

БЄЛІЗНОЙ АНДРІЙ ПАВЛОВИЧ

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРІДНОГО МАСИВУ ПОЗА ЗОНОЮ
ВПЛИВУ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

184 Гірництво
магістр

2018

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 95 сторінок, 1 таблиці, 25 рисунка, 109 джерел.

Об'єкт досліджень: напружено-деформований стан масиву гірничих порід.

Предмет досліджень: орієнтація оптичної вісі зерен кварца в шліфах гірничих порід.

Мета роботи: знайти залежність коефіцієнта бічного розпору від кута бісектриси оптичної вісі, у зернах кварцу, шліфи яких відібрані зі скважини №7762, Первомайського залізорудного родовища.

Методи досліджень: в роботі використовували комплексний підхід, що включає в себе, вимір оптичної вісі зерен кварцу на мікроскопі за допомогою коноскопічного методу з подальшим аналізом та обробкою даних.

Отримані результати дають можливість, не втручаючись в гірський масив, а по свердловинах, визначити орієнтування зерен кварцу та знати яке значення має λ в цьому місці. І в подальшому цю λ закладати в рішення геотехнічних задач.

У розділі 1 розглянуто методи рішення задач, пов'язаних зі стійкістю підземних виробок; чисельні методи в геомеханіці такі як метод кінцевих елементів, метод граничних елементів, метод дискретних елементів.

У розділі 2 за допомогою програмного продукту Phase 2 канадської компанії ROCKSIENSE, було розглянуто чисельне моделювання пружно-пластичного стану породного масиву в околиці одиночної підземної виробки та показали, що величина коефіцієнта бічного розпору має суттєвий вплив на переміщення контура штучної порожнини, визначаючи її стійкість.

У Розділі 3 було досліджено Первомайське родовище, умови утворення порід, їх розташування, склад гірських порід; розглядалися і аналізувалися роботи які проводилися в області вивчення коефіцієнта бічного розпору, що описують методикау визначення оптичної вісі у зернах кварцу; виконано дослідження та здійснено аналіз результатів, на основі якого встановлено

залежність величини коефіцієнту бокового розпору від кута орієнтировки оптичної вісі зерен кварцу.

Ключові слова: коефіцієнт бічного розпору, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів, оптична вісь, коноскопичний метод.

ВСТУП

Актуальність теми представляє теоретичний і практичний інтерес, тому що раніше всі роботи на дослідження коефіцієнта бічного розпору розглядалися вже в порушеному масиві. До початку гірничих робіт на родовищі породний масив вже знаходиться в початковому (природному) напруженому стані, від параметрів якого залежить характер проявів гірського тиску: їх форми місця локації масштаби. Джерелом природних напруг є сили власної ваги порід і тектонічні процеси в земній корі. Напруження, що виникають в масиві гірських порід від сил власної ваги визначити досить просто. Для оцінки ж напружень, які створюються в масиві тектонічними процесами необхідно проведення спеціальних експериментів.

Наприклад, О.С. Алферовим був запропонований метод визначення коефіцієнта бічного розпору з допомогою мікроструктурного дослідження порід по орієнтованим петрографічним шліфам. Причиною для такої постановки задачі є відомі положення структурної петрології. Відомо, що під впливом напружень виникають диференціальні руху в масиві, які супроводжуються виникненням орієнтованого розташування окремих мінералів в просторі, особливо коли деформації носять пластичний незворотний характер. Одним з методів їх визначення є мікроструктурний аналіз, який ґрунтується на виявленні орієнтування оптичних вісій зерен кварцу. Аналіз отриманих петроструктурних узорів на кругових діаграмах, дозволяє виявити особливості характеру розподілу оптичних вісій кварцу, їх співвідношення з орієнтування кварцу з накладеними напруженнями.

Для вивчення орієнтування кристалографічних вісій залучають спеціальні методики (наприклад, в даній роботі використовували коноскопічний метод вимірювання орієнтувань оптичних вісій). З'ясування характеру переважного кристалографічного орієнтування засноване на безлічі вимірів кристалографічних вісій.

Таким чином, дослідження, спрямовані на можливість не втручаючись в гірський масив по свердловинах визначити орієнтування зерен кварцу і знати яке значення має коефіцієнт бічного розпору в цьому місці. І в подальшому цю λ закладати в рішення геотехнічних задач.

Метою досліджень є вимір оптичної вісі зерен кварцу на мікроскопі за допомогою коноскопічного методу, з подальшим аналізом та обробки даних.

Основна ідея полягає в вимірі кута нахилу оптичної вісі зерен кварцу за допомогою мікроструктурного дослідження порід по орієнтованим петрографічним шліфам.

Об'єктом досліджень є напружено-деформований стан масиву гірничих порід.

Предметом досліджень є орієнтація оптичної вісі зерен кварца в шліфах гірничих порід.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені такі основні завдання досліджень:

- вибір методу дослідження орієнтировки оптичної вісі зерен кварцу;
- виявлення зміни оптичної вісі зерен кварцу при різних значення коефіцієнту бокового розпору;
- вимір оптичної вісі зерен кварцу на мікроскопі за допомогою коноскопічного методу;

Наукова новизна роботи полягає у встановленні залежності величини коефіцієнту бокового розпору від кута орієнтировки оптичної вісі зерен кварцу.

РОЗДІЛ 1

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ В ГЕОМЕХАНІЦІ

1.1. Методи розв'язання задач, пов'язаних зі стійкістю підземних виробок

Постановка задачі в геомеханіці включає чітке формулювання кінцевої мети дослідження та необхідних вихідних даних для вирішення завдання. Якщо формулювання кінцевої мети дослідження зазвичай не зустрічає труднощів, так як визначається запитами практики, то запис необхідних вихідних даних деколи вимагає проведення спеціальних досліджень. У цьому сенсі постановка задачі є таким же творчим процесом, як і її рішення [4].

Після формулювання кінцевої мети дослідження слід виконати аналіз геометричних розмірів і характеристик механічного стану породного масиву для встановлення їх симетрії, що може привести до спрощення розрахункової схеми.

При наявності осьової симетрії в породному масиві розглядається осесиметрична завдання. Прикладом можуть служити породні масиви в околиці вертикальних шахтних стволів кругового поперечного перерізу, підземних ємностей у вигляді тіл обертання з вертикальною віссю і т. д.

При наявності площин симетрії в породному масиві доцільно розглядати плоску задачу в постановці плоскої деформації. Такий тип завдання зазвичай використовується для дослідження механічних процесів в масивах навколо горизонтальних гірничих виробок, укосів з циліндричною поверхнею і в інших випадках. При цьому необхідно пам'ятати, що рішення буде справедливим лише для перетинів масиву, які в процесі деформування залишаються плоскими. У гірських виробках такі перетину, норрисьні до поздовжньої осі вироблення, повинні бути віддалені від забою на відстань $l \geq 60D$, де D - проліт поперечного перерізу або діаметр кругового поперечного перерізу виробки. Виникає при цьому похибка в аналізі механічних процесів в рамках завдання з плоскою

деформацією становить не більше 10%. Можна припустити, що такий же порядок похибки при дослідженні перетинів, розташованих поблизу гирл і сполучень гірничих виробок. Звідси можна зробити й інший висновок: рішення задачі в постановці плоскої деформації буде вельми грубим наближенням для непротяжних виробок і камер з розміром по поздовжній осі $l \leq 12D$. Решта вироблення, геометричні розміри яких не задовольняють цій умові, будемо називати протяжними виробками [5].

Одночасне наявність в породному масиві осьової і площинної симетрії дає можливість розглядати задачу з плоскою і осесиметричною деформацією - найбільш простий тип завдання, що дозволяє в багатьох випадках отримати правильну якісну оцінку механічних процесів в породних масивах навколо гірничих виробок.

Зазначимо ще на одну особливість постановки завдань, пов'язану з аналізом геометричних розмірів об'єкта дослідження. Граничні поверхні досліджуваних породних масивів є, як правило, багатозв'язними (наприклад, породну поверхню розглядаємої виробки, земна поверхня, породну поверхню сусідньої виробки), що ускладнює вирішення завдань. Тому розглянемо можливість приведення таких завдань до розрахункової схеми з однозв'язним контуром.

Спеціальними дослідженнями встановлено, що вплив прямолінійною межі важкої півплощини (навантаженої об'ємними силами важкості) незначно впливають на розподіл напружень в околі отвору при $h \geq 2D$, де h - відстань від прямолінійної межі до центре отвору (виробка з поперечним розміром D). При цьому умови допустима помилки у разі заміни даної задачі з двохзв'язної контуром у вигляді межі півплощини і контуру отвору на завдання з однозв'язного контуром (круговий отвір у важкій площині) не перевищує 10% і швидко зменшується в міру збільшення h . Такий же порядок має похибка при заміні двохзв'язного контуру у вигляді двох сусідніх отворів на однозв'язний, якщо відстань між центрами отворів $d \geq 2,5D$. Так як глибина залягання гірських виробок зазвичай задовольняє умові $h \geq 2D$, вплив земної поверхні можна не

враховувати. У першому наближенні також можна відмовитися від обліку впливу сусідніх виробок, якщо розміри ціликів між ними задовольняють умови $d \geq 2,5D$ [6]. Таким чином, в більшості випадків, досліджуючи геомеханічні процеси в околиці гірничої виробки, досить сформулювати постановку задачі як для однозв'язного контуру. Розглядати так звану одиночну заглиблену виробку.

На наступному етапі постановки завдання приймається геомеханічна модель із зазначенням діючих сил в масиві (гравітаційних, тектонічних і ін.), Які зазвичай з'ясовуються в процесі дослідження початкового напруженого стану.

Далі наводяться кількісні оцінки механічних властивостей порід і структурно-механічних особливостей масиву, що відбилися в прийнятій геомеханічній моделі.

Вибір аналітичного методу розв'язання задачі визначається не тільки геомеханічною моделлю масиву т.е. видом фізичних рівнянь, але в значній мірі і кінцевою метою вирішення завдання.

Пояснимо це на прикладі завдання за оцінкою міцності незакріплених виробок. На першому етапі рішення при визначенні напружень в околиці виробок доцільно використовувати методи лінійної та нелінійної теорії пружності в залежності від деформаційних властивостей порід, т. е. в залежності від прийнятої геомеханічної моделі масиву. На другому етапі рішення задачі при дослідженні руйнування порід і оцінці міцності виробок без їх кріплення доцільно скористатися методами теорії граничної рівноваги [4].

Крім того, вибір геомеханічної моделі, а отже, і методу розв'язання задачі часто визначається напруженим станом масиву: одні й ті ж породи в умовах різного напруженого стану можуть виявляти властивості пружних, пластичних або тендітних тіл. В кінцевому підсумку при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки слід віддавати перевагу чисельним методам моделювання геомеханічних процесів.

1.2. Чисельні методи в геомеханіці

Знаходження точних рішень про напружено-деформований стан в точці суцільного середовища пов'язано з інтеграцією диференціальних рівнянь рівноваги з тими чи іншими граничними умовами. Складність аналітичних рішень обмежує їх застосування в гірській геомеханіці, а існуючі рішення розглядають часні, елементарні завдання. Далеко не завжди може бути знайдено аналітичне рішення більш складних завдань, а наближене чисельне рішення пов'язане з великим обсягом обчислювальних операцій.

Розвиток обчислювальної техніки в другій половині ХХ століття і пов'язаний з цим прогрес в теорії і практиці чисельних методів привели до створення і розвитку потужних інструментів для розв'язання задач математичної фізики - методу кінцевих елементів (МКЕ) і методу граничних елементів (МГЕ) [4].

Наприклад, плоске січення підготовчої виробки аркової форми, що сполучається з виробленим простором лави, є площина, ослаблена вирізом досить складної форми рис.1.1.

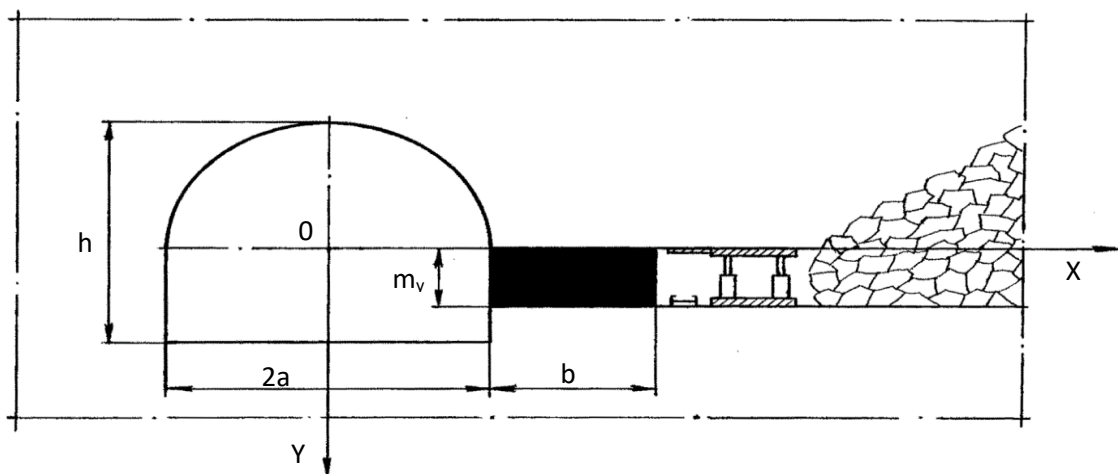


Рис. 1.1. Плоский перетин виробки, поєднаної з виробленим простором лави [44]

Наявність області завалених порід створює додаткову неоднорідність даного середовища. Отримати рішення задачі про розподіл напружень і деформацій методами, розглянутими вище, для наведеної області, навіть в припущенні, що середовище деформується тільки пружно, не уявляється можливим. В інженерній практиці для обліку перерахованих вище факторів, які

не вдається ввести в розрахункову схему, використовують різні коефіцієнти, отримані, як правило, емпіричним шляхом на основі узагальнення натурних спостережень або даних лабораторних випробувань. Однак, використання емпіричних коефіцієнтів, «підправляти» аналітичне рішення, обмежена тими конкретними умовами, в яких проводилися спостереження або експеримент. Такий підхід загрожує ефектом «накопичення помилок»: проектувальник вибирає значення потрібних йому коефіцієнтів з деякого діапазону (іноді досить широкого), не маючи достатніх підстав для вибору саме цих значень. Чим більше коефіцієнтів потрібно ввести, тим більша ймовірність того, що отримуюча в результаті величина відхиляється від свого істинного значення і тим більше величина цього відхилення.

Більш точне рішення поставленої задачі можна отримати, якщо розрахункова схема і метод рішення дозволяють спочатку врахувати, що цікавлять дослідника чинники. Широкі можливості відкривають в цьому плані так звані чисельні методи рішення, запозичені з механіки твердого тіла, що деформується. Найбільш ефективні з них – метод кінцевих елементів (МКЕ) і метод граничних елементів (МГЕ). Інтенсивним їх розвитком і застосуванням в практиці інженерних розрахунків стало можливим з розвитком і доступністю обчислювальної техніки. В останні два десятиліття завдяки застосуванню цих методів дуже розширився клас завдань, що вирішуються в механіці гірських порід [44].

1.2.1. Метод кінцевих елементів.

Метод кінцевих елементів запозичений з будівельної механіки. Його суть полягає в наступному.

З нескінченного масиву виділяється деяка інформація, що цікавить нас по цій області, наприклад, в околиці яка підлягає вивченню виробки рис. 1.2.

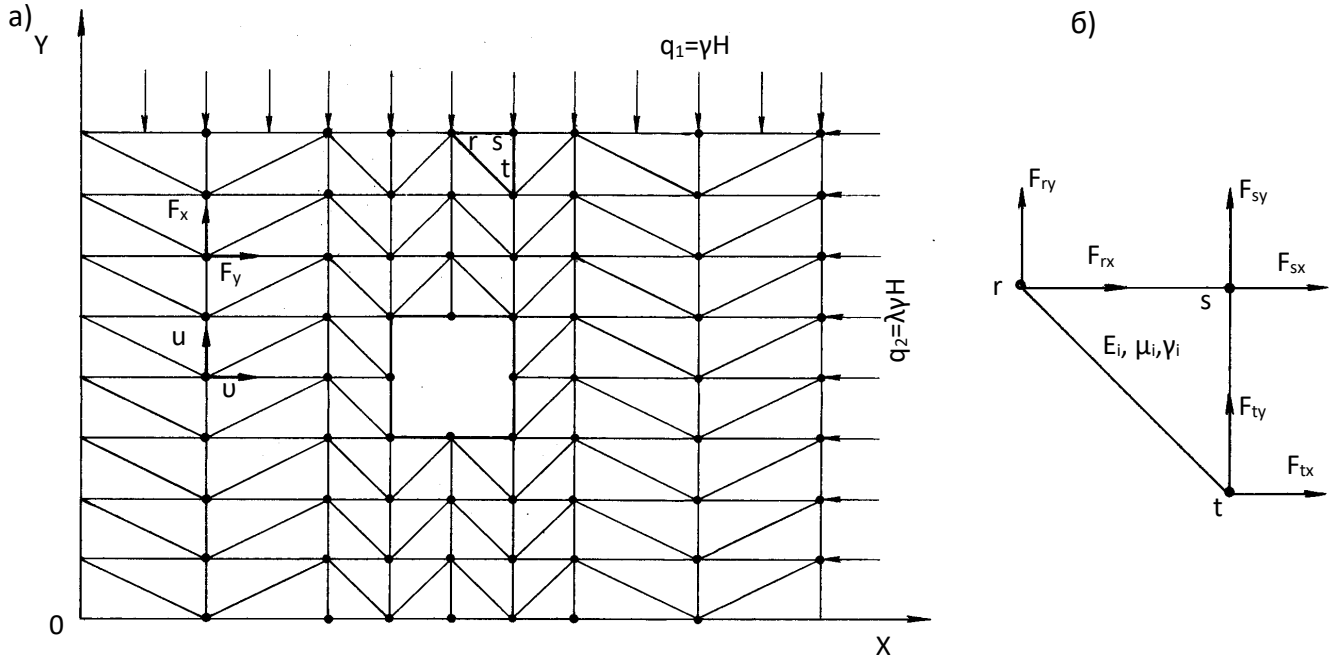


Рис. 1.2. Конечноеlementная аппроксимация досліджуваної області (а) і її довільний i -ий елемент (б) [44]

Дія відкинутої частини масиву замінюємо зусиллями, прикладеними на границі області:

$$\sigma_y = -\gamma H; \quad \sigma_x = -\lambda \gamma H.$$

Вся досліджувана область ділиться на підобласті, досить рисі, щоб вважати всередині їх середу однорідної і ізотропного рис.1.2, б. Тому властивості середовища в кожній з підобластей описуються постійними (для даної підобласті) характеристиками: E , μ , γ . Ці подобласті називаються кінцевими елементами. Вони взаємодіють один з одним в вузлах через вузлові сили $-F$ і вузлові переміщення. У такому вигляді досліджувана область подібна деякої стрижневий системі. Повідомляючи одному вузлу зусилля або переміщення, отримаємо відгук у всій системі, в кожному з її вузлів.

Однак, основна ідея методу полягає в тому, що переміщення внутрішніх точок кожного елемента (вектор з компонентами (проекціями) $\{\delta\} = \{U, V\}$) зв'язуються з переміщеннями вузлів (вектором з компонентами) рис. 1.2, а, б.

Вся досліджувана область ділиться на підобласті, досить рисі, щоб вважати всередині їх середу однорідної і ізотропного рис. 1.2. б. Тому властивості середовища в кожній з підобластей описуються постійними (для даної підобласті) характеристиками: E, μ, γ . Ці подобласті називаються кінцевими елементами. Вони взаємодіють один з одним в вузлах через вузлові сили $-F$ і вузлові переміщення δ . У такому вигляді досліджувана область подібна деякій стрижневий системі. Повідомляючи одному вузлу зусилля або переміщення, отримуємо відгук у всій системі, в кожному з її вузлів.

Однак, основна ідея методу полягає в тому, що переміщення внутрішніх точок кожного елемента (вектор $\vec{\delta}$ з компонентами (проекціями) $\{\delta\} = \{U, V\}$) зв'язуються з переміщеннями вузлів (вектором $\vec{\delta}_e$ з компонентами $\{\delta\}_e = \{\delta_r, \delta_s, \delta_t\} = \{U_r, V_r, U_s, V_s, U_t, V_t\}$) рис.1.2, а, б. Цей зв'язок виражається деякою функцією, яка званої функцією форми.

$$\{\delta\}_e = \Phi\{\delta\}_e. \quad (1.1)$$

Її треба підібрати так, щоб задовольнити граничним умовам на контурі елемента і дотриматися умови нерозривності деформацій. Найбільш просто отримати цю функцію для кінцевого елемента трикутної форми. Саме тому найчастіше досліджувану область розбивають на кінцеві елементи трикутної форми.

Компоненти вектора переміщень довільної внутрішньої точки рис.1.3 пов'язують з компонентами вектора переміщень вузлів (детальний висновок опускаємо):

$$\begin{aligned} u_e &= \frac{1}{2S} \left[(a_r + b_r x + c_r y) u_r + (a_s + b_s x + c_s y) u_s + (a_t + b_t x + c_t y) u_t \right] \\ v_e &= \frac{1}{2S} \left[(a_r + b_r x + c_r y) v_r + (a_s + b_s x + c_s y) v_s + (a_t + b_t x + c_t y) v_t \right] \end{aligned} \quad (1.2)$$

де:

$$\begin{aligned} a_r &= X_s Y_t - X_t Y_s, & b_r &= Y_s - Y_t, & c_r &= X_t - X_s. \\ a_s &= X_t Y_r - X_r Y_t, & b_s &= Y_t - Y_r, & c_s &= X_r - X_t. \\ a_t &= X_r Y_s - X_s Y_r, & b_t &= Y_r - Y_s, & c_t &= X_s - X_r. \end{aligned}$$

де - $X_s, Y_s, X_t, Y_t, X_r, Y_r$ координати вузлів елементів, S - площа трикутного елемента, що визначається наступною матрицею:

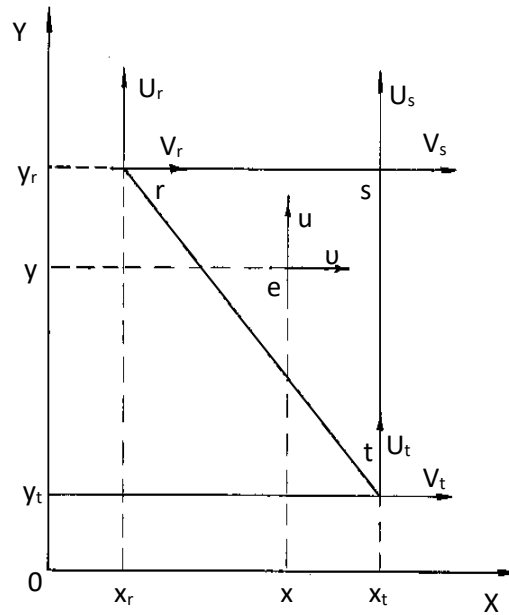


Рис. 1.3. До визначення вектора переміщень довільної внутрішньої точки елемента

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & X_r & Y_r \\ 1 & X_s & Y_s \\ 1 & X_t & Y_t \end{bmatrix}.$$

Оскільки ми маємо справу з векторними величинами, все співвідношення і далі зручно записати в матричній формі. З вектором переміщень пов'язують вектор деформацій:

$$\{\varepsilon\} = B\{\delta\}_e, \quad (1.3)$$

де B – координатна матриця. Вона визначається наступним чином:

$$B = \frac{2}{2S} \begin{bmatrix} b_r & 0 & b_s & 0 & b_t & 0 \\ 0 & c_r & 0 & c_s & 0 & c_t \\ c_r & b_r & c_s & b_s & c_t & b_t \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

Далі, використовуючи матрицю пружності

$$D = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \begin{bmatrix} 1 - \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1 - \mu & 0 \\ 0 & 0 & (1 - 2\mu)/2 \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

переходять до напруг:

$$\{\sigma\} = D\{\varepsilon\} = DB^T\{\delta\}_e, \quad (1.6)$$

де B^T – транспонована матриця B . Остання рівність - не що інше, як закон Гука в матричному вигляді.

Поставлена задача буде вирішена, якщо будуть відомі переміщення вузлів під дією прикладеного навантаження. А вони, звичайно, пов'язані із зусиллями в вузлах, тобто з вектором $\{F\}_e$. Цей зв'язок впливає з умови: робота вузлових сил по переміщенню вузлів повинна бути дорівнювати роботі внутрішніх сил, тобто напруг. Для трикутного елемента ця умова дає рівняння:

$$\{F\}_e = [k]_e\{\delta\}_e, \quad (1.7)$$

де $[k]_e$ – так звана матриця жорсткості елемента, утворена в такий спосіб:

$$[k]_e = \frac{h}{2S} B^T D B, \quad (1.8)$$

На цьому підготовча робота закінчується.

Найголовнішим етапом створення кінцево-елементної моделі є побудова для всієї системи узагальненої матриці жорсткості, в яку входять жорсткості кожного елемента. При цьому всі зовнішні навантаження приведені до вузлових сил. Наприклад, на рис.1.4 показано, як масова сила P , що діє в центрі ваги елемента, а також розподілене навантаження q наводяться до системи вузлових сил.

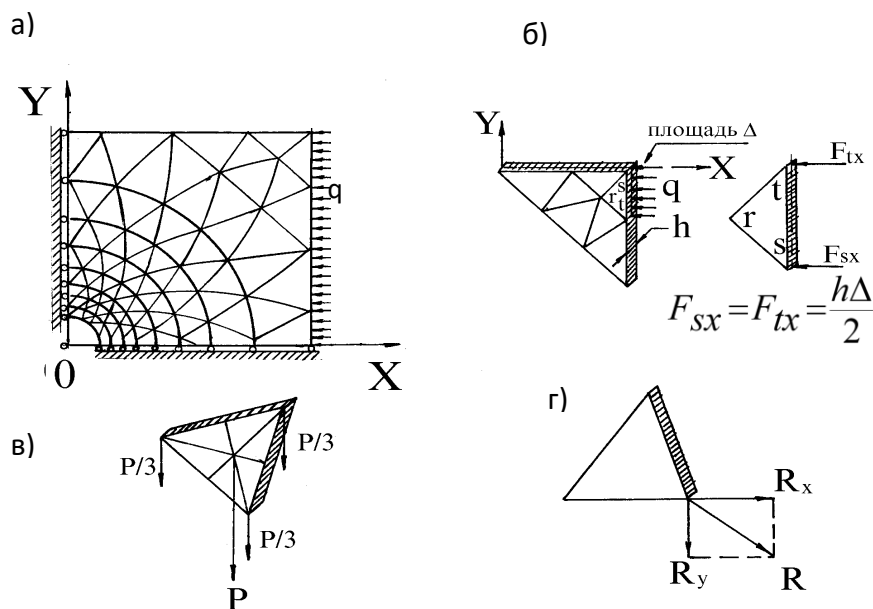


Рис. 1.4. Приклади приведення навантажень до статистично еквівалентної системі вузлових сил: а) - розподілене навантаження, що діє на досліджувану область; б) - заміна розподіленого навантаження q вузловими силами F_{tx} и F_{sx} ; в) - розкладання сили тяжіння P на систему вузлових сил; г) - розкладання вузловий сили R на складові R_x и R_y [43]

Для лінійних задач справедливий принцип суперпозиції. З безлічі векторів $\{F\}_e$ и $\{\delta\}_e$ формується узагальнений вектор сил $\{F\}$ и вектор переміщень вузлів $\{U\}$, які пов'язані між собою рівністю:

$$\{F\} = K \{U\}. \quad (1.9)$$

де K - узагальнена матриця жорсткості системи, елементами якої є матриці жорсткості кожного кінцевого елемента:

$$K = \begin{bmatrix} \sum_{e=1}^m k_{1,1}^{(e)} & \sum_{e=1}^m k_{1,2}^{(e)} & \dots & \sum_{e=1}^m k_{1,j}^{(e)} & \dots & \sum_{e=1}^m k_{1,2n}^{(e)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{e=1}^m k_{i,1}^{(e)} & \sum_{e=1}^m k_{i,2}^{(e)} & \dots & \sum_{e=1}^m k_{i,j}^{(e)} & \dots & \sum_{e=1}^m k_{i,2n}^{(e)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{e=1}^m k_{2n,1}^{(e)} & \sum_{e=1}^m k_{2n,2}^{(e)} & \dots & \sum_{e=1}^m k_{2n,j}^{(e)} & \dots & \sum_{e=1}^m k_{2n,2n}^{(e)} \end{bmatrix},$$

Принцип її побудови детально наводиться в [17].

Це рівність, записане в матричній формі, являє собою систему лінійних рівнянь.

$$\begin{aligned} U_1 K_{11} + V_1 K_{12} + U_2 K_{13} + V_2 K_{14} + \dots + U_{2n} K_{1,2n-1} + V_{2n} K_{1,2n} &= F_{x1} \\ U_1 K_{21} + V_1 K_{22} + U_2 K_{23} + V_2 K_{24} + \dots + U_{2n} K_{2,2n-1} + V_{2n} K_{2,2n} &= F_{y1} \\ \dots & \\ \dots & \\ U_1 K_{2n-1,1} + V_1 K_{2n-1,2} + U_2 K_{2n-1,3} + V_2 K_{2n-1,4} + \dots + U_{2n} K_{2n-1,2n-1} + V_{2n} K_{2n-1,2n} &= F_{xn} \\ U_1 K_{2n,1} + V_1 K_{2n,2} + U_2 K_{2n,3} + V_2 K_{2n,4} + \dots + U_{2n} K_{2n,2n-1} + V_{2n} K_{2n,2n} &= F_{yn} \end{aligned} \quad , \quad (1.10)$$

Невідомими тут є переміщення вузлів конечноелементної сітки $\{U\}$. Узагальнений вектор сил – це стовпець вільних членів в системі рівнянь. Коефіцієнти при невідомих - елементи матриці жорсткості, які включають в себе координати вузлів і пружні константи. Якщо область розбита на m елементів, які з'єднуються між собою в n вузлах, то ми отримаємо систему $2n$ рівнянь щодо $2n$ невідомих переміщень.

Отриману систему можна вирішити одним з відомих методів (Гаусса, Зейделя та ін.).

Визначивши в результаті рішення для кожного вузла компоненти вектора переміщень, через координатну матрицю B переходимо до деформацій в центрі

ваги кінцевого елемента $\{\varepsilon\}$ (1.3), а від деформацій через матрицю пружності до напруг $\{\delta\}$ (1.6). Таким чином, поставлена задача вирішена. У центрі кожного елемента отримані значення повного тензора напружень, деформацій, переміщень.

Для того, щоб отримати досить точний розподіл напружень поблизу виробки, кінцеві елементи потрібно робити дрібними, отже, їх буде багато. Для кожного елемента потрібно сформувавши кілька матриць, які потім зливаються в загальну матрицю жорсткості, тобто потрібно формувати великі масиви чисел. Для цього необхідний великий обсяг оперативної пам'яті ПЕОМ. На рис.1.4, а показана розрахункова схема і сітка для вирішення тестового завдання з метою порівняння чисельного рішення і точного, аналітичного. Для такої симетричної задачі досить розглянути чверть області, закріпивши жорстко лінії симетрії. Стека зображена зі згущенням елементів у міру наближення до приконтурної області яка цікавить нас.

З сутності методу випливають його величезні можливості для математичного моделювання різних неоднорідностей. По суті, для кожного елемента можна задати свої властивості, правда тільки пружні. Зокрема, легко моделюється слоистість. Можна імітувати зону зруйнованих порід, задавши відповідні (менші) значення модуля пружності, або навпаки, врахувати наявність деяких більш жорстких елементів.

Є ліцензовані програмні продукти, що реалізують МСЕ для різних завдань механіки. Вони мають широкі можливості і потужний інтерфейсі. Одна з таких обчислювальних програм, що реалізує МСЕ для задач геомеханіки, приведена в відомій монографії Б.А. Фадєєва [3] і Б.З. Амусина [25]. У Національному гірничому університеті розроблені власні версії обчислювальних програм навчального та дослідницького плану. До теперішнього моменту на їх основі отримано багато рішень різних геомеханічних задач. Причому, не тільки в пружною постановці і не тільки для двовимірної (плоскої) області. Просторова область масиву також може бути апроксимована кінцевими елементами, але вже не трикутниками, а, наприклад, тетраедричних. Відзначимо також можливість

отримання рішення в нелінійній постановці, тобто, в припущенні, що породний масив деформується непружно, виявляє пластичні деформації або тендітні руйнування. Використовуючи обчислювальні можливості методу, нелінійне рішення отримують як послідовність пружних рішень.

1.2.2. Метод граничних елементів.

Ідея методу граничних елементів полягає в наступному. В теорії пружності вирішені деякі прості завдання, наприклад, відома задача Кельвіна про дію зосередженої сили F в нескінченній пружному середовищі рис.1.5.

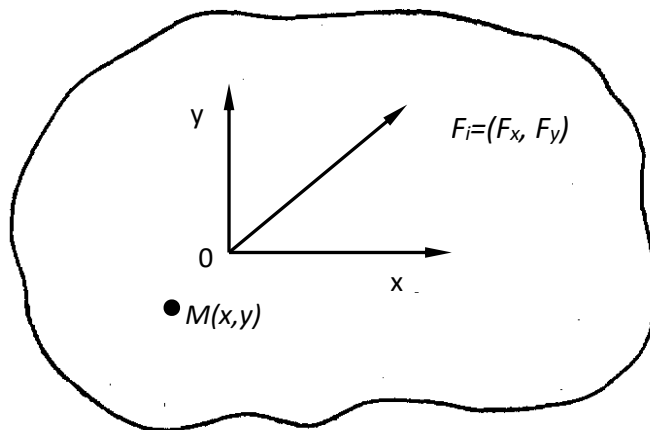


Рис. 1.5. Дія зосередженої сили F в нескінченній пружній середовищі (завдання Кельвіна) [44]

У довільній точці області $M(x, y)$ визначені напруги σ і переміщення U від дії цієї сили. У прямокутній системі координат вони визначаються через деяку функцію координат точки і її похідні.

$$g(x, y) = -\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \ln(x^2 + y^2)^{1/2}. \quad (1.12)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона. Вирази для напруг і переміщень мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= F_x [2(1-\mu)g_{,x} - xg_{,xx}] + F_y (2\mu g_{,y} - yg_{,xx}), \\ \sigma_{yy} &= F (2\mu g_{,x} - xg_{,yy}) + F_y [2(1-\mu)g_{,y} - yg_{,yy}], \\ \sigma_{xy} &= F_x [(1-2\mu)g_{,y} - xg_{,xy}] + F_y [(1-2\mu)g_{,x} - yg_{,xy}] \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$u_x = \frac{F_x}{2G} [(3 - 4\mu)g - xg_{,x}] + \frac{F_y}{2G} (-yg_{,x}),$$

$$u_y = \frac{F_x}{2G} (-xg_{,y}) + \frac{F_y}{2G} [(3 - 4\mu)g - yg_{,y}]$$

Можна переконатися, що отримані в такому вигляді напруги задовольняють рівнянням рівноваги, а переміщення – умові спільності деформацій.

Наведене рішення являє собою приклад так званого сингулярного рішення: напруги і переміщення як функції координат точки неперервні усюди за винятком початку координат (точки прикладання сили F), де вони не визначені, тобто сингулярного.

Якщо в нескінченному середовищі будуть діяти кілька зосереджених сил, то рішення задачі про напруги і переміщення в довільній точці середовища можна отримати методом суперпозиції рис.1.6. Вирази для напруг і переміщень візьмуть більш складний вид, оскільки в них внесе свій «внесок» кожна з діючих сил.

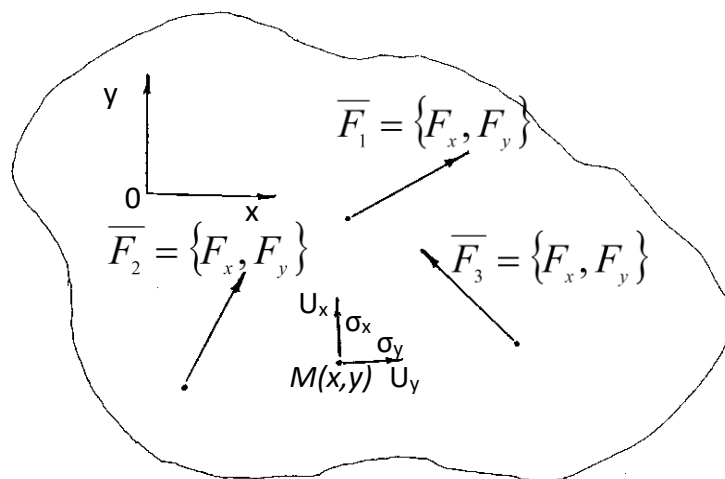


Рис.1.6. Дія декількох зосереджених сил в нескінченній пружній середовищі [44]

Можна піти далі і, використовуючи той же принцип, отримати рішення для випадку, коли зусилля додані не до точок, а рівномірно розподілені вздовж деякого відрізка кінцевої довжини (2а) в нескінченно пружному тілі рис.1.7.

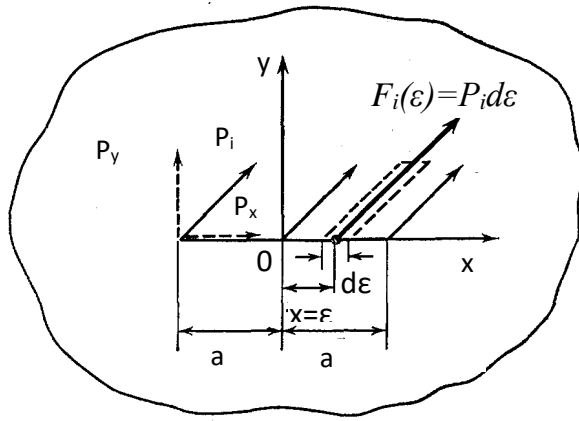


Рис.1.7. Інтегрування рішення Кельвіна [44]

Рішення при цьому суттєво ускладнюється. Напруги і переміщення довільної точки середовища виражаються через функцію:

$$f(x, y) = \int_{-a}^a g(x - \xi, y) d\xi$$

або

$$f(x, y) = -\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[y \left(\arctg \frac{y}{x-a} - \arctg \frac{y}{x+a} \right) - (x-a) \times \right. \\ \left. \times \ln \sqrt{(x-a)^2 + y^2} + (x+a) \ln \sqrt{(x+a)^2 + y^2} \right], \quad (1.14)$$

і її частні похідні:

$$f'_x = +\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[\ln \sqrt{(x-a)^2 + y^2} - \ln \sqrt{(x+a)^2 + y^2} \right], \\ f'_y = -\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[\arctg \frac{y}{x-a} - \arctg \frac{y}{x+a} \right], \\ f''_{xy} = +\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[\frac{y}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{y}{(x+a)^2 + y^2} \right], \\ f''_{xx} = -f''_{yy} = +\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[\frac{x-a}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{x+a}{(x+a)^2 + y^2} \right]. \quad (1.15)$$

Напруги і переміщення в довільній точці середовища від дії постійного зусилля P мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= P_x [(3 - 2\nu)f'_x + yf''_{xy}] + P_y (2yf'_y + yf''_{yy}), \\
\sigma_y &= P_x [-(1 - 2\nu)f'_x - yf''_{xy}] + P_y [2(1 - \nu)f'_y - yf''_{yy}], \\
\tau_{xy} &= P_x [2(1 - \nu)f'_y + yf''_{yy}] + P_y [(1 - 2\nu)f'_x - yf''_{xy}]
\end{aligned}
\tag{1.16}$$

переміщення

$$\begin{aligned}
u_x &= \frac{P_x}{2G} [(3 - 4\nu)f + yf'_y] + \frac{P_y}{2G} (-yf'_x), \\
u_y &= \frac{P_x}{2G} (-yf'_x) + \frac{P_y}{2G} [(3 - 4\nu)f - yf'_y]
\end{aligned}
\tag{1.17}$$

У точках $x = \pm a$ функція $f(x, y)$, а отже і напруги, а також пов'язані з ними переміщення, мають особливість (сингулярність).

Уявімо тепер, що таких відрізків в нескінченному тілі багато, вони примикають один до одного, утворюючи деяку замкнуту ламану лінію. Напруження в довільній точці середовища отримаємо, підсумовуючи вклади від дії зусиль на кожному з цих відрізків. Цей принцип використаний для вирішення вже відомого нам завдання про одиночну виробку в масиві, яку можна уявити, як порожнину в нескінченному пружному тілі. Контур цієї порожнини замінюється описаної вище ламаної і являє собою деяку кордон в пружному тілі. Тому відрізки ламаної, на яких докладено зусиль P_j , $j = 1, N$ (N – число відрізків), називаються граничними елементами. Чисельна процедура полягає в підсумовуванні вкладів від зусиль на кожному j -му відрізку – граничному елементі. Вплив кожного зусилля на відповідному відрізку дає сингулярне рішення, яке задовольняє рівняння рівноваги. Тому немає необхідності

розбивати область на підобласті як в МКЕ. Ділиться на елементи тільки межа області рис.1.8.

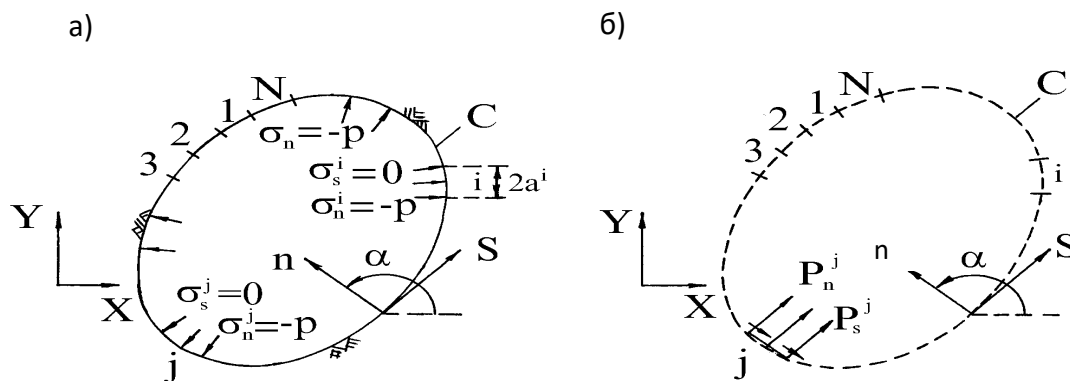


Рис.1.8. Ілюстрація методу граничних елементів для задачі про полості: а) фізична задача; б) чисельна модель [44]

Довжина кожного елемента $-2a^i$. Разом з глобальною системою координат XOY розглядають для кожного елемента локальні координати n, s , що змінюються від точки до точки. На кожному з N відрізків діють постійні нормальні P_s^j і дотичні P_n^j напруги. Для простоти показані тільки напруги, прикладені до j -му відрізка і позначені P_s^j і P_n^j . В підсумку, як і в МКЕ, завдання зводиться до вирішення системи лінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_S^i &= \sum_{j=1}^N A_{SS}^{ij} P_S^j + \sum_{j=1}^N A_{Sn}^{ij} P_n^j \\ \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A_{nS}^{ij} P_S^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\} i=1, \dots, N. \quad (1.18)$$

де A_{SS}^{ij} , - так звані коефіцієнти впливу, що підсумовують вклади кожного i -го зусилля, заданого на j -м елементі кордону. Ліва частина рівнянь містить напруги (дотичні і нормальні), які виникають в точці середовища під дією сумарного впливу зусиль P_s^j і P_n^j прикладених на кожному з N відрізків. Принциповим моментом, однак, є те, що дійсні нормальне і дотичне напруження на j -м відрізку не рівні P_s^j та P_n^j . Для кожного граничного елемента необхідно розрізняти дві

різні групи напруг: прикладені P_s^j та P_n^j і дійсні σ_s^j , σ_n^j , які викликані дією прикладених напружень на всіх N елементах кривої. Величини P_s^j і P_n^j в правих частинах рівнянь (1.17) є «фіктивними». Їх потрібно визначити так, щоб задовольнити граничним умовам. Розглянемо ці умови.

У завданнях геомеханіки використовується поняття початкових напружень, що мають місце в масиві до початку виробництва гірських робіт. Спочатку в кожній точці породного масиву діють напруги:

$$(\sigma_y)_0 = \gamma H,$$

$$(\sigma_x)_0 = \lambda \gamma H.$$

Від впливу виробки виникають додаткові напруги: σ_y , σ_x .

Повні напруги в точці рівні:

$$\begin{aligned} \sigma'_y &= (\sigma_y)_0 + \sigma_y, \\ \sigma'_x &= (\sigma_x)_0 + \sigma_x. \end{aligned} \quad (1.19)$$

На контурі виробки повні напруги дорівнюють нулю. Тоді додаткові напруги на контурі (кордоні області) виражаються через початкові:

$$\sigma_y = -(\sigma_y)_0 = -\gamma H, \quad (1.20)$$

$$\sigma_x = -(\sigma_x)_0 = -\lambda \gamma H.$$

Це і є граничні умови. Таким чином, перейшовши до локальної системи координат n, s сформуємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} -(\sigma_s)_0 &= \sum_{j=1}^N A_{SS}^{ij} P_S^j + \sum_{j=1}^N A_{Sn}^{ij} P_n^j \\ -(\sigma_n)_0 &= \sum_{j=1}^N A_{nS}^{ij} P_S^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\}, i=1, \dots, N. \quad \text{Вирішивши} \\ \text{її,} \quad \text{визначимо}$$

значення «фіктивних» напруг P_s^j та P_n^j і через них визначимо напруги і переміщення в будь-якій точці області. Тепер більш зрозумілими є коефіцієнти впливу. Так, коефіцієнт A_{Sn}^{ij} , наприклад, дає дійсне дотичне напруження в центрі

i -го відрізка (σ_S^i), викликане постійною одиничною навантаженням, прикладеної на j -м відрізку ($P_n^j = 1$). Детально про чисельної реалізації МГЕ можна прочитати в монографії С. Крауча і Старфілда [24].

У порівнянні з МКЕ метод граничних елементів економічніший. Система рівнянь має порядок набагато менший, оскільки вона сформована тільки для N елементів, заданих на контурі виробки. Однак метод граничних елементів має дещо менше можливостей для моделювання різних неоднорідностей середовища і нелінійність фізичних співвідношень. Хоча і тут існують різні підходи. Все залежить від базового рішення.

У розглянутому вище підході (він називається метод «фіктивних навантажень») в якості базового було прийнято рішення задачі Кельвіна.

Розроблено й інший підхід, який використовується в якості базового рішення в теорії пружності завдання про розрив зсувів уздовж деякого відрізка кінцевої довжини всередині нескінченного пружного тіла. У формі «розривних зсувів» МГЕ дуже ефективний для вирішення завдань, пов'язаних з трещиноватістю гірських порід. Є можливість моделювати і «з'яючі» тріщини, і заповнені матеріалом-заповнювачем. В останньому випадку граничні елементи, які моделюють тріщину, представлені як пружний контакт відповідної жорсткості. Поєднання цих методів відкриває можливості для вирішення завдань з різних областей техніки, в тому числі і геомеханіці.

1.2.3. Метод дискретних елементів.

Метод дискретних елементів (МДЕ) розроблений доктором Г. Кундаллом в 1978 році [34]. Він базується на двох фундаментальних законах фізики – другому законі Ньютона і закон пружних деформацій Гука.

Областю застосування МДЕ є ґрунти, основи і фундаменти; породні масиви, що мають складну структуру; механічні системи з osvобождаючимися зв'язками; нелінійні динамічні процеси, для яких він найбільш ефективний; хіміко-фізичні процеси (наприклад, рух колоїдної рідини); процеси збагачення корисних копалин методом флотації в важких середовищах і багато іншого.

Суть МДЕ стосовно до моделювання складноструктурних породних масивів, що містять штучні порожнини (виробітку), полягає в наступному. Реальний породний масив в моделі замінюється дискретними елементами, які, в принципі, можуть мати будь-яку форму, і краще, якщо вона буде близька до контурів елементів структури масиву.

Однак, по ряду причин, найважливішою з яких є простота створення математичної моделі дискретної середовища, елементи її найпростіше представити у вигляді куль, які в загальному випадку мають різний діаметр. Геометрична модель такого середовища наведена на рис.1.9.

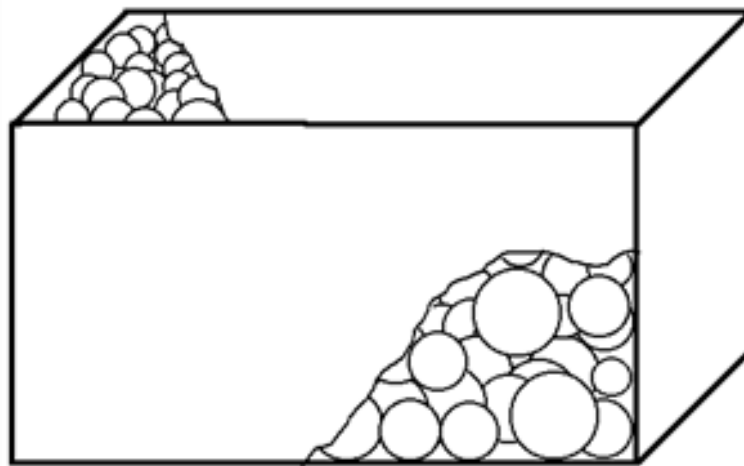


Рис. 1.9. Геометрична модель метода дискретних елементів [44]

Як видно з рисунку, модель суцільний або сипучої (дискретної) середовища, як правило, являє собою шість попарно паралельних площин, які, перетинаючись, відокремлюють деякий замкнутий простір, в якому розміщені кулі – елементи нерухомих площин. Верхня площина найчастіше відсутня, і зовнішнє навантаження прикладається безпосередньо до куль. Кулі взаємодіють між собою і з обмежувачими площинами за допомогою сил тертя і дисипативних сил, а також, і це головне, за допомогою недосконалих вивільняються зв'язки, які протидіють їх взаємопроникнення. Якщо інших зв'язків немає, то кулі імітують сипучу середу. Кулі можуть бути також «склеєні» між собою і стінами за допомогою таких неідеальних зв'язків, які не тільки перешкоджають

їх взаємопроникнення, але також разбеганию і обертанню. У цьому випадку розглянута механічна система імітує суцільний масив.

Як тільки реакції в не звільнених зв'язках перевищує певна межа, вони ліквідуються як зруйновані і тоді вже система куль і площин імітує зруйнований масив, який складається з незв'язаних між собою частинок і, можливо, сипучого матеріалу між ними. У самому ж загальному випадку модель, що складається з куль і обмежують площин, може імітувати суцільний породний масив, що містить зруйновані ділянки.

Для того, щоб середовище складається з пружних куль різного діаметра, відповідає реальному породному масиві, авторами роботи [24] вводяться такі припущення:

1. Форма і розмір дискретних елементів (куль) не змінюються під дією прикладених навантажень.

2. Реальні деформації дискретних елементів замінюються взаємопроникненням куль.

3. Тимчасовий крок повинен бути настільки малим, щоб за той час, поки він триває, порушення (дислокації) не могли поширюватися на будь-які інші кулі, крім тих, які знаходяться в безпосередньому контакті з даним кулею.

Останнє припущення є особливо важливим, оскільки обумовлює дуже зручне взаємодія елементів – куль: на кожному часовому кроці рівнодіюча сил, прикладених до кожного окремого шару, визначається виключно координатами центрів розглянутої кулі і тих куль, які в даний момент з ним стикаються.

Розрахункова схема методу дискретних елементів наведена на рис.1.10.

Елементи – кулі навантажені гравітаційними силами і виявляють при взаємодії один з одним пружні і в'язкі властивості.

Фізико-механічні властивості дискретних елементів задаються таким чином, щоб їх поведінка в загальній масі було адекватно поведінки вихідної середовища. Для кожного елемента відомі маса, швидкість, прискорення і координати центру ваги. Крім того, до кожного елемента окремо прикладається

сила \bar{F}_i , як рівнодіюча сил тяжкості, пружною реакції, в'язкого і кулонова тертя, що відображають поточний механічне стан масиву в даний момент часу.

Рух кожного елемента описується рівнянням Лагранжа 2-го роду. З усіх численних методів, що застосовуються для вирішення поставленого завдання, найбільш ефективний модифікований метод Ейлера.

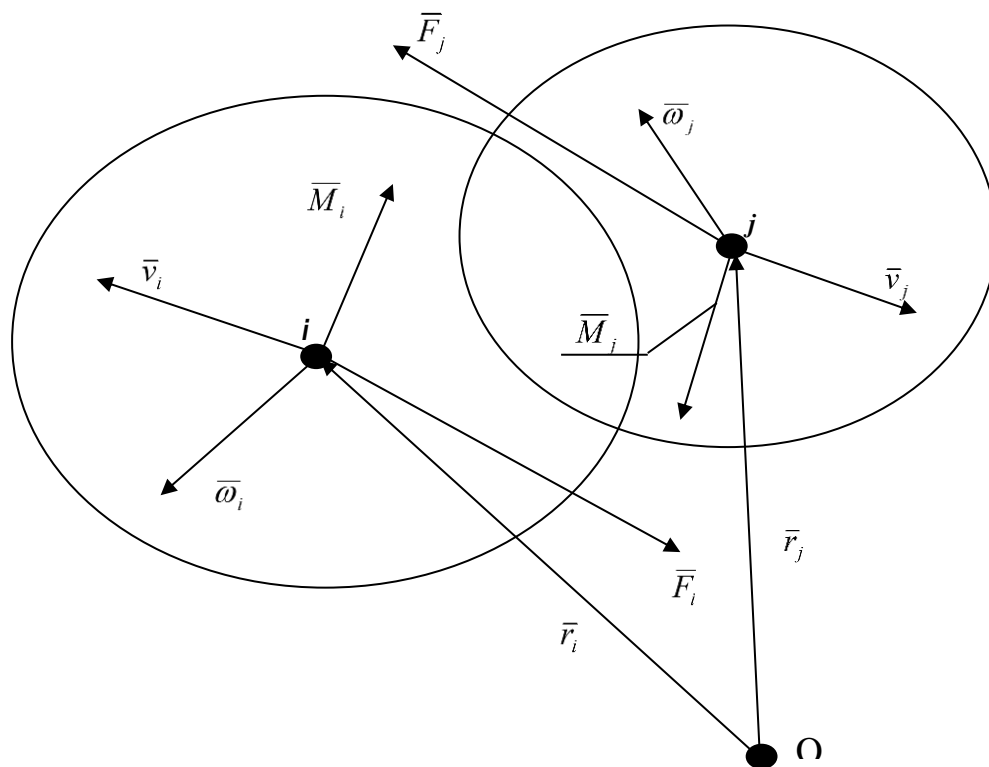


Рис. 1.10. Розрахункова схема взаємодії двох куль [42]

Відомі два способи використання методу Ейлера. Перший полягає в тому, що спочатку, виходячи з фізичних міркувань, складають систему диференціальних рівнянь і рівнянь початкових умов, а потім вирішують їх, використовуючи форрисізований метод Ейлера.

Згідно з другим способом метод Ейлера використовують не тільки для вирішення поставленого завдання, а й для опису власне фізичного процесу, тобто для постановки самої задачі.

Другий спосіб і був використаний в роботах А.А. Ткача [24] для розробки математичної моделі методу дискретних елементів у векторному викладі. Спосіб орієнтований на використання можливостей сучасних обчислювальних машин,

зокрема матричної математичної системи Matlab.

Опис фізичного процесу і обчислення його параметрів відповідно до форрисізованим методом Ейлера [27] наведені в табл.1.

Таблиця 1.1.

Схема обчислення руху системи дискретних елементів

Етап	n	t	\bar{r}	\bar{v}	$\bar{\omega}$	\bar{F}	\bar{M}	\bar{a}	$\bar{\varepsilon}$	
Початкові умови	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\Delta t}{2}$	—	0	0	—	—	—	—	
	0	0	\bar{r}^0	—	—	\bar{F}^0	\bar{M}^0	\bar{a}^0	$\bar{\varepsilon}^0$	
Основний розрахунок	$\frac{1}{2}$	$\frac{\Delta t}{2}$	—	$\frac{1}{\bar{v}^2}$	$\frac{1}{\bar{\omega}^2}$	—	—	—	—	
	1	Δt	\bar{r}^1	—	—	\bar{F}^1	\bar{M}^1	\bar{a}^1	$\bar{\varepsilon}^1$	
	$1\frac{1}{2}$	$\frac{3\Delta t}{2}$	—	$\frac{1}{\bar{v}^2}$	$\frac{1}{\bar{\omega}^2}$	—	—	—	—	
	- - - - -									
	$\frac{2i-1}{2}$	$\frac{2i-1}{2}\Delta t$	—	$\frac{1}{\bar{v}^2}$	$\frac{1}{\bar{\omega}^2}$	—	—	—	—	—
	i	$i\Delta t$	\bar{r}^i	—	—	\bar{F}^i	\bar{M}^i	\bar{a}^i	$\bar{\varepsilon}^i$	—
- - - - -										

У табл. 1.1. та на рис. 1.10 прийняті наступні позначення:

n - номер півкроку і кроку по модельному часу ($n = -\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, 1, 1\frac{1}{2}, \dots$);

t - модельний відлік часу (знак «+» слід форрисьно розуміти, як тимчасові кроки в майбутнє, а знак «-», як тимчасові кроки в минуле відносно моменту часу $t = 0$);

\bar{r} (або \bar{r}^n) – матриця-рядок, компонентами якої є радіуси-вектори центрів куль: $\bar{r} = (\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{r}_3, \dots, \bar{r}_N)$ або $\bar{r}^n = (\bar{r}_1^n, \bar{r}_2^n, \bar{r}_3^n, \dots, \bar{r}_N^n)$, де N – загальне число куль;

\bar{v} (або \bar{v}_n) – матриця-рядок, компонентами якої є вектори швидкостей центрів куль: $\bar{v} = (\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_N)$ або $\bar{v}^n = (\bar{v}_1^n, \bar{v}_2^n, \dots, \bar{v}_N^n)$;

$\bar{\omega}$ (або $\bar{\omega}^n$) – матриця-рядок, компонентами якої є вектори кутових швидкостей куль: $\bar{\omega} = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_N)$ або $\bar{\omega}^n = (\bar{\omega}_1^n, \bar{\omega}_2^n, \dots, \bar{\omega}_N^n)$;

\overline{F} (або \overline{F}^n) – матриця-рядок, компонентами якої є вектори равнодействующих всіх активних і пасивних сил (крім сил інерції) для кожного окремого кулі: $\overline{F} = (\overline{F}_1, \overline{F}_2, \dots, \overline{F}_N)$ або $\overline{F}^n = (\overline{F}_1^n, \overline{F}_2^n, \dots, \overline{F}_N^n)$;

\overline{M} (або \overline{M}^n) – матриця-рядок, компонентами якої є вектори моментів сил, які входять в матрицю-рядок \overline{F} : $\overline{M} = (\overline{M}_1, \overline{M}_2, \dots, \overline{M}_N)$ або $\overline{M}^n = (\overline{M}_1^n, \overline{M}_2^n, \dots, \overline{M}_N^n)$;

\overline{a} (або \overline{a}^n) – матриця-рядок, компонентами якої є вектори прискорень центрів куль: $\overline{a} = (\overline{a}_1, \overline{a}_2, \dots, \overline{a}_N)$ або $\overline{a}^n = (\overline{a}_1^n, \overline{a}_2^n, \dots, \overline{a}_N^n)$;

$\overline{\varepsilon}$ (або $\overline{\varepsilon}^n$) – матриця-рядок, компонентами якої є вектори кутових прискорень центрів куль: $\overline{\varepsilon} = (\overline{\varepsilon}_1, \overline{\varepsilon}_2, \dots, \overline{\varepsilon}_N)$ або $\overline{\varepsilon}^n = (\overline{\varepsilon}_1^n, \overline{\varepsilon}_2^n, \dots, \overline{\varepsilon}_N^n)$.

Найбільш складним в такій обчислювальній моделі є визначення рівнодіюча сил, які діють в даний момент модельного часу на кожну кулю. Для і-го кулі рівнодіюча сила F_i складаються з нормальних і тангенціальних сил пружно взаємодії з сусідніми кулями і обмежують площинами і сил тертя в точках контакту з ними. Умови контакту між дискретними елементами можна описати рядом нормальних параметрів, значення яких визначаються на основі порівняльного аналізу численних і фізичних експериментів.

Змінні, що обчислюються в табл. 1.1 вважаються постійними величинами в часі протягом кожного модельного кроку і стрибкоподібно змінюються в його кінці. Дробові значення тимчасових кроків в табл. 1.1 дозволяють на порядок підвищити точність обчислень без збільшення кількості кроків. Обчислення проводяться в наступному порядку:

- з огляду на прискорення і швидкості, які задані в початкових умовах (мінус півкроку і нульовий крок), знаходять значення швидкостей на першому півкроку;

- виходячи з отриманих значень швидкостей і початкових умов, знаходять координати центрів куль, равнодействующие сил і моментів, а потім і відповідні значення прискорень на першому модельному кроці;

- виходячи з значень швидкостей, які отримані на першому півкроку, і прискорень - на першому кроці, знаходять значення швидкостей на півтора разу кроці і т.д.

Звертає увагу на себе відсутність в табл.1 значень кутових координат центрів куль (є тільки їх радіуси - вектори). Це наслідок допущення про незмінність форми куль, яке компенсується допущенням про їх взаємодію шляхом взаємопроникнення. В результаті істотно спрощується алгоритм обчислень.

Результатом розрахунків на основі методу дискретних елементів є отримання загальної картини напружено-деформованого стану розглянутого породного масиву з визначенням величин головних напружень, осідань (переміщень) і деформацій, викликаних утворенням в суцільному середовищі порожнини заданих розмірів.

Відмінною особливістю даного методу, по відношенню до викладеним вище методам кінцевих і граничних елементів, які можна застосувати тільки в разі моделювання суцільних середовищ, є можливість опису нелінійних динамічних процесів, що виникають в деформується породному масиві, що містить порожнини і ділянки зруйнованих гірських порід.

До недоліків методу можна віднести досить високі вимоги до технічної бази для його реалізації. Для обробки великих масивів даних і вирішення реальних завдань необхідні досить високу швидкодію комп'ютера і великий обсяг оперативної пам'яті.

Таким чином, існує досить велика група методів - аналітичних і чисельних, що дозволяє досить точно встановити напружено-деформований стан породного масиву в околиці виробок при будь-якому, в тому числі і довільному, їх розташування в просторі.

1.3. Програмний продукт Phase 2 канадської компанії ROCKSIENSE

Програмний продукт Phase 2 – являє собою потужну двовимірну програму кінцевих елементів для ґрунтових і гірських застосувань RS 2 може використовуватися для широкого спектра інженерних проектів і включає в себе проектування розкопок, стійкість до похилу, просочування ґрунтових вод, імовірнісний аналіз, консолідацію та можливості динамічного аналізу.

Дозволяє моделювати поетапне утворення виробок в напруженій середовищі. При цьому на кожному наступному етапі враховуються в якості початкових деформацій, отриманих на попередніх стадіях формування напружено-деформованого стану.

Для визначення зон руйнування навколо виробок використовувався критерій Хоека-Брауна. Його загальна формула має такий вигляд:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_a \frac{\sigma_3}{\sigma_{\bar{n}^3}} + s \right)^a \quad (1.21)$$

де, σ_1, σ_3 - максирисьні і мінірисьні головні напруження в масиві, m_a - константа Хоека-Брауна для породного масиву, s та a - постійні величини, що враховують генезис і стан (якість) породного масиву, σ_{ci} - межа міцності на одновісний стиск масиву порід в інтактному стані [31].

Для породного масиву в інтактному стані критерій Хоека-Брауна зводиться до наступного виразу:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (1.22)$$

Тут константа m_i на відміну від константи m_a враховує тільки генезис і текстуру гірських порід ($4 \leq m_i \leq 33$). Більша величина відповідає слабким породам, чим вона менша, тим більш пластичної є порода, а при $m_i = 0$ має місце ідеальна пластичність.

ВИСНОВКИ

1. Постановка задачі в геомеханіці включає чітке формулювання кінцевої мети дослідження та необхідних вихідних даних для вирішення завдання;
2. Розглянули методи розв'язання задач, при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки слід віддавати перевагу чисельним методам моделювання геомеханічних процесів;
3. Проаналізували та описали чисельні методи в геомеханіці які в свою чергу підрозділяються на: метод кінцевих елементів, метод граничних елементів, метод дискретних елементів.

РОЗДІЛ 2

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОРОДНОГО МАСИВУ В ОКОЛИЦІ ОДИНОЧНОЇ ВИРОБКИ.

2.1. Постановка задач, обґрунтування розрахункових схем

Основним, або первинним, фактором, завдяки якому створюється початкове поле напруг, є сили гравітації. Крім цього параметри початкового поля напружень залежать від ряду вторинних факторів, таких як температурне поле, неотектонические процеси, рельєф земної поверхні, космічні сили і т.п. При цьому може трапитися так, що вплив вторинних факторів перевищить вплив первинних.

Для рівнинних родовищ, розташованих поза впливом гірських масивів і на достатньому видаленні від країв літосферних плит, вплив вторинних факторів досить мало і можна вважати, що початкова поле напруг створюється завдяки наявності сил гравітації.

Найбільш відповідальним етапом постановки завдання є побудова розрахункової схеми із зазначенням початкових та граничних умов. Геомеханічні процеси, пов'язані з виробництвом гірничих робіт (спорудження виробок, виймання корисних копалин і т.д.), активно реалізуються лише в деякій обмеженій області масиву в окремій частині цих робіт. Тому при побудові розрахункової схеми звичайно розглядається не весь масив, а деяка його область, зовнішні межі якої вибираються таким чином, що досліджувані механічні процеси в їхньому районі практично затухають, а гірничі породи знаходяться в умовах початкового напруженого стану [27].

Пояснимо це на простому наглядному прикладі. Розглянемо довгий важкий стержень постійного перерізу, але з виточенням в околиці точки А, що спирається на нерухому опору рис. 2.1, а.

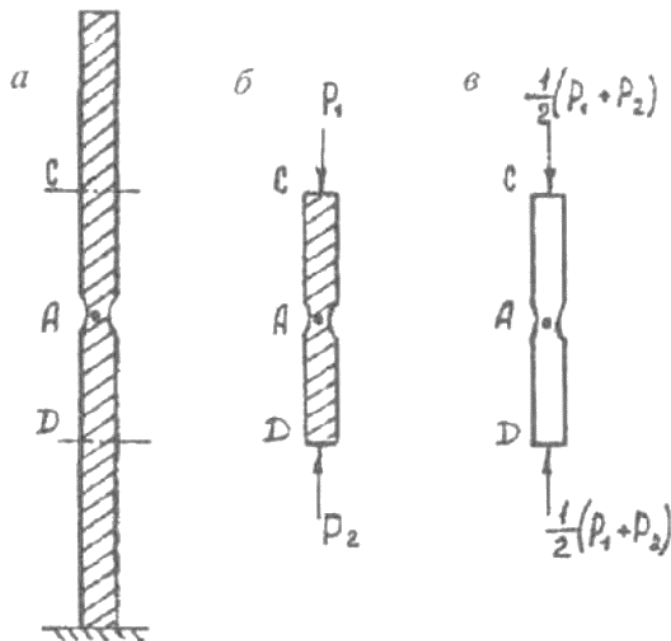


Рис. 2.1. До побудови розрахункової схеми [4]

Припустимо, нас цікавить концентрація напружень в околі точки А. Ця концентрація напружень буде помітною лише в деякій області, що примикає до виточенні, а в досить віддалених від точки А перетинах С і D практично не спостерігається. Тоді можна виділити частину важкого стержня між перетинами С і D, а решта частини відкинути, замінивши їх для збереження рівноваги реактивними силами P_1 , і P_2 , де P_1 , - вага стержня вище перетину С, P_2 - вага стержня вище перетину D. Таким чином, приходимо до розрахункової схемою, показаної на рис.2.1, яка еквівалентна початковій розрахунковій схемі [9].

Подальше спрощення розрахункової схеми зводиться до наступного. Той же відрізок стержня між перетинами С і D представимо невагомим (на відміну від важкого стержня він показаний без штрихування на рис. 2.1, а на кінцях його докладемо однакові сили, рівні напівсумі P_1 і P_2 . Очевидно, в останньому випадку розподіл напружень в околі точки А буде мало відрізнятися від розподілу напружень, отриманого по першій і другим схемам тобто, від дійсного

розподілу напружень [10]. До речі, розподіл напружень на кінцевих ділянках стержня в останній схемі суттєво відрізняється від дійсного, але в даній задачі воно нас мало цікавить. Отже, концентрацію напружень в околиці точки А можна з достатнім ступенем точності оцінити, розглядаючи невагомий стержень, на межах якого, значно віддалених від точки А, прикладені сили, рівні вазі частини стержня, розташованої вище перерізу, що проходить через точку А.

Аналогічним чином вибирається розрахункова схема для геомеханічних задач. На рис. 2.2 показані етапи послідовного побудови плоскої розрахункової схеми. Для наочності в якості об'єкта дослідження рас-розглядали породний масив з постійною об'ємною вагою в околиці горизонтальної гірничої виробки, пройденої на глибині h . На рис. 2.2, *а* представлена дійсна розрахункова схема для важкого масиву, тобто навантаженого гравітаційними силами, які умовно позначені вертикальними векторами [8]. На рис. 2.2, *б* – частина важкого масиву з зовнішніми кордонами, значно віддаленими від центру вироблення і навантаженими урівновешиваючими реактивними напруженнями. І, нарешті, на рис. 2.2, *в* – частина невагомого масиву з зовнішніми віддаленими від центру виробки границями, навантаженими гравітаційними напруженнями q (у вертикальному напрямку) і λ_q (в горизонтальному напрямку), що діють в незайманому масиві в точці, що відповідає центру виробки (при наявності конструкцій грузонесущей кріплення на контурі виробки вказуються напруги реактивного опору кріплення, напряму в бік масиву). Остання розрахункова схема, що відрізняється простотою і наочністю, дає можливість досить точно оцінити концентрацію напруги в околиці гірничої виробки.

Разом з тим при використанні геомеханичної моделі лінійно-деформованого масиву зазначене завдання можна спростити, скориставшись методом суперпозиції рішень [5]. Наприклад, дійсну розрахункову схему, показану на (рис. 2.3, *a*), можна представити у вигляді двох розрахункових схем: розрахункова схема незайманого породного масиву (рис. 2.3, *a*), навантаженого гравітаційними силами, і розрахункова схема (рис. 2.3, *б*) для частини невагомого породного масиву з зовнішніми віддаленими кордонами, де зміщення дорівнюють нулю, і з гірської виробкою, контур якої навантажений напруженнями реактивного опору кріплення, якщо така є, і гравітаційними напруженнями, що діють в незайманому масиві в точці, що відповідає центру виробки, і спрямованими в бік виробки, у вигляді так званої знімаемого навантаження.

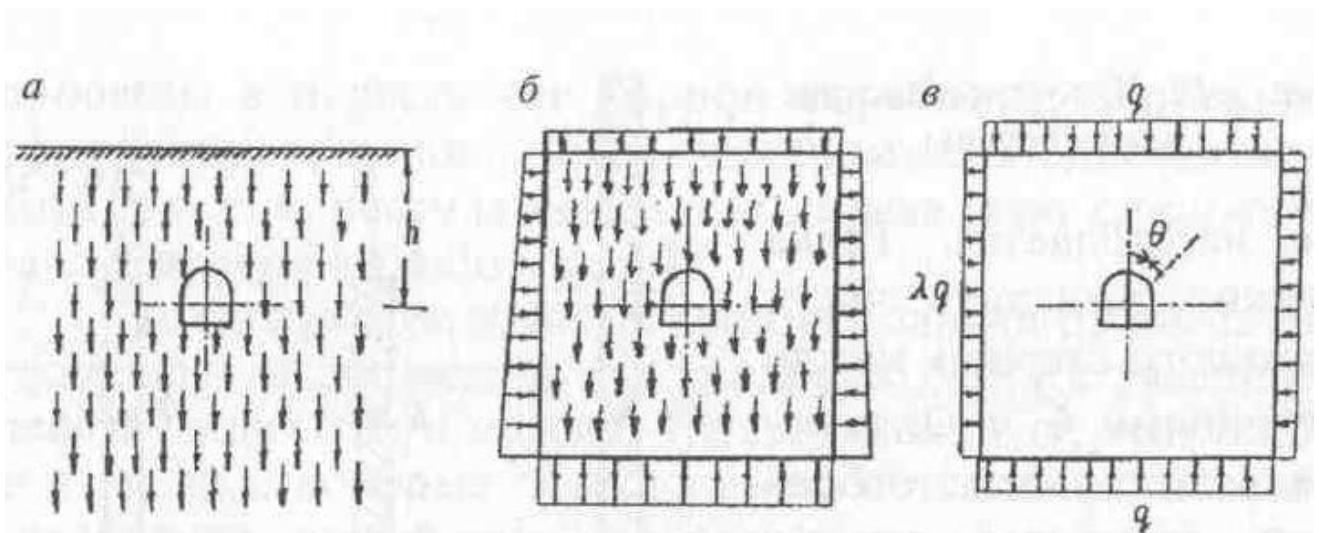


Рис. 2.2. До побудови розрахункової схеми геомеханічного завдання в повному напруженні [4]

З першої розрахункової схеми знаходимо початкове поле напруг і зсувів, з другої-додаткове поле напруг і зсувів. Таким чином, в лінійно-деформованому масиві для оцінки розподілу напружень слід рекомендувати розрахункову схему, показану на рис. 2.2, *в*, а для оцінки розподілу зсувів можна користуватися розрахунковою схемою, представленої на рис. 2.3, *б*.

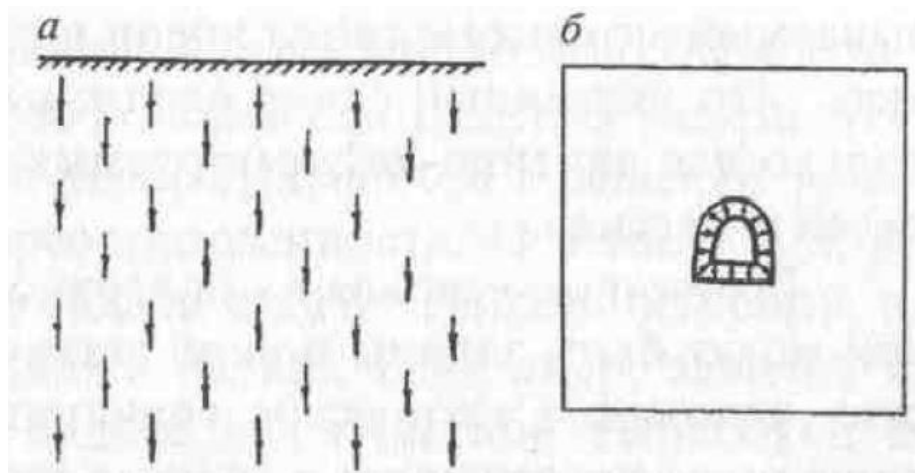


Рис. 2.3. До побудови розрахункової схеми геомеханічного завдання в додаткових напруженнях [4]

Останні рекомендації слід супроводити одним досить суттєвим зауваженням. У разі рівнокомпонентного (гідростатичного) поля початкових напружень в породних масивах, складених гірськими породами з коефіцієнтом Пуассона, близьким до 0,5 тобто, практично нестисливими гірськими породами, початкові зміщення дорівнюють нулю і додаткове поле зсувів може бути визначено за розрахунковою схемою на рис. 2.2, в [12]. Визначення додаткового поля зсувів (деформацій) має принципове значення для моделювання геомеханічних процесів руйнування навколо виробок, оскільки саме додаткові деформації і відповідні їм додаткові напруги, що реалізуються при утворенні виробок, є першою причиною руйнування гірських порід. Звідси випливають очевидні рекомендації про те, що руйнування породних масивів навколо виробок повинні моделюватися по розрахунковою схемою, показаної на рис. 2.3, б з використанням характеристик міцності властивостей гірських порід, які визначаються на породних зразках за схемою випробувань Беккера [11].

При цьому в розглянутому вище випадку рівнокомпонентного поля початкових напружень і нестискуваних гірських порід можливо моделювання геомеханічних процесів руйнування за розрахунковою схемою, представленої на рис. 2.2, в.

Зупинимося дещо докладніше на формулюванні початкових і граничних умов. Зазвичай в якості початкових умов, тобто, початок відліку часу, приймається момент вилучення породи з вибою, виїмки вугілля з пласта, утворення укусу на кар'єрі і т. д. Іноді початок відліку часу кілька зсувається щодо зазначених моментів. Наприклад, вважаючи швидкість пружних деформацій незмірно більше швидкості подальшого деформування гірських порід (деформацій пластичної течії, повзучості), за початкові умови зручно приймати момент закінчення пружних деформацій. При дослідженні взаємодії породного масиву і кріплення а реалізовані при утворенні виробок, є першою причиною руйнування виробок, яка, як правило, встановлюється з деяким відставанням від вибою виробки і дотриманням будівельного зазору між контуром кріплення і породи, в якості початкової умови доцільно приймати момент зіткнення породного контуру і кріплення, званий моментом введення кріплення в роботу [6]. Слід зазначити, що вказане зрушення початкових умов можливий тільки для лінійно-деформованих геомеханічних моделей і масиву.

Граничні умови на поверхні породних масивів можуть бути задані у вигляді статичних і кінематичних умов. Статичні граничні умови, які найчастіше зустрічаються в задачах геомеханіці, представляють запис на поверхні породних масивів компонентів напружень, як це показано, наприклад, на рис. 2.2, в. Кінематичні граничні умови представляють запис на кордонах компонентів зсувів. Наприклад, кінематичні граничні умови у вигляді обмежень на зміщення можуть бути сформульовані на поверхні виробок, закріплених абсолютно жорстким кріпленням [6].

Статичні граничні умови доцільно застосовувати при вирішенні завдань в напружених (методом сил), а кінематичні – при вирішенні задач в переміщеннях (методом переміщень). Можлива також запис змішаних граничних умов: на одній частині поверхні масиву – статичні, на решті поверхні масиву – кінематичні граничні умови. Наприклад, на поверхні очисної виробки при використанні секційного механізованого кріплення змішані граничні умови можуть бути записані так: на контакті з секціями кріплення – кінематичні умови

у вигляді обмежень на переміщення породного контуру, на решті поверхні – статичні граничні умови у вигляді рівності нулю компонентів напружень, дотичних і нормальних до породного контура. Змішані граничні умови, як зазначалося вище, мають місце на розрахунковій схемі рис. 2.3, б на контурі виробки – статичні граничні умови у вигляді так званої знімається навантаження; на зовнішніх віддалених кордонах в породному масиві – кінематичні граничні умови у вигляді рівності нулю зсувів.

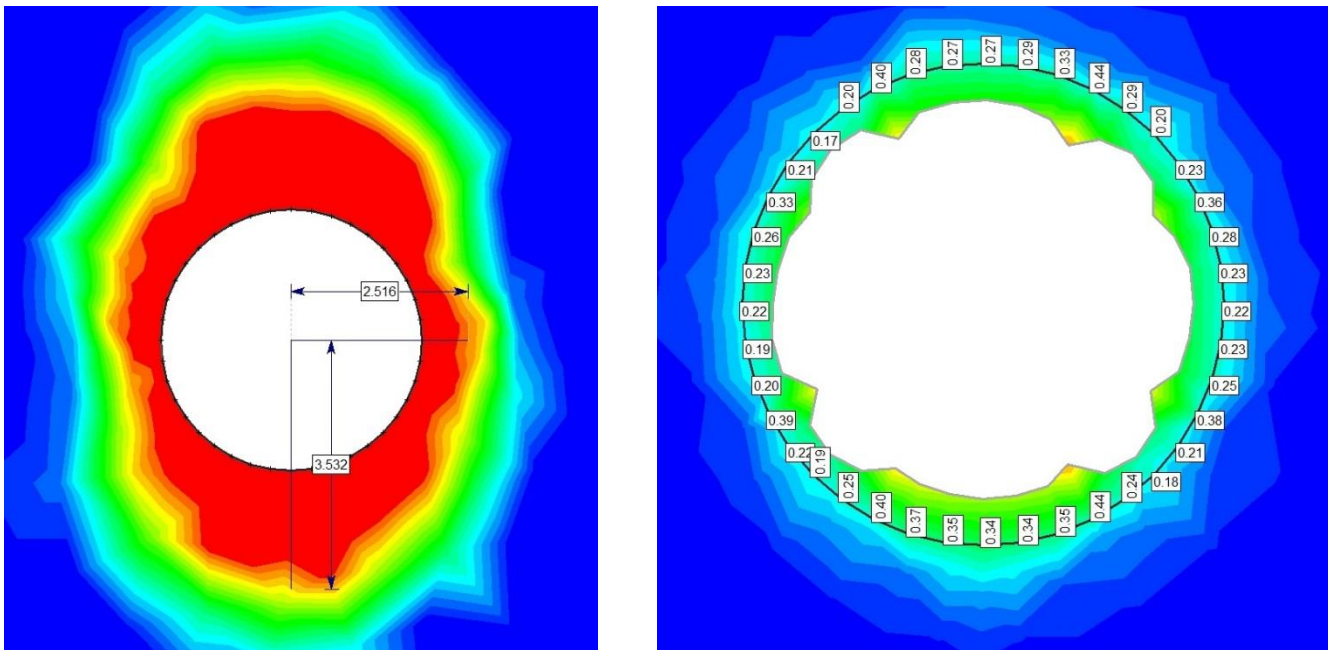
У той же час граничних умов має бути рівно стільки, скільки необхідно для вирішення задачі. Їх нестача призводить до невизначеності у вирішенні завдання, а надлишок – до перевизначення. І в тому і в іншому випадку постановку задачі слід вважати невірною, і рішення задачі побудувати не можна [19]. Наприклад, записавши в розглянутої вище задачі для очисної виробки з механізованим кріпленням, крім зазначених граничних умов, ще умови для напружень на контакті породи і секцій механізованого кріплення, отримаємо надлишок граничних умов, тобто на вказаній ділянці кінематичні і статичні умови можуть виявитися несумісними. Правда, теоретично можливий випадок спільного завдання кінематичних і статичних умов на даній ділянці кордону, але тоді для дотримання правильності постановки завдання необхідно виключити частину обмежень на інших ділянках кордону.

Крім зовнішніх поверхонь породних масивів (поверхні виробки, укусу і т. д.) В деяких задачах геомеханіки розглядаються внутрішні поверхні розділу між областями масиву, де породи знаходяться в різному фізичному стані. На поверхнях розділу зазвичай задаються умови безперервності компонентів напружень і зсувів, наприклад, такі умови задаються на кордоні між областями граничної рівноваги порід та іншою частиною породного масиву [12].

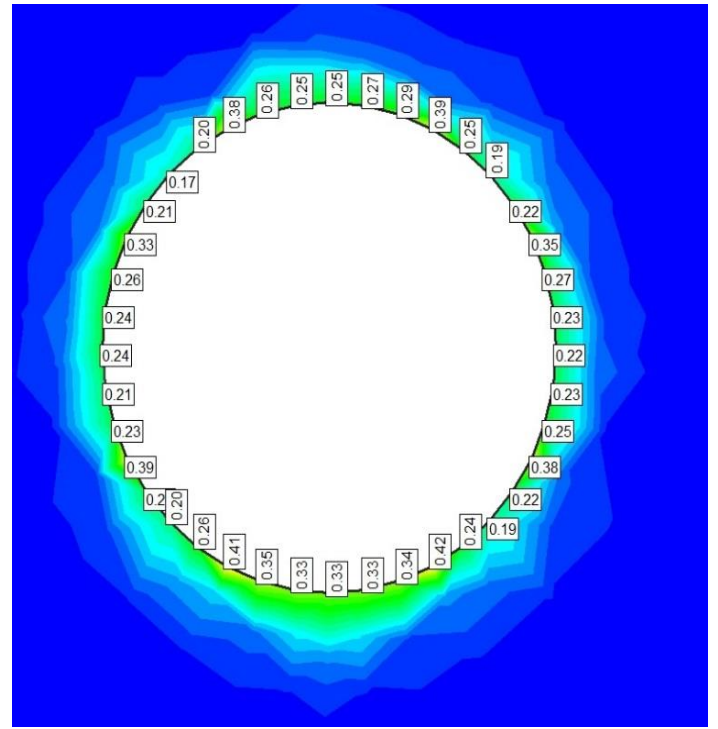
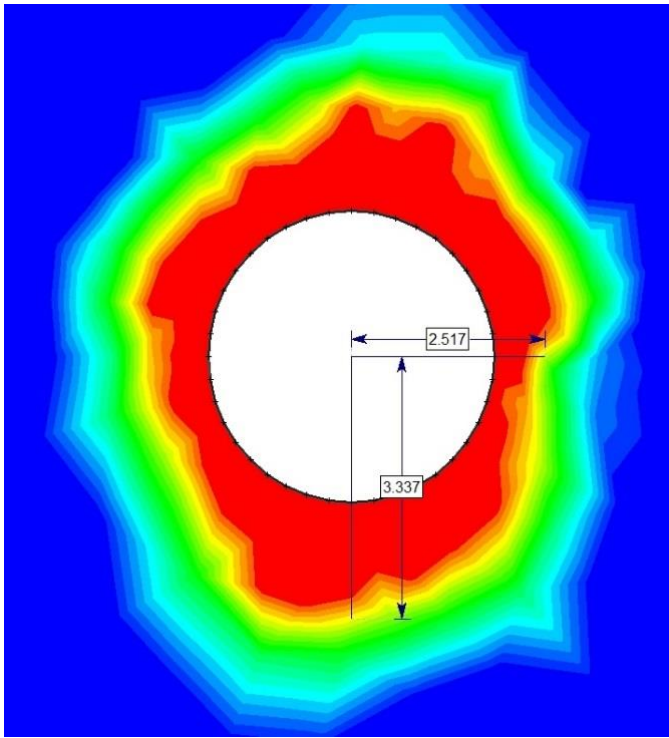
2.2. Виконання розрахунків для однорідної моделі

З метою встановлення ступеня впливу коефіцієнта бічного розпору на розмір зони непружних деформацій (ЗНД) і переміщення контура одиночної виробки виконаний чисельний експеримент. Завдання вирішені на основі методу кінцевих елементів, який реалізований в програмному продукті «RS2» канадської компанії Rockscience. Вплив величини коефіцієнта бічного розпору λ досліджувався стосовно круглої виробки, яка розміщена в однорідному породному середовищі. Величина коефіцієнта λ змінювалася від 0,5 до 1,5.

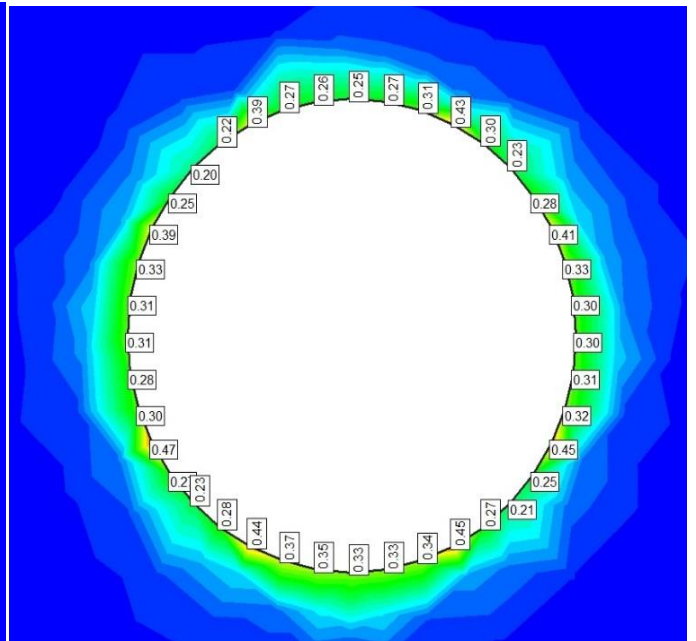
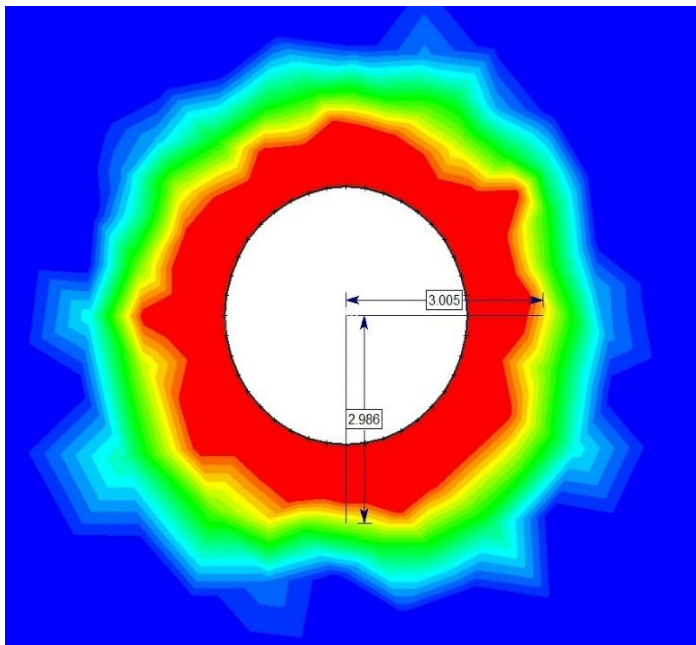
Аналіз отриманих результатів показав, що конфігурація ЗНД, яка охоплює виробку, спотворюється зі зміною величини коефіцієнта λ , приймаючи форму від витягнутої уздовж горизонтальної вісі при $\lambda = 0,5$ до витягнутої по вертикалі при $\lambda = 1,5$ (рис. 2.4).



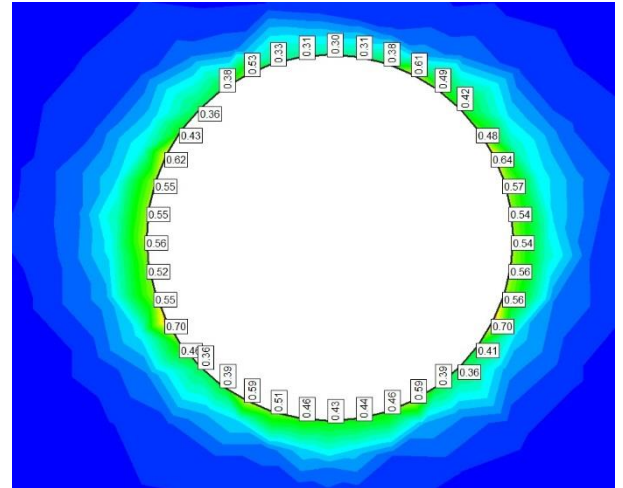
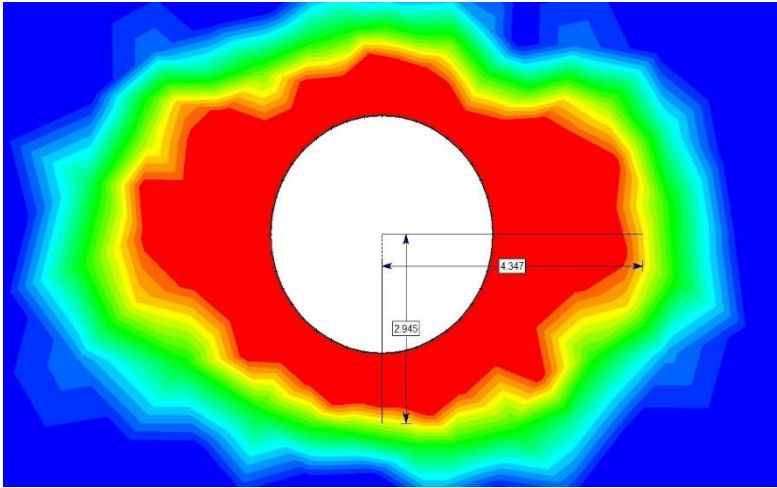
Картина розподілу ЗНД і переміщення при $\lambda = 0,25$



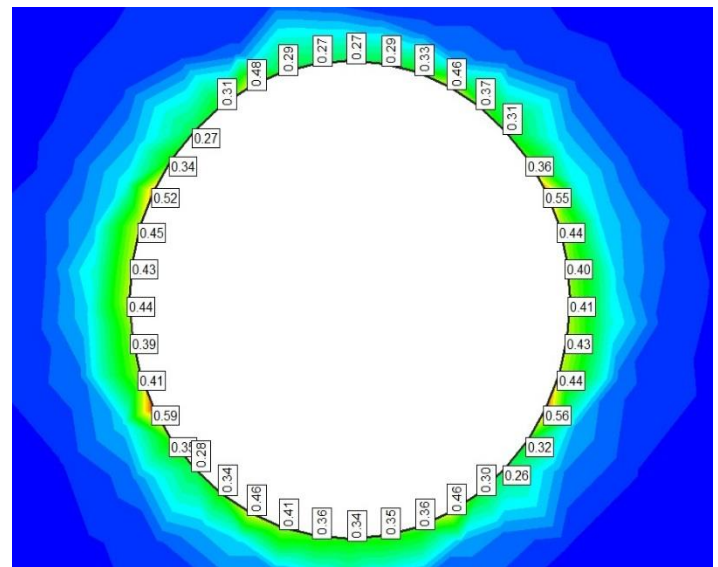
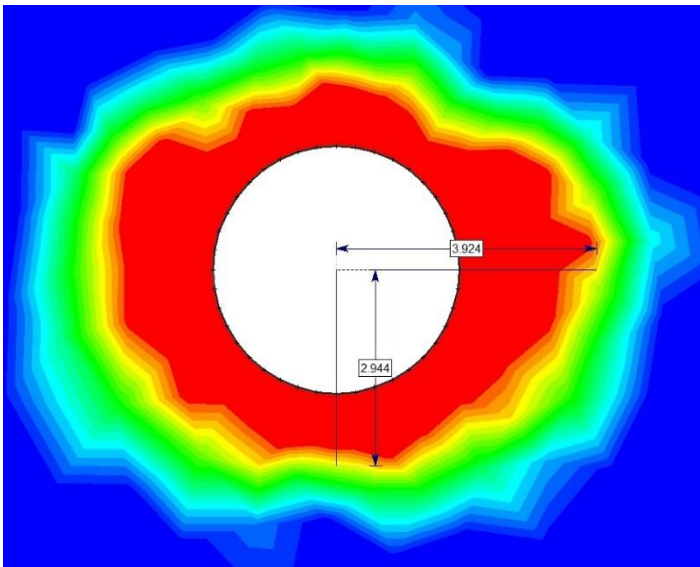
Картина розподілу ЗНД і переміщення при $\lambda = 0,5$



Картина розподілу ЗНД і переміщення при $\lambda = 1$



Картина розподілу ЗНД і переміщення при $\lambda = 1,25$



Картина розподілу ЗНД і переміщення при $\lambda = 1,5$

Рис.2.4. Якісні картини впливу коефіцієнта бічного розпору на розмір зони непружних деформацій і переміщень навколо горизонтальної виробки в однорідному породному масиві

Залежність величини відносного радіуса області пластичної деформації від величини λ показані на графіку рис. 2.5.

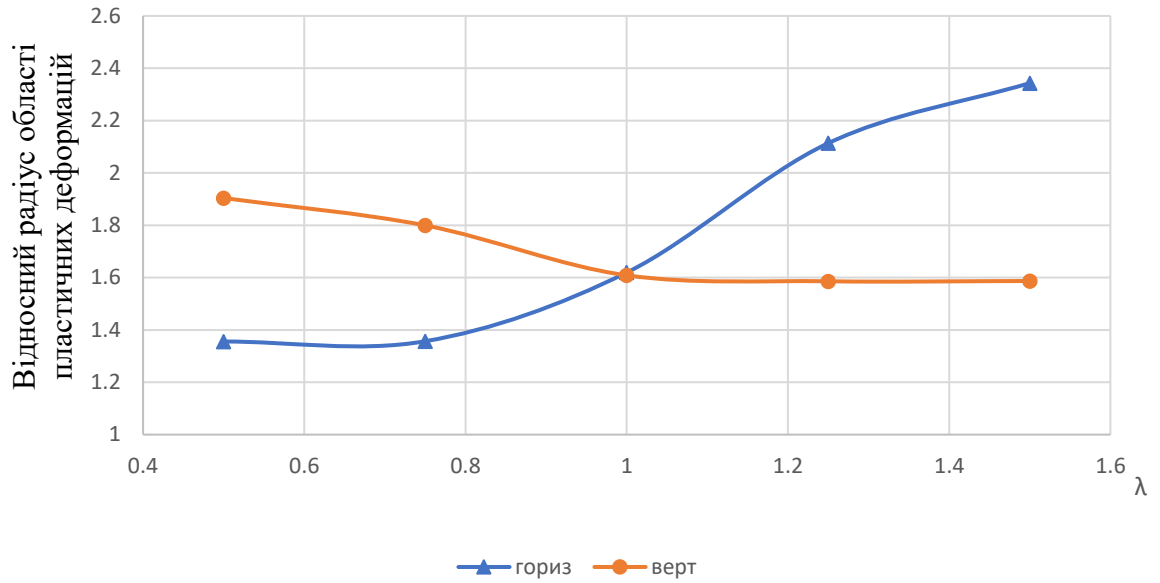


Рис. 2.5. Змінення величини відносного радіуса області пластичної деформації від коефіцієнта бічного розпору

Залежність величини переміщення контуру виробки U від величини λ показані на графіку рис. 2.6.

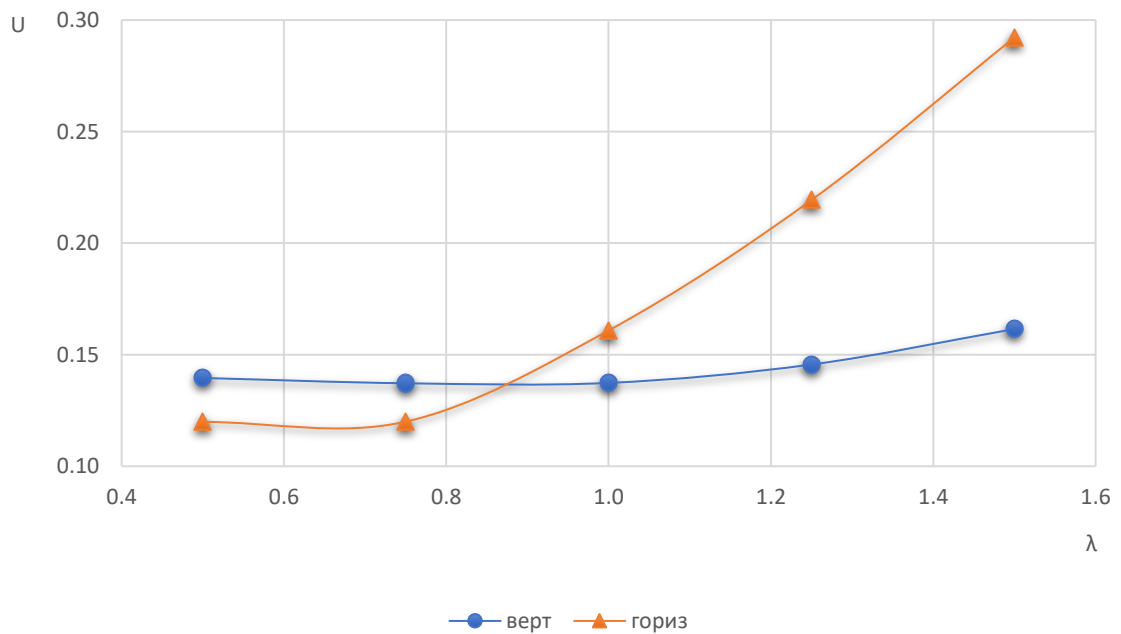


Рис. 2.6. Змінення величини зсуву контуру виробки від коефіцієнта бічного розпору

Результати виконаних досліджень дозволяють стверджувати, що коефіцієнт бічного розпору суттєво впливає на величину зсуву контуру виробки і на розміри зони непружних деформацій, яка формується навколо виробки. При цьому в діапазоні величини λ від 0,25 до 1 величини зміщення контуру виробки змінюються слабо, а в діапазоні від 1 до 2 відбувається їх різке зростання.

ВИСНОВКИ

1. Чисельне моделювання пружно-пластичного стану породного масиву в околиці одиночної підземної виробки показало, що величина коефіцієнта бічного розпору має суттєвий вплив на переміщення контура штучної порожнини, визначаючи її стійкість.

2. Аналітичні методи визначення величини коефіцієнта бічного розпору не охоплюють її спектр факторів, що впливають і з цієї причини не можуть бути рекомендовані для прогнозування цієї величини.

3. Натурні дослідження, будучи трудомісткими і вносять додаткове обурення в початкове поле напружень, хоча і враховують всі що впливають причини, теж не можуть бути визнані досить надійними.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКИ КОМПОНЕНТІВ ПОЧАТКОВОГО ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ В ПОРОДНОМУ МАСИВІ

3.1. Огляд досліджень в області оцінки коефіцієнта бічного розпору

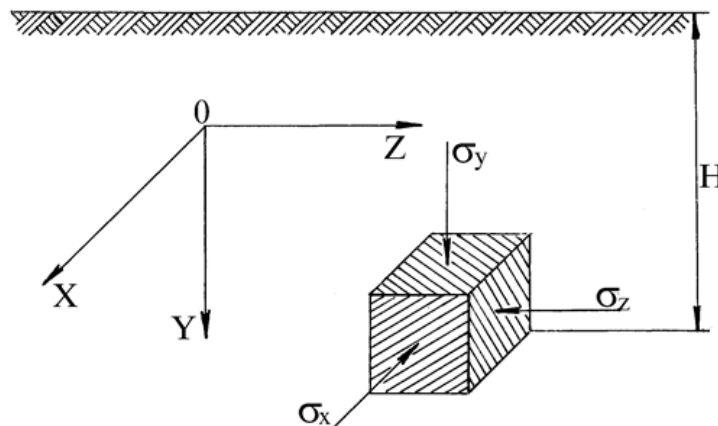
ДО ПОЧАТКУ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА РОДОВИЩІ ПОРОДНИЙ МАСИВ ВЖЕ ЗНАХОДИТЬСЯ В ПОЧАТКОВОМУ (ПРИРОДНОМУ) НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ, ВІД ПАРАМЕТРІВ ЯКОГО ЗАЛЕЖИТЬ ХАРАКТЕР ПРОЯВІВ ГІРСЬКОГО ТИСКУ: ЇХ ФОРМИ МІСЦЯ ЛОКАЦІЇ МАСШТАБИ. ДЖЕРЕЛОМ ПРИРОДНИХ НАПРУГ Є СИЛИ ВЛАСНОЇ ВАГИ ПОРІД І ТЕКТОНІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЗЕМНІЙ КОРІ. НАПРУЖЕННЯ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВІД СИЛ ВЛАСНОЇ ВАГИ ВИЗНАЧИТИ ДОСИТЬ ПРОСТО. ДЛЯ ОЦІНКИ Ж НАПРУЖЕНЬ, ЯКІ СТВОРЮЮТЬСЯ В МАСИВІ ТЕКТОНІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НЕОБХІДНО ПРОВЕДЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ. ТОМУ, ЗАВДАННЯ ПРО ПРИРОДНО НАПРУЖЕНИЙ СТАН ПОРОДНОГО МАСИВУ НАДЗВИЧАЙНО СКЛАДНІ, А РІШЕННЯ ЇХ – БАГАТОЗНАЧНІ. СКЛАДНІСТЬ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧАЄТЬСЯ ЧИСЛЕННІСТЮ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗЕМНОЇ КОРИ, СТУПІНЬ І ХАРАКТЕР ВПЛИВУ ЯКИХ ВИВЧЕНІ НЕДОСТАТНЬО, А БАГАТОЗНАЧНІСТЬ РІШЕНЬ СЛІД НЕ ТІЛЬКИ З БЕЗЛІЧІ КОМБІНАЦІЙ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ, АЛЕ І В СИЛУ ТОГО, ЩО ЗЕМНА КОРА СХИЛЬНА ДО ПОСТІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ І В НІЙ ЗАВЖДИ Є ЗАЛИШКОВІ АБО ПОЧАТКОВІ НАПРУГИ.

А ТАКОЖ, ХОТІЛОСЯ ЗВЕРНУТИ УВАГУ, ЩО НЕОБХІДНО РОЗРІЗНЯТИ КОЕФІЦІЄНТ БОКОВОГО ТИСКУ І КОЕФІЦІЄНТ БОКОВОГО РОЗПОРУ. КОЕФІЦІЄНТ БІЧНОГО ТИСКУ В МАСИВІ МОЖЕ БУТИ І БІЛЬШЕ, І МЕНШЕ 1 ЗАЛЕЖНО ВІД РІВНЯ ТЕКТОНІЧНИХ НАПРУГ.

КОЕФІЦІЄНТ БІЧНОГО РОЗПОРУ ЗАВЖДИ МЕНШЕ 1 І ЗАЛЕЖИТЬ ТІЛЬКИ ВІД КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ГІРСЬКИХ ПОРІД. КОЕФІЦІЄНТИ БІЧНОГО ТИСКУ І БІЧНОГО РОЗПОРУ РІВНІ МІЖ СОБОЮ ТІЛЬКИ В ОДНОМУ ВИПАДКУ: ЯКЩО В МАСИВІ НЕМАЄ ТЕКТОНІЧНИХ НАПРУГ, І ГОРИЗОНТАЛЬНІ НАПРУГИ СТВОРЮЮТЬСЯ ТІЛЬКИ ЗА РАХУНОК ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИСКУ ТОВЩИ ПОРІД.

ІСНУЄ БАГАТО ПРИПУЩЕНЬ, ЯКІ Є ПІДСТАВОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ПОЧАТКОВОГО ПОЛЯ НАПРУГИ. НАЙБІЛЬШОГО ПОШИРЕННЯ НАБУЛА ГІПОТЕЗА А.Н. ДИННИКА [15], СУТЬ ЯКОЇ ПОЛЯГАЄ В НАСТУПНОМУ.

РОЗГЛЯНЕМО ДОСИТЬ МАЛИЙ ОБСЯГ ГІРСЬКОГО МАСИВУ В ФОРМІ КУБА ЗІ СТОРОНОЮ, ЩО ДОРІВНЮЄ ОДИНИЦІ, ЯКА ЗНАХОДИТЬСЯ НА ГЛИБИНІ H ВІД ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ РИС. 3.1. ОБ'ЄМНА



ВАГА ПОРІД, ЩО ЗАЛЯГАЮТЬ ВИЩЕ, ДОРІВНЮЄ γ .

Рис. 3.1. Розрахункова схема до визначення початкового напруженого стану породного масиву [5]

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ВВАЖАЄТЬСЯ ВСТАНОВЛЕНИМ, ЯКЩО ВІДОМІ ЙОГО КОМПОНЕНТИ В КОЖНІЙ ТОЧЦІ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ОБЛАСТІ. ДЛЯ ОБ'ЄМНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ, В ЯКОМУ ЗНАХОДИТЬСЯ БУДЬ-ЯКА ТОЧКА ПОРОДНОГО МАСИВУ,

СПРАВЕДЛИВІ СПІВВІДНОШЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО ЗАКОНУ ГУКА,
ВІДПОВІДНО ДО ЯКОГО ГОРИЗОНТАЛЬНА ДЕФОРМАЦІЯ
ВИЗНАЧИТЬСЯ ВИРАЗОМ:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z) \right],$$

(3.1)

ДЕ E, μ - ВІДПОВІДНО МОДУЛЬ ЮНГА І КОЕФІЦІЄНТ ПУАССОНА
ГІРСЬКИХ ПОРІД.

ВІДПОВІДНО ДО ГІПОТЕЗИ А.Н. ДИННИКА ВВАЖАЮТЬ, ЩО В
УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО СТИСНЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНІ ДЕФОРМАЦІЇ
ДОРІВНЮЮТЬ НУЛЮ. ВИХОДЯЧИ З ЦЬОГО, ОТРИМАЄМО

$$\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z) = 0. \quad (3.2)$$

ОСКІЛЬКИ ОСІ КООРДИНАТ ВИБИРАЮТЬСЯ ДОВІЛЬНО, ТО ДЛЯ
ОДНОРІДНОГО ІЗОТРОПНОГО МАСИВУ МОЖНА ПОКЛАСТИ ЩО,

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z \text{ ТА } \sigma_x = \sigma_z, \text{ А } \sigma_y = \gamma H. \text{ ТОДІ, НА ОСНОВІ ВИРАЗУ (3.2)}$$

ОТРИМАЄМО НАСТУПНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ:

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H. \quad (3.3)$$

Таким чином, напружений стан незайманого масиву визначено. З (3.3)
впливає, що в пружному масиві горизонтальні і вертикальні напруги пов'язані
співвідношенням: $\sigma_x = \sigma_z = \lambda \gamma H$, де $\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}$.

Відповідно до гіпотези А.Н. Динника, величина коефіцієнта бічного
розпору для твердих пружних гірських порід коливається в межах 0,2 ... 0,3, для
пластичних (наприклад, аргілітів) – 0,5...0,6 [14].

За теорією А.Н. Динника [15] після переходу порід в пластичний стан діючі
в масиві природні горизонтальні напруги стають рівним вертикальним, тобто у
всіх напрямках тиск в масиві однаковий та дорівнює γH , і $\lambda = 1$. У таких випадках

говорять про гідростатичний розподіл природних напруг в пластичних масивах. Гіпотеза про гідростатичний розподіл напруг вперше була висловлена А. Гейм.

Інструментальні виміри, виконані ВНІМІ з урахуванням умов положозалегаючих родовищ осадового походження, підтвердили цю гіпотезу [45].

ТАКИМ ЧИНОМ, МОЖНА ВВАЖАТИ, ЩО НА РІВНИННИХ РОДОВИЩАХ ПРИ ВІДСУТНОСТІ ВПЛИВУ НЕОТЕКТОНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НАПРУЖЕНИЙ СТАН БЛИЗЬКИЙ ДО ГІДРОСТАТИЧНОГО. В ІНШИХ ЖЕ ВИПАДКАХ ВІН Є НЕРАВНОКОМПОНЕНТНИМ, ПРИЧОМУ СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ І ВЕРТИКАЛЬНОЮ СКЛАДОВИМИ МОЖУТЬ БУТИ ЯК БІЛЬШЕ, ТАК І МЕНШЕ ОДИНИЦІ.

ПОВНЕ Ж ЗАВДАННЯ ЩОДО ПРИРОДНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРОДНОГО МАСИВУ НАДЗВИЧАЙНО СКЛАДНА, А РІШЕННЯ ЇХ - БАГАТОЗНАЧНІ. ЦЮ БАГАТОЗНАЧНІСТЬ С.Г. МИХЛИН [28] ВИСЛОВИВ

РІВНЯННЯМ:

$$\sigma_x = a\sigma_z + b, \quad (3.4)$$

де σ_x та σ_z - відповідно тангенціальна (горизонтальна) і радіальна компоненти напружень; a , b - довільні постійні (яка не має розмірності - та має розмірність напружень - b).

При цьому відповідно до припущення щодо гідростатичного розподілу напруг $a = 1$, $b = 0$, $\sigma_z = \gamma z$, а згідно припущенням щодо негідростатическом

$$a = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad b = 0, \quad \sigma_z = \gamma z.$$

С.А. Христианович на основі досліджень механізму гідророзриву пластів в 1960 р вперше вказав на невідповідність поширених тоді в геомеханіці уявлень про напружений стан не займаного гірничими роботами масиву фактичного полю напрузі [25].

Відомі й теоретичні дослідження в цій галузі. Так, в роботі [27] на основі методу дискретних елементів проведено чисельне моделювання процесу

деформування сипучого середовища в тривимірній постановці у разі великих деформацій для двох граничних значень кута зовнішнього тертя φ між частинками ($\varphi = 0^\circ$ і $\varphi = 45^\circ$).

Продемонстровано виконання співвідношення континуальної моделі Друкера-Прагера на початковій стадії навантаження при відсутності тертя між дискретними елементами.

Показано, що зі збільшенням тиску коефіцієнт бічного розпору переходить в деякий стаціонарний стан.

В роботі [7] на основі аналізу в'язких властивостей отримано вираз для бокового розпору в масиві гірських порід з урахуванням пружних і в'язкопружних деформацій порід. В межах глибин інженерної діяльності в неоднорідному масиві порід з шарами, що мають різні в'язкі властивості, бічний розпір змінюється скачками від шару до шару. Цим автор пояснює, наприклад, те, що в відносинах або нафтоносних породах колекторські властивості зберігаються на великих глибинах (1 км і більше). При цьому в соляних або глинистих шарах напружений стан близький до гідростатичного в силу їх в'язкоупругих властивостей. У більшості ж випадків не виникають умови граничного напруженого стану, що впливають на формування напруг бокового розпору в масиві порід.

В СРСР була проведена величезна робота по вдосконаленню методів і засобів вивчення напруженого стану земної кори: в гірських виробках – методами розвантаження, в геологічних структурах – методами відновлення полів напружень за елементами залягання тріщин і розломів, в осередках землетрусів – за даними сейсмічних спостережень, в сейсмоактивних регіонах країни – за даними новітніх і сучасних рухів земної кори. У багатьох районах країни (Кольський півострів, Кривий Ріг, Донбас, Урал, Норильськ, Кузбас, Алтай, Середня Азія та ін.) Проведено якісне та кількісне порівняння полів напружень, отриманих різними методами. Результати цих досліджень знайшли відображення в ряді робіт [9-12].

Одночасно великі дослідження природних полів напружень були виконані зарубіжними вченими в Австрії, Норвегії, Швеції, Фінляндії, Канаді, США, ПАР та в інших країнах [29]. Вони представлені на рис. 3.3.

Накопичені за останні 10 років статистичні матеріали щодо природного поля напруг підтверджують основні статистичні особливості в розподілу напружень у верхній частині земної кори [29]:

- гіпотезі щодо гідростатичного напруженого стану незайманого масиву порід відповідають менше 25% всіх вимірювань;

- гіпотезі А.Н. Динника вірна, приблизно, для 25% всіх вимірювань (включаючи випадки з $\mu = 0,5$);

- близько 75% всіх вимірів дають нерівні горизонтальні напруги та ставле $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$, досягає близько 5-6 та більше;

- понад 75% всіх вимірів свідчать про те, що горизонтальні напруги більше вертикальних в 1,5-6 разів.

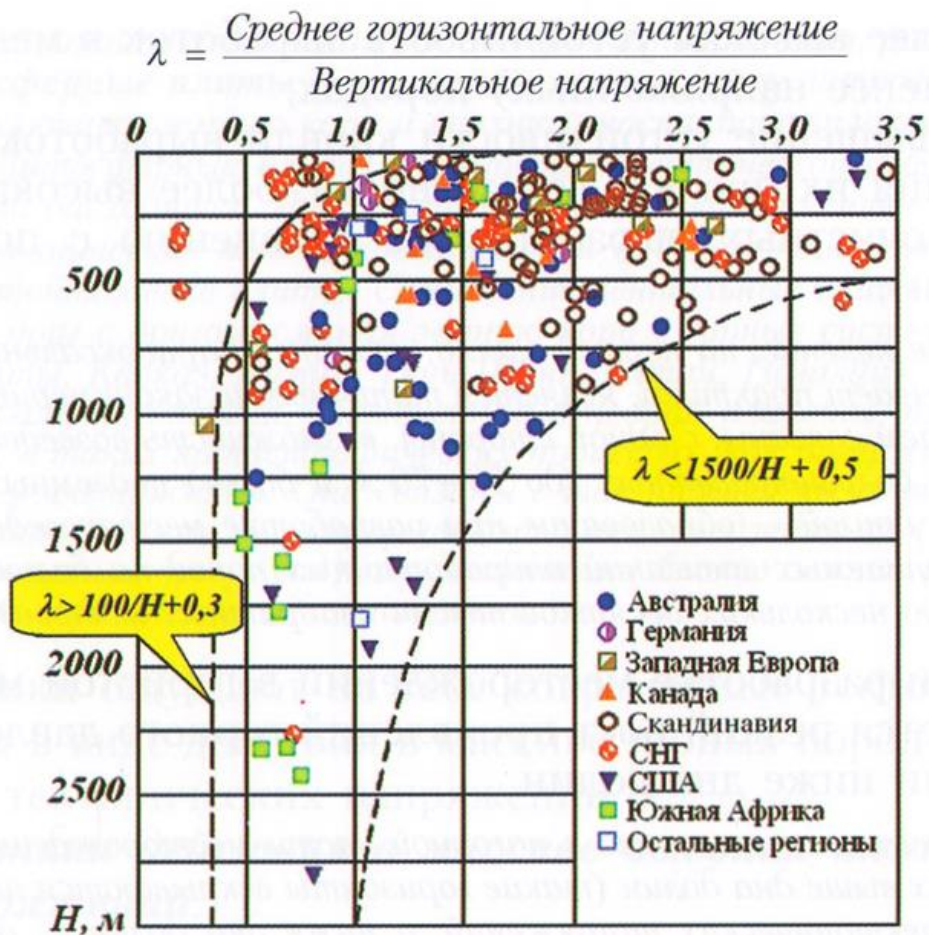


Рис. 3.3. Зміна з глибиною співвідношення середніх горизонтальних тектонічних та вертикальних напружень [28]

- мінімальне стискуюча напруга у 60% випадків менше γH , що збігається з узагальненими статистичними даними о критичних тисках при гідророзриві пластів;

- максимальне стискуюча напруга в 89% випадків орієнтована майже горизонтально і хрестом простягання основних геологічних структур ($\pm 30^\circ$);

- вертикально орієнтоване або σ_2 ($\sim 50\%$ випадків), або σ_3 ($\sim 30\%$);

- орієнтування головних напружень, знайдені за даними методів розвантаження і відновлення по тріщинуватості, в середньому збігаються (в межах точності і ступеня локальної неоднорідності полів напружень), що свідчить про успадкування полів тектонічних напружень [44].

Наявність системної тріщинуватості вже само по собі не відповідає жодній з гіпотез про напружений стан масиву порід, побудованих тільки на

обліку ваги порід, а наявність планетарних систем тріщин і тривала успадкованість орієнтування тектонічних полів напруг свідчать про глобальні фактори, що впливають на формування поля напружень в земній корі.

3.2. Методика визначення напрямку оптичних вісій кварцу на шліфах гірських порід

У своїй роботі, я спробував відтворити напружений стан порід Первомайського родовища Криворізького району за результатами мікроструктурних досліджень порід по орієнтованим петрографічним шліфам.

Причиною для такої постановки завдання є відомі положення структурної петрології. Відомо, що під впливом напружень виникають диференціальні руху в масиві, які супроводжуються виникненням орієнтованого розташування окремих мінералів в просторі, особливо коли деформації носять пластичний незворотній характер. Одним з методів їх визначення є мікроструктурний аналіз, який ґрунтується на виявленні орієнтування оптичних вісій зерен кварцу. Для отримання представницького петроструктурного узору оптичних вісій необхідно виміряти не менше 50 зерен кварцу у шліфах. Аналіз отриманих петроструктурних узорів на кругових діаграмі дозволяє виявити особливості характеру розподілу оптичних вісій кварцу, їх співвідношення з орієнтуваннями кварцу з накладеними напруженнями.

Для вивчення орієнтування кристалографічних вісій залучають спеціальні методики (наприклад, вимір орієнтувань оптичних вісій за допомогою Федоровського столика або скануючого електронного мікроскопа). З'ясування характеру переважного кристалографічного орієнтування засноване на безлічі вимірів кристалографічних вісій. Після винесення замірів на сферичну діаграму може бути встановлено наявність статистичного переважного орієнтування та її характер, а також зроблене припущення про динамічні ситуації її формування.

О.С. Алфьоров в своїй роботі [1,2] мікроструктурні дослідження виконував за допомогою столика Федорова, методика яких описана в різних працях і

посібниках [2,23]. На сучасному етапі даний метод застарів, відрізняється великою трудомісткістю і времезатратністю, тому в своїй роботі мікроструктурний аналіз кварцу я виконував коноскопичним методом. Так як універсальний столик Федорова не випускається нашою промисловістю з середини 60-х років і давно вже став дефіцитним. Тому я, почав пошук нових, альтернативних способів вимірювання орієнтування оптичної вісі у зернах кварцу. Різницю методів, яких я опишу нижче. Дослідженню піддавалася кристалічна решітка мінералу кварцу в уламкових зернах.

Мікроструктурний аналіз заснований на статистичній обробці результатів масового виміру орієнтування оптичної індикатриси мінеральних зерен в шліфах гірських порід. Для одновісних мінералів просторова орієнтування оптичної вісі визначається двома характеристиками: кутом нахилу φ оптичної вісі OA до площини шліфа і азимутальним кутом β , відрахувавши від будь-якого початкового напрямку OB , наприклад, від ребра шліфа, до проекції оптичної вісі на площину шліфа рис. 3.4.

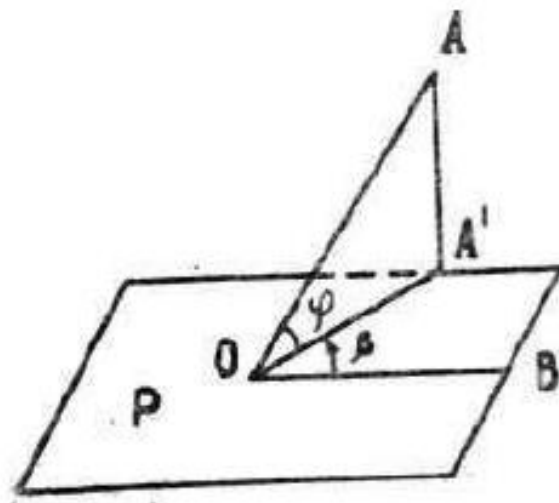


Рис. 3.4 . Елементи орієнтування оптичної вісі: P - площина шліфа; OA - оптична вісь; OA' - проекція оптичної вісі на площину шліфа; OB - початок відліку азимутальних кутів; β - азимут нахилу оптичної вісі; φ - кут нахилу оптичної вісі до площини шліфа [33].

Вимірювання азимутального кута не представляє великих труднощів, так як проекції оптичної вісі відповідає один з напрямків згасання кристала в схрещених николях.

Для вимірювання кута нахилу оптичної вісі можна використовувати поведінку коноскопічної фігури при обертанні столика мікроскопа. У перетинах, перпендикулярних оптичній вісі ($\varphi = 90^\circ$), вона нерухома, тобто не зміщується і не йде з поля зору коноскопа. Якщо оптична вісь майже паралельна площині шліфа, то досить повороту столика на $1-2^\circ$, щоб ізогіра пішла з поля зору коноскопа. Таким чином, чим менше кут φ , тим вище швидкість зсуву ізогіри і тим менше той критичний кут повороту столика, при якому ізогіра йде з поля зору коноскопа. Ця залежність функціональна і виражається наступною формулою (3.5):

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{D^2}{K^2 n^2 \sin^2 a + D^2 \cos^2 a}} \quad (3.5)$$

де φ — кут нахилу оптичної вісі; K - константа Малляра, яка визначається для кожного мікроскопа експериментально; n - середній показник заломлення мінералу; a - кут повороту столика мікроскопа, при якому ізогіра зміщається від центру на D поділів окуляра-мікрометра [33].

Для коноскопічного вимірювання орієнтування оптичної вісі надзвичайно важливе значення має ретельна налаштування мікроскопа.

Методика вимірювання полягає в наступному. Встановлюємо на столик мікроскопа препаратодітель і зміцнюємо в ньому шліф. Препаратодітель необхідний для пошуку зерен одноосного мінералу по лініях, що попереджає повторне вимірювання орієнтування оптичної вісі в одному і тому ж зерні. Вимірюємо максимальний розмір зерен досліджуваного мінералу і намічаємо відстань між лініями, який мав би перевищувати цю величину. Відстань між лініями задаємо першим гвинтом препаратодієм. За допомогою другого гвинта робим плавне переміщення шліфа з переглядом зерен, які перетинають окулярное перехрестя. Якщо зерно дрібне, то, використовуючи обидва гвинта препаратодієм, центр зерна потрібно вивести на окулярное перехрестя з

подальшим обов'язковим поверненням до первісної позначці за шкалою першого гвинта. Для дрібних зерен потрібно сильне діафрагмування лінзи Бертрана.

Основною перевагою коноскопічного методу крім того очевидного факту, що відпадає необхідність в додатковому приладі Федорівському столику - є простота вимірювальних операцій: досить лише зняти два відліку по лімбі столика мікроскопа, в той час як установка зерна в положення темряви на Федорівському столику вимагає значно більше операцій.

Сутність деформаційних перетворень в кристалічних решітках мінералів під дією тектонічних напружень зводиться до наступного. Мінерали, які беруть участь в диференціальних тектонічних переміщеннях в процесі складчастості, відчувають деякий поворот. У момент, коли з напрямком руху (деформації) збігається одна з площин трансляції в кристалічній решітці мінералу, обертання зерна припиниться і почнеться трансляція, тобто симетричне зрушення в кристалічній решітці. Трансляція кристалічної решітки - величина, суворо обмежена в лінійних розмірах і в напрямку, відповідному решітці Браве. [2]

На цій основі кристалічні решітки анізотропних мінералів отримують закономірне орієнтування в просторі по відношенню до діючих напруг і переміщень, утворюючи, так звану, орієнтовану текстуру.

Як приклад розглянемо орієнтування оптичних вісій кварцу в зразку, взятому безпосередньо з дзеркала ковзання в Криворізькому районі рис. 3.5 [1].

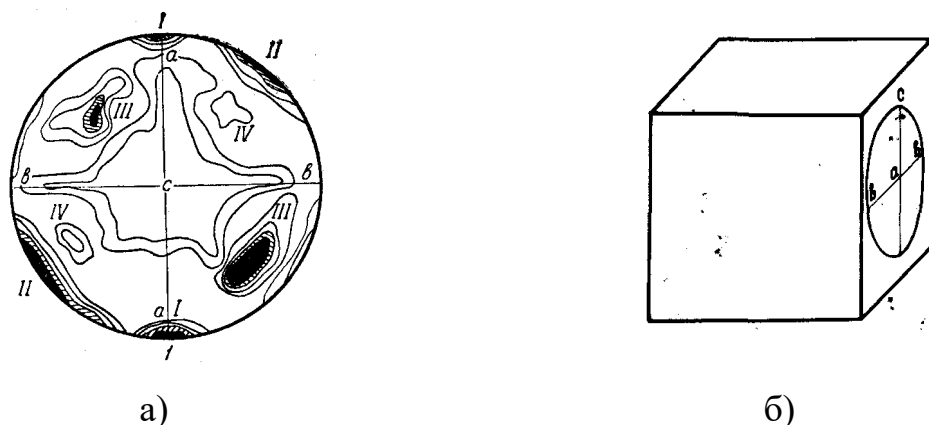


Рис. 3.5. Орієнтирна діаграма $\varphi = 29^\circ$, глибина 800 м. а) Мікроструктурна діаграма; б) положення зразка в масиві

На діаграмі чітко виділяються кілька максимумів концентрації оптичних вісій. Пояснити їх орієнтування наявністю тільки одного типу тектонітів не можна. Максимуми 1-1, розташовані по вісі, а характеризують S - тектоніти. Диференціальні рухи при утворенні цих максимумів відбуваються в кварці, як пояснює В. Шмідт по площині призми $[10\bar{1}0]$ у напрямку $[0001]$, а оптичні вісі в цьому випадку збігаються з напрямом руху. Максимуми II - II, мабуть, аналогічні, але повернені на деякий кут по відношенню до a . Наявність максимумів III-III і IV-IV, розташованих перпендикулярно один до одного, створюють В-тектонітові узорі. Таким чином, В-тектоніти орієнтовані в площині, перпендикулярній до ab , тобто в площинах bc та ac . Цей тип орієнтування пояснюється А. Хітану [16] наступним чином. Диференціальні рухи здійснювалися в кварці по гранях призми і паралельно $s = ab$, але в напрямку не паралельному $[0001]$, а по вісі b в напрямку $[2\bar{1}\bar{1}2]$. У результаті цього руху оптичні вісі будуть розташовуватися симетрично відносно площини ac .

Таким чином, загальна деформація здійснювалася по вісі a в прямокутній системі координат Б. Зандера.

У загальному вигляді структурна діаграма породи представляє складний пов'язаний S + В - тектоніт. Причому, "основним" за інтенсивністю прояви S - тектоніт, "додатковим" є В-тектоніти, що лежать в площинах, перпендикулярних слоїстості порід. Для S-тектонітів характерним є наявність однієї площини диференціальних переміщень, що розташовується в площині слоїстості, тобто в площині $ab = S$.

У той же час ця площина є площиною симетрії узору S-тектонітів. Одночасно в двох інших площинах $[ac$ та $bc]$ розташовуються узорі В-тектонітів. Для них характерним є наявність двох площин диференціальних переміщень для кожної фігури. У той же час ці площини є площинами симетрії для В-тектонітів. Всі три фігури виявляються пов'язаними і симетричними відносно вісі c .

Таким чином, вісь c є віссю симетрії четвертого порядку. Максимуми концентрації оптичних вісій S-тектонітів на периферії кола та площини симетрії

пов'язаних В-тектонітів є в той же час виходами кристалографічних вісій другого порядку. Всього їх 4. Таким чином, є статистична фігура, утворена деформованими кристалічними решітками кварцу з наступними елементами симетрії $L_44L_33L_25PC$. Ці елементи симетрії відповідають тетрагональній сингонії.

Таким чином, деформована текстура породи відповідає тетрагонального виду симетрії, це, в свою чергу - уявленню про симетрію деформації та симетрію напруг. Відомо, що, наприклад, ромбічний еліпсоїд деформації, має осями сили-вектори або напруги-вектори, відповідає наступного вигляду: $P_a \neq P_b \neq P_c$ або $\sigma_a \neq \sigma_b = \sigma_c$ де P та σ – діючі сили або напруги по відповідним осях еліпсоїда деформацій [1].

Для деформації, що розвивається по тетрагонального еліпсоїду, для напруг матиме по аналогії $P_a \succ P_b = P_c$. Кути між відповідними вісями рівні. На орієнтирній діаграмі по сітці Вульфа можна обчислити розміри вісій еліпсоїда деформацій, пропорційні чинним зусиллям або напруженням за відповідної вісі.

Результати розрахунку сферичних координат оптичних вісій та елементів симетрії оптичної індикатриси виносять на стереографічну проекцію. Хоча усі сферичні координати розраховані в полярних координатах, для цієї мети можна використовувати екваторіальну стереографічну сітку Вульфа.

На рис. 3.6 показано побудова стереографічної проекції оптичних вісій та елементів симетрії оптичної індикатриси за даними, наведеними вище. Попередньо негативну довжину переводимо в позитивні, додавши до їх значенням 360° . Накладаємо на сітку Вульфа кальку, поєднуємо нульовий індекс на кальці з розподілом великого кола сітки, відповідному довжині оптичної вісі A_1 рис. 3.5, *a*. На нульовому меридіані відзначаємо точку, віддалену від центру вгору на величину полярного кута оптичної вісс ρ_1 . Подібним же чином наносимо на кальку другу оптичну вісь A_2 , гостру (B_1) і тупу (B_2) бісектриси і площину оптичних вісей (P). В останньому випадку потрібно мати на увазі, що точка P розташована на площині оптичних вісей [14,33].

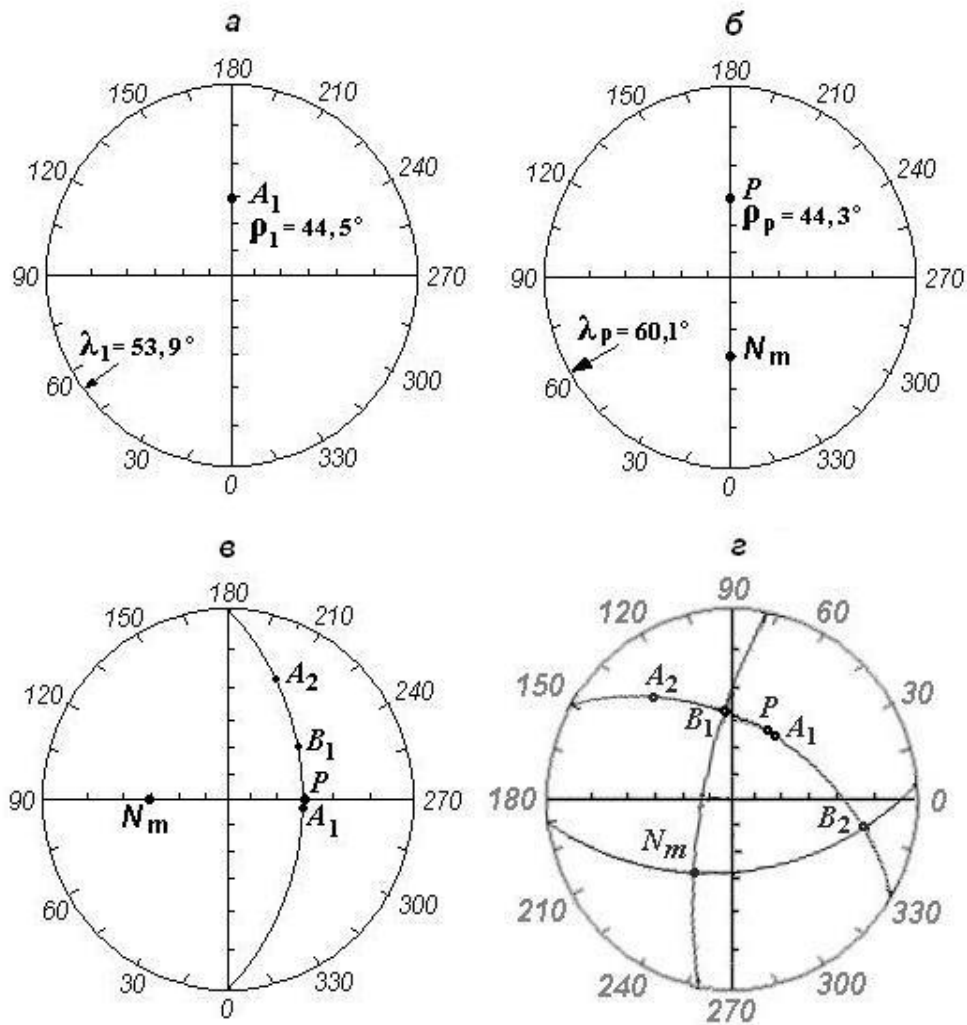


Рис. 3.6. Побудова стереографічної проекції оптичних вісей та елементів симетрії оптичної індикатриси. *a* - нанесення на кальку оптичної вісі A_1 ; *б* - нанесення площині оптичних вісей P і їх полюса N_m ; *в* - побудова площини оптичних вісей; *г* - стереографічна проекція оптичних вісей та елементів симетрії оптичної індикатриси. A_1 та A_2 - оптичні вісі; P - точка, яка визначає кут нахилу площини оптичних вісей; N_m - вісь оптичної індикатриси (вона ж полюс площині оптичних вісей); B_1 та B_2 - гостра і тупа бісектриса кута оптичних вісей [33]

Щоб отримати полюс цієї площини (з ним збігається вісь оптичної індикатриси N_m), потрібно при тій же довжині відзначити точку на нульовому меридіані нижче центру, відповідно кутку $90^\circ - \rho_p$ рис. 3.5, б. Далі, поєднуємо точки N_m та P з екватором сітки та по меридіану, відповідному полярному кутку ρ_p , проводимо площину оптичних вісей. Таким же чином, поєднавши з екватором

гостру (B_1) та тупу (B_2) бісектриси, маюємо інші два головних перетину оптичної індикатриси – B_1N_m та B_2N_m . В результаті побудов отримана стереографічна проекція всіх елементів оптичної індикатриси (рис. 3.5, б, г).

3.3. Аналіз результатів досліджень

Об'єктами мікроструктурних досліджень в моїй роботі були дрібно- і середньозернисті сланці, і частково піщані сланці Первомайського родовища Криворізького залізорудного басейну.

Первомайське родовище залістистих кварцитів розташоване в північній частині Криворізького залізорудного басейну на ділянці сполучення Саксаганської та Східно-Ганнівське поздовжніх синклінальних структур в районі Першотравневої синклінальної складки рис.3.7. Родовище приурочене до району різкого флексурних повороту всієї товщі порід криворізької серії і розвитку зони широтного Девладівського розлому. Внаслідок чого на родовищі інтенсивно розвинені тектонічні розриви і зміщення різного напрямку.

Тектонічними порушеннями родовище розбите на значну кількість окремих блоків різних розмірів, просторового орієнтування і складу складають їх порід. Найчастіше форма блоків в плані чотирикутна або трикутна, рідше - полігональна. Цим пояснюється утворення складної складчато - блокової структури родовища.

В геологічну будову Первомайського родовища беруть участь метаморфічні породи криворізької серії (PR1gd, PR1sk, PR1sk), представленні амфіболітами, кварцитами, сланцями різного складу [13].

Зразки (талькові сланці) відбиралися з керна свердловин та відносяться до тальковому горизонту PR1sk3 скелюватської світи (хлорит-тальку, тальк-амфіболові, тальк-карбонатні, зміїний-амфіболові та карбонатно-серпентінові сланці).

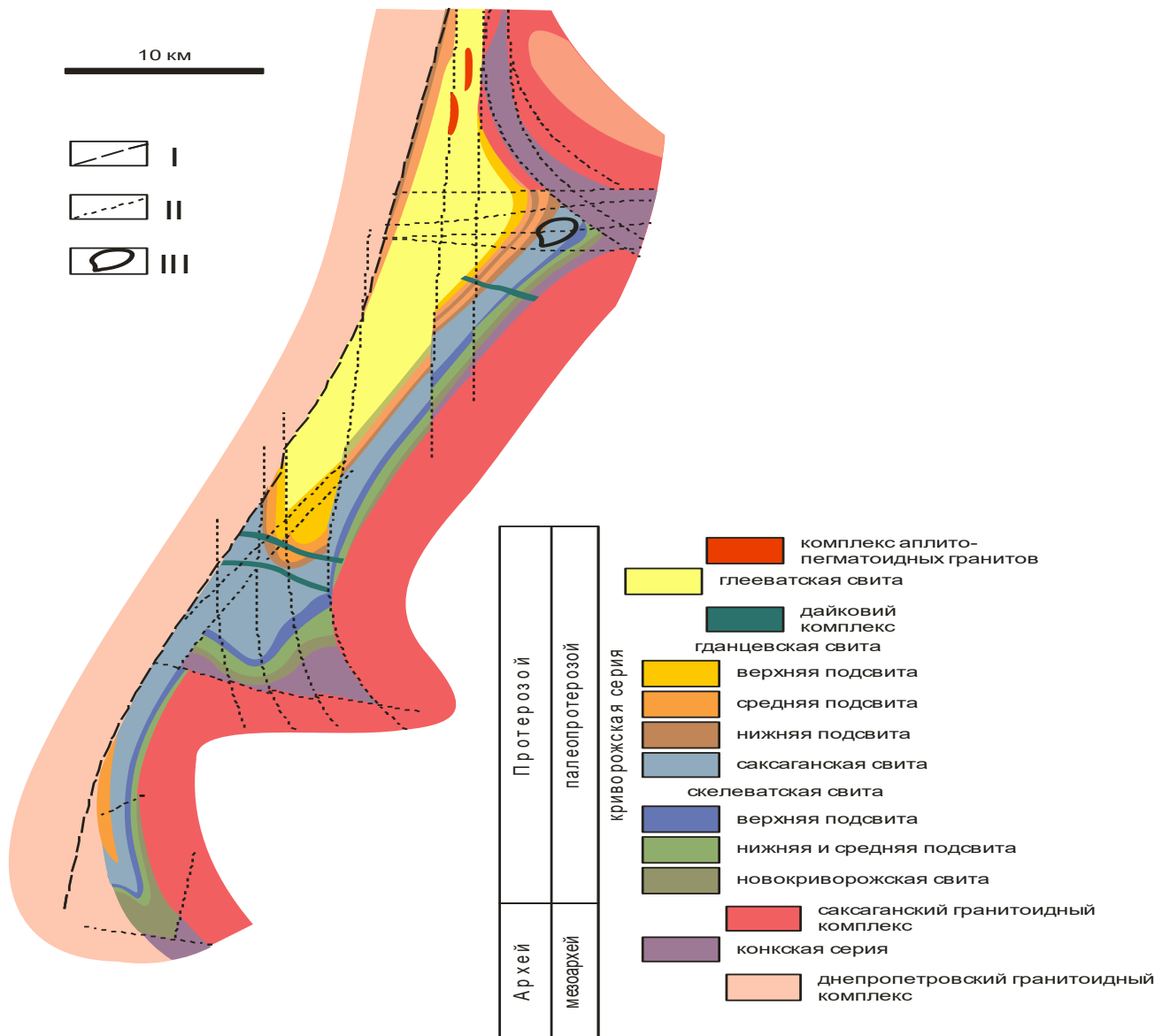


Рис.3.7. Геологічна карта Криворізького залізорудного басейну.

I - Криворізько-Кременчуцький глибинний розлом; II - інші розломи; III - Первомайське родовище [13]

Породи горизонту оголюються в балці Грядковатая і Куца, а також в східній частині кар'єру розробляється Первомайське родовище. Породи м'які, жирні на дотик, добре рассланцованние зеленувато-сірого кольору.

Умови залягання порід горизонту в межах родовища різноманітні з частими виклинюваннями. В межах Криворізького залізорудного району талькові сланці є маркуючим горизонтом, який відокремлює скелюватську світу від вище розташованої саксаганської. Потужність порід горизонту змінюється від 10 до 150 м, в середньому становить близько 60 м.

З тих шліфів, які були відібрані для моєї роботи, основну частину породи становив тальк (40-45%), біотит (20-23%), кварц (30-34%), карбонати уламкового і вторинного походження (5-7%) , слюди і глинисті мінерали. Текстури сланцеваті, структури від гомеограно-лепідобластових до гетеронематограно-лепідобластових і порфіробластових, мікрозернисті.

При мікроскопічному перегляді шліфа переважне орієнтування мінералів ні за формою, ні за внутрішньою будовою не проявляється, за винятком помітною сланцеватості рис. 3.8. А при введенні компенсаційної пластинки або кварцового клину певну кількість зерен забарвлювалося в однакові кольори інтерференції, що служить попередніми ознакою орієнтування.

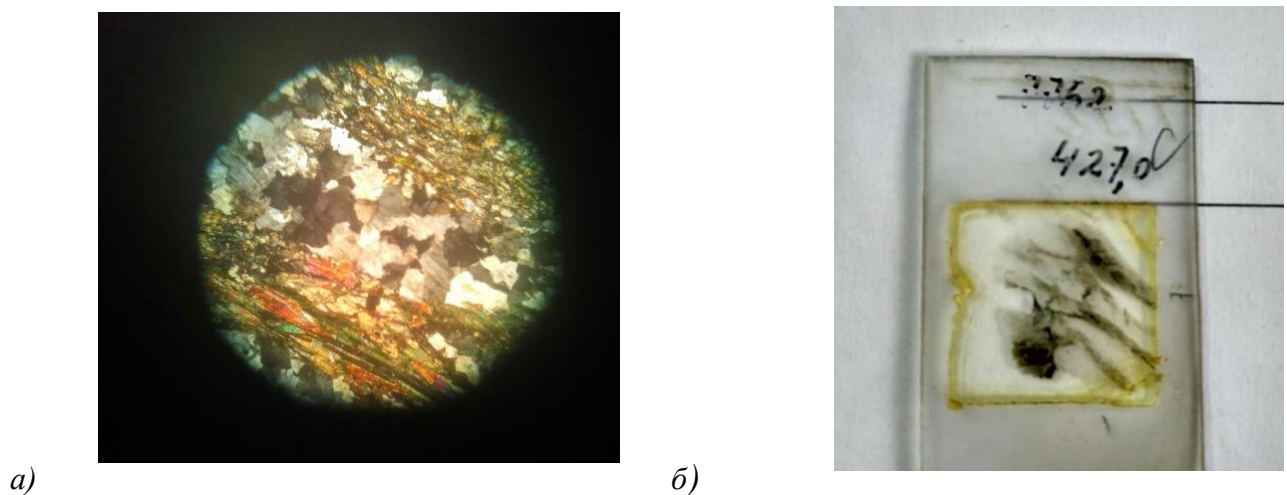


Рис. 3.8. Шліф зі скважини №7762 глибини 427 м. а) під мікроскопом зі збільшенням $\times 9$. б) загальний вигляд та помітна сланцеватість

При вивченні сланців, в шліфі проводилося від 20 до 30 вимірювань виходів оптичних вісій кварцу. Результати наносилися на сітку Вульфа з подальшою статистичною обробкою на планісфері Проніна-Меліса . Всього було досліджено 5 шліфів порід з однієї свердловини Первомайського родовища, на різних глибинах до 1500 м. Результати моїх досліджень (стереопроекції) винесені на сітку Вульфа та представлені на рис. 3.9.

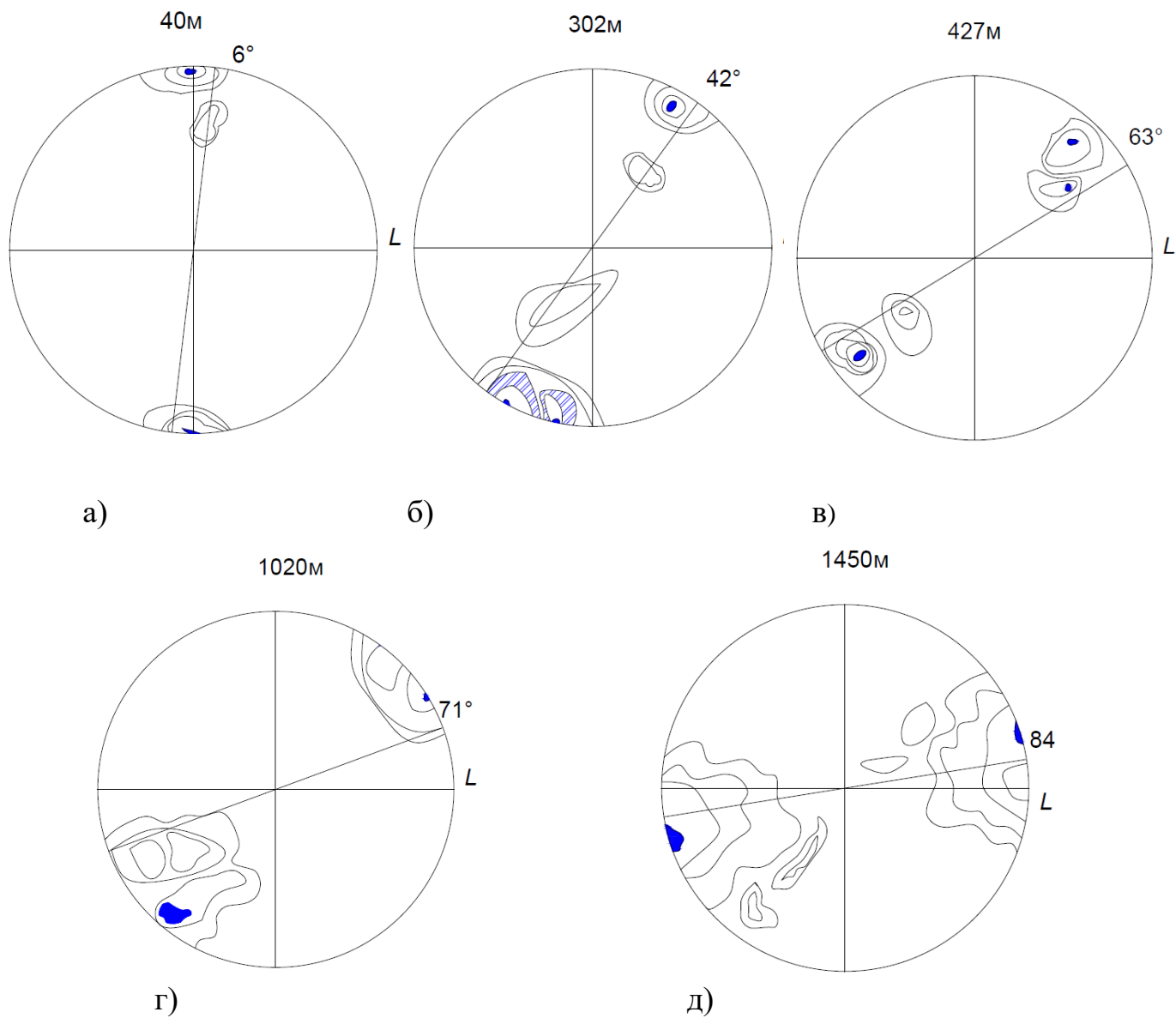


Рис.3.9. Зразки зі свердловини № 7762, визначення орієнтування оптичної вісі. а) шліф з глибини 40 м; б) шліф з глибини 302 м; в) шліф з глибини 427 м; г) шліф з глибини 1020 м; д) шліф з глибини 1450 м

Я їх досліджував на визначення кута оптичної вісі. Відповідно з законом Гіббса формування мінеральної речовини, а саме зерен кварцу, відбувалося в конкретних умовах тиску, глибини і відповідних величин вертикального і бічного, тому між ними повинна існувати функціональний зв'язок.

Цей принцип мінімуму потенційної енергії системи лежить в основі всіх без винятку процесів літогенезу. Математично його довести не просто, але з іншого боку, в природі не існує прикладів, йому суперечить. Цей принцип іноді

називають принципом мінімуму дисипації енергії. Його особливість полягає в тому, що природа допускає не просто ті руху, при яких ентропія зростає, а тільки ті, при яких зростання ентропії мінімальний (в межі, нуля).

Ось чому на великих глибинах, де геостатичний тиск перевищує межі міцності більшості порід, і вони знаходяться в стані пластичного деформування, симетрія еліпсоїда деформації трансформується в кулю – з елементами симетрії кубічної сингонії. Як відомо, це найбільш щільна і енергетично більш економна (стійка) упаковка [41].

Показанні на прикладі Криворізького залізорудного басейну. Переорієнтування мінералів кварцу відображає напрямок діючих тектонічних напруг.

Нами отриман зв'язок між оптичною віссю зерен кварцу в залежності від глибини рис.3.10 але ця діаграма не дозволяє перейти до величини λ . У зв'язку з цим скористаємося результатами натурних вимірювань, які виконані за визначенням величини λ , для різного родовища, але які мали гірничо-геологічні умови схожі з Криворізькими. Вони в систематизованому вигляді викладені в книзі [26]. Якщо з цієї діаграми виділити тільки ті родовища, які відповідають умовам Криворізького району то ми отримаємо наступний графік рис.3.11.

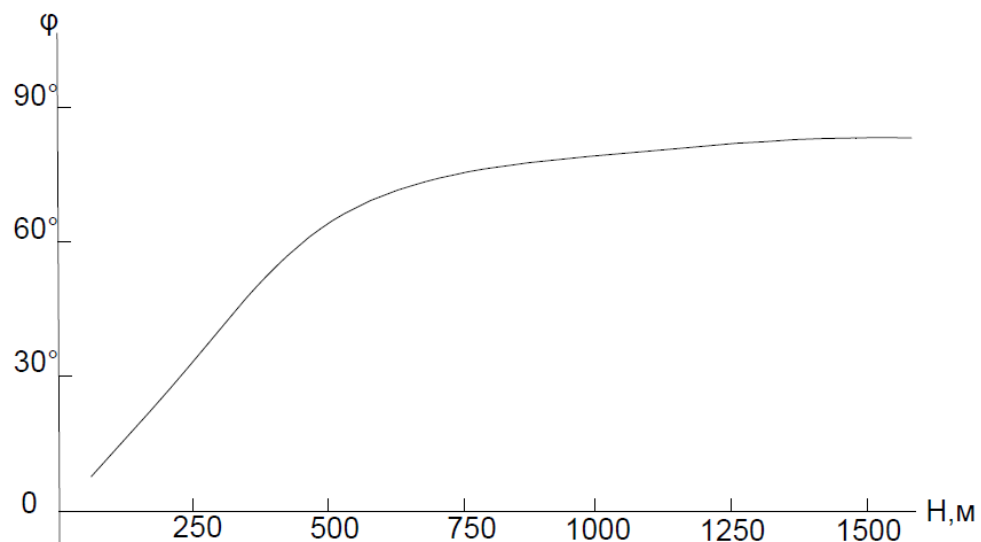


Рис.3.10. Залежність кута орієнтування оптичної вісі зерен кварцу від глибини

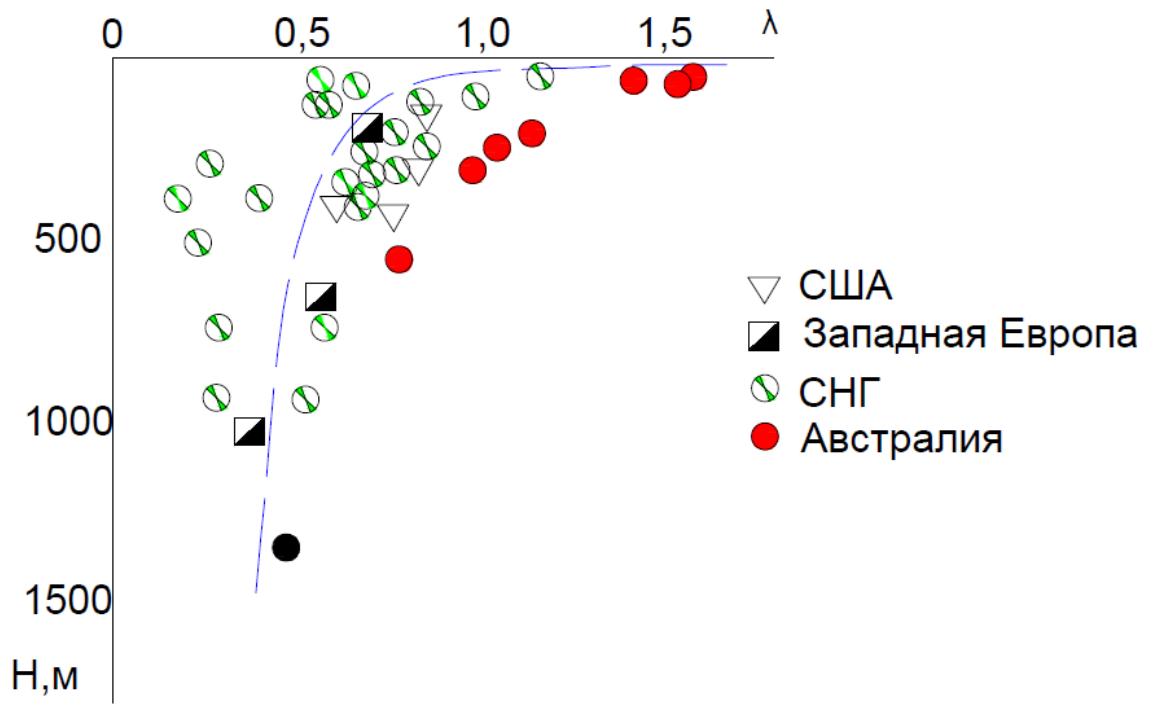


Рис.3.11. Результаты натурних вимірів коефіцієнту бокового розпору на родовищах залізної руди.

Та ми для них отримали ось таку результуючу криву в залежності від λ та глибини рис.3.12. Аналізуємо два графіка рис.3.10 та рис.3.12 об'єднуємо ці два графіка рис.3.13.

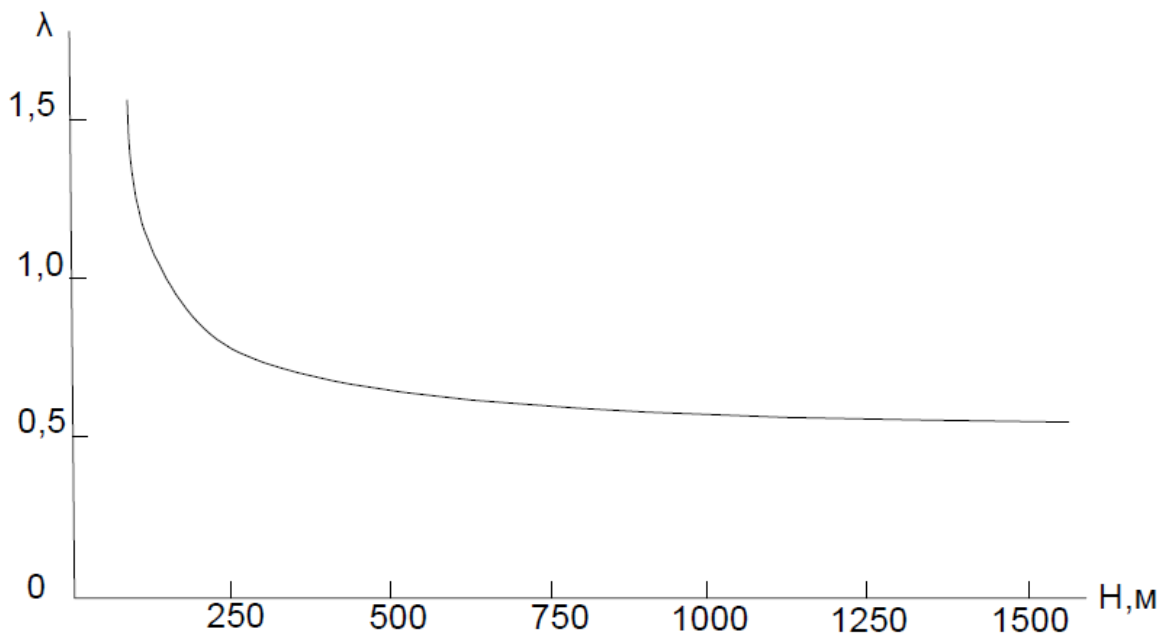


Рис. 3.12. Залежність коефіцієнта бічного розпору від глибини

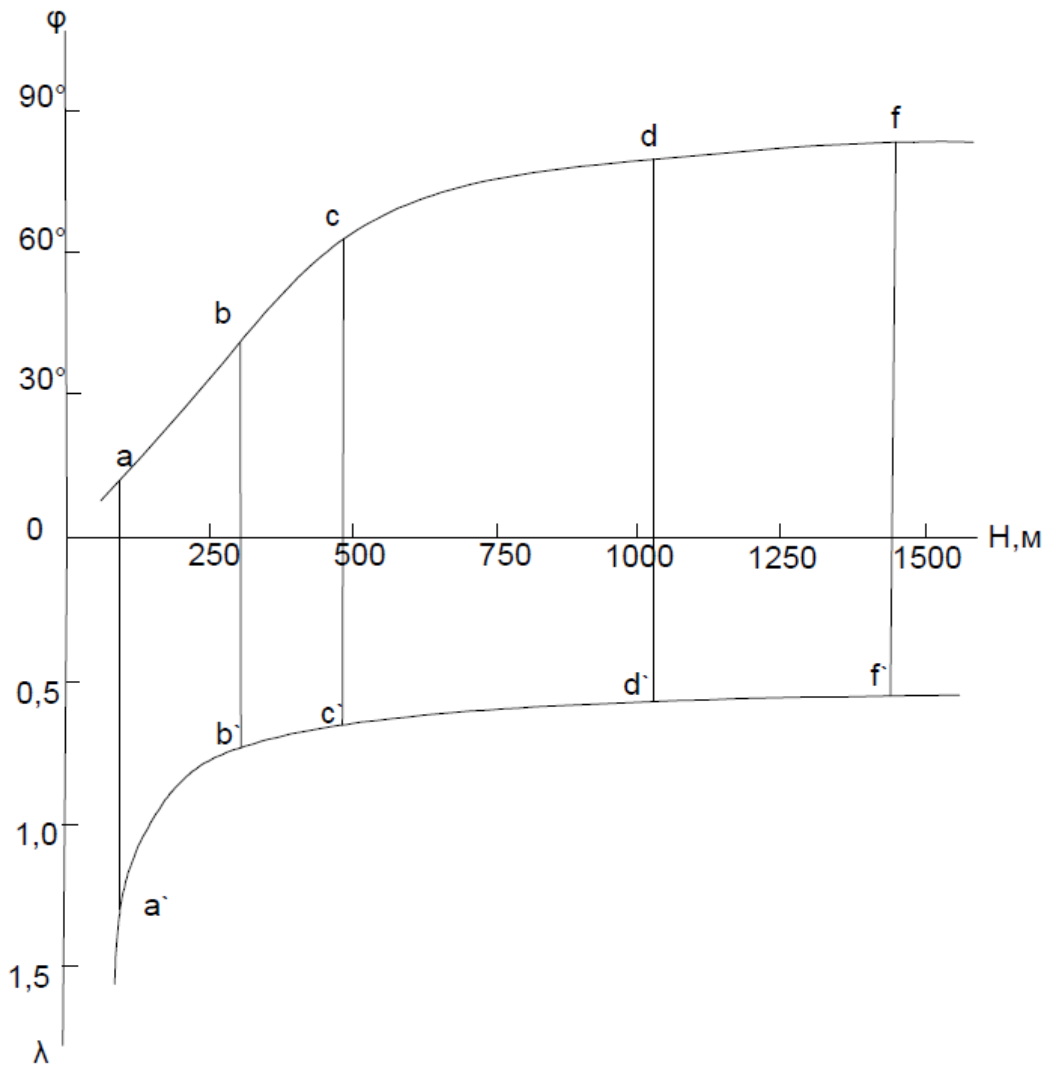


Рис. 3.13. Залежність коефіцієнту бокового розпору від глибини, та залежність кута орієнтовки оптичної вісі зерен кварцу від глибини

Після обробки даних та об'єднання цих двох графіків в один можна отримати залежність величини λ від відхилення вісі в зернах кварцу отримаємо графік рис.3.14.

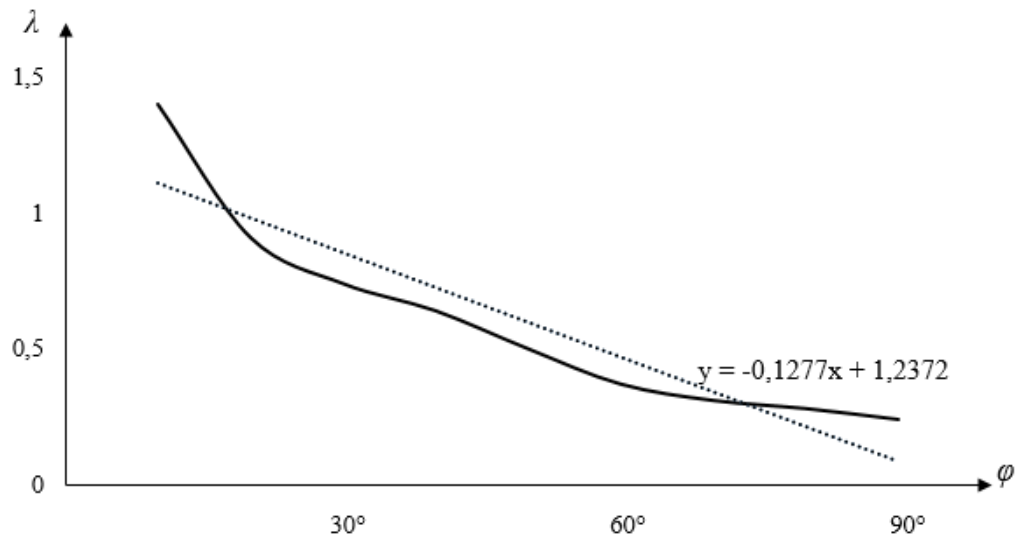


Рис. 3.14. Залежність величини коефіцієнту бокового розпору від кута орієнтовки оптичної вісі зерен кварцу.

Графік описується таким рівнянням $\lambda = -0,1174\varphi + 1,3482$. Железновудні родовища які мають умови залягання такого ж характер, як Криворізькі, можна не втручаючись в гірський масив по свердловинах визначити орієнтування зерен кварцу та знати яке значення має λ в цьому місці. Та в подальшому цю λ закладати в рішення геотехнічних задач.

ВИСНОВКИ

1. Існують різні способи оцінювання величини бокового розпору у гірських масивах. Всі вони основані або на математичних моделях, або потребують виконання натурних вимірювань. Втручання у масив призводить до порушення початкового поля напружень, що робить ці експерименти сумнівними.
2. Більшість мінералів формуються в умовах всебічного тиску. При цьому зерна кварца відповідно до співвідношення вертикальних і бокових напружень мають однозначну орієнтацію оптичної вісі.
3. Метод кристаллографического розташування оптичних вісій кварцу виглядає найбільш привабливим по відношенню до аналітичних і натурних досліджень.

4. Залежність величини бокового розпору від величини кута орієнтовки оптичної вісі кварца є лінійною і має наступний вигляд: $\lambda = -0,1174\varphi + 1,3482$.

ВИСНОВОК

У даній магістерській роботі вирішена актуальна науково-технічна задача, яка полягає в оцінюванні величини бокового розпору у гірських масивах завдяки виміру оптичної вісі зерен кварцу на мікроскопі за допомогою коноскопічного методу, шліфи яких відібрані зі скважини №7762, Криворізького району Первомайського залізорудного родовища.

Основні наукові і практичні результати досліджень полягають у наступному:

1. Були розглянуті та проаналізовані методи визначення коефіцієнту бокового розпору.
2. Аналітичні методи визначення величини коефіцієнта бічного розпору не охоплюють її спектр факторів, що впливають і з цієї причини не можуть бути рекомендовані для прогнозної оцінки цієї величини.
3. Натурні дослідження, будучи трудомісткими і вносять додаткове обурення в початкове поле напружень, хоча і враховують всі що впливають причини, теж не можуть бути визнані досить надійними.
4. Метод кристаллографічного розташування оптичних вісій кварцу виглядає найбільш привабливим по відношенню до аналітичних і натурних досліджень.
5. Більшість мінералів формуються в умовах всебічного тиску. При цьому зерна кварца відповідно до співвідношення вертикальних і бокових напружень мають однозначну орієнтацію оптичної вісі.
6. Відповідно з законом Гіббса формування мінеральної речовини, а саме зерен кварцу, відбувалося в конкретних умовах тиску, глибини і відповідних величин вертикального і бічного, тому між ними повинна існувати функціональний зв'язок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алфёров О.С. К оценке влияния тектоники на степень метаморфизма осадочных пород Донбасса. Геологический журнал, том XXIV, вып.2. 1964, изд. АН УССР, Киев. – С.10-23.
2. Алфёров О.С. Симметрия ориентированных структур деформированных горных пород // История кафедры строительных геотехнологий и геомеханики национального горного университета. – Донецк: «НОРД-ПРЕСС», 2004. – 544 с.
3. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 144с.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
5. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. – М: Недра, 1986. – 272 с.
6. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 270 с.
7. Батугин С.А. Напряженно-деформированное состояние нетронутого массива горных пород и его влияние на ведение горных работ: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1974. – 40с.
8. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 380 с.
9. Борщ-Компаниец В. И. Механика горных пород, массивов и горное давление. – М.: изд-во Моск. горного ин-та, 1968. – 484 с.
10. Булин Н. К. Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // Геотектоника. – 1971. – № 3. С. 3-15.
11. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка, 1983. – 192 с.
12. Влох Н. П., Сашурин А. Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. – М.: Недра, 1970. – 123 с.

13. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
14. Делицин И.С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука. 1985. – 192 с
15. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. // Инж. работник, 1925, №7. С.1-12.
16. Елисеев Н.А. О закономерной ориентировке в горных породах /тектониты и ложные тектониты/. Минералогический сб. № 16. 1962. Львов. – С. 3-16.
17. Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. Алма-Ата: Наука, 1975. – 237 с.
18. Ершов Л.В. Иофис И.М., Найман И.Б. Математические модели массива горных пород. – М.: изд-во МГИ, 1983. – 85 с.
19. Жданкин Н.А., Жданкин А.А. Геомеханика горных выработок. – Новосибирск. Наука, Сиб. отделение, 1990. – 112 с.
20. Жуков В.В., Чернов Е.В., Довгенко Г.Н. Напряженно-деформированное состояние слоистого массива. – Л.: Наука, 1973. – 132 с.
21. Иоффе А.Ф., Кирпичев М.В., Левитская А.И. Деформация и прочность кристаллов. – Журнал русского физико-химического общества – 1924 – № 22, С. 286-293.
22. Кацауров И.Н. Механика горных пород. – М.: Недра, 1981. – 160 с.
23. Компанейцев В. П. Способ коноскопического измерения ориентировки оптической оси одноосных минералов. А. с. 15662208 СССР. Заявлено 26.09.88. Опубл .23.05.90. Бюл. № 19 .
24. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 236 с.
25. Крупенников, Н.А. Филатов, Б.З. Амусин, В.М. Барковский Распределение напряжений в породных массивах / – М.: Недра, 1972. – 144 с.
26. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Издательство «Горная книга», 2006. – 391 с.

27. Максимов А.П. Горное давление и крепь выработок. – М.: Недра, 1973. – 282 с.
28. Михлин С.Г. Распределение напряжений в полуплоскости с эллиптическим вырезом // Сб. науч. тр. Сейсмологического ин-т АН СССР. – 1934. – № 29а. С. 17-29.
29. Мякишев В. С. Обзор результатов натуральных измерений естественного напряженного состояния массива горных пород // Изв. вузов. Геол. и геофиз. – 1985. – 37 с.
30. Новикова Л.В., Пономаренко П.И., Приходько В.В., Морозов И.Т. Метод граничных элементов в задачах геомеханики. – Днепропетровск: Наука и образование, 1997. – 178 с.
31. Протоdjяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. – М.: Гостехиздат, 1931. – 153 с.
32. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. – 216 с.
33. Родыгин А.И. Методы стрейн-анализа. – М.: Издательство ТГУ, 2006. – 271 с.
34. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1954. – 383 с.
35. Руппенейт К.В., Либерман Ю.М. Введение в механику горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 384 с.
36. Слесарев В.Д. Механика горных пород. – М.: Углетехиздат, 1948. – 236 с.
37. Спивак А.И. Механика горных пород. – М.: Недра, 1967. – 192 с.
38. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость горных выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
39. Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод. М. , 1965. 306 26с.
40. Турчанинов И.А., Иоффис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. - 488 с.

41. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И. и др. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.
42. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 236 с.
43. Ферберн Х.В. Структурная петрология деформированных пород. ИЛ. 1949. М. – 267 с.
44. Цимбаревич П.М. Механика горных пород. – М.: Углетехиздат, 1948. – 247 с.
45. Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. Методы теории вероятностей в геомеханике. – К.: Техніка, 1994. – 216 с.
46. Шашенко А.Н. Геомеханика / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко, Е.А. Сдвижкова. – К.: Новий друк, 2016. – 258 с.
47. Юшкин Н.П. Законы симметрии в минералогии / Н.П. Юшкин, И.И. Шафрановский, К.П. Янулов. Л.: Наука, 1987. – 335 с.