

## МЕХАНІКА ГРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 624.131.37:519.25

DOI 10.31649/2311-1429-2020-1-63-72

О. С. Ковров  
Р. М. ТерещукАНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ  
МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІРСЬКИХ ПОРІД  
ДЛЯ ПРОГНОЗУ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ УКОСІВ

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Стаття базується на порівняльному аналізі сучасних підходів з використанням детерміністичних, статистичних та графоаналітичних моделей і методик визначення міцнісних властивостей м'яких гірських порід для прогнозу зсувонебезпечності укосів. Для оцінки стійкості природних схилів та техногенних укосів найчастіше використовується критерій руйнування Кулона-Мора, основними величинами якого є зчеплення (С) та кут внутрішнього тертя ( $\varphi$ ). Детерміністичний підхід передбачає отримання значень цих характеристик в результаті лабораторних випробувань зразків м'яких порід на зсувних пристроях під впливом дотичних і нормальних навантажень. Проте ці розрахункові значення залежить від того, яким чином побудувати пряму дотичну до кривих Мора, що є суттєвим недоліком. Імовірнісний підхід щодо визначення міцнісних властивостей враховує певний діапазон значень С та  $\varphi$  порід в мінливих геокліматичних умовах для адекватного прогнозу стійкості і зсувонебезпечності укосів.

В статті представлено результати розрахунків стійкості гіпотетичних укосів з висотами 20 м та 30 м отримані за допомогою детермінованих параметрів С і  $\varphi$  та ймовірнісними діапазонами значень цих показників.

Запропоновано графоаналітичний підхід визначення міцнісних характеристик гірських порід. Обґрунтовано методику визначення міцнісних властивостей ґрунту чи гірських порід через побудову кривої граничних станів за трьома точками дотично до граничних кривих Мора, що відповідають межах міцності на розтягування, стискання і зрушення. Наукова новизна методики полягає у поєднанні результатів лабораторних випробувань зразків порід на стискання та зрушення, аналітичному визначенні меж міцності на розтягування за формулою та побудові кривої граничних станів. Практичне значення запропонованого способу побудови паспорта міцності гірських порід полягає в можливості більш точно обчислювати фізико-механічні властивості порід та прогнозувати процеси їх руйнування.

Ключові слова: фізико-механічні властивості порід, зчеплення, кут внутрішнього тертя, коефіцієнт запасу стійкості укосу, зсувонебезпечність.

## Вступ

Фізико-механічні властивості ґрунтів є найважливішим предметом інженерно-геологічних досліджень для прогнозу зсувонебезпечності і стійкості природних схилів та техногенних укосів. Отримання вірогідних значень таких характеристик, як зчеплення та кут внутрішнього тертя в мінливих гідрогеологічних та кліматичних умовах становить практичний інтерес для подальшого розрахунку коефіцієнту запасу стійкості (КЗС) укосу. Цей коефіцієнт представляє відношення утримуючих  $F_{\text{утр}}$  і зсувних  $F_{\text{зсув}}$  сил в схилі чи укосі по поверхні ковзання, тобто  $KЗС = F_{\text{утр}} / F_{\text{зсув}}$ . Можливі три стани схилової ділянки породного масиву: при  $KЗС > 1,0$  схил стійкий,  $KЗС = 1,0$  відповідає граничному стану в момент ініціації обвалення схилу чи укосу, яке переходить в стан обвалення (зсуву) при  $KЗС < 1,0$ .

Розрахунок стійкості укосів класичними методами здійснюється на основі детермінованих міцнісних властивостей гірських порід, що складають прибортовий масив. Однак такий підхід для визначення параметрів кар'єрних укосів вже несе в собі деяку похибку, пов'язану з тим, що встановлені за допомогою дослідів і випробувань фізико-механічні характеристики порід носять статистичний характер і є оцінками шуканих параметрів з обчисленою ймовірністю. Розрахункові характеристики беруться на підставі статистичної обробки результатів випробувань гірських порід. Тому їх надійність обумовлює точність розрахунку КЗС укосу.

Фізико-механічні властивості порід мінливі, залежать від великої кількості різних факторів, серед яких важко виділити домінуючий. Мінливість зчеплення і кута внутрішнього тертя зазвичай враховують за результатами лабораторних випробувань зразків гірських порід на зсувних пристроях. Отримані таким чином значення називаються розрахунковими фізико-механічними характеристиками. Більш обґрунтовано та вірогідно визначити міцнісні властивості гірських порід

та ґрунтових масивів дозволяє застосування методів теорії ймовірностей і математичної статистики [1], а також сучасних графоаналітичних способів з побудовою паспорта міцності порід.

Поєднання різних підходів і методик визначення міцнісних властивостей порід значно підвищує надійність прогнозової оцінки стійкості масиву.

**Мета** статті полягає в аналізі підходів щодо визначення фізико-механічних характеристик гірських порід для прогнозу стійкості і зсувонебезпечності природних схилів та техногенних укосів.

### 1. Детерміністичний підхід при визначенні міцнісних властивостей м'яких порід.

Для оцінки стійкості природних схилів та техногенних укосів найчастіше використовується критерій руйнування Кулона-Мора. В основі критерію міцності Кулона-Мора [2] лежить гіпотеза про залежність дотичних напружень матеріалу від величини прикладених нормальних напружень:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

де  $\tau$  – величина дотичних напружень в масиві,  $C$  – зчеплення,  $\sigma$  – величина нормальних напружень,  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя.

Критерій отримав широке застосування в гірництві і будівництві для оцінки несучої здатності пухких незв'язних і уламкових зцементованих порід, а також м'яких однорідних ґрунтів. Так, в ґрунтовому або породному масиві руйнування виникає в той момент, коли величина дотичного напруження сягає межі міцності на зрушення.

Значення  $\varphi$  та  $C$  отримують в результаті лабораторних випробувань зразків м'яких порід на зсувних пристроях, наприклад на приладі одноплощинного зрізу ПС-10, для визначення кута внутрішнього тертя і зчеплення ґрунтів за методикою регламентованою ДСТУ Б В.2.1-4-96 [3].

Випробування зразків суглинків з метою визначення їх фізико-механічних характеристик виконують в лабораторних умовах при нормальних навантаженнях 0,1, 0,2 і 0,3 МПа для визначення опору порід зрізу  $\tau$ , кута внутрішнього тертя  $\varphi$  і питомого зчеплення  $C$ . Розміри зразків ґрунту для дослідів: діаметр – 56 мм і висота – 20 мм. За виміряними в процесі випробувань значеннями дотичного і нормального навантажень визначаються дотичні і нормальні напруження  $\tau$  і  $\sigma$  (МПа) за формулами:

$$\tau = \frac{T}{A}, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (3)$$

де  $T$  і  $P$  – дотична і нормальна сили до площини зрізу, кг,  $A$  – площа перерізу зразка, см<sup>2</sup>.

Питомі значення кута внутрішнього тертя  $\varphi$  і зчеплення  $C$  при аналізі не менше 3-х проб кожного виду суглинку, обчислюються за формулами:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{n \sum \tau_i \sigma_i - \sum \tau_i \sum \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}; \quad (4)$$

$$C = \frac{\sum \tau_i \sum \sigma_i^2 - \sum \sigma_i \sum \tau_i \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \quad (5)$$

де  $\tau_i$  – дослідні значення опору зрізу, певні при різних значеннях  $\sigma_i$  і відносяться до одного інженерно-геологічного елементу або окремого моноліту ґрунту (при  $n \geq 3$ ),  $n$  – число випробувань.

На рис. 1 представлено пристрій для випробування зразків м'яких розкривних порід на зрушення та результати у вигляді типового графіку компресійних випробувань ґрунтів. Так для жовто-бурого суглинку, що складає верхній шар осадових порід, отримані значення зчеплення  $C = 40$  кПа та кута внутрішнього тертя  $\varphi = 25^\circ$  [4]. Отримані експериментальним шляхом значення в подальшому використовуються в якості вихідних даних для інженерного аналізу та чисельного моделювання стійкості ґрунтових укосів.

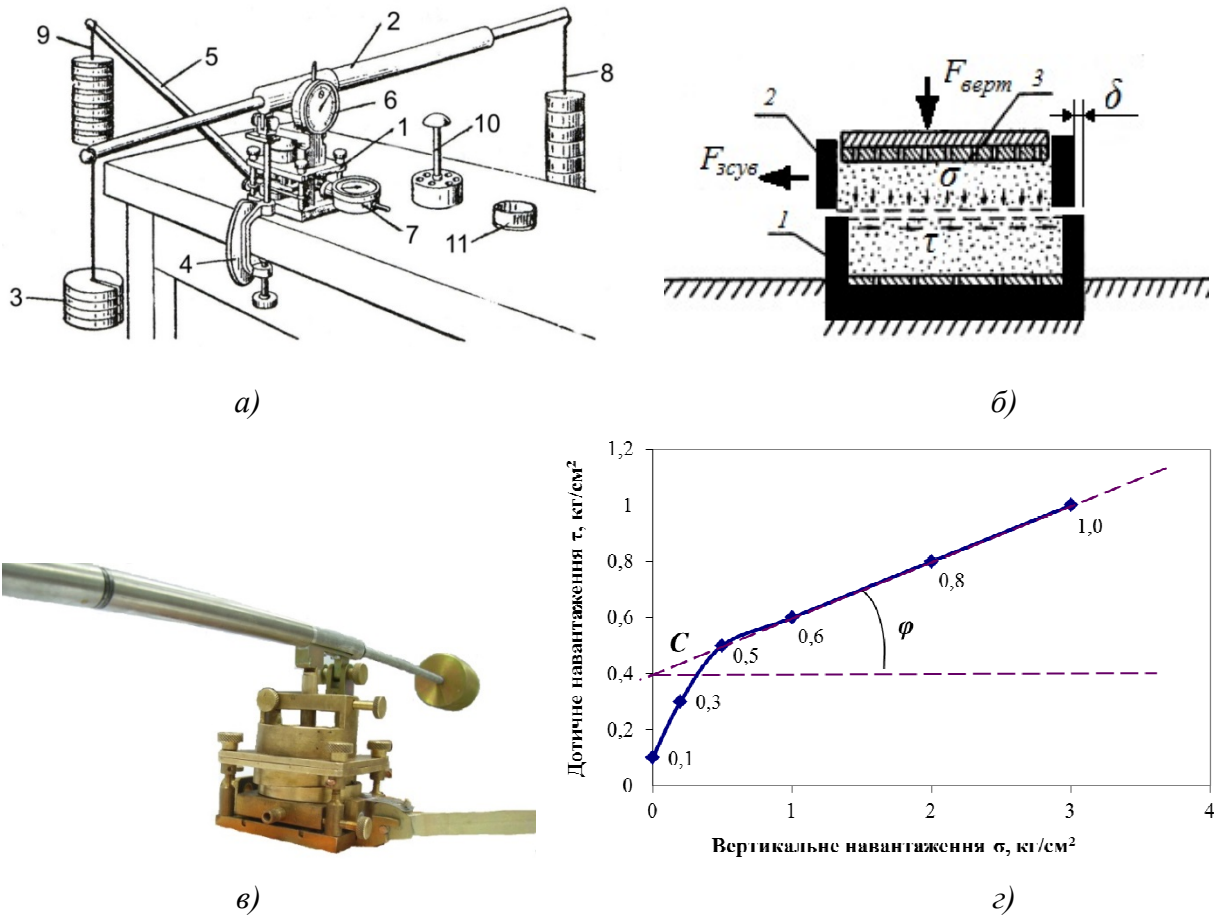


Рисунок 1 – Випробування зразків м'яких розкривних порід на зрушення:

- а) загальний вид приладу П10-С; б) схема експерименту з випробування ґрунтів на зсув;
- в) зразок ґрунту в обоймі пристрою під вертикальним та дотичним навантаженням; г) типовий графік компресійних випробувань ґрунтів; 1 – основна частина приладу; 2 – система важеля для вертикального навантаження з підвісками для вантажів; 3 – протизвага важеля 2; 4 – струбцина для кріплення приладу і важеля 2; 5 – важіль для горизонтального навантаження з підвіскою і вантажами; 6 – індикатор вертикальних переміщень поршня; 7 – індикатор горизонтальних переміщень нижньої каретки; 8 – вантажний підвіс вертикального навантаження; 9 – вантажний підвіс горизонтального навантаження; 10 – пристосування для переміщення зразка ґрунту з гільзи в прилад; 11 – ґрутовідбірна гільза

Вищенаведені розрахунки кута внутрішнього тертя  $\varphi$  та зчеплення  $C$  не є досконалими, бо мають певну похибку. При лабораторних тестуваннях м'яких гірських порід на зсувних пристроях, зазвичай визначають фізико-механічні характеристики досліджуваних зразків при різних навантаженнях, що дозволяє отримати сімейство кругів Мора та побудувати дотичну криву  $lt$  (рис. 2) по отриманим точкам, що відповідають певному напружено-деформованому стану. Але застосування вірогідних значень  $\varphi$  та  $C$  отриманих під час лабораторних випробувань, залежить від того, яким чином побудувати пряму дотичну до кругів Мора.

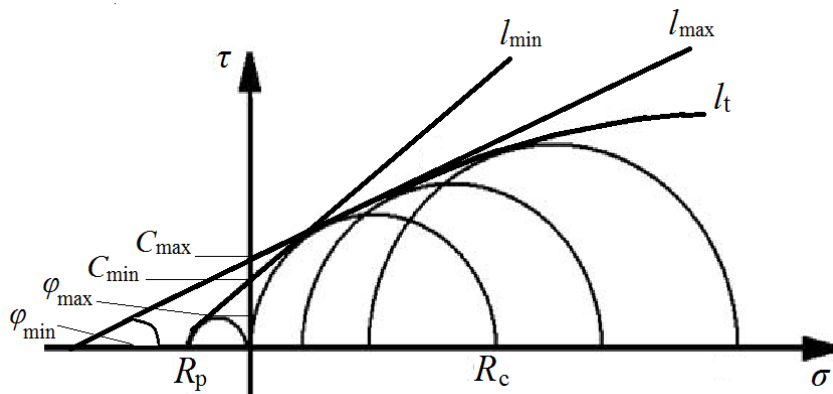


Рисунок 2 – Круги напружень Мора для визначення властивостей ґрунтів

Якщо використовувати круги Мора, починаючи з першого круга, який відповідає значенню границі міцності на стискання  $R_c$ , то існує ймовірність отримання завищених значень зчеплення  $S_{\max}$  на перехресті прямої  $l_{\max}$  з віссю дотичних напружень  $\tau$ . Якщо в розрахункову схему включити круг, що відповідає границі міцності на розтягування  $R_p$ , то внаслідок проведення прямої  $l_{\min}$  дотичної до кругів  $R_c$  та  $R_p$  отримаємо мінімальне значення зчеплення  $S_{\min}$  на перехресті з віссю дотичних напружень  $\tau$ .

Наведене вище свідчить про елемент певної невизначеності щодо вірогідних значень  $C$  та  $\phi$  навіть в процесі лабораторних випробувань, що потребує застосування ймовірнісно-статистичних методів при визначенні міцнісних властивостей м'яких порід та їх застосуванні в геотехнічних розрахунках.

## 2. Ймовірнісний підхід щодо визначення $C$ та $\phi$ для прогнозу стійкості і зсувонебезпечності укосів.

Рішення різноманітних геомеханічних задач стійкості природних схилів та штучних укосів ґрунтується переважно на детерміністичних моделях. Цей факт передбачає значну ідеалізацію досліджуваних об'єктів, а саме властивостей ґрунтового масиву м'яких ґрунтових порід. Геотехнічні розрахунки ґрунтуються на простих моделях, в яких досліджуваний параметр, зокрема КЗС, залежить від одного чи двох змінних факторів впливу. В реальних умовах гірські породи чи ґрунтовий масив мають значну неоднорідність, що відбивається на фізико-механічних властивостях окремих літологічних різностей [5]. Це призводить до того, що спочатку прості моделі не належним чином описують реальні об'єкти, що, в свою чергу, змушує ускладнювати початкові моделі, збільшуючи кількість факторів, що, ймовірно, впливають на вірогідне значення КЗС. Оскільки завдання ускладнюється, кількість факторів, що впливають, зростає, а досліджувана модель стає все складніше, тому її важко проаналізувати.

Геотехнічні розрахунки стабільності схилів та укосів, засновані на детерміністичному аналізі, мають досить низьку надійність внаслідок об'єктивних похибок пов'язаних з варіаціями фізико-механічних властивостей гірських порід, що визначаються лабораторними випробуваннями. Ці лабораторні результати мають відповідні помилки, тому їх можна оцінити як статистичні параметри з певною ймовірністю.

Ймовірнісний підхід знайшов найбільше застосування при оцінці укосів на кар'єрах та при цивільному будівництві, що пов'язано з безпекою життєдіяльності людини та додержанням вимог безпечних технологічних операцій на кар'єрах.

Фізико-механічні властивості порід мінливі, залежать від великої кількості різних факторів, серед яких важко виділити домінуючий. На відміну від детерміністичних моделей ймовірнісні методи розрахунку мають важливу перевагу, яка полягає в об'єктивності рішення, здатності оцінювати точність отриманих результатів та визначати діапазон надійності отриманих результатів.

Статистичне визначення характеристик міцнісних властивостей порід є основою для ймовірнісного способу розрахунку стійкості укосів. Використання розрахункових характеристик, обчислених з певною надійністю, ще не означає, що і кінцевий результат, тобто коефіцієнт запасу стійкості (КЗС) або параметри стійких укосів, буде знайдений з тією ж надійністю. Це обумовлено іншими факторами, в більшій чи меншій мірі впливають на стійкість укосу.

У зв'язку з цим виникає завдання визначення КЗС з певною надійністю або побудувати границю довірчого інтервалу із заданою ймовірністю на основі статистичних характеристик розподілу міцнісних властивостей масиву, розглядаючи КЗС як функцію випадкових аргументів [6, 7].

Ймовірнісний підхід до визначення стійкості та граничних параметрів укосу. Маючи розрахункові показники фізико-механічних властивостей гірничих порід  $\text{tg } \phi^p$ ,  $C_p$ ,  $\gamma_p$  можна обчислити: КЗС укосу  $\eta$ , якщо задані його геометричні параметри (висота  $H$  і кут укосу  $\alpha$ ):

$$\begin{aligned} F_s &= f(\text{tg } \phi_p, C_p, \gamma_p, \alpha, H) \\ H &= f(\text{tg } \phi_p, C_p, \gamma_p, \alpha) \\ \alpha &= f(\text{tg } \phi_p, C_p, \gamma_p) \end{aligned} \quad (6)$$

Варіативність є невід’ємною властивістю гірських порід та обумовлена впливом різних факторів формування та трансформації порід, які мають окремий вплив на їх механічні параметри та характеристики.

Для вирішення варіативності вхідних параметрів при розрахунках стійкості укосів в різноманітних програмах інженерного аналізу, наприклад Phase2 (RocScience Inc.) використовуються статистичні інструменти, які базуються на імовірнісному методі точкових оцінок Розенблюта (МТО) [8].

Принцип використання імовірнісного методу полягає в обчисленні кінцевої функції КЗС в діапазоні двох різних значень фізико-механічних характеристик порід в мінливих умовах, що показано на прикладі оцінки стійкості укосу для умов кар’єру Вільногірського гірничо-металургійного комбінату (м. Вільногірськ, Україна).

Для оптимізації робіт з видобутку розсіпних руд відкритим способом та зменшення об’ємів розкривних порід виконані розрахунки оптимальних геометричних параметрів укосів кар’єру в мінливих гірничо-геологічних умовах. Верхні шари покриваючих порід представлені лесовими світло-жовтими суглинками загальною товщиною 60...65 м. Нижні шари представлені червоно-бурими глинами. Геомеханічна оцінка стійкості укосу виконана в програмі скінченно-елементного аналізу Phase2 з використанням двох імовірнісних вхідних змінних параметрів, а саме зчеплення та кута внутрішнього тертя.

В табл. 1 представлено фізичні властивості ґрунтів з відхиленням змінних значень.

Таблиця 1

## Фізичні властивості ґрунту

| Тип ґрунту                   | Зчеплення, кПа   |                       | Кут внутрішнього тертя, градуси |                       |
|------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                              | Середнє значення | Стандартне відхилення | Середнє значення                | Стандартне відхилення |
| Світло-жовті лесові суглинки | 38               | 6                     | 25                              | 2                     |
| Червоно-бурі глини           | 75               | 25                    | 16                              | 4                     |

Результати розрахунків свідчать, що укіс знаходиться в стійкому стані, а середнє значення КЗС = 1,76 зі стандартним відхиленням 0,0054, тому ймовірність зсуву близька до 0 (рис. 3).

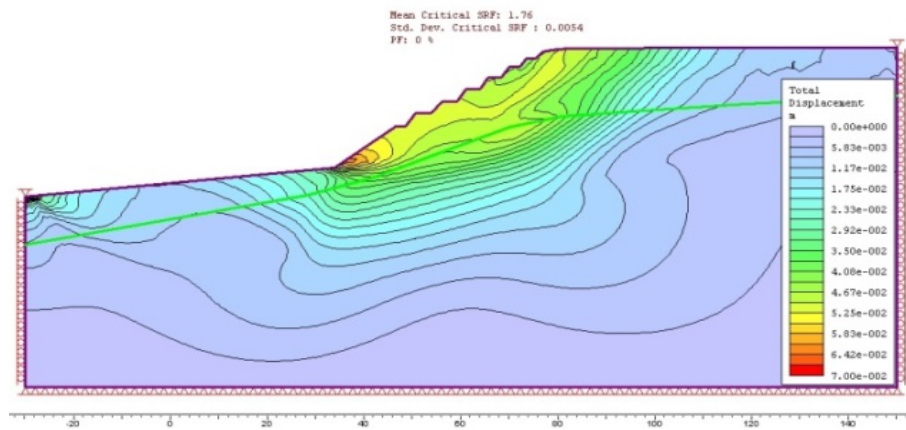


Рисунок 3 – Оцінка стійкості укосу з використанням імовірнісного методу

На рис. 4 представлено відмінності між результатами, отриманими за допомогою детермінованих розрахунків КЗС та імовірнісного підходу. Для однорідного схилу, що складається з м’якого лесового суглинку, отримані значення КЗС для укосів з висотами  $H_1 = 20$  м і  $H_2 = 30$  м відповідно. Результати розрахунку показують, що використання фіксованих значень фізико-механічних характеристик порід дає детерміновані значення коефіцієнта запасу. У мінливих гірничо-геологічних та гео-кліматичних умовах показники зчеплення та кута внутрішнього тертя, що входять в умову міцності Кулона-Мора, варіюють в широких межах залежно від вологості м’яких розкривних порід. Так, при використанні детерміністичного підходу критичні значення КЗС = 1,0 з обваленням укосу може виникнути при кутах нахилу укосу  $\alpha = 54^\circ$  ( $H_2 = 30$  м) та

$\alpha = 59^\circ$  ( $H_1 = 20$  м) відповідно. При використанні ймовірнісного підходу критичні значення КЗС = 1,0 з обваленням укосу може виникнути при кутах нахилу укосу  $\alpha = 45^\circ$  ( $H_2 = 30$  м) та  $\alpha = 48^\circ$  ( $H_1 = 20$  м) відповідно.

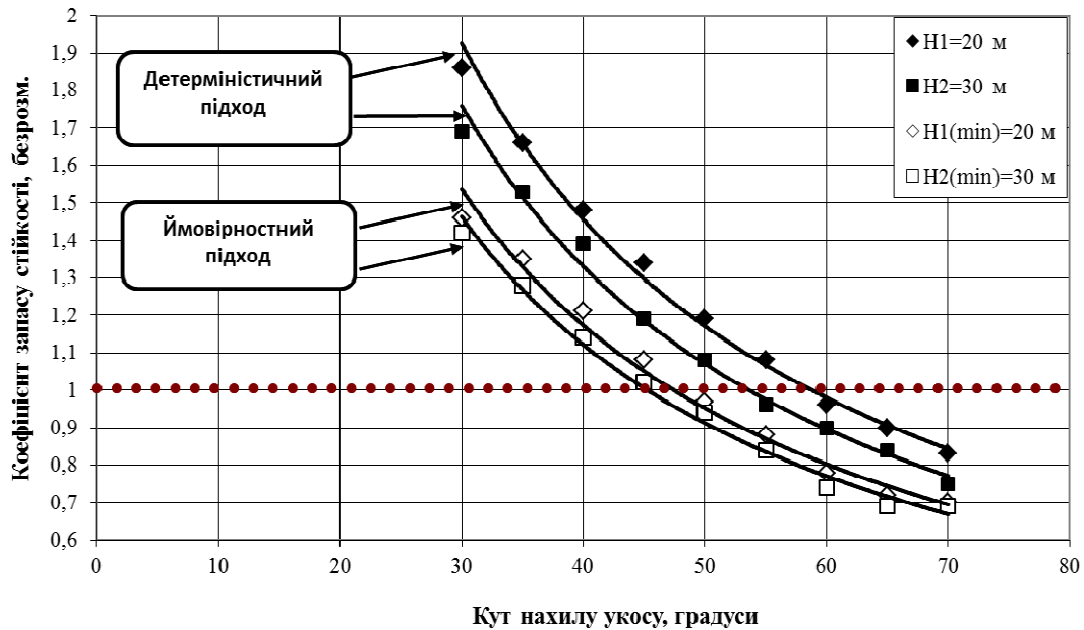


Рисунок 4 – Результати розрахунків КЗС для схилів з  $H_1 = 20$  м і  $H_2 = 30$  м

Задаючи в програмі Phase2 діапазон значень міцнісних характеристик можна отримати максимальне і мінімальне значення КЗС, відповідні заданій ймовірності. Для обґрунтування стійких параметрів укосу і технології ведення відкритих гірничих робіт доцільно пропонувати мінімальні значення КЗС для отриманого довірчого інтервалу.

В іншому випадку, результати розрахунків за досить поширеними методиками [9, 10] можуть призвести до значного завищення значень КЗС укосу.

Таким чином, різноманітні ймовірнісно-статистичні підходи до оцінки стійкості укосів дозволяють встановити довірчі границі коефіцієнта запасу стійкості і граничні геометричні параметри укосу при заданій довірчій ймовірності. Такий ймовірнісний підхід до вирішення завдань стійкості укосів дозволяє більш надійно обґрунтовувати параметри укосів для прийняття оптимальних інженерних рішень на різних стадіях проектування і розробки родовищ відкритим способом.

### 3. Графоаналітичний підхід визначення міцнісних характеристик гірських порід.

Як зазначалось вище, визначення фізико-механічних властивостей гірських порід на зсувних пристроях має один недолік пов'язаний з побудовою паспорту міцності. Стосовно м'яких порід, точність визначення цих властивостей залежить від проведення на графіку опору зсуву дотичної, яка перетинає вісь ординат в точці, що відповідає значенню зчеплення (рис. 2). Значна варіація значень міцнісних властивостей призводить до збільшення діапазону розрахункових значень КЗС укосу і зменшення надійності геотехнічних розрахунків.

Враховуючи вищевикладене, запропоновано методику визначення механічної міцності гірських порід шляхом прикладення до досліджуваних зразків статичних сил стискання та зрушення у вигляді графічної моделі. Згідно з цією моделлю, перед визначенням межі міцності на одноосьове стискання  $R_c$  від породного зразка відокремлюють частину зразка, яку поміщують в лабораторний прилад та визначають межу міцності на зрушення  $R_t$ , після чого визначають межу міцності на одноосьове розтягування  $R_p$  за наступною формулою [11]:

$$R_p = \frac{4R_t^2}{R_c} \quad (7)$$

Побудова кривої граничних станів здійснюють за трьома точками, дотично до граничних кругів Мора, що відповідають межах міцності на розтягування і стискання через точку межі міцності на зрушення, що належить вісі  $\tau$ . На рис. 4 наведено криву граничних станів  $\tau = f(\sigma)$  гірських порід,

де А – точка дотику кривої граничних станів до граничного кола межі міцності на розтягування; В – точка перетину кривої граничних станів та вісі  $\tau$ , що відповідає межі міцності на зрушення; С – точка дотику кривої граничних станів до граничного кола межі міцності на стискання.

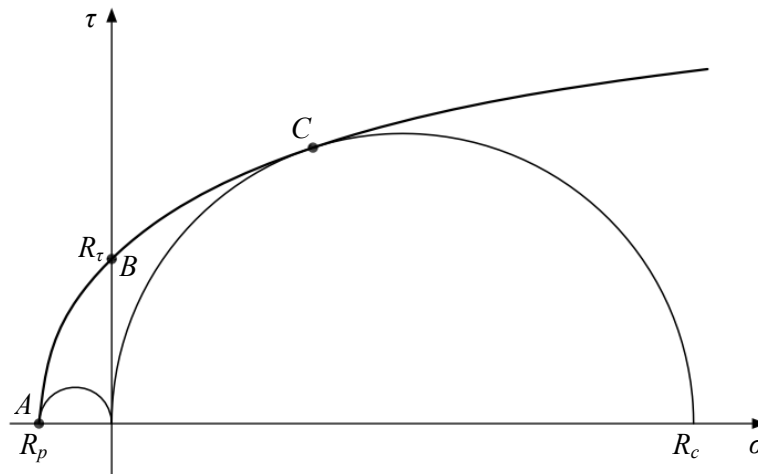


Рисунок 4 – Спосіб побудови паспорта міцності та визначення фізико-механічних характеристик гірських порід

Спосіб реалізується наступним чином. Спочатку виготовляють зразки гірської породи (від м'яких  $f = 0,8$  до дуже міцних  $f = 15$ ) циліндричної форми діаметром не менше 70 мм. Далі від зразка відокремлюють його частину зі співвідношенням діаметру до висоти 1:2, яку поміщують в прилад та визначають межу міцності на зрушення ( $R_\tau$ ). Визначення межі міцності на зрушення регламентується ДСТУ Б В.2.1-4-96 [3]. Залишок зразка повинен мати співвідношенням діаметру до висоти 1:3. Далі на цих зразках визначають межу міцності на одноосьовий стиск ( $R_c$ ). Визначення межі міцності на одноосьовий стиск регламентується ГОСТ (ДСТУ) 21153.2-84 [12].

$$R_p = \frac{4R_\tau^2}{R_c}$$

Після цього визначають межу міцності на одноосьовий розтяг ( $R_p$ ) за формулою. Далі будують безперервну монотонно зростаючу криву граничних станів за трьома точками (А, В, С), дотично до граничних кругів меж міцності на розтягування (А) і стискання (С) через точку межі міцності на зрушення (В), що належить вісі  $\tau$ .

Запропонований спосіб побудови паспорта міцності гірських порід має наступні переваги:

- враховуються властивості гірських порід в зоні розтягування, що дає можливість обчислювати фізико-механічні властивості порід та більш точно прогнозувати процеси їх руйнування;

- забезпечується можливість досліджувати гірські породи незалежно від їх міцності.

Таким чином, запропонована методика побудови паспорта міцності гірських порід може забезпечити вирішення проблеми дослідження слабких, особливо глинистих порід, та побудову кривої граничних станів за трьома точками. Використання даної методики дозволяє досліджувати гірські породи, незалежно від їх міцнісних властивостей, підвищує точність та простоту побудови паспорта міцності.

## Висновок

1. В статті виконано аналіз підходів щодо визначення фізико-механічних характеристик гірських порід для прогнозу стійкості і зсувонебезпечності природних схилів та техногенних укосів. Результати застосування детерміністичного підходу свідчать про елемент певної невизначеності щодо вірогідних значень  $C$  та  $\phi$  в процесі лабораторних випробувань, що потребує застосування ймовірно-статистичних методів для визначення міцнісних властивостей м'яких порід та їх застосуванні в геотехнічних розрахунках. Так, при використанні детерміністичного підходу критичні значення  $K3C = 1,0$  з обваленням укосу може виникнути при кутах нахилу укосу  $\alpha = 54^\circ$  ( $H2 = 30$  м) та  $\alpha = 59^\circ$  ( $H1 = 20$  м) відповідно. При використанні ймовірного підходу критичні значення  $K3C = 1,0$  з обваленням укосу може виникнути при кутах нахилу укосу  $\alpha = 45^\circ$  ( $H2 = 30$  м) та  $\alpha = 48^\circ$  ( $H1 = 20$  м) відповідно.

2. Запропонований графоаналітичний підхід визначення міцнісних характеристик гірських порід. Обґрунтовано методику визначення міцнісних властивостей ґрунту чи гірських порід через побудову кривої граничних станів за трьома точками дотично до граничних кругів Мора, що відповідають межах міцності на розтягування, стискання і зрушення. В основу методики поставлена задача удосконалення відомого способу побудови паспорта міцності гірських порід, в якому зміною технологічних параметрів досягається можливість визначення межі міцності гірських порід на зрушення та побудову кривої граничних станів за трьома точками та досліджувати гірські породи, незалежно від їх міцності. Крім того, завдяки запропонованому підходу підвищується точність та простота побудови паспорта міцності гірських порід.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шашенко А. Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А. Н. Шашенко, С. Б. Тулуб, Е. А. Сдвижкова. – К.: Университетское издательство «Пульсары», 2002. – 302 с.
2. Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., vol. 7, pp. 343–387.
3. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості: ДСТУ Б В.2.1-4-96. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 96 с.
4. Kovrov O. S. Investigation of physical and mechanical properties of subsident soils at the Yevpatoriyskaya ravine located in the City of Dnepropetrovsk / O. S. Kovrov, O. V. Solodyankin, N. N. Ruban // Scientific Bulletin of the National Mining University. – 2015. – Vol. 1. – P. 15–20.
5. Сдвижкова О. А. Статистична оцінка міцнісних властивостей глинистих порід / О. А. Сдвижкова, О. С. Ковров, Т. В. Мніщенко // Зб. наук. праць НГУ. – 2018. – №54. – С. 240–252.
6. Кендалл М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стьюарт – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. – 900 с.
7. Попов В. Н. Управление устойчивостью карьерных откосов / В. Н. Попов, П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, изд-во «Горная книга», 2008. – 683 с.
8. Rosenblueth E. Point estimates for probability moments. Proceedings of the National Academy of Sciences. 1975. – Vol. 72 (10). – pp. 3812–3814.
9. Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии / Министерство цветной металлургии СССР. – М.: Унипромедь, 1989. – 127 с.
10. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 163 с.
11. Шашенко А. Н. Геомеханика / А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко, Е. А. Сдвижкова. – 2-е изд., испр. и доп. – Киев: Новий друк, 2016. – 528 с.
12. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: ГОСТ 21153.2-84 (Породы гірські. Методи визначення межі міцності при одноосовому стисканні). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 16 с.

## REFERENCES

1. Shashenko A. N. Some tasks of statistical geomechanics / A. N. Shashenko, S. B. Tulub, E. A. Sdvizhkova. – Kyiv: University Publishing House “Pulsary”, 2002. – 302 p.
2. Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., vol. 7, pp. 343–387.
3. Soils. Methods of laboratory determination of strength and deformation characteristics: DSTU B V.2.1-4-96. – Kyiv: State Committee of Ukraine for Urban Development and Architecture, 1997. – 96 p.
4. Kovrov O. S. Investigation of physical and mechanical properties of subsident soils at the Yevpatoriyskaya ravine located in the City of Dnepropetrovsk / O. S. Kovrov, O. V. Solodyankin, N. N. Ruban // Scientific Bulletin of the National Mining University. – 2015. – Vol. 1. – P. 15–20.
5. Sdvizhkova O. A. Statistical estimation of clay rocks strength properties / O. A. Sdvizhkova, O. S. Kovrov, T. V. Mnyshenko // Proceedings of scientific papers of NMU. – 2018. – No. 54. – P. 240–252.
6. Kendall M. Statistical conclusions and relationships / M. Kendall, A. Stuart. – Moscow: The main division of the physical and mathematical literature of the Nauka Publishing House, 1973. – 900 p.
7. Popov V. N. Controlling the stability of open pit slopes / V. N. Popov, P. S. Shpakov, Yu. L. Yunakov. – Moscow: Publishing house of the Moscow State Mining University, publishing house “Gornaya kniga”, 2008. – 683 p.
8. Rosenblueth E. Point estimates for probability moments. Proceedings of the National Academy of Sciences. 1975. – Vol. 72 (10). – pp. 3812–3814.
9. Temporary guidelines for managing the stability of the quarries sides in non-ferrous metallurgy / Ministry of Non-Ferrous Metallurgy of the USSR, Unipromed. – Moscow, 1989. – 127 p.
10. Guidelines for determining the inclination angles for quarry sides, slopes of benches and dumps of constructed and operated quarries. – Leningrad: VNIMI, 1972. – 163 p.
11. Shashenko A. N. Geomechanics / A. N. Shashenko, V. P. Pustovoitenko, E. A. Sdvizhkova. – 2nd ed., rev. – Kiev: Novy Druk, 2016. – 528 p.
12. Mine rocks. Methods for determining the tensile strength under uniaxial compression: GOST 21153.2-84 (Methods for determining the tensile strength under uniaxial compression). – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2001. – 16 p.



**Ковров Олександр Станіславович** – докт. техн. наук, доцент, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». E-mail: kovralex1@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-119X>.

**Терещук Роман Миколайович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівництва, геотехніки та геомеханіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». E-mail: tereshchuk.r.m@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2511>.

**O. Kovrov  
R. Tereschuk**

## ANALYSIS OF APPROACHES FOR DETERMINATION OF MINE ROCKS STRENGTH PROPERTIES TO FORECAST LANDSLIDE HAZARD

National Technical University «Dnipro Polytechnic»

*The paper is based on a comparative analysis of modern approaches using deterministic, statistical and graphic-analytical models and techniques for determining the strength properties of soft rocks to predict slope failure and landslide hazard. To assess the stability of natural and man-made slopes, the Mohr-Coulomb failure criterion is often used, the main values of which are the cohesion (C) and the angle of internal friction ( $\varphi$ ). The deterministic approach involves obtaining the values of these properties as a result of laboratory testing of soft rock specimens on shearing devices under the impact of normal and tangent loads. However, these calculated values depend on how to draw a direct line tangent to Mohr circles, which is a significant disadvantage. The probabilistic approach for determining the strength properties takes into account a certain range of C and  $\varphi$  values for soft rocks in changing geo-climatic conditions for adequate prognosis of slope stability and landslide danger.*

*The results of calculations of stability for hypothetical slopes with heights of 20 m and 30 m are obtained by means of determined parameters C and  $\varphi$  and with probabilistic values of these indicators.*

*A graphic-analytical approach for determining the strength characteristics of mine rocks is proposed. The technique for determining the strength properties of soil or mine rocks through the construction of a curve of boundary states at three points tangential to the boundaries of the Mohr circles corresponding to the limits of tensile strength, compression strength and shear strength is substantiated. The scientific novelty of the technique is to combine the results of laboratory tests of rocks specimens due to compression and shear, the analytical determination of the tensile strength through the formula and drawing the boundary state curve. The practical value of the proposed technique of the plotting a passport of the rock strength is the ability to more accurately calculate the physical and mechanical properties of rocks and predict the processes of their failure.*

*Key words: physical and mechanical properties of rocks, cohesion, angle of internal friction, slope safety factor, landslide hazard.*

**Oleksandr Kovrov** – Doctor of Tech. Sc., Associate Professor, Professor of Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, National Technical University «Dnipro Polytechnic». E-mail: kovralex1@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-119X>.

**Roman Tereschuk** – Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, National Technical University «Dnipro Polytechnic». E-mail: tereshchuk.r.m@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2511>.

**A. С. Ковров  
Р. Н. Терещук**

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕОПАСНОСТИ

Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»

*Статья базируется на сравнительном анализе современных подходов с использованием детерминированных, статистических и графоаналитических моделей и методик определения прочностных свойств мягких горных пород для прогноза оползнеопасности откосов. Для оценки устойчивости природных склонов и техногенных откосов чаще всего используется критерий разрушения Кулона-Мора, основными величинами которого являются сцепления (C) и угол внутреннего трения ( $\varphi$ ). Детерминистический подход предполагает получение значений этих характеристик в результате лабораторных испытаний образцов мягких пород на сдвиговых устройствах под влиянием касательных и нормальных нагрузок. Однако эти*

расчетные значения зависят от того, каким образом построить прямую касательную к кругам Мора, что является существенным недостатком. Вероятностный подход по определению прочностных свойств учитывает определенный диапазон значений  $C$  и  $\phi$  в изменчивых геоклиматических условиях для адекватного прогноза устойчивости и оползнеопасности откосов.

В статье представлены результаты расчетов устойчивости гипотетических откосов с высотами 20 м и 30 м полученные с помощью детерминированных параметров  $C$  и  $\phi$  и вероятностными диапазонами значений этих показателей.

Предложен графоаналитический подход определения прочностных характеристик горных пород. Обоснована методика определения прочностных свойств грунта или горных пород путем построения кривой предельных состояний по трем точкам касательной к предельным кругам Мора, соответствующим границам прочности на растяжение, сжатие и сдвиг. Научная новизна методики заключается в сочетании результатов лабораторных испытаний образцов пород на сжатие и сдвиг, аналитическом определении предела прочности на растяжение по формуле и построении кривой предельных состояний. Практическое значение предложенного способа построения паспорта прочности горных пород заключается в возможности более точно вычислять физико-механические свойства пород и прогнозировать процессы их разрушения.

Ключевые слова: физико-механические свойства пород, сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент запаса устойчивости откоса, оползнеопасность.

**Ковров Александр Станиславович** - докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры экологии и технологий защиты окружающей среды Национального технического университета «Днепропетровская политехника». E-mail: kovralex1@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-119X>.

**Терещук Роман Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительства, геотехники и геомеханики Национального технического университета «Днепропетровская политехника». E-mail: tereshchuk.r.m@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2511>.