

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.131.53

О. Л. ТЮТЬКІН<sup>1\*</sup>, О. І. ДУБІНЧИК<sup>2</sup>, В. Р. КІЛЬДЕЄВ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>2</sup> Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olga\_dubinchik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>3</sup> Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта vk.promore@gmail.com, ORCID 0000-0003-2803-8150

### КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ УКОСІВ І СХИЛІВ

**Мета.** У багатьох випадках при інженерних розрахунках і проектуванні необхідно оцінити стійкість території, що забудовується, особливо розташованої поблизу схилів або укосів. Виконати критичний огляд методик розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів і укосів. **Методика.** Розглянуті варіанти методів розрахунку стійкості укосів різними авторами. Існує багато методик з розрахунку стійкості укосів, всі вони зводяться до трьох базових класів методів: методи граничної рівноваги; метод скінченних елементів; комбіновані методи. Під час перевірки стійкості найпоширенішими є інженерні методи, засновані на силових схемах рівноваги ґрунтових масивів. Одним з найбільш важливих питань при розрахунку стійкості є правильний вибір поверхні, за якою можливе зміщення ґрунту. **Результати.** Вибір тих чи інших методів насамперед визначається типом зсувного процесу та механізмом можливого зміщення зсувних мас. Кожен оригінальний спосіб розрахунку характеризується своєю оригінальною системою, отриманою в даному способі з використанням того чи іншого припущення, необхідність якого пов'язана зі статичною невизначеністю завдання. **Наукова новизна.** Приведені формули по визначенню коефіцієнта стійкості укосу для практичного використання. Аналіз стійкості зсувного схилу із залученням розрахункових методів виконується як складовий елемент комплексної інженерно-геологічної оцінки та прогнозу стійкості зсувного схилу в природних умовах та з урахуванням наміченого його використання. **Практична значимість.** У проектній практиці застосовуються інженерні методи розрахунку стійкості схилу, що містять різноманітні спрощувальні припущення. Найбільш поширений з них – метод круглоциліндричних поверхонь ковзання, що відноситься до схеми плоскої задачі. Визначення коефіцієнта стійкості є необхідною умовою для висновку про можливість використання схилів для будівництва.

**Ключові слова:** схил; укіс; втрата стійкості; поверхня ковзання; методи розрахунку стійкості; коефіцієнт стійкості

#### Вступ

Укосами називаються штучні похилі поверхні, а схилами – природні. На таких похилих поверхнях під дією гравітаційних сил виникає небезпека порушення суцільності ґрунтових масивів з відділенням частини та зміщенням її вниз. Зсув – це переміщення мас гірських порід по схилу під впливом власної ваги і додаткового навантаження внаслідок підмиву схилу, перезволоження, сейсмічних поштовхів, динамічних впливів та інших процесів (рис. 1, 2). Найчастіше зсуви виникають на схилах, де йде чергування водоупорних і водоносичених порід. Зміщення великих мас викликається здебільшого змочуванням дощовою водою ґрунту так, що

маса ґрунту стає важкою і більш рухливою (Зоценко, Коваленко, Хілобок, & Яковлев, 2004).



Рис. 1. Зсув у Бразилії



Рис. 2. Зсув у м. Дніпро в 1997 році

Сили тертя, що забезпечують зчеплення ґрунтів або гірських порід на схилах, виявляються меншими за силу тяжіння, і вся маса гірської породи починає рухатися (Тютюкін, Дубінчик, & Кільдєєв, 2018).

За положенням поверхні зсуву і складом зсувного тіла зсуви поділяються на: **асеквентні**, що виникають у однорідних нешаруватих товщах порід, поверхня ковзання – криволінійна; **консеквентні** (ковзаючі), що відбуваються при неоднорідному складанні схилу, зміщення відбувається по поверхні розділу шарів або по тріщині; **інсеквентні**, що виникають також при неоднорідному складанні схилу, але поверхня ковзання перетинає шари різного складу, зсув вірізається в горизонтальні або похилі шари.

### Мета

Метою даної роботи є критичний огляд методик визначення коефіцієнта стійкості укосу і обґрунтування вибору схеми розрахунків.

### Методика

Розрахунок стійкості схилів є непростим завданням. Під час перевірки стійкості найпоширенішими є інженерні методи, засновані на силових схемах рівноваги ґрунтових масивів. Одним з найбільш важливих питань при розрахунку стійкості є правильний вибір поверхні, за якою можливе зміщення ґрунту. На основі спостережень за поверхнями ковзання було установлено, що вони переважно криволінійні. У однорідних зв'язних ґрунтах ці поверхні нагадують циліндричні чи чашоподібні поверхні, а

в незв'язних наближаються до площини. При неоднорідному ґрунтовому масиві найчастіше зміщення поверхні має складну лому форму (Abramson, Lee, Sharma, & Boyce, 2002; Зоценко, Коваленко, Хілобок, & Яковлев, 2004).

Існує велика кількість методів розрахунку зсувонебезпечних схилів. Якщо укіс насипу або виїмки складений з однорідного ґрунту, то розрахунок його стійкості проводиться за одним із наступних методів: круглоциліндричних поверхонь ковзання, метод Гольдштейна, метод Маслова. Якщо укіс складений із неоднорідних ґрунтів, то його стійкість визначається методом горизонтальних сил Маслова – Берера. Розрахунок коефіцієнта запасу стійкості для призм із круглоциліндричною поверхнею ковзання виконується за методами Феленіуса, дотичних сил, Янбу, Бішопа, Моргенштерна – Прайса, Шахунянца; для призм із поверхнею ковзання у вигляді ламаної лінії за методами дотичних сил, Янбу, Моргенштерна – Прайса, Шахунянца (Зоценко, Коваленко, Хілобок, & Яковлев, 2004; Bromhead, 2005).

Найбільш поширеним на практиці є метод **круглоциліндричних поверхонь ковзання**, запропонований В. Феленіусом (Fellenius, 1936) і К. Терцагі. Особливістю цього розрахунку є припущення, що стан граничної рівноваги спостерігається тільки в точках вздовж поверхні ковзання, а тіло зсуву є жорстким недеформованим тілом. Суть цього методу полягає у знайденні круглоциліндричної поверхні ковзання з центром в деякій точці  $O$ , яка проходить через підшву укосу, для якої коефіцієнт стійкості буде мінімальним. Для цього клин розбивається на вертикальні відсіки.

Метод круглоциліндричних поверхонь ковзання описує складний вид деформації ґрунтового масиву, що характеризується зрізом із обертанням. Порушення стійкості в даному випадку пов'язане зі зсувом, зрізом та переміщенням деякої частини ґрунту по поверхні ковзання. Оцінка стійкості ґрунтових масивів проти зсуву зводиться до визначення коефіцієнта стійкості (ДБН В.1.1-12:2006, 2007; ДБН В.1.1-24:2009, 2010). Коефіцієнт стійкості – це відношення величини граничних впливів на споруду або її основу до їх розрахункових, реально діючих величин. Він характеризує відношення моментів сил, що утримують частину масиву, до моментів зсувних сил (рис. 3):

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$k_{cm} = \frac{\sum M_{ymp}}{\sum M_{zc}}; \quad (1)$$

$$k_{cm} = \frac{\sum N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot L}{\sum T_i}, \quad (2)$$

де  $N_i$  – нормальна складова ваги  $i$ -того блоку поверхні ковзання, кН;  $T_i$  – дотична складова ваги  $i$ -того блоку поверхні ковзання, кН;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;  $c$  – питоме зчеплення ґрунту, кН/м<sup>2</sup>;  $L$  – довжина кривої ковзання, м.

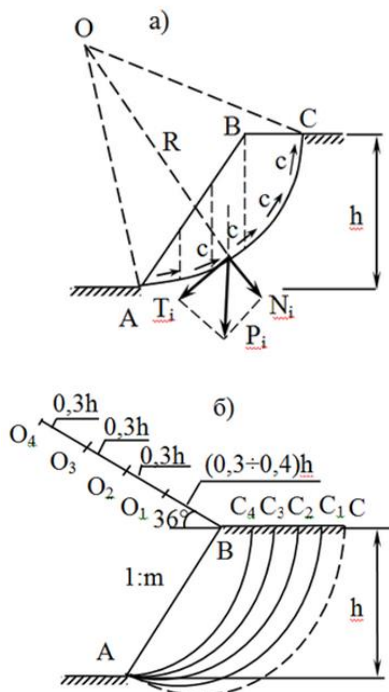


Рис. 3. Розрахункова схема:  
а) вибір центру обертання; б) варіювання центру

Центром обертання «О» відповідно величиною радіуса  $R$  задаються.

**Врахування гідростатичного тиску.** Поверхневі і ґрунтові води знижують міцнісні характеристики ґрунтів і сприяють зниженню стійкості схилів і укосів, викликаючи тим самим зсувні явища. Гідростатичне зважування по-різному проявляється для сипучих (зернистих) та глинистих ґрунтів. Для глинистих ґрунтів це явище складніше, ніж для пісків, через те, що пилувато-глинисті ґрунти можуть перебувати в різній консистенції і початковий градієнт напору перешкоджає проникненню гравітаційної води.

У підтопленому водою насипу тертя і зчеплення у водонасиченому ґрунті менше, ніж у сухого, тому стійкість частини ґрунту, розташованого нижче поверхні депресії, може значно знизитися. При розрахунках підтопленого насипу вважається, що ґрунт вище за горизонт вод знаходиться в сухому стані, нижче – у водонасиченому. Це явище відбивається на питомій вазі ґрунту. Враховуючи, що будь-який предмет у воді легший, можна припустити, що частинка ґрунту у воді також стає легшою, а отже, вага ґрунту зменшується.

При розрахунку стійкості укусу за методом круглоциліндричних поверхонь ковзань з урахуванням гідростатичного тиску ґрунтового масив, позначений кривою ковзання, розбивається на блоки та проводиться горизонтальна пряма, що відображає рівень затоплення ґрунту. У тих блоках, у яких пряма горизонту вод перетинає середню висоту блоку, середня лінія розбивається на два відрізки вище і нижче прямої горизонту вод. Визначаються два об'єму блоку; нижній блок множиться на питому вагу зваженого у воді ґрунту, а верхній – на питому вагу сухого ґрунту.

Знаходиться питома вага ґрунту, зваженого у воді:

$$\gamma_{зв} = \gamma - \gamma_w, \quad (3)$$

де  $\gamma$  – питома вага ґрунту, кН/м<sup>3</sup>;  $\gamma_w$  – питома вага води, кН/м<sup>3</sup>.

Обчислюється середньозважене значення питомої ваги ґрунту:

$$\gamma_{cp} = \frac{\gamma \cdot h_c + \gamma_{зв} \cdot h_3}{h_c + h_3}, \quad (4)$$

де  $h_c$  – висота сухої частини ґрунту, м;  $h_3$  – висота зони затоплення, м.

**Врахування фільтраційного тиску.** За наявності у схилі водонасичених шарів, якими відбувається рух ґрунтових вод, необхідно враховувати гідродинамічний (фільтраційний) тиск. Врахування фільтраційного тиску проводиться через фіктивний кут тертя. Відношення коефіцієнта фіктивного кута тертя до коефіцієнта кута внутрішнього тертя при вологості ґрунту  $W$  дорівнює відношенню питомої ваги ґрунту, зваженого у воді, до питомої ваги ґрунту. При затопленні частини насипу та подальшому спаді води виникають ситуації, коли в порах ґрун-

ту залишається певна кількість води, яка починає рух у бік укосу паралельно кривій депресії.

Криву депресії будують за трьома точками: перша – це перетин поверхні укосу з рівнем горизонту вод після спаду; друга точка – перетин осі земляного полотна з горизонтом максимального затоплення; третя – визначається розрахунком з урахуванням розмірів насипу та наявності гідравлічного градієнта напору, що залежить від виду ґрунту. Гідравлічний градієнт відповідає середньому нахилу лінії депресії.

Крива депресії, рівень горизонту вод та підошва укосу розбивають весь обсяг насипу на окремі зони, які враховують стан окремих частин насипу. Відповідно до них укіс земляного полотна розбивається на наступні зони: зону сухого ґрунту, що лежить вище кривої депресії; зону фільтрації, що лежить між кривою депресії та рівнем горизонту вод; зону затоплення, що лежить між рівнем горизонту вод та підошвою укосу; зону застою, що лежить нижче підошви укосу.

**Врахування сейсмічних сил.** Розрахунок укосів в районах з бальністю 7 і вище, виконується з урахуванням сейсмічності. Неприятливими умовами є насичені водою гравійні, піщані і лесовидні ґрунти; м'якопластичні і текучі глинисті ґрунти; обривисті береги, яри, розщелини; вивітрені породи; ділянки, близькі до тектонічних розломів.

Врахування сейсмічного впливу здійснюється додаванням до розрахункових зусиль сейсмічної сили. Вона визначається як доля від ваги ґрунту, який зазнає сейсмічний вплив:

$$Q_c = \mu Q, \quad (5)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної сейсмічності;  $Q_c$  – вага ґрунту, яка сприймає сейсмічний вплив.

Напрямок сили  $Q_c$  приймається паралельним основі відсіку в сторону дії зсуваючої сили. При суцільному водонасиченні зсувного масиву сейсмічні сили враховуються як від ваги ґрунту так і від ваги води.

При розрахунку стійкості укосів, у **спрощеному методі Бішопа** задовольняються умови рівноваги загальних моментів та вертикальних сил (рівновага зсувних сил не дотримується) (Bishop, 1955). Нормальні реакції основи у відсіках визначаються за умов виконання рівняння рівноваги у кожному відсіку у проекції на вер-

тикальну вісь. Усі зовнішні сили, що діють на  $i$ -й відсік, приводяться до рівнодіючої. Вона розкладається на горизонтальну та вертикальну складові.

Для визначення коефіцієнта запасу використовується формула:

$$k_{CT} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[ c_i l_i + Q_i \operatorname{tg} \varphi_i \left( \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i}{k_{CT}} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \sin \alpha_i}, \quad (6)$$

де  $c$  – питоме зчеплення ґрунту;  $l$  – довжина площини ковзання відсіку;  $Q$  – вага відсіку;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;  $\alpha$  – кут площини ковзання відсіку.

В зв'язку з тим, що коефіцієнт стійкості входить в обидві частини рівняння, для його рішення задаються початковим коефіцієнтом стійкості. Розрахунки виконуються до тих пір, поки коефіцієнт стійкості не стане меншим за даної допустимої похибки.

**Метод Янбу** був розроблений в 1954 року норвезьким професором геотехніки Нілмаром Оскардом Чарльзом Янбу (Janbu, 1954). Він дуже схожий зі способом Бішопа. Відмінністю є те, що в даному методі здійснюється задоволення рівноваги сил, що зсувають, при цьому не дотримується задоволення рівноваги моментів.

Рівняння для обчислення коефіцієнта стійкості за спрощеним методом Янбу має вигляд:

$$k_{CT} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(c_i b_i + N_i \operatorname{tg} \varphi_i) \sec \alpha_i]}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \operatorname{tg} \alpha_i + \sum_{i=1}^{i=n} \Delta E_i}, \quad (7)$$

де  $N$  – сила реакції опору відсіку;  $b$  – довжина основи відсіку;  $\alpha$  – кут нахилу основи відсіку;  $\Delta E$  – різниця горизонтальних утримуючих і зсуваючих сил.

**Метод дотичних сил** доцільно використовувати при визначенні коефіцієнта стійкості масиву ґрунту, що сповзає по фіксованій плоскій поверхні ковзання. Метод передбачає взаємодії між відсіками і забезпечує виконання сумарного рівняння рівноваги у проекції на напрям ковзання, а також рівняння рівноваги у кожному відсіку в проекції на нормаль.

Коефіцієнт стійкості визначається за формулою:

$$k_{CT} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Q_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \sin \alpha_i} \quad (8)$$

**Метод Моргенштерна – Прайса** вимагає виконання для кожного відсіку:

- рівняння рівноваги в проекціях на нормальний і дотичний до основи напрямках;
- рівняння моментів щодо точки центру основи відсіку.

Таким чином, для кожного відсіку та для всієї призми зсуву забезпечується виконання всіх рівнянь статички. Метод передбачає наявність як горизонтальних, так і вертикальних складових сил взаємодії між відсіками.

**Метод Вольдта** розроблений німецьким вченим Юргеном Вольдтом. В ньому приймається статична рівновага сил і моментів всього тіла зрушення. Розглядається укiс, в якому, в кожній точці поверхні ковзання виконується умова граничної рівноваги Кулона:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_T + c_T, \quad (9)$$

де  $\tau$ ,  $\sigma$  – відповідно дотичні і нормальні напруження в кожній точці поверхні ковзання, які характеризують стан граничної рівноваги сповзаючого блоку;  $\varphi_T$ ,  $c_T$  – відповідно кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення ґрунту вздовж поверхні ковзання, які відповідають границі рівноваги ґрунтової товщі.

Коефіцієнт стійкості укусу  $k_{CT}$  визначається відношенням фактичних значень міцностних характеристик ґрунту вздовж поверхні ковзання  $\operatorname{tg} \varphi_\phi$ ,  $c_\phi$ , які визначаються лабораторним шляхом, до теоретичних значень  $\operatorname{tg} \varphi_T$ ,  $c_T$ :

$$k_{CT} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_\phi}{\operatorname{tg} \varphi_T} = \frac{c_\phi}{c_T} \quad (10)$$

Відмінною рисою методу Вольдта є те, що він дозволяє визначити коефіцієнт запасу стійкості укусу лише в зоні поверхні ковзання.

**Метод Г. М. Шахунянца** дозволяє визначити коефіцієнт стійкості схилу як при круглоциліндричній, так і за будь-якої іншої форми поверхні ковзання (Тютюкін, Дубінчик, Кільдєєв, & Новік, 2022):

$$k_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (f_i N_i + c_i l_i + T_{i-ym}) \frac{\cos \phi_i}{\cos(\beta_i - \phi_i)}}{\sum_{i=1}^{i=n} T_{i-zc} \frac{\cos \phi_i}{\cos(\beta_i - \phi_i)}}, \quad (11)$$

де  $n$  – кількість відсіків, на які розбивається блок можливого зміщення;  $f_i$ ,  $N_i$  – реактивна сила тертя по поверхні зміщення в  $i$ -тому відсіку, кН/м;  $f_i$  – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту по поверхні зміщення  $i$ -го відсіку,  $f = \operatorname{tg} \varphi$ ;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;  $N_i$  – нормальна складова сили ваги  $Q$   $i$ -того відсіку, кН/м;  $c_i$ ,  $l_i$  – реактивна сила зчеплення по поверхні зміщення в  $i$ -му відсіку кН/м;  $c$  – питоме зчеплення ґрунту в основі  $i$ -го відсіку, кПа;  $l$  – довжина поверхні зміщення в межах відсіку, м;  $T_{i-ym}$  – утримуюча тангенціальна складова сили ваги  $Q$   $i$ -того відсіку, кН/м;  $T_{i-zc}$  – зсуваюча тангенціальна складова сили ваги  $Q$   $i$ -того відсіку, кН/м;  $\beta_i$  – кут нахилу до горизонту поверхні зміщення  $i$ -го відсіку, град.

Метод Шахунянца має широке використання при розрахунках призм довільної конфігурації. В цьому методі для кожного відсіку враховується вплив на нього сусідніх відсіків, що дозволяє більш точно дотриматись законів будівельної механіки. В загальному випадку передбачається, що сили на контакті відсіків направлені під кутом до горизонту. В спрощеному вигляді ці сили приймаються горизонтальними.

Всі сили, що діють на відсік, зводяться до рівнодіючої, яка розкладається на нормальну і дотичну. Враховується характер впливу дотичної складової на процес зрушення, і вона може виступати як зсуваюча або утримуюча сила.

**Метод плоских поверхонь ковзання** (метод Маслова – Берера) застосовується у тих випадках, коли схил або укiс складений з неоднорідного ґрунту. При цьому зсув ґрунту відбувається по ломаній поверхні ковзання.

В умовах плоскої задачі поверхні ковзання замінюються прямими лініями. Опір ґрунту зсуву виражається через кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , зчеплення  $c$  або кут опору зсуву  $\Psi_p$  і коефіцієнт опору зсуву  $f_p$ :

$$f_p = \operatorname{tg} \Psi_p = \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{P_o}; \quad (12)$$

$$\psi_p = \arctg f_p, \quad (13)$$

де  $P_o$  – середній питомий тиск,  $\text{кН/м}^2$ .

$$P_o = \frac{P_i}{l_i}, \quad (14)$$

де  $P_i$  – вага блоку,  $\text{кН}$ ;  $l_i$  – довжина площини ковзання в границях блоку,  $\text{м}$ .

Коефіцієнт  $f_p$  і кут опору зсуву  $\Psi_p$  залежать від прикладеного навантаження (рис. 4).

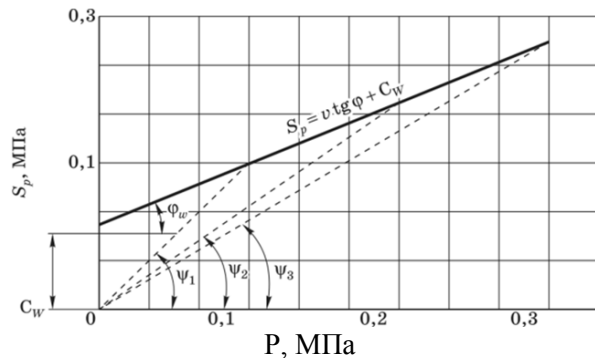


Рис. 4. Залежність опору зсуву ґрунту через кут опору зсуву  $\Psi_p$

Визначення ступеня стійкості укусу за методом горизонтальних сил здійснюється за наступними формулами (рис. 5):

$$k_{zan} = \frac{\sum T_i}{\sum H_i} = \frac{\sum (H_i - E_i)}{\sum H_i}, \quad (15)$$

$$H = P \cdot \tg \alpha, \quad (16)$$

$$E = P \cdot \tg(\alpha - \psi_p), \quad (17)$$

$$T = H - E, \quad (18)$$

де  $P$  – реакція маси ґрунту;  $N$  – нормальна до поверхні ковзання складова реакції маси  $P$ ;  $H$  – проекція на горизонтальну вісь сили  $N$ , що є тиском на вертикальну стінку ґрунту за відсутності в ньому тертя та зчеплення;  $Q$  – результуюча двох сил: маси ґрунту та горизонтальної складової тиску на вертикальні стінки;  $T$  – частина тиску на вертикальну стінку, що сприймається тертям і зчепленням;  $E$  – сила, що становить різницю між силами  $H$  і  $T$ ;  $\alpha$  – кут укусу.

Наявність у схилі фільтраційного тиску надає додатковий вплив на маси ґрунту, що сповзають. Величина цього тиску у кожному блоці визначається за формулою:

$$P_\phi = \gamma_w \cdot V \cdot J, \quad (19)$$

де  $\gamma_w$  – питома вага води,  $\text{кН/м}^3$ ;  $J$  – гідравлічний градієнт напору;  $V$  – об'єм блоку,  $\text{м}^3$ .

Напрямок лінії дії фільтраційної сили в межах кожного блоку приймають паралельним кривій депресії.

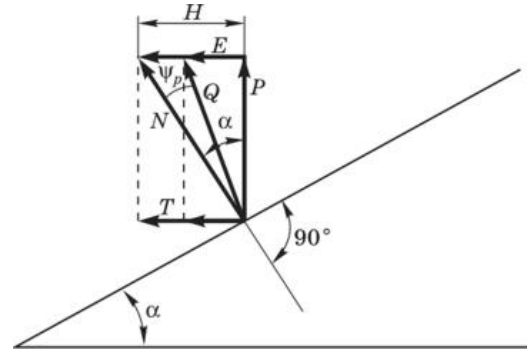


Рис. 5. Розрахункова схема

Коефіцієнт запасу стійкості зсувного тіла при врахуванні фільтраційного тиску визначається за формулою

$$k_{zan} = \frac{\sum P_i [\tg \alpha_i - \tg(\alpha_i - \psi_p)]}{\sum (P_i \cdot \tg \alpha_i + P_\phi \cdot \cos \beta)}, \quad (20)$$

де  $\beta$  – кут, що утворюється кривою депресії з горизонтальною площиною в межах кожного блоку, град.

**Метод скінченних елементів (МСЕ)** є одним з основних чисельних методів рішення задач механіки суцільного середовища (Albataineh, 2006; Petrenko, Tiutkin, Ihnatenko, & Kovalchuk, 2018; Dubinchyk, Petrenko, Ihnatenko, & Kildieiev, 2019).

Одна з особливостей МСЕ полягає в тому, що він базується скоріше на інтегральному формулюванні аналізованого явища, ніж на диференціальній формі, яку представляють рівняння у приватних похідних та граничні умови. Це інтегральне формулювання може бути варіаційного або проєкційного типу.

Основна концепція методу скінченних елементів полягає в тому, що шукану безперервну величину апроксимують шматковим набором найпростіших функцій, заданих обмеженими скінченними підобластями (елементами). За допомогою такої процедури інтегрування диференціальних рівнянь аналітичної постановки задачі зводиться до розв'язання системи ліній-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

них рівнянь. Кількісні значення невідомої величини перебувають у обмеженому числі точок (вузлів) області, а межах елементів значення невідомої функції та її похідних визначаються вже апроксимуючими функціями та його похідними.

Найбільш важливими перевагами МСЕ, завдяки яким він так широко використовується, є:

- властивості матеріалів суміжних елементів можуть бути різними, що дозволяє застосовувати метод для моделювання напружено-деформованого стану неоднорідних середовищ;
- методом можна користуватися для областей із будь-якою формою зовнішніх та внутрішніх границь;
- розміри елементів можуть бути змінними, що дає змогу укрупнити або подрібнити мережу розбиття області на елементи;
- МСЕ дозволяє розгляд граничних умов з розривним поверхневим навантаженням, а також змішаних граничних умов.

Велике практичне застосування МСЕ отримав під час вирішення геотехнічних завдань, що стосуються розрахунку стійкості укосів і схилів, оскільки дозволяє врахувати складну геометрію укосів та його неоднорідність. На відміну від методів, заснованих на аналізі граничної рівноваги, в МСЕ знаходження нормальних та дотичних напружень по поверхні ковзання здійснюється з урахуванням деформаційних властивостей ґрунтів (модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона).

Аналіз напруженого стану методом скінченних елементів задовольняє умовам статичної рівноваги та дозволяє оцінити зміни напруження, викликані варіюванням деформаційних властивостей, неоднорідності та геометричних форм.

Поле напруження у схилі визначається рішенням двовимірної задачі плоскої деформації з використанням скінченних елементів трикутної форми. У методі скінченних елементів матриця жорсткості елементів, яка пов'язує сили та переміщення у вузлах, визначається виходячи з мінімізації повної потенційної енергії. Ці матриці жорсткості потім накладаються, утворюючи загальну матрицю жорсткості системи. Здавши на границях вузлів сили та переміщення, система спільних рівнянь, що базуються на загальній матриці жорсткості, може бути вирішена щодо переміщень кожного вузла. Після того,

як встановлені переміщення, для кожного елемента можна визначити напруження.

Визначення стійкості схилу виконується методом редукції (ступінчастого зменшення) параметрів міцності матеріалів моделі, доводячи модель до штучного руйнування. Коефіцієнт запасу несучої здатності укосів і схилів визначається як відношення вихідних параметрів міцності порід, що складають укис або схил до їх мінімальних значень, при яких рішення крайової задачі ще можливе.

В основі розрахункових методів оцінки стійкості зсувних та зсувнебезпечних схилів лежать дві граничні схеми. Ідея першої граничної схеми, фактичних і зменшених характеристик міцності, полягає в знаходженні таких критичних значень характеристик міцності ґрунту, щоб розрахунковий схил перейшов у стан граничної рівноваги. Відповідно коефіцієнт стійкості при такому підході визначається як відношення фактичних характеристик міцності до їх критичних значень.

Ідея другої граничної схеми, утримуючих та зсувних зусиль, полягає у вивченні співвідношення зсувних та утримуючих зусиль, що діють на схил. Коефіцієнт стійкості в цьому випадку може бути визначений як відношення утримуючих моментів до зсувних.

Визначення коефіцієнта стійкості в першому та в другому випадку різні. З точки зору механіки ґрунтів використання першої граничної схеми більш обґрунтовано. Однак на практиці обидва визначення коефіцієнта стійкості дають близькі результати.

### Наукова новизна та практична значимість

Аналіз стійкості зсувного схилу із залученням розрахункових методів виконується як складовий елемент комплексної інженерно-геологічної оцінки та прогнозу стійкості зсувного схилу в природних умовах та з урахуванням наміченого його використання.

Оцінка стійкості укосів і схилів полягає у вирішенні плоскої задачі: розглядаються умови рівноваги масиву гірських порід шириною 1 м, умовно «вирізаного» з масиву схилу у напрямку очікуваного зсувного зсуву.

Розрахунки стійкості у тривимірній постановці виконуються у складних інженерно-геологічних умовах за високого ступеня їх вивченості, достовірного визначення положення

поверхні ковзання для інженерних найбільш відповідальних об'єктів.

Методи оцінки стійкості укосів та схилів, засновані на теорії граничної рівноваги, розглядають лише напружений стан ґрунтового масиву в граничній рівновазі. Деформації ґрунтів схилю при цьому не враховуються.

Кількісним показником ступеня стійкості укосів та схилів у методах граничної рівноваги є коефіцієнт стійкості (коефіцієнт запасу стійкості), що дорівнює співвідношенню сум усіх утримуючих та зсувних сил (моментів).

### Висновки

Розглянуто та проаналізовано методи оцінки стійкості ґрунтових схилів та укосів.

У багатьох випадках при інженерних розрахунках і проектуванні необхідно оцінити стійкість території, що забудовується, особливо розташованої поблизу схилів або укосів. Для кількісної оцінки стійкості використовують поняття коефіцієнта стійкості  $k_{cm}$ . При  $k_{cm} = 1$  об'єкт перебуває у стані граничної рівноваги, при  $k_{cm} > 1$  має деякий запас стійкості. При значенні  $k_{cm} < 1$  міцність та стійкість об'єкта не забезпечена.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Albatineh, N. (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. Ohio, United States: The University of Akron.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7-17.

Bromhead, E. N. (2005). *The stability of slopes*. London and New York: Taylor & Francis.

Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D., & Kildieiev V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-8.

Fellenius, W. (1936). Calculation of the Stability of Earth Dams. *2nd Int. Congress on Large Dams, Int. Commission on Large Dams, Washington, DC*, 445-459.

Janbu, N. (1954). Application of composite slip surface for stability analysis. *Proc. Euro. conf. on stability of Earth slopes, Stockholm, Sweden*, 43-49.

Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Y., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 14, 101-109.

ДБН В.1.1-12:2006 (2007). *Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України*. Київ: Мінбуд України.

ДБН В.1.1-24:2009 (2010). *Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування*. Київ: Мінрегіонбуд.

Зоценко, М. Л., Коваленко, В. І., Хілобок, В. Г., & Яковлев, А. В. (2004). *Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи та фундаменти*. Київ: Вища школа.

Тют'їн, О. Л., Дубінчик, О. І., & Кільдєєв, В. Р. (2018). Аналіз результатів стійкості природних схилів, складених неоднорідними та шаруватими ґрунтами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 81-92.

Тют'їн, О. Л., Дубінчик, О. І., Кільдєєв, В. Р., & Новік, Р. Б. (2022). Аналіз методів розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 22, 85-92.

O. L. TIUTKIN<sup>1\*</sup>, O. I. DUBINCHYK<sup>2</sup>, V. R. KILDIEIEV<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>2</sup> Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail olga\_dubinchik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>3</sup> Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail vk.promore@gmail.com, ORCID 0000-0003-2803-8150

## CRITICAL REVIEW OF THE METHODS OF CALCULATING THE STABILITY OF SLOPES



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Purpose.** In many cases, during engineering calculations and design, it is necessary to assess the stability of the built-up area, especially located near slopes. To carry out a critical review of methods for calculating the stability of landslide-prone slopes. **Methodology.** Variants of methods for calculating the stability of slopes by different authors have been considered. There are many methods for calculating the stability of slopes, all of them are reduced to three basic classes of methods: limit equilibrium methods; finite element method; combined methods. During stability testing, the most common engineering methods are based on force diagrams of the balance of soil masses. One of the most important issues in the calculation of stability is the correct choice of the surface on which the displacement of the soil is possible. **Findings.** The choice of certain methods is primarily determined by the type of shearing process and the mechanism of possible displacement of shearing masses. Each original method of calculation is characterized by its original system, obtained in this method using one or another assumption, the necessity of which is related to the static uncertainty of the task. **Originality.** Formulas for determining the factor of slope resistance are given for practical use. The analysis of the stability of the landslide slope with the involvement of calculation methods is performed as a component of a comprehensive engineering and geological assessment and forecast of the stability of the landslide slope in natural conditions and considering its intended use. **Practical value.** In project practice, engineering methods for calculating slope stability are used, which contain various simplifying assumptions. The most common of them is the method of round-cylindrical sliding surfaces, which belongs to the planar problem scheme. Determination of the stability factor is a necessary condition for concluding that the slopes can be used for construction.

*Keywords:* slope; buckling; sliding surface; stability calculation methods; stability factor

## REFERENCES

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons. (in English)
- Albataineh, N. (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. Ohio, United States: The University of Akron. (in English)
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7-17. (in English)
- Bromhead, E. N. (2005). *The stability of slopes*. London and New York: Taylor & Francis. (in English)
- Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D., & Kildieiev V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*, 109. 1-8. (in English)
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the Stability of Earth Dams. *2nd Int. Congress on Large Dams, Int. Commission on Large Dams, Washington, DC*, 445-459. (in English)
- Janbu, N. (1954). Application of composite slip surface for stability analysis. *Proc. Euro. conf. on stability of Earth slopes, Stockholm, Sweden*, 43-49. (in English)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Y., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 14, 101-109. (in English)
- DBN V.1.1-12:2006 (2007). *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy*. Kyiv: Minbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.1.1-24:2009 (2010). *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv. Osnovni polozhennia proektuvannya*. Kyiv: Minrehionbud. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Kovalenko, V. I., Khilobok, V. H., & Yakovliev, A. V. (2004). *Inzhenerna heolohiia: Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenty*. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Dubinchyk, O. I., & Kildieiev, V. R. (2018). Analiz rezultativ stiikosti pryrodnykh skhyliv, sklade-nykh neodnoridnymy ta sharuvatymy gruntamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 81-92. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Dubinchyk, O. I., Kildieiev, V. R., & Novik, R. B. (2022). Analiz metodiv rozrakhunku stiikosti zsu-vonebezpechnykh skhyliv. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 22, 85-92. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 01.04.2023.

Прийнята до друку 20.05.2023.