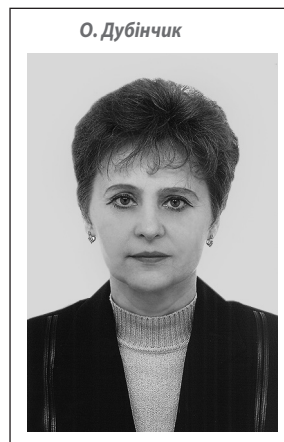
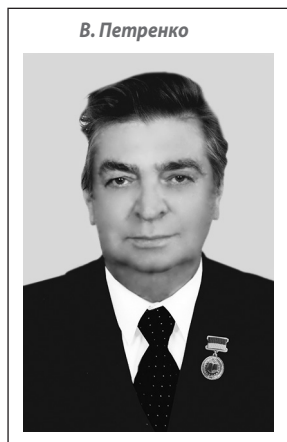


В. Петренко, д. т. н., професор,
О. Тют'їн, д. т. н., доцент,
О. Дубінчик, к. т. н., доцент,
В. Кільдєєв, магістр,
 кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СТІЙКОСТІ УКОСІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ВИСОКИХ НАСИПІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМИ ОТКОС

КЛЮЧЕВІ СЛОВА: земляне полотно; зсувна ділянка; стійкість порід схилів; математичне моделювання; програма «ОТКОС»; коефіцієнт запасу стійкості

УДК 625.12



Вичерпання стійкості укосів земляного полотна є причиною величезних матеріальних збитків і можливих людських жертв, тому визначення коефіцієнту запасу стійкості є актуальною проблемою.

Оцінка стійкості укосів земляного полотна є актуальною проблемою у зв'язку із освоєнням зсувонебезпечних територій, а також активізацією і появою нових зсувів, обумовлених втручанням людини в навколишнє середовище. Вичерпання стійкості укосів земляного полотна є причиною величезних матеріальних збитків і можливих людських жертв. Тому контроль над цими процесами дуже важливий в ході зведення і експлуатації земляного полотна високих насипів, оскільки вірогідність утворення зсуву на їх укосах значно зростає.

Зсуви класифікують за ознакою їх будови і за положенням поверхні ковзання на:

1. Асеквентні — зсуви, які утворюються в однорідних породах. Причина утворення — втрата міц-

ності складаючих порід (консидентні зсуви). Частіш усього, саме асеквентні зсуви утворюються на укосах та тілі земляного полотна, хоча деякі особливості його роботи можуть викликати і зсуви іншої природи та генезису.

2. Консеквентні. Причиною утворення цього виду є наперед підготовлена деякими процесами поверхня.

Процеси підготовки:

- межа між двома шарами (наприклад, тіло насипу і баласт);
- тріщини в масиві, тріщини за колу;
- поверхня розділу делювію і корінної складаючої породи (характерні для глибинного зсуву, який утворюється не лише в земляному полотні, а й зачіпає основу насипу).

3. Інсеквентні. Зсуви, що утворюються завдяки ковзанню, яке є при нашаруванні порід.

Стан зсуву можна оцінити за допомогою коефіцієнту запасу стійкості K_{cm} , який дорівнює відношенню сил: утримальних $\sum T_i$ і зсуювальних $\sum N_i$.

Якщо $K_{cm} > 1$, то схил стійкий, якщо $K_{cm} < 1$ — схил нестійкий.

Будова зсуву здебільшого така:

1. Тіло зсуву — маса порід, що зсуюються і зсунулися.
2. Поверхня ковзання — поверхня, по якій відбувається відрив і рух тіла зсуву.
3. Брівка зсуву — верхня лінія перетину поверхні ковзання і поверхні корінного схилу.
4. Підшова зсуву — нижня лінія перетину поверхні ковзання і поверхні корінного схилу.

Найчастішими причинами утворення зсуву є:

- збільшення крутизни схилу при підрізуванні або підробці;
- зменшення міцності складаючих порід унаслідок зміни їх фізичних властивостей при зволоженні, набуханні, вивітрюванні, реологічних явищах тощо;
- дія напірних і ненапірних ґрунтових вод, суфозійні процеси;
- додаткові дії на схил (у цьому випадку — дія рухомого складу).

Дослідженням міцності та стійкості схилів в загальному випадку, тобто не тільки укосів земляного полотна, успішно займалися вітчизняні і зарубіжні вчені [1 – 4]. Проте деякі питання ще недосить вивчені, а використовувані в разі методи розрахунку стійкості привантажених рухомим складом укосів і схилів містять низку недоліків.

Дослідження міцності та стійкості укосів земляного полотна є складним завданням, що визначається необхідністю одночасного урахування трьох основних чинників: рухомого складу, рельєфу і гравітаційної сили, що вимагає використання відповідних методів дослідження. Для дослідження міцності та стійкості укосів земляного полотна використовуються польові методи, лабораторне моделювання, яке включає метод еквівалентних матеріалів, поляризаційно-оптичні методи, електричне моделювання та методи математичного моделювання, як аналітичні, так і численні вирішення поставленого завдання.

Основним для визначення міцності та стійкості укосів земляного полотна є уявлення про те, що напружений стан порід, у верхній частині земної кори, формується в основному завдяки таких причин: діючої повсюдно гравітаційною і динамічною (вплив потягу) силами. Вагомий внесок в перерозподіл напружень має рельєф земної поверхні. Незважаючи, що вплив рельєфу розповсюджується на відстань від поверхні, що не перевищує розмірів її нерівностей, а концентрація напружень спосте-

рігається тільки на окремих ділянках і лише поблизу поверхні. Разом з тим, вивчення перерозподілу напружень, обумовленого рельєфом, необхідне для оцінки стійкості схилів і укосів і вирішення питань проектування і будівництва наземних і підземних споруд на схилах і в межах річкових долин як на рівнинах, так і у гірничо-складчастих областях.

Для вирішення завдання визначення стійкості укосів розроблені численні методи в рамках теорії граничної рівноваги. Ці методи, як правило, виходять з нижчевикладених передумов.

1. Механізм втрати стійкості приймається як механізм ковзання масиву, що обповзає, щодо нерухомої частини укосу. Межа розділу називається поверхнею ковзання.

2. Опір зрушення на поверхні ковзання розраховується для статичних умов. Уздовж всієї поверхні має витримуватись критерій руйнування ґрунту, що приймається у вигляді закону Кулона.

3. Реальне напруження зсуву, що отримане на основі розрахунку, зіставляється з граничним опором зрушенню, і результат цього порівняння виражається у вигляді коефіцієнта запасу стійкості K_{cm} . Для обраної поверхні ковзання коефіцієнт запасу стійкості K_{cm} є таким показником, що якщо міцнісні характеристики (кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення) уздовж всієї поверхні зменшені в K_{cm} раз, то відокремлюваний масив в цілому виявиться в стані граничної рівноваги. Коефіцієнт запасу стійкості схилу (укосу) K_{cm} — це мінімальний з коефіцієнтів запасу стійкості по всіх можливих поверхнях ковзання, задовольняючих заданим обмеженням.

4. Реальна поверхня ковзання тривимірна. Але в переважній більшості методів розрахунку, зокрема і в програмі УКІС (ОТКОС; надалі надається переклад і автентична назва діалогу або дії у програмі, яка відноситься до програм SCAD Office) [5], прийнята передумова про плоску деформацію, коли поверхня ковзання — циліндрична

із напрямними, паралельними поверхні схилу, а завдання зводиться до пошуку критичного напрямку, так званого лінією ковзання. Такий підхід заснований на гіпотезі, що неврахування просторовості мало впливає на величину коефіцієнта запасу стійкості і йде в запас міцності.

Використовуються різні, як правило, вельми обмежені класи можливих пробних ліній ковзання (дуги кіл або логарифмічних спіралей). Проте очевидно, що для істотно неоднорідних укосів і складної гідрогеологічної обстановки, які розглядаються в справжній розробці, обмеження на вибір поверхні ковзання мають бути мінімальними. У основі алгоритму розрахунку, реалізованого в програмі УКІС (ОТКОС), лежить методика, запропонована в роботах В. Г. Федоровського і С. В. Курилло і заснована на методі змінного ступеня мобілізації опору зрушенню (МЗСМ) [5].

В програмі УКІС (ОТКОС) реалізовано декілька класичних методів аналізу стійкості укосів:

- Феленіуса (Fellenius);
- Бішопа (Bishop) спрощений;
- Спенсера (Spencer);
- Корпуса інженерів №1;
- Лоува і Карафайта («Лове і Карафат», автентичне — Lowe-Karafiath);
- Янбу (Janbu) спрощений;
- Янбу (Janbu) коригований (також відомий як «Янбу узагальнений»).

Відмінності наведених методів полягають в умовах статичної рівноваги (табл. 1).

В деяких дослідженнях вже з'ясовано, що наявність заколу не є причиною утворення зсуву [3; 4], то варто відшукати більш впливовий фактор, який різко зменшує значення коефіцієнту стійкості. Без сумнівів, таким фактором є наявність ґрунтових вод в тілі насипу. Моделювання підняття рівня ґрунтових вод (РГВ) є актуальним дослідженням, яке дозволяє визначити закономірності зміни коефіцієнту стійкості укосу високого насипу (12 метрів) в залежності від цього фактору.

Табл. 1. Методи розрахунку стійкості схилів і умови статичної рівноваги, яким вони задовільняють

Назва методу	Рівновага сил		Рівновага моментів
	По вертикалі	По горизонталі	
Феленіуса*	Так	Ні	Так
Бішопа спрощений*	Так	Ні	Так
Спенсера*	Так	Так	Так
Корпуса інженерів №1	Так	Так	Ні
Лоува і Карафайта	Так	Так	Ні
Янбу спрощений	Так	Так	Ні
Янбу коригований	Так	Так	Ні

Примітка*. Методи Феленіуса, Бішопа спрощений та Спенсера дозволяють знайти тільки круглоциліндричні поверхні ковзання.

Розрахунок стійкості земляного полотна проводиться за реальними даними перегону дільниці 1231 км залізничної колії Вапнярка-Подільськ (Котовськ) Південно-Західної залізниці. Розрахунок стійкості доцільно проводити для насипів значної висоти (>6 м), що експлуатуються, для прогнозу деформованого стану та можливого виникнення зсувів, а також для насипів, що будуються, для оцінки загальної стійкості із визначенням коефіцієнту запасу. Програма ОТКОС дозволяє моделювати насипи різної висоти та складності профілю.

Табл. 2. Результати розрахунку параметрів зсуву різними методами (програма «ОТКОС») (PFB +2 м)

Назва параметру	Назва методу					
	Феленіуса	Бішопа (спрощений)	Корпуса інженерів № 1	Лоува і Карафайта	Янбу (спрощений)	Янбу (коригований)
Коефіцієнт запасу стійкості	1,420	1,473	1,477	1,347	1,339	1,431
Координата x початку поверхні ковзання, м	14,0	11,0	11,3	11,8	12,0	12,6
Координата z початку поверхні ковзання (глибина заколу), м	0	0	0,67	3,27	2,18	1,3
Координата x закінчення поверхні ковзання, м	51,0	52,5	51,9	60	56,2	51,1

Табл. 3. Результати розрахунку параметрів зсуву різними методами (програма «ОТКОС») (PFB +4 м)

Назва параметру	Назва методу					
	Феленіуса	Бішопа (спрощений)	Корпуса інженерів № 1	Лоува і Карафайта	Янбу (спрощений)	Янбу (коригований)
Коефіцієнт запасу стійкості	1,183	0,498	0,016	1,05	1,13	1,23
Координата x початку поверхні ковзання, м	16,0	20,0	15,0	10,4	12,9	11,1
Координата z початку поверхні ковзання (глибина заколу), м	11,45	22,9	5,39	7,73	5,73	5,73
Координата x закінчення поверхні ковзання, м	60,0	60,0	55,5	60,0	58,3	58,8

Для такого дослідження відмітка рівня ґрунтових вод (РГВ), яка відображається в моделях програми ОТКОС, варіювалася наступним чином: +2 м і +4 м. Результати розрахунків за допомогою програми ОТКОС наведені в табл. 2 – 3.

При аналізі отриманих результатів, варто зазначити зростання глибини заколу, яка при зміні РГВ з 0 до +2 м зменшується незначно (тільки в методі Лоува і Карафайта з 1,30 до 3,27 м). При цьому коефіцієнт запасу стійкості також змінюється незначно, що свідчить про незначний вплив підняття РГВ на 2 м. Але при підвищенні РГВ на 4 м відбувається різка зміна коефіцієнта запасу стійкості і глибини заколу.

Аналіз результатів, наведених в табл. 2, свідчить про те, що K_{cm} або вичерпався (методи Бішопа (спрощений) і Корпуса інженерів № 1), або становить незначний запас у 5 – 23% (методи Лоува і Карафайта, Янбу (спрощений), Янбу (коригований)). Метод Феленюса надає $K_{cm} = 1,48$, тобто близький до нормативного значення 1,5, але більш детальний аналіз табл. 3 і рис. 4. свідчить про те, що глибина заколу складає 11,45 м, тобто тіло зсуву практично відокремилася від корінного схилу. Значна глибина заколу присутня і в інших методах (від 5,33 до 7,73 м), а в методі Бі-



шопа (спрощений) вона становить максимальне значення в 22,9 м.

Аналіз поверхонь ковзання, побудованих різними методами надає змогу зробити висновок, що при піднятті РГВ високий насип отримує можливість глибинного зсуву, який захоплює значний обсяг корінного схилу, що не відбувається при низькому РГВ. Для з'ясування сили впливу підняття РГВ на коефіцієнт запасу міцності, побудовано графік його залежності (рис. 1).

З графіку простежуємо, що при піднятті РГВ, рівному +2 м, відбувається різка зміна K_{cm} (від 1,5 – 1,6 до 1,3 – 1,38), причому в методах Бішопа (спрощений) і Корпуса інженерів № 1 відбувається його катастрофічне падіння і втрата схилом стійкості за сценарієм глибинного зсуву, тобто підняття РГВ на 4,2 – 5,0 м є критичною величиною для стійкості укосу високого насипу. Прогнозування

глибинного зсуву може бути засноване на цих показниках, а постійний моніторинг схилу та РГВ, особливо при довготривалих дощах або у період сніготанення, має відслідковувати вплив підняття РГВ на K_{cm} .

Забезпечення стійкості укосів земляного полотна високих насипів — це відповідальна задача для надійної роботи залізничного транспорту. Прогнозувати поведінку зсувонебезпечної ділянки при зміні рівня ґрунтових вод можливо на основі кількісної теорії оцінки стійкості схилів за допомогою програми ОТКОС. На основі отриманих результатів обґрунтовуються методи покращення стійкості високих насипів та вибір матеріалів і конструкцій їх закріплення. ☞

► Список літератури

1. Дорфман, А. Г. Исследование устойчивости склонов / А. Г. Дорфман, А. Я. Туровская // Вопросы геотехники: Межвуз. сб. науч. Трудов. Днепропетровск, 1975. — №24. — С. 132 – 156.
2. Оползни. Исследование и укрепление / под ред. Шустера Р. и Кризика Р. — М.: Мир, 1981. — 368 с.
3. Ковров, О. С. Оцінка впливу гідрогеологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувів / О. С. Ковров // Екологічна безпека. — №1/2003 (15). — С. 72 – 76.
4. Albataineh, N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. / N. Albataineh. — Ohio, United States: The University of Akron, 2006. — 126 p.
5. Федоровский, В. Г. Метод расчета устойчивости откосов и склонов / В. Г. Федоровский, С. В. Курилло. // Геоэкология, 1997. — №6. — С. 95 – 106.

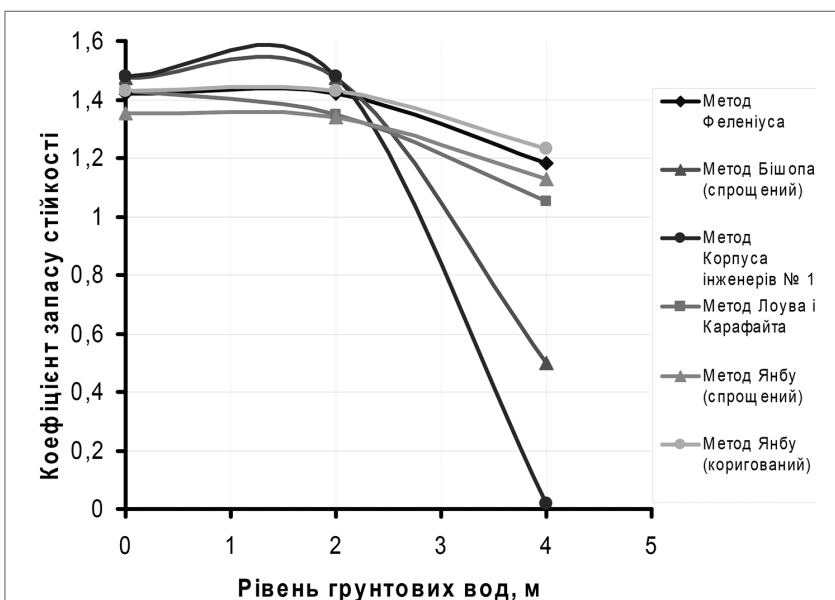


Рис. 1. Залежність зміни коефіцієнту запасу стійкості від рівня ґрунтових вод для укосу високого насипу