

І.Є. Григор'єв, аспір.  
Є.О. Несмашний, д.т.н., проф.  
А.В. Сорокопуд, ст. викл.  
Криворізький технічний університет

### ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ ПОРОДНИХ СХИЛІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

*Розглянута задача про визначення коефіцієнта стійкості породних схилів на підставі аналізу їхнього деформованого стану. Отримані, на підставі повної діаграми деформування гірських порід у вигляді експонентної функції, аналітичні вирази для визначення коефіцієнта запасу стійкості як у дограничній, так і в заграничній областях їх деформування.*

Більшість методів для розрахунку кутів схилу бортів кар'єрів та відвалів, рекомендованих до практичного використання, засновано на теорії граничної рівноваги та деяких наукових принципах, головними з яких є:

- механізм ковзання, що приймається без істотних кінематичних обмежень і полягає в ковзанні породних мас по площинах з лінійними чи криволінійними поверхнями;
- розрахунковий опір зсуву, обумовлений прийнятою гіпотезою міцності, порівнюється з розрахунковою величиною сили, що діє на призму зсуву, і за результатами цього порівняння визначається положення найбільш небезпечної поверхні зсуву та коефіцієнт запасу стійкості.

Основним недоліком такого підходу є те, що в розрахунках стійкості відкритих гірничих виробок не враховується найбільш достовірна інформація про стан породного схилу, а саме – його деформаційні параметри. Тобто ті параметри, які досить легко визначаються інструментальними маркшейдерсько-геодезичними спостереженнями за станом бортів кар'єрів і відвалів. Тому і розрахунок ступеня стійкості породних схилів бажано робити на підставі аналізу їхнього деформованого стану.

Рішення даної задачі може бути отримано за умови, що фізико-математична модель руйнування породного схилу дозволяє встановлювати кількісні взаємозв'язки між величиною, що характеризує ступінь стійкості гірничої виробки, і величиною її деформованого стану, яка визначається інструментальними методами в масиві.

При цьому необхідно, по найбільш небезпечній поверхні зсуву, визначати не тільки співвідношення між силами, що утримують чи зсувають призму зсуву, але і враховувати, що величина цих сил не залишається постійною, а змінюється в залежності від зміни стану породного схилу при переході його від дограничного в область заграничного деформування. При розробці фізико-математичної моделі, для розв'язання вищезгаданої наукової задачі, ступінь стійкості породного схилу оцінювався нами величиною коефіцієнта запасу. Чисельне значення цього коефіцієнта визначалося як відношення величини утримуючої сили до сили, що зсуває породний масив, по найбільш небезпечній поверхні зсуву. Для визначення коефіцієнта запасу стійкості використовувався метод алгебраїчного сумування сил по кругло-циліндричній поверхні зсуву, відомий як метод проф. Фісенка Г.Л. [1].

При цьому нами враховувалися наступні положення механіки твердого тіла, що деформується [2]:

- в дограничній області деформування гірської породи, коли первинна суцільність породного масиву не порушена, значення деформацій обумовлені величиною діючої напруги і визначаються законом Гука;
- в заграничній області деформування гірської породи значення деформацій обумовлені збільшенням обсягу породи при її руйнуванні і вже не зв'язані однозначно з діючою напругою.

Тому значення коефіцієнта запасу стійкості нами визначалося на різній фізико-математичній основі для дограничної і заграничної областей деформування породного масиву.

Дограничне деформування ( $\varepsilon_i < \varepsilon_{пр}$ ). Міцність гірських порід у дограничному стані визначається дією сил внутрішнього тертя і молекулярного зчеплення. Гранична величина цих сил може бути визначена у відповідності до гіпотези міцності Мора. Тоді граничне значення питомої утримуючої сили по найбільш небезпечній поверхні зсуву буде дорівнювати:

$$\tau_{зд} = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} (\gamma \cdot h_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi + c) \cdot dx, \quad (1)$$

де  $h_i = Y(x) - y(x); \alpha_i = \operatorname{arctg}[y'(x)];$   
 $Y(x)$  – рівняння поверхні породного схилу;  
 $y(x)$  – рівняння поверхні зсуву;  
 $y'(x)$  – похідна від рівняння поверхні зсуву;  
 $c$  – молекулярне зчеплення, Па;  
 $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, град.;  
 $\gamma$  – питома вага, Н/м<sup>3</sup>;  
 $\ell$  – довжина призми зсуву, м.

Для визначення сили, що зсуває породний масив, скористаємося загальним положенням про те, що деформування твердого тіла є наслідком впливу на нього зовнішніх сил і в межах пружності та непорушеної суцільності речовини, сила та деформація знаходяться в прямо пропорційній залежності. Тобто, знаючи деформований стан породного масиву, можна визначити величину сили, що викликала це деформування. Для цього скористаємося дограничною областю повної діаграми деформування гірських порід у вигляді експонентної залежності [3]. Тоді при відносній деформації, що не перевищує для даної породи її граничного значення, величина питомої зсувної сили, по найбільш небезпечній поверхні зсуву дорівнює:

$$\tau_{сдв} = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \tau(\varepsilon_i) dx, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_i$  – відносна деформація зсуву на розглянутій площадці  $dx$ , що визначається інструментальними методами в масиві;  
 $\tau(\varepsilon_i)$  – питома зсувна сила при відносній деформації  $\varepsilon_i$ , Па;  
 $\ell$  – довжина призми зсуву, м.

Відносна деформація зсуву  $\varepsilon_i$  визначається за результатами маркшейдерсько-геодезичних спостережень за станом породного схилу таким чином. Розглянемо породний схил, що складається з декількох підступів (рис. 1).

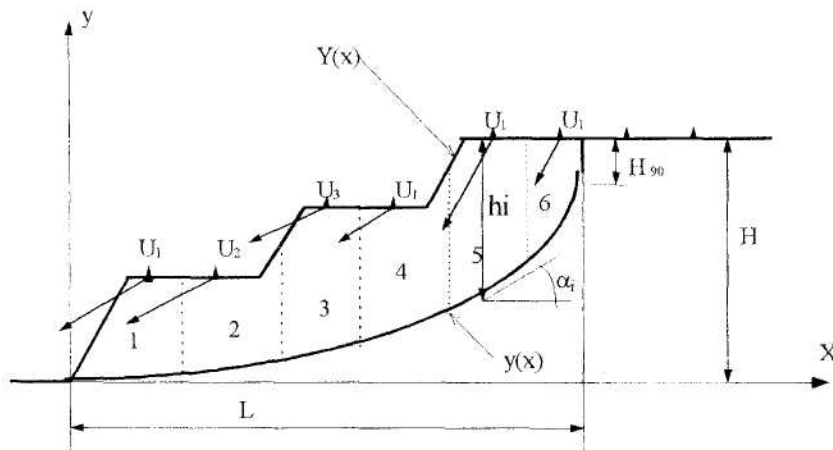


Рис. 1. До розрахунку стійкості породного схилу на основі аналізу його деформованого стану

На поверхні укусу встановлені геодезичні репери  $U_i$ . Призма зсуву розбивається на ряд ділянок, у залежності від кількості реперів на поверхні схилу. Границі між ділянками визначаються як середні горизонтальних відстаней між сусідніми реперами. Для кожної з умовних ділянок, на які розбита призма зсуву, з виразу (3) визначається величина модуля вектора зсуву  $U_i$ , а з виразу (4) – кут нахилу  $\xi$  вектора зсуву до горизонталі:

$$U_i = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}, \quad (3)$$

$$\xi_i = \operatorname{arctg} \left[ \frac{U_z}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2}} \right], \quad (4)$$

де  $U_x, U_y, U_z$  – зсув реперів по осях  $x, y, z$  відповідно, мм;  
 $i$  – номер відповідної ділянки призми зсуву.

Для кожної з умовних ділянок, на які розбита призма зсуву, відповідно до методу масштабних перетворень, з виразу (5) визначається значення експериментально установленної відносної деформації зсуву  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{U_i \cdot h_{дi}}{h_i \cdot m_{дi}}, \quad (5)$$

де  $h_i$  – середня висота відповідної ділянки призми зсуву, м;  
 $h_{дi}, m_{дi}$  – висота та довжина зразка гірської породи, що використовувалися для іспитів у зсувному приладі, м.

Таким чином, для кожної з умовних ділянок, на які розбивається призма зсуву, визначається значення величини  $\varepsilon_i$ , на підставі якої і визначається значення параметра  $\tau(\varepsilon_i)$ . Його підсумовування по всій поверхні зсуву і визначає значення зсувної сили. Тоді ступінь стійкості породного схилу у дограничному стані може бути визначений за значенням коефіцієнта запасу стійкості  $n_3$  з наступного виразу:

$$n_3 = \frac{\int_0^{\ell} (y h_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi + \dots) dx}{\int_0^{\ell} \tau(\varepsilon_i) dx}. \quad (6)$$

**Заграничне деформування** ( $\varepsilon_j \geq \varepsilon_{пр}$ ). В області заграничного деформування гірських порід величина дотичних напруг по поверхні руйнування чисельно являє собою суму коефіцієнтів молекулярного зчеплення, фізичного тертя і механічного зачеплення, яка і визначає міцність гірської породи на зсув. Тому величину утримуючих сил у заграничній області деформування гірських порід пропонується визначати з експонентної залежності для повної діаграми деформування [3] в такий спосіб:

$$\tau_{уд} = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \tau(\varepsilon_j) dx, \quad (7)$$

де  $\varepsilon_j$  – відносна деформація зсуву на площадці  $dx$  у заграничній області деформування, що визначається з виразу (5);

$\tau(\varepsilon_j)$  – питома утримуюча сила, що діє на площадці зсуву і визначається з експонентної залежності для повної діаграми деформування [3], при значенні відносної деформації  $\varepsilon_j > \varepsilon_{пр}$ .

Оскільки поверхня ковзання в заграничній області деформування може вважатися вже цілком сформованою, то величина зсувних сил може бути визначена добре апробованим способом:

$$\tau_{сдв} = \frac{1}{2\ell} \int_0^{\ell} y h_i \cdot \sin(2\alpha_i) dx. \quad (8)$$

А значення коефіцієнта запасу стійкості по поверхні зсуву у заграничній області деформування породного схилу дорівнює:

$$n_3 = \frac{2 \cdot \int_0^{\ell} \tau(\varepsilon_j) \cdot dx}{\int_0^{\ell} y h_i \cdot \sin 2\alpha_i \cdot dx}. \quad (9)$$

На підставі вищенаведеної фізико-математичної моделі деформування породного укосу визначені і наведені на рис. 2 теоретичні криві, що визначають закономірності зміни коефіцієнта запасу стійкості породного схилу по найбільш небезпечній поверхні зсуву, відповідно до зміни його деформованого стану при різних значеннях коефіцієнта молекулярного зчеплення (рис. 2, а) та коефіцієнта залишкової міцності  $f_0$  (рис. 2, б).

Аналізуючи отримані теоретичні криві, відзначимо, що рішення даної задачі за методом проф. Г.Л. Фісенка є частковим випадком запропонованого рішення при деформаціях породного масиву, рівних граничним.

У цілому отримані закономірності показують, що з ростом деформованого стану породного схилу його коефіцієнт запасу стійкості нелінійно знижується від нескінченної величини (при  $\varepsilon_i = 0$ ) до нульового значення, при  $\varepsilon_i \rightarrow \infty$ . У випадку, якщо відносні деформації породного ма-

сиву по всій поверхні зсуву досягнуть граничних значень ( $\varepsilon_i = \varepsilon_{in}$ ), то значення коефіцієнта запасу стійкості буде тотожно дорівнювати одиниці.

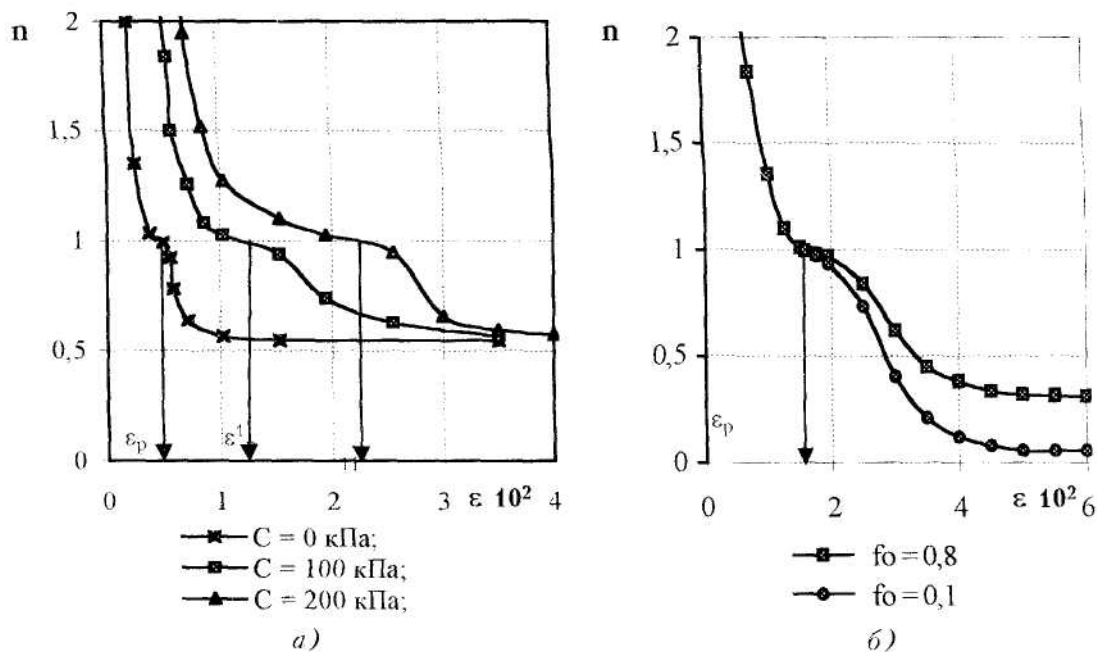


Рис. 2. Зміна коефіцієнта запасу стійкості породного схилу з ростом його деформованого стану при різних значеннях:  
а) коефіцієнта молекулярного зчеплення  $C$ ;  
б) коефіцієнта залишкової міцності  $f_0$ .

На підставі вищенаведеної методики визначення коефіцієнта запасу стійкості відкритих гірничих виробок, на основі аналізу картини їх деформованого стану розроблений пакет прикладних програм «NeUSTUP.GLINA» для реалізації на ЕОМ типу IBM PC. Вхідними даними для програм є: дані про міцність гірських порід, що складають масив; геометричні параметри схилу і просторові координати маркшейдерських реперів. Як змінні величини в програму вводяться дані про зсув маркшейдерських реперів, що розташовані по осі призми зсуву.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 375 с.
2. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
3. Несмашний Е.А. Аналитическая зависимость для полной диаграммы деформирования породных массивов. Изв. ВУЗов // Горный журнал. – 1989. – № 10. – С. 32–33.

ГРИГОР'ЄВ Ігор Євгенійович – аспірант кафедри “Відкриті гірничі роботи” Криворізького технічного університету.

Наукові інтереси:

- планування відкритих гірничих робіт.

НЕСМАШНИЙ Євген Олександрович – доктор технічних наук, завідувач кафедри фізики Криворізького технічного університету.

Наукові інтереси:

- фізичні процеси гірничого виробництва.

СОРОКОПУД Андрій Вадимович – старший викладач кафедри фізики Криворізького технічного університету.

Наукові інтереси:

- фізичні процеси гірничого виробництва;
- процеси буріння вибухових свердловин.