

Розрахунок **зрушень і деформацій** гірських порід і земної поверхні внаслідок гірничих робіт є критично важливим для забезпечення безпеки, охорони надр і навколишнього середовища, а також для прогнозування впливу на будівлі та інфраструктуру.

Для розрахунку зрушень і деформацій використовують **три основні групи методів**:

- 1.Емпіричні (статистичні) методи.
- 2.Аналітичні методи.
- 3.Чисельні методи (математичне моделювання).

Емпіричні (Статистичні) Методи

Ці методи базуються на **узагальненні великої кількості натурних спостережень** за зрушеннями, що виникли в схожих гірничо-геологічних умовах. Вони є найбільш поширеними для прогнозування **зрушення земної поверхні** і зазвичай використовують параметри, отримані з польових вимірювань.

Основні параметри та формули

Розрахунок ґрунтується на концепції **мульди зсуву** (зони зрушення), яка формується над очисною виробкою. Ключові параметри, що використовуються:

- **Кут зсуву (β)**: Кут між вертикаллю та лінією, що з'єднує контур виїмки в пласті з межею мульди зсуву на поверхні.
- **Кут повного зсуву (γ_0)**: Кут між вертикаллю та лінією, що з'єднує контур виїмки з точкою повного опускання на поверхні.
- **Максимальне опускання (осідання) (S_{\max})**: Найбільше вертикальне зміщення в центрі мульди.

Розраховується за формулою:

$$S_{\max} = m \cdot q \cdot \cos \alpha$$

• Де:

- m — потужність пласта, що виймається.
- q — коефіцієнт об'ємного зрушення (менше 1), який враховує заповнення виробленого простору.
- α — кут падіння пласта.

•**Максимальна деформація:** Включає максимальні горизонтальні розтягувальні (εрозт.мах) та стискальні (εстиск.мах) деформації, які розраховуються через Sмах та параметри мульди зсуву, наприклад, за формулами типу:

• $\epsilon_{\text{мах}} = D \cdot H S_{\text{мах}}$

•Де:

- D — емпіричний коефіцієнт деформації.
- H — глибина розробки.

Переваги та Недоліки

•**Переваги:** Відносно прості та швидкі розрахунки, добре відпрацьовані для типових умов.

•**Недоліки:** Низька точність при значній зміні гірничо-геологічних умов (наприклад, тріщинуватості, потужності наносів) або для складних форм виїмки.



Аналітичні Методи

Ці методи ґрунтуються на **теорії пружності, пружно-пластичності або в'язкопружності** та використовують диференціальні рівняння для опису напружено-деформованого стану (НДС) гірського масиву.

Основні Моделі

- **Модель балки на пружній основі:** Використовується для розрахунку прогинів (зрушень) та моментів (деформацій) у покрівлі або земній поверхні, розглядаючи масив як балку чи плиту.
- **Теорія пружності (задача Ляма-Келіна):** Для простих геометрій виробок у пружному, однорідному та ізотропному масиві. Визначає напруги (σ) та деформації (ϵ) навколо виробок, використовуючи модуль Юнга (E) та коефіцієнт Пуассона (ν).
- **Метод інтегральних рівнянь (МІР):** Використовується для розрахунку НДС навколо контуру виробки, особливо при складних формах.

Формули (загальний вигляд)

Напруги та деформації в певній точці $P(x, y, z)$ залежать від початкового поля напруг та зміни напруг через створення порожнини (виробки).

- Деформації:

- $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial x_j \partial u_i + \partial x_i \partial u_j)$

- Де u_i — компоненти вектора зміщення.

- Напруги (за законом Гука для пружного середовища):

- $\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2G \epsilon_{ij}$

- Де λ і G — параметри Ляме, δ_{ij} — символ Кронекера.



Чисельні Методи (Математичне Моделювання)

Це найсучасніші та найбільш універсальні методи, які дозволяють враховувати **складну геометрію** виробок, **неоднорідність** і **анізотропію** гірських порід, **нелінійність** їхньої поведінки (пластичність, повзучість, руйнування) та **послідовність** ведення гірничих робіт.

Основні Чисельні Методи

Метод	Принцип дії	Застосування
Метод скінченних елементів (МСЕ, FEM)	Розбиття масиву на дискретні елементи (сітку). НДС розраховується для кожного елемента, а потім система рівнянь вирішується для всього масиву.	Широко використовується для моделювання НДС навколо виробок, взаємодії кріплення з масивом, прогнозування зрушень поверхні.
Метод скінченних різниць (МСР, FDM)	Дискретизація диференціальних рівнянь шляхом заміни похідних скінченними різницями в точках сітки.	Моделювання поширення хвиль, тепломасопереносу, руйнування (часто у динамічних задачах).
Метод граничних елементів (МГЕ, BEM)	Дискретизація лише <i>границь</i> (контурів) виробок. Перевага для однорідних і нескінченних масивів.	Розрахунок полів напруг і зміщень навколо гірничих виробок, особливо глибоких .
Метод дискретних елементів (МДЕ, DEM)	Масив розглядається як сукупність окремих блоків або частинок. Враховується рух і взаємодія цих блоків.	Моделювання дуже тріщинуватих масивів , руйнування покрівлі, обвалів , поведінки сипких матеріалів .

Програмне Забезпечення

Для чисельного моделювання використовуються спеціалізовані програмні комплекси:

- **FLAC/FLAC3D** (Itasca)
- **UDEC/3DEC** (Itasca)
- **ABAQUS, ANSYS** (загальні інженерні пакети з модулями для геомеханіки)
- **Rocscience** (Phase2, Examine3D)

Етапи Чисельного Розрахунку

- 1. Створення моделі:** Визначення геометрії виїмки, гірського масиву та граничних умов.
- 2. Вибір constitutive model (моделі поведінки):** Застосування законів деформування гірських порід (наприклад, пружна модель, модель Мора-Кулона, модель Хука-Брауна).
- 3. Визначення параметрів:** Введення фізико-механічних властивостей порід (E, ν , міцність, кут внутрішнього тертя тощо).
- 4. Моделювання:** Послідовне імітування процесу виїмки та взаємодії з кріпленням.
- 5. Аналіз результатів:** Отримання карт ізоліній **зрушень** (вертикальних, горизонтальних) та **деформацій** (розтяг, стиск) для прогнозу впливу.

Чисельні методи забезпечують **найвищу точність** і **детальність** прогнозу, але вимагають значних обчислювальних ресурсів, детальних інженерно-геологічних даних та високої кваліфікації інженера-геомеханіка.