

**Каськів С.В.**

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ УКОСІВ**

**Анотація.** У статті розглянуто різні методи розрахунку стійкості укосів з врахуванням можливого їх обводнення.

**Ключові слова:** автомобільна дорога; насип; укіс; стійкість.

**Аннотация.** В статье рассмотрены различные методы расчета устойчивости откосов с учетом возможного их обводнения.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; насыпь; откос; устойчивость.

**Abstract.** The article examines different methods of calculating stability of slopes with regard to their irrigation potential.

**Key words:** road; embankment; slope; stability.

Оцінка стійкості укосів може бути виконана за двома основними моделями граничної або локальної рівноваги [1–10]. Моделі протилежні за своїми фізичними передумовами. На їх базі одержали розвиток інженерні методи розрахунку на принципах криволінійних і ломаних поверхонь ковзання, які застосовуються зараз в проектуванні. Існує третій напрямок, що базується на знаходженні напружено-деформованого стану (НДС) споруд з застосуванням тієї чи іншої математичної моделі ґрунту з можливим врахуванням всіх діючих сил, змінності розрахункових характеристик ґрунтів, а також знаходження форми і розміщення можливих поверхонь ковзання на основі варіаційних принципів [11].

У моделі граничної рівноваги приймається, що у всіх точках ґрунтового середовища має місце граничний стан.

Друга модель базується на гіпотезі локальної граничної рівноваги. Процес порушення стійкості реальних ґрунтових споруд досить таки складний, але часто, як показують спостереження формування області сповзаючого масиву, коли втрачається стійкість укосу, супроводжується зсувом по поверхні ковзання. Причому сповзаючий і стійкий масиви залишаються в дограничному стані, руйнуючись лише в процесі зсуву. Це дає підставу для застосування в

розрахунках стійкості теорії, яка базується на використанні моделі затверділого відсіку руйнування. В основі даної теорії лежать рівняння рівноваги теоретичної механіки і спосіб переведення дійсної схеми споруди, що розраховується, в граничний стан. При цьому під граничним слід розуміти такий напружений стан поверхні зсуву, коли в усіх її точках витримується умова міцності Кулона-Мора:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c. \quad (1)$$

Вся область руйнування або її окремі відсіки приймаються жорстким тілом, не здатним до деформування. Розглянемо основні методи розрахунку стійкості укоосу з огляду їх застосування для обводнених укосів глибоких виїмок.

**Метод горизонтальних сил Маслова-Берера.** Метод застосовується у випадках, коли укіс складний різномірними ґрунтами і обвал відбувається по відомій довільній поверхні ковзання. Передбачається, що ця поверхня ковзання (її положення й обрис) вже встановлена хоча би на частині її простягання за наслідками інженерно-геологічних досліджень. Масив ґрунту розділяють на окремі відсіки з таких міркувань, щоб кожен розрахунковий відсік полягав, по можливості, з однорідного ґрунту. Кожну лінію ковзання в окремому відсіку приймають за пряму лінію (рис. 1).

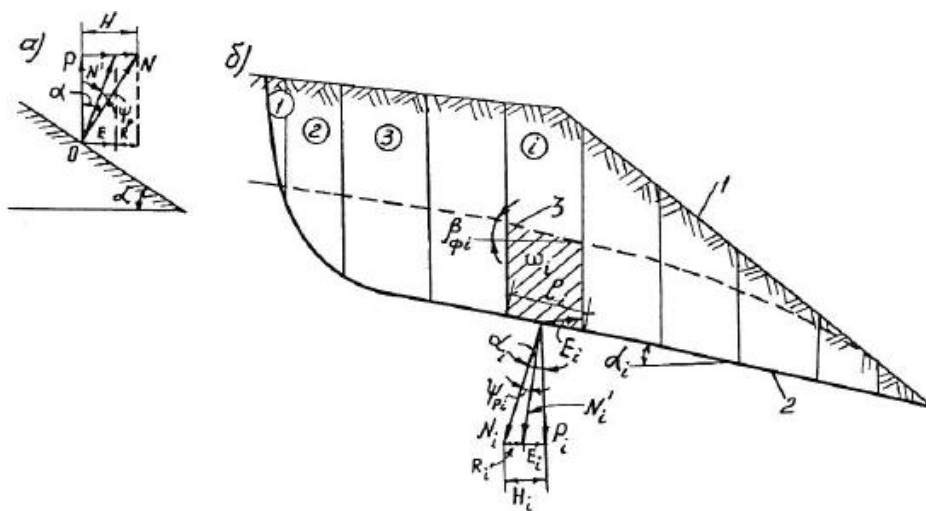


Рис. 1. Метод горизонтальних сил (Маслова-Берера): а – основний принцип; б – для розрахунку стійкості схилу і величини зсуваючого тиску; 1 – поверхня схилу (укоосу); 2 – поверхня ковзання; 3 – поверхня депресії;  $\omega_i$  – площа водонасиченої частини відсіку;  $N, N_i$  – нормаль до поверхні ковзання складова реакції ваги  $P, P_i$ ;  $N', N_i'$  – те ж, але за наявності в ґрунті тертя і зчеплення;  $H, H_i$  – розпір (проекція на горизонтальну вісь сили  $N, N_i$ );  $R, R_i$  – частина розпору, що сприймається тертям і зчепленням;  $E, E_i$  – непогашена частина розпору  $H, H_i$ .

Остаточна формула для розрахунку коефіцієнта стійкості методом горизонтальних сил, з урахуванням фільтраційного тиску, має:

$$k_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i [tg \alpha_i - tg(\alpha_i - \psi_{pi})]}{\sum_{i=1}^n (P_i tg \alpha_i + j_i \cos \beta_{\phi i} + Q_{ci})} \quad (2)$$

Цей метод, на нашу думку, не придатний для розрахунку стійкості укосів насипів автомобільних доріг, але його можна застосовувати при розрахунку обводнених укосів глибоких виїмок, при виконанні попередніх інженерно-геологічних вишукувань.

**Метод круглоциліндричної поверхні ковзання.** Це досить поширений метод і застосовується для визначення коефіцієнта стійкості схилу, складеного однорідними ґрунтами (за відсутності фіксованої поверхні ковзання). Коефіцієнт стійкості схилу визначають за формулою (рис. 2):

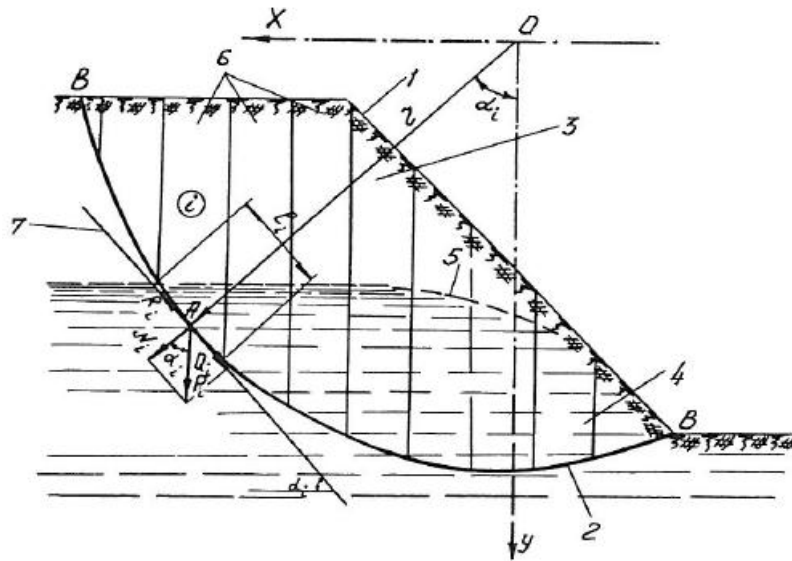


Рис. 2. Метод круглоциліндричної поверхні ковзання: 1 – поверхня схилу (укосу); 2 – поверхня ковзання; 3 – суха частина зсувного блоку; 4 – водонасичена частина зсувного блоку; 5 – крива депресії; 6 – відсіки, на які умовно розбивається укіс; 7 – дотична поверхні ковзання в розрахунковому відсіку;  $N_i = P_i \cos \alpha_i$  – нормальна складова ваги відсіку;  $R_i = P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i$  – утримуюча сила;  $Q_i = P_i \sin \alpha_i$  – зсуваюча сила (дотична складова ваги відсіку)

Остаточні формули для визначення коефіцієнта стійкості методом круглоциліндричної поверхні ковзання, при простому затопленні укосу:

$$k_{cm} = \frac{\sum M_{ymp}}{\sum M_{зсув}} \quad \text{або} \quad k_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ei} \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_{ei} + c_{ei} l_i)}{\sum_{i=1}^n (P_{ei} \sin \alpha_i + Q_{ci})}. \quad (3)$$

де  $M_{ymp}$  – сума моментів сил, що утримують масив ґрунту;

$M_{зсув}$  – сума моментів зсуваючих сил;

$P_{ei}$  – вага відсіку з врахуванням зважуючих сил води;

$\alpha_i$  – кут нахилу підосви відсіку до горизонту;

$c_{ei}, \varphi_{ei}$  – міцнісні характеристики водонасиченого ґрунту на рівні поверхні ковзання, відповідно питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя;

$l_i$  – довжина підосви відсіку (довжина хорди, що сполучає межі підосви відсіку);

$Q_{ci}$  – сейсмічна сила, що діє на відсік (в разі її наявності).

**Метод Шахунянца.** Аналітичний метод Г. М. Шахунянца найзручніше застосовувати, коли конфігурація поверхні ковзання на всьому протязі вже встановлена. Використовується він і в тих випадках, коли методом підбору необхідно встановити найбільш небезпечну поверхню ковзання (екстремаль).

Обвальний блок для розрахунків членується на ряд відсіків, які приймають такими, щоб без практичної втрати точності можна було в їх межах приймати поверхню за площину і щоб стан ґрунту, контур схилу, дія зовнішніх сил і т.п. були практично однорідними.

Коефіцієнт стійкості, при звичайному водонасиченні схилу:

$$k_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ei} \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_{ei} + c_{ei} l_i) \frac{\cos \varphi_{ei}}{\cos(\alpha_i - \varphi_{ei})}}{\sum_{i=1}^n (P_{ei} \sin \alpha_i + Q_{ci}) \frac{\cos \varphi_{ei}}{\cos(\alpha_i - \varphi_{ei})}}. \quad (4)$$

**Метод Вольта.** У цьому методі, розробленому німецьким вченим Юргеном Вольдтом, приймається статична рівновага (сил і моментів) всього тіла обвалення.

Розглядається укіс, в якому по потенційній поверхні ковзання в кожній точці виконується умова граничної рівноваги Кулона (1).

Коефіцієнт стійкості укосу визначають відношенням фактичних значень міцнісних характеристик ґрунту вздовж даної поверхні ковзання  $tg\varphi_\phi$ ,  $C_\phi$ , які визначають, наприклад, лабораторними випробуваннями зразків непорушеної структури (або по підготовленій поверхні – «плашка по плашці» – залежно від стану схилу), до теоретичних значень  $tg\varphi_T$ ,  $C_T$ . Такий підхід до оцінки ступеня стійкості укосу (схилу) отримав назву «Правило Фелленіуса»:

$$k_{cm} = \frac{tg\varphi_\phi}{tg\varphi_T} = \frac{c_\phi}{c_T}. \quad (5)$$

Метод Вольдта, як ітераційний, може бути реалізований тільки із застосуванням комп'ютера. Тут слід зазначити, що метод Вольдта дозволяє визначити лише коефіцієнт запасу стійкості укосу, причому як функції міцнісних характеристик ґрунту в зоні поверхні ковзання, що відрізняє підхід до поняття коефіцієнта стійкості в інших методах, де це є найчастішим відношення утримуючих сил уздовж поверхні ковзання до зсуваючих (або відповідних моментів).

**Метод Янбу.** Цей метод розрахунку коефіцієнта стійкості схилу, запропонований Янбу у 1954 році (дещо удосконалений у 1973 р.), також заснований на прагненні досягнення поняття рівноваги сил і моментів і, за задумом автора, повинен був застосовуватись для поверхонь ковзання будь-якої форми (рис. 3).

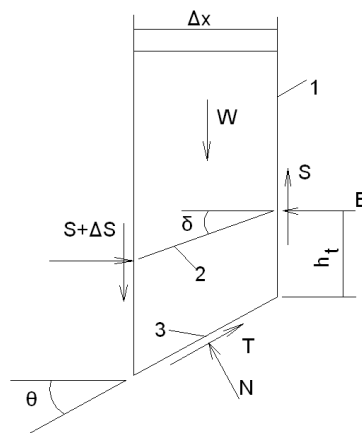


Рис. 3. Сили, прикладені до відсіку за методом Янбу: 1 – контур елементарного відсіку; 2 – лінія тиску; 3 – серединна точка основи відсіку

Використовуюючи позначення, що наведені на рис. 3 остаточна формула для визначення коефіцієнта стійкості буде:

$$k_{cm} = \frac{\sum \{c\Delta x \sec \theta + [(W + \Delta S) \sec \theta - T \operatorname{tg} \theta] \operatorname{tg} \varphi\} \sec \theta}{\sum (W + \Delta S) \operatorname{tg} \theta}. \quad (6)$$

**Метод Моргенштерна і Прайса.** У методі, розробленому Моргенштерном і Прайсом у 1965 р, умови рівноваги розглядаються для кожного елемента не тільки щодо напрямів нормалі і дотичної, але й також і моментів. На рис. 4 показаний довільний відсік призми обвалення.

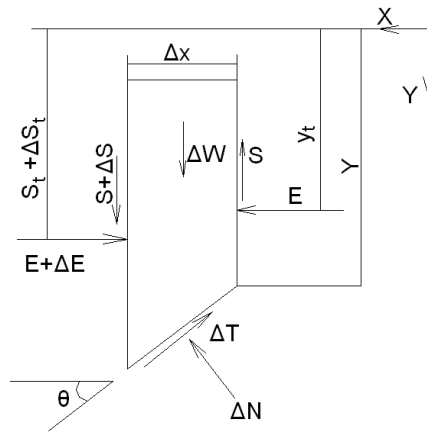


Рис. 4. Схема сил у відсіку за методом Моргенштерна і Прайса

Рівновага забезпечується, прирівнюючи нулю моменти щодо підосви і суму проекцій сил на напрям нормалі і дотичну до підосви відсіку. Звідси витікають наступні залежності:

$$S = y \frac{dF}{dx} - \frac{d}{dx} (Ey_t);$$

$$\Delta N = (\Delta W + \Delta S) \cos \theta + \Delta E \sin \theta; \quad (7)$$

$$\Delta T = (\Delta W + \Delta S) \sin \theta - \Delta E \cos \theta.$$

Критерій руйнування Мора-Кулона має вигляд:

$$\Delta T = \frac{c\Delta x \sec \theta + \Delta N \operatorname{tg} \varphi}{k_{cm}}. \quad (8)$$

**Метод рівномірного укусу.** Цей метод базується на двох наступних основних даних:

1) кут стійкого (природного) укусу для будь-якої гірської породи є кут опору її зсуву ( $\psi_p$ );

2) критичне напруження у товщі визначається рівністю двох головних напружень (коефіцієнт бічного тиску  $\xi=1$ ), що дорівнює вазі стовпа ґрунту з висотою, що у свою чергу дорівнює глибині занурення даної точки від горизонтальної поверхні ґрунту.

Метод Ер базується на висновку автора, що кутом природного укусу для зв'язного ґрунту є кут опору зсуву  $\psi_p$ . Для сипучих ґрунтів, кут природного укусу дорівнює куту тертя  $\phi$ . Тому укіс для ґрунтів, без зчеплення, буде одним по всій висоті і в граничному стані рівноваги визначатиметься кутом  $\alpha = \phi$ . При  $\alpha > \phi$  укіс нестійкий. При  $\alpha < \phi$  укіс має деякий запас стійкості, що визначають величиною коефіцієнта запасу  $n$ :

$$n = \operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

Для глинистих ґрунтів, що володіють зчепленням, зберігається повна аналогія: у граничному стані рівноваги  $\alpha = \psi_p$ ; при  $\alpha > \psi_p$  укіс нестійкий; при  $\alpha < \psi_p$  укіс має деякий запас стійкості, що визначають коефіцієнтом запасу  $n$ :

$$n = \operatorname{tg} \psi_p / \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

**Варіаційний метод** знаходження екстремалі розглянутий у статті автора [12].

У дорожній галузі найбільшого поширення знайшов *метод круглоциліндричних поверхонь ковзання*. Цей метод застосовують для визначення коефіцієнта стійкості укусу, складеного однорідними ґрунтами (за відсутності фіксованої поверхні ковзання). Хоча і у цьому методі укіс попередньо розбивають на низку відсіків.

В основних нормативних документах у дорожній галузі [13–15] не конкретизується метод розрахунку стійкості укосів насипів. У суміжних галузях [16–19] також не конкретизують методи розрахунку, а вказують, що стійкість укосів потрібно перевіряти за можливими поверхнями зсуву (круглоциліндричними, ломаними тощо) із знаходженням самої небезпечної призми обвалення, що характеризується мінімальним відношенням узагальнених граничних реактивних сил опору до активних сил зсуву.

Критерієм стійкості насипів згідно з [17, 20] є дотримання (для самої небезпечної призми обвалення) нерівності:

$$\gamma_f \cdot T \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot R, \quad (11)$$

де  $\gamma_f$  – коефіцієнт поєднання навантажень (надійності по навантаженню), для основного випадку  $\gamma_f = 1,00$ , для особливого  $\gamma_f = 0,90$ , для будівельного періоду  $\gamma_f = 0,95$ ;

$T$  – розрахункове значення загальної активної сили зсуву;

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи, на стадії експлуатації приймають  $\gamma_c = 1,0$ ;

$\gamma_n$  – коефіцієнт надійності, що враховує ступінь важливості споруди, для автомобільних доріг приймаємо  $\gamma_n = 1,0$ ;

$R$  – розрахункове значення загальної активної сили граничного опору зсуву, яке потрібно визначати із врахуванням коефіцієнта надійності по ґрунту  $\gamma_g$ .

### **Висновок**

Аналіз існуючих методів розрахунку стійкості укосів, зокрема обводнених, свідчить про їх різноманіття, хоча в основі кожного із них лежить відношення зсуваючих сил (моментів) до утримуючих або інше їх порівняння.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Клейн Г.К.* Строительная механика сыпучих тел. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.



2. *Маслов Н.Н.* Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. – М.-Л., 1965 – 468 с.
3. *Маслов Н.Н.* Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
4. *Соколовский В. В.* Статика сыпучей среды. – М.: Гостехиздат, 1954.
5. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.
6. *Харр М.Е.* Основы теретической механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1971. – 320 с.
7. *Гольдштейн М.Н.* Проблемы расчета устойчивости грунтовых массивов // Основания и фундаменты. – Вып. 10. – Киев, 1977. – С. 13–21.
8. *Кандауров И.И.* Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. – Л.: Стройиздат, Ленингр.отд-ние, 1988. – 280 с.
9. *Нагрузки и воздействия на здания и сооружения : [справ. пособ.] / В.Н. Гордеев [и др.]* Под ред. Перельмутера А.В.. – К.: Сталь, 2005. – 479 с.
10. *Проектирование и строительство автомобильных дорог: Справочник /* Под ред. В.И.Заворицкого. – К.: Техніка, 1996. – 382 с.
11. *Варіаційне обчислення.* – Харків, ХДПУ, 1999. – 44 с.
12. *Каськів С.В., Рутковська І.А.* Застосування варіаційного методу для розрахунку обводених укосів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2008. – Вип. 74. – С. 86–92.
13. *Споруди транспорту. Автомобільні дороги: ДБН В.2.3–4:2007.* – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 91 с.
14. *Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-15:2009.* – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 22 с.
15. *Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування ДБН В.2.3-22:2009.* – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 52 с.
16. *Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009.* – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 83 с.
17. *Плотины из грунтовых материалов: СНиП 2.06.05-84\*.* – М.: Госстрой СССР, 1991. – 76 с.
18. *Земляные сооружения. Основы и фундаменты: СНиП 3.02.01-87.* – М.: Минстрой России, 1996. – 120 с.
19. *Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85* – М.: Госстрой СССР, 1981 – 100 с.
20. *Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования: СНиП 2.01.15-90.* – М.: Госстрой СССР, 1991. – 41 с.