефіцієнт Пуассона руди та порід, μ
0	20	80	50	800	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,25
1	19	75	60	900	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,24
2	18	80	50	1000	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,23
3	17	85	60	1100	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,22
4	16	90	50	800	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,25
5	20	95	60	900	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,24
6	21	100	50	1000	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,23
7	22	75	60	1100	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,22
8	23	80	50	800	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,25
9	24	85	60	900	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,24
10	20	90	50	1000	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,23
11	19	95	60	1100	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,22
12	18	100	50	800	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,25
13	17	75	60	900	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,24
14	16	80	50	1000	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,23
15	20	85	60	1100	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,22
16	21	90	50	800	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,25
17	22	95	60	900	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,24
18	23	100	50	1000	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,23
19	24	75	60	1100	3600	3200	2800	90	140	100	0,8	0,22
20	20	80	50	800	3950	3300	2850	60	120	80	0,9	0,25

12.3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахуємо та графічно побудувати модель шаруватого масиву з очисною камерою за варіантом №0.

Визначимо площу описаного прямокутника навколо очисної камери вхрест простягання за формулою (12.1)

$$S_{п.к.вхр.} = b_k \cdot h_k = 46 \cdot 80 = 3680 \text{ м}^2.$$

Визначимо площу описаного прямокутника навколо очисної камери за простяганням за формулою (12.2)

$$S_{n.k.прост.} = l_k \cdot h_k = 50 \cdot 80 = 4000 \text{ м}^2.$$

Визначимо приведенний діаметр очисної камери вхрест простягання за формулою (12.3)

$$D_{к.вхр.} = \sqrt{4 \cdot S_{n.k.вхр.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 3680 / 3,14} = 68 \text{ м.}$$

Визначимо приведенний діаметр очисної камери вхрест простягання за формулою (12.4)

$$D_{к.прост.} = \sqrt{4 \cdot S_{n.k.прост.} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 4000 / 3,14} = 71 \text{ м.}$$

Визначимо ширину моделі масиву за формулою (12.5)

$$B_m = b_k + 4 \cdot D_{к.вхр.} = 46 + 4 \cdot 68 = 318 \text{ м.}$$

Визначимо висоту моделі масиву за формулою (12.6)

$$H_m = h_k + 4 \cdot D_{к.вхр.} = 80 + 4 \cdot 68 = 350 \text{ м.}$$

Визначимо довжину моделі масиву за формулою (12.7)

$$L_m = l_k + 4 \cdot D_{к.прост.} = 50 + 4 \cdot 71 = 334 \text{ м.}$$

Приймаємо такі параметри моделі: $B_m = H_m = L_m = 350 \text{ м.}$

За прийнятими параметрами моделі у масштабі 1:2000 будуємо геометрію моделі шаруватого масиву навколо очисної камери згідно розрахункової схеми, що подано на рис. 3.1. Побудована геометрія моделі шаруватого масиву навколо очисної камери за прийнятими параметрами подана на рис. 12.9.

Визначимо межу міцності масиву порід висячого боку за формулою (10.1)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c = 120 \cdot 0,8 = 100 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву порід лежачого боку за формулою (10.1)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c = 80 \cdot 0,8 = 60 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву руди за формулою (10.1)

$$\sigma_{cm}^M = \sigma_{cm} \cdot K_c = 60 \cdot 0,8 = 50 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву порід висячого боку на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву порід лежачого боку на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 60 = 6 \text{ МПа.}$$

Визначимо межу міцності масиву руди на розтягання за формулою (4.4)

$$\sigma_p^M = 0,1 \cdot \sigma_{cm}^M = 0,1 \cdot 50 = 5 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності масиву порід висячого боку за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^M}{0,0001} = \frac{10}{0,0001} = 100000 \text{ МПа.}$$

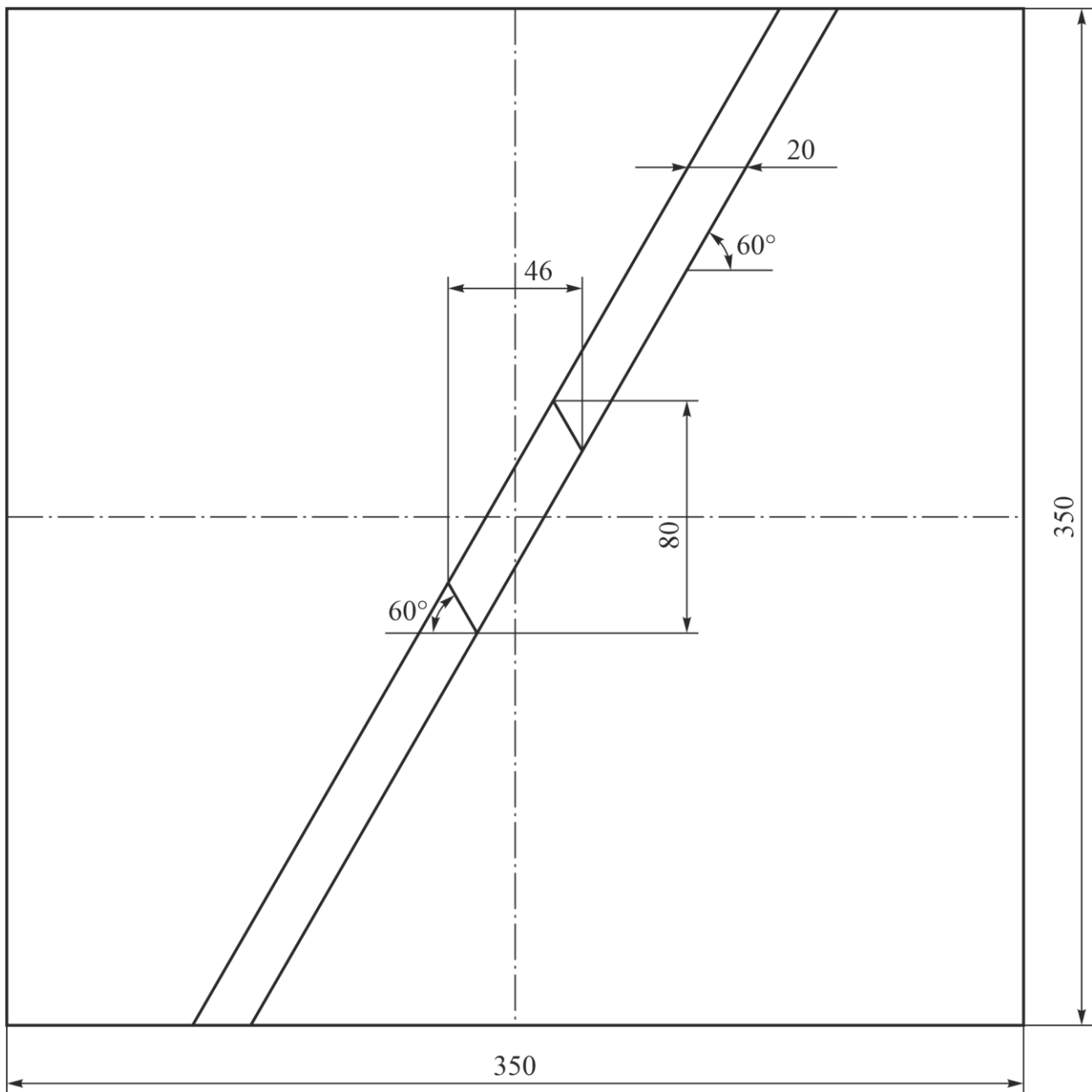


Рис. 12.9 – Геометрія моделі шарватого масиву навколо очисної камери за прийнятими параметрами у масштабі 1:2000

Визначимо модуль пружності масиву порід лежачого боку за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{6}{0,0001} = 60000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль пружності масиву руди за формулою (4.1)

$$E \approx \frac{\sigma_p^m}{0,0001} = \frac{5}{0,0001} = 50000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву масиву порід висячого боку за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{100000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 40000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву масиву порід лежачого боку за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{60000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 24000 \text{ МПа.}$$

Визначимо модуль зсуву масиву руди за формулою (4.2)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{50000}{2 \cdot (1 + 0,25)} = 20000 \text{ МПа.}$$

Визначимо величину гірського тиску за формулою (10.2)

$$P_m = 10 \cdot \gamma \cdot H = 10 \cdot 2500 \cdot 800 = 20000000 \text{ Па.}$$

Висновок. Для зниження впливу крайових ефектів на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану шаруватого масиву гірських порід навколо очисної камери, що має висоту 80 м, параметри моделі повинні бути не менше 350 м × 350 м. Для проведення моделювання розраховано межу міцності масиву гірських порід на стискання, що дорівнює для порід висячого боку $\sigma_{cm} = 100$ МПа, для порід лежачого боку $\sigma_{cm} = 60$ МПа та для руди $\sigma_{cm} = 50$ МПа. Межа міцності масиву гірських порід на розтягання для порід висячого боку $\sigma_p = 10$ МПа, для порід лежачого боку $\sigma_p = 6$ МПа та для руди $\sigma_p = 5$ МПа. Модуль пружності для порід висячого боку $E = 100000$ МПа, для порід лежачого боку $E = 60000$ МПа та для руди $E = 50000$ МПа. Модуль зсуву для порід висячого боку $G = 40000$ МПа, для порід лежачого боку $G = 24000$ МПа та для руди $G = 20000$ МПа. Величина гірського тиску $P_m = 20$ МПа.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення терміну «Вироблений простір»?
2. Що розуміють під терміном очисні виробки?
3. Які показники впливають на параметри геометрії моделі при чисельному моделюванні напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо очисної камери?
4. Перелічите, які параметри необхідно розрахувати для чисельного моделювання напружено-деформованого стану шаруватого масиву гірських порід навколо очисної камери у модулі SolidWorks Simulation?

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Навчальні досягнення здобувачів вищої освіти за результатами вивчення курсу оцінюватимуться за шкалою, що наведена нижче:

Рейтингова шкала	Інституційна шкала
90–100	відмінно
74–89	добре
60–73	задовільно
0–59	незадовільно

Здобувачі вищої освіти можуть отримати **підсумкову оцінку** з навчальної дисципліни на підставі поточного оцінювання знань за умови, якщо набрана кількість балів складатиме не менше як 60 балів.

Максимальне оцінювання:

Теоретична частина	Практична частина		Разом
	При своєчасному складанні	При несвоєчасному складанні	
-	100	60	100

Практичні роботи приймаються за контрольними запитаннями до кожної з роботи. Оцінювання практичних робіт здійснюється шляхом розрахунку середнього арифметичного балу за складеними практичними роботами.

Критерії оцінювання практичної роботи

За кожну практичну роботу здобувач вищої освіти може отримати наступну кількість балів:

100 балів: отримано правильну відповідь (згідно з еталоном), використано формулу з поясненням змісту окремих її складових, зазначено одиниці виміру.

75 балів: отримано правильну відповідь з незначними неточностями згідно з еталоном, відсутня формула та/або пояснення змісту окремих складових, або не зазначено одиниці виміру.

50 балів: отримано неправильну відповідь, проте використано формулу з поясненням змісту окремих її складових, зазначено одиниці виміру.

25 балів: отримано неправильну відповідь, проте використано формулу без пояснень змісту окремих її складових та не зазначено одиниці виміру.

0 балів: наведено неправильну відповідь, до якої не надано жодних пояснень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ворошук В.Я., Вітенько Т.М. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем: навч. посібник. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.
2. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Клак Ю.В. Інженерна графіка в SolidWorks: навч. посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.
3. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Косенко А.В. Процеси підземної розробки рудних родовищ: підручник. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. 206 с.
4. Геомеханіка створення підземної інфраструктури при видобуванні руд із застосуванням емульсійних вибухових речовин: монографія / М.М. Кононенко, О.Є. Хоменко, І.Л. Коваленко, І.Г. Миронова, А.В. Косенко. Дніпро: Журфонд, 2024. 252 с.
5. Kononenko, M., Khomenko, O., Sudakov, A., Drobot, S., Lkhagva, Ts. Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working. Mining of mineral deposits. 2016. № 10(3), 101–106.
6. Кононенко М.М., Хоменко О.Є., Косенко А.В. Чисельне моделювання лінії найменшого опору при підриванні зарядів. Збірник наукових праць НГУ. 2022. № 69. С. 43–57.
7. Кононенко М.М., Хоменко О.Є., Косенко А.В. Раціональні параметри буропідривних робіт для проведення підняттяєвих. Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва. 2022. № 24. С. 15–31.
8. Кононенко М.М., Хоменко О.Є., Косенко А.В. Нова методика визначення параметрів буропідривних робіт для проведення горизонтальних і похилих гірничих виробок. Збірник наукових праць НГУ. 2023. № 73. С. 16–32.
9. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Косенко А.В. Раціональні параметри кріплення польових підготовчих виробок у зонах впливу очисних камер. Наукові праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. 2023. № 1(29). С. 57–66.
10. Kononenko M., Khomenko O., Sadovenko I., Sobolev V., Pazylich Yu., Smolinski A. Managing the rock mass destruction under the explosion. Journal of sustainable mining. 2023. № 22(3), 240–247.
11. Хоменко О.Є. Геоенергетика підземної розробки рудних родовищ. Дніпропетровськ: НГУ, 2016. 242 с.
12. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Савченко М.В. Технологія підземної розробки рудних родовищ: підручник. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 450 с.

Навчальне видання

КОНОНЕНКО Максим Миколайович
ХОМЕНКО Олег Євгенович
КОСЕНКО Андрій Володимирович
ІНЮТКІН Іван Володимирович
ЄГОРЧЕНКО Ростислав Русланович

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИДОБУВАННЯ РУД

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів ступеня магістра
освітньо-професійної програми «Гірничорудна інженерія»
зі спеціальності 184 Гірництво

Видано в авторській редакції

Електронний ресурс
Підписано до видання 14.05.2024. Авт. арк. 10,1.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19