

УДК 625.1

МЕТОДИ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Й. Лучко, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-2239-849X

*Львівський національний аграрний університет***І. Кравець, аспірант**

ORCID ID: 0000-0002-3675-0503

*Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна***В. Ковальчук, к. т. н.**

ORCID ID: 0000-0003-4350-1756

Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна<https://doi.org/10.31734/architecture2019.20.014>**Лучко Й., Кравець І., Ковальчук В. Методи оцінки стійкості земляного полотна**

Розглянуто важливе для транспортного та цивільного будівництва питання – стійкість укосів. Цей напрям є важливим аспектом, як технічним так і економічним. Тут описано історичний розвиток методів розрахунку стійкості укосів на основі досліджень вітчизняних та зарубіжних учених. Окреслено напрямки їх розвитку, ідеї, на яких вони засновані, фактори, що враховуються під час розрахунків, випадки, в яких доцільно застосовувати той чи інший метод розрахунку. Наведено поділ методу відсіків залежно від числа рівнянь рівноваги, які задовольняються: рівновага моментів, рівновага сил, рівновага сил та моментів.

Зазначено, що дослідження міцності та стійкості укосів земляного полотна є складним завданням, що визначається необхідністю одночасного врахування різних чинників. Описано причини втрати стійкості укосів і схилів. Розглянуто принцип розрахунку, що зводиться до пошуку розташування поверхні ковзання в ґрунтовому масиві, на якому реалізуються максимальні зсувні напруження, та має місце мінімальний коефіцієнт стійкості, що виражається відношенням сумарних утримувальних сил до сумарних зрушувальних сил або відношенням моментів утримувальних сил до моментів сил, що зсувають.

Подано перелік програм, що набули широкого використання в інженерній практиці розрахунку стійкості, завдяки яким стало можливим проводити розрахунки для схилів зі складною літологічною будовою, враховувати в розрахунках додаткові навантаження і елементи структурного зміцнення укосів за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Усе дає змогу сформувати не двовимірну розрахункову схему, а віртуальний прототип заданої ділянки масиву з реальними геометричними розмірами і фізико-механічними властивостями матеріалів. Комплекси дають змогу проглянути положення графіків, сил, поверхонь зсуву та інших параметрів, що дозволяє детально вивчати більше механізм розвитку зсувного процесу, ніж саме значення коефіцієнта стійкості.

Описані можливості програмного комплексу PLAXIS, перелік задач, що вирішуються, моделі різних ґрунтів, на основі яких моделюється робота масиву.

Ключові слова: земляне полотно, коефіцієнт стійкості, PLAXIS, укоси.

Luchko Y., Kravets I., Kovalchuk V. Methods of assessment of the earth bed stability

The article considers the issue of slope stability as an important aspect of transport and civil engineering. This area of research is an important technical and economic aspect. It describes the historical development of the methods for computation of slopes stability, basing on the researches of domestic and foreign scientists, who were engaged in that filed. The work outlines directions of their development, ideas, which serve as a base, factors, which are taken into account in the computation, and cases, in which it is expedient to apply one or another method of computation. The work presents distribution of the reduced methods of compartments, depending on the number of satisfied equilibrium equations, i.e. equilibrium of the moments, balance of forces, balance of forces and moments.

It is noted that study of the strength and stability of the slopes of the earth bed is a complicated task, which is determined by the need of simultaneous consideration of various factors. The reasons of loss of slopes stability are described in the research. The article describes a computation principle, which is manifested in the search of a slipping surface in the soil layer of a maximum sloping load and a minimum coefficient of stability, which is expressed as a ratio of the total of retaining forces to the total displacement forces, or a ratio of the moments of the retaining forces to the moments of the displacing forces.

The work supplies a list of programs that have become widely used in the engineering practice of stability computation, which enable performing of computation for the slopes with a complex lithological structure with consideration of additional loads and elements of structural strengthening of slopes, using the Finite Element Method (FEM). It secures forming of not a two-dimensional calculation scheme, but a virtual prototype of the set section of an array with real geometric dimensions, and physical and mechanical properties of materials. These complexes provide an opportunity to

look at the position of graphs, forces, shear surfaces and other parameters, assisting in more detailed studying of the mechanisms of a shift process development than the value of the coefficient of stability.

The research describes features of the software complex PLAXIS, a list of solved problems, described models of different soils, which serve as a basis for work modeling.

Key words: earth bed, retaining forces, shifted forces, coefficient of stability, PLAXIS, slopes

Постановка проблеми. Забезпечення стійкості укосів відіграє важливу роль у транспортному та цивільному будівництві. Тому основне завдання інженерів-проектувальників – забезпечення стійкості укосів. Порушення стійкості ґрунтових масивів є складним процесом. Ділянка пластичних деформацій та поверхні зрушення утворюється поступово і супроводжується суттєвими деформаціями частин масиву, які утворюють окремі ділянки із добре вираженою поверхнею зрушення ґрунтового масиву 5 (рис. 1).

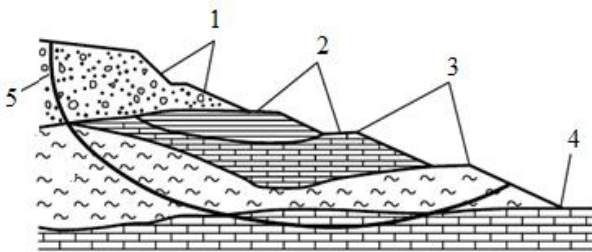


Рис. 1. Схема ґрунтового укосу та його основних частин: 1 – уступ; 2 – берма; 3 – бровка уступу; 4 – підшва укосу; 5 – поверхня зрушення

Під стійкістю ґрунтових масивів зазвичай розуміють їх здатність протягом тривалого часу протистояти силам зрушення, зберігаючи свою форму. За несприятливого поєднання різноманітних факторів ґрунтовий масив може перейти в нерівноважний стан і втратити стійкість. Вибір методу оцінки стійкості укосів є важливим завданням, як із технічного боку, забезпечення надійної експлуатації споруд, так із економічного.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На сьогодні є чимало методів дослідження стійкості ґрунтових споруд і основ. Докладний аналіз деяких поширених методів та їх застосування подано у працях [1-6].

У [1] описані сучасні тенденції у розрахунках стійкості укосів, наведені загальна класифікація методів математичного моделювання та переваги їх застосування. Автор пропонує розробити класифікацію методів оцінки стійкості, що ґрунтується на механіко-математичному підході до вирішення задачі.

У праці [2] подано алгоритм визначення і порівняння параметра стійкості зсувного схилу

різними методами у програмі «ОТКОС». Проаналізовано чинники, які впливають на стійкість природного укосів. Визначено та розраховано параметри стійкості зсуву, такі як коефіцієнт запасу стійкості, координата початку поверхні ковзання, глибина заколу, координата закінчення поверхні ковзання.

Праця [3] присвячена розробці нового методу пошуку поверхні ковзання, який базується на методі Моргенштерна і Прайса та алгоритмі імітації відпалу. Такий метод дає змогу знайти критичну поверхню ковзання неоднорідних ґрунтових споруд. Автори довели, що запропонований метод надзвичайно точний.

Постановка завдання. Наше завдання – аналіз методів оцінки стійкості земляного полотна.

Виклад основного матеріалу. Шарль Кулон започаткував розрахунки стійкості укосів, коли 1773 р. сформулював умову міцності ґрунту:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c,$$

де τ – опір зсуву; σ – нормальні напруження; φ – кут внутрішнього тертя; c – питоме зчеплення.

У 1820 р. Франсе [4] запропонував спосіб розрахунку по плоскій поверхні ковзання, заснований на принципі Кулона. У 1859 р. В. Ренкін, розглянувши граничну рівновагу нескінченного масиву, обмеженого похилою площиною, ввів поняття про поверхні ковзання і вивів, на основі умови міцності Кулона, основні рівняння теорії тиску земляних мас. З 1900-х років розвиваються два напрямки розрахунку стійкості схилів [5; 6].

Перший напрямок є продовженням ідеї В. Ренкіна, розвиває її Ф. Кеттер [4], що склав систему граничної рівноваги сипучого середовища, взявши диференціальні рівняння рівноваги і граничні умови в кожній точці і звівши їх до відповідних криволінійних координат. Серйозним продовженням теорії граничної рівноваги вважаються праці Л. Прандтля, в яких розглянуто задачі пластичної рівноваги. У сучасному вигляді теорія граничної рівноваги сформована працями В. В. Соколовського [7], В. Г. Березанцева, М. В. Малишева, Ю. І. Соловійова, Ю. О. Соболевського, А. С. Строганова, Г. Мейергофа та ін [8].

Другий напрямок було засновано на «спрощеній» теорії граничної рівноваги, що базується на припущенні: умова граничної рівноваги задо-

вольняється на внутрішній межі (поверхні ковзання) укусу тієї або іншої геометричної форми, і припускається, що деформація укусу відбувається в результаті одночасного подолання опору зрушення порід у межах усієї потенційної поверхні ковзання. З цього й почався розвиток методів, заснованих на моделі отверділого відсіку, та поділу зсувного тіла на відсіки або блоки.

У 1936 р. А. І. Іванов [9] запропонував метод, заснований на ідеї затверділого укусу, який розвинув Д. Тейлор [10]. Недоліком методів стійкості схилів, заснованих на моделі затверділого укусу, є їхні умовність, складність та громіздкість одержуваних розрахункових залежностей, що призводить до неможливості їх використання для оцінки стійкості схилів у важких інженерно-геологічних умовах. Як зазначено у [11], методи цієї підгрупи придатні тільки для оцінки стійкості однорідних укосів, завантажених власною вагою. Їх практично неможливо поширити на випадки більш складної будови укусу, дії фільтраційних і сейсмічних сил.

Учені Н. Янбу [12] та Б. Бішоп [13] вдосконалили метод відсіків. Уточнення до методу розробили Н. Моргенштерн та В. Прайс [14]. Метод граничної рівноваги поширений серед інженерів, оскільки розрахунок можна виконати вручну без застосування громіздких формул.

Учені, що займалися дослідженнями, пов'язаними з методами розрахунків схилів, – М. Н. Гольдштейн [15; 16], А. Г. Дорфман [17], М. М. Маслов [18], Р. Р. Чугаєв, Г. М. Шахунянц [19; 20] та ін. [21–26].

На сьогодні популярними методами оцінки стійкості є методи, що ґрунтуються на припущенні про досягнення граничного опору зсуву тільки на поверхні зрушення, яка зазвичай представлена у круглоциліндричній, плоскій або довільній формі. Для уточнення закону розподілу нормальних на-

пружень по поверхні зрушення, що особливо важливо за неоднорідності будови ґрунтового масиву, тіло зрушення розділяється на плоскі елементи.

Загалом методи відсіків можна поділити на три основні типи залежно від числа рівнянь рівноваги, які задовольняються (рис. 2): 1) тип методів, що задовольняють рівновагу моментів; 2) тип методів, що задовольняють рівновагу сил; 3) тип методів, що задовольняють рівновагу сил та моментів. У табл. 1 подано умови статичної рівноваги та методи, що їх задовольняють [27].

Методів розрахунку стійкості є досить багато, проте деякі питання ще недостатньо вивчені, а використовувані наразі методи розрахунку стійкості навантажених рухомим складом укосів і схилів містять низку недоліків.

Дослідження міцності та стійкості укосів земляного полотна є складним завданням, що визначається необхідністю одночасного врахування трьох основних чинників: рухомого складу, рельєфу і гравітаційної сили, що вимагає використання відповідних методів дослідження. Для дослідження міцності та стійкості укосів земляного полотна використовують польові методи, лабораторне моделювання, яке охоплює метод еквівалентних матеріалів, поляризаційно-оптичні методи, електричне моделювання та методи математичного моделювання, як аналітичні, так і численні вирішення поставленого завдання [28].

Принцип розрахунку стійкості зводиться переважно до пошуку розташування поверхні ковзання в ґрунтовому масиві, на якому реалізуються максимальні зсувні напруження, та має місце мінімальний коефіцієнт стійкості, що виражається відношенням сумарних утримувальних сил до сумарних зрушувальних сил або відношенням моментів утримувальних сил до моментів сил, що зсувають.

$$K_{cm} = \frac{F_{ym}}{F_{zp}}, \text{ або } K_{cm} = \frac{M_{ym}}{M_{zp}}.$$

Таблиця 1

Методи розрахунку стійкості схилів і умови статичної рівноваги, які вони задовольняють

Назва методу	Рівновага сил		Рівновага моментів
	По вертикалі	По горизонталі	
Феленіуса [21]	Так	Ні	Так
Бішопа спрощений [24]	Так	Ні	Так
Спенсера [22]	Так	Так	Так
Корпусу інженерів [27]	Так	Так	Ні
Лоува і Карафайта [27]	Так	Так	Ні
Янбу спрощений [12]	Так	Так	Ні
Янбу коригований [26]	Так	Так	Ні
Моргенштейна і Прайса [14]	Так	Так	Так
Сарма [27]	Так	Так	Так

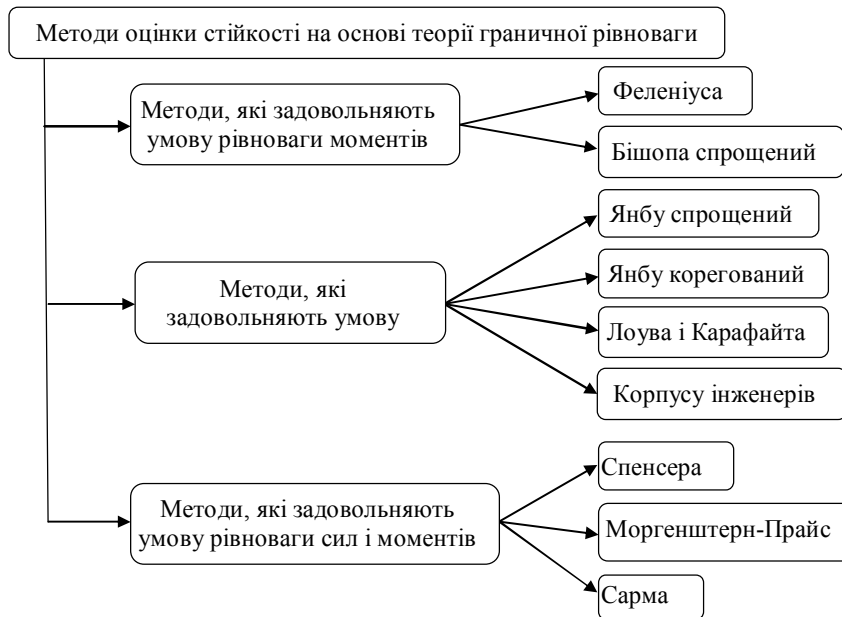


Рис. 2. Методи оцінки стійкості та умови, які вони задовольняють

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

Інженерною практикою встановлено, що методи розрахунку коефіцієнта стійкості можуть дати занижене значення коефіцієнта стійкості, з огляду на безліч факторів, що впливають на результат розрахунку. Тому коефіцієнт стійкості $[K]$ повинен бути диференційований залежно від категорії споруди. Для залізничних насипів згідно з [29]:

$$[K] = \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c}$$

де γ_n – коефіцієнт надійності за призначенням споруди (коефіцієнт значущості споруди); γ_{fc} – коефіцієнт сполучення навантажень, що враховує зменшення імовірності одночасної появи розрахункових навантажень; γ_c – коефіцієнт умов роботи.

Основними причинами втрати стійкості укосів і схилів є: влаштування неприпустимо крутого укосу або схилу; підрізування схилу, що перебуває в стані, близькому до граничного; збільшення зовнішнього навантаження (зведення споруд, складування матеріалів на укосі чи поблизу його брівки); зміна внутрішніх сил (наприклад, збільшення питомої ваги ґрунту за зростання його вологості); помилкове призначення розрахункових характеристик ґрунту; зниження опору ґрунту зрушенню за рахунок підвищення його вологості або інших причин; прояв гідродинамічного тиску; вплив сейсмічних сил і різних динамічних впливів (рух транспорту, забивання паль і т.п.).

Деякі з розглянутих методів розрахунку реалізовані у програмі ОТКОС, яка належить до програм SCAD Office, приклади розрахунку стійкості укосів у цій програмі наведені у [3; 28].

Останніми роками завдяки розвитку комп'ютерних технологій розрахунки стійкості укосів набули широкого використання в інженерній практиці. Є змога проводити розрахунки для схилів зі складною літологічною будовою, враховувати в розрахунках додаткові навантаження і елементи структурного зміцнення укосів за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Сьогодні є низка потужних обчислювальних програмних комплексів (PLAXIS, ANSYS, COSMOS/M, ABAQUS, PHASE2, MIDAS та ін.), що дають змогу сформувати не двовимірну розрахункову схему, а віртуальний прототип заданої ділянки масиву з реальними геометричними розмірами і фізико-механічними властивостями матеріалів. Комплекси дають змогу проглянути положення графіків, сил, поверхонь зсуву та інших параметрів, що дозволяє детально вивчати радше механізм розвитку зсувного процесу, ніж саме значення коефіцієнта стійкості.

Серед геотехнічних інженерів-проектувальників програмний комплекс PLAXIS зарекомендував себе на високому рівні. За допомогою програми можуть бути виконані розрахунки фільтрації та консолідації ґрунтів, розрахунки стійкості з визначенням потенційних поверхонь руйнування і значень коефіцієнта запасу, які відповідають рівню досягнутих напружень.

У програмному комплексі є набір моделей різних ґрунтів, на основі яких моделюється робота масиву: «Mohr-Coulomb model» – пружно-пластична модель Кулона-Мора; «Hardening Soil model» – модель ґрунту, що зміцнюється (пружно-пластична модель гіперболічного типу), застосовується для моделювання поведінки піску, гравію; «Soft Soil model» – модель слабого ґрунту (модель типу «Cam-Clay»); «Soft Soil Creep model» – модель слабого ґрунту з урахуванням ефекту повзучості (охоплює моделювання другої стадії повзучості), може використовуватися для моделювання залежної від часу поведінки слабких ґрунтів; «Jointed Rock model» – модель анізотропного тріщинуватого скельного масиву, може використовуватися для моделювання шаруватих гірських порід [30].

Методика розрахунку і моделювання роботи масиву залежать від задачі, яку необхідно вирішити. Для прикладу, стійкість розраховують зниженням характеристик міцності ґрунту на основі методу Phi-c-reduction (зниження ϕ і c), що використаний у програмі «PLAXIS» для розрахунків коефіцієнта загальної безпеки.

Коефіцієнт стійкості визначається як відношення реальної міцності на зсув до обчисленої мінімальної міцності, необхідної для рівноваги

$$K = \frac{S_m}{S_n},$$

де S_m – максимально можлива міцність; S_n – міцність, необхідна для рівноваги.

Відповідно для умови міцності Кулона коефіцієнт стійкості визначається як відношення фактичних характеристик міцності до їх мінімальних значень, необхідних для підтримання рівноваги:

$$K_{cm} = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_r + \sigma_n \tan \phi_r},$$

де c , ϕ – параметри міцності; σ_n – компонента нормального фактичного напруження; c_r , ϕ_r – параметри наведеної міцності, достатні для підтримки рівноваги.

У такому підході знижуються зчеплення і тангенс кута внутрішнього тертя в однаковій пропорції:

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} = \sum M_{sf}.$$

Зниження параметрів міцності контролюють показником $\sum M_{sf}$. Цей показник змінюють, доки не відбудеться руйнування. Приклади розрахунку стійкості насипів наведено у [31; 32].

Висновки. Для забезпечення надійної роботи земляного полотна потрібно здійснювати аналіз стійкості та приймати рішення щодо підвищення його стабільності. Аналіз стійкості неоднорідного земляного полотна, застосовуючи аналітичні методи, є дуже складним завданням. Коефіцієнт стійкості потрібно аналізувати комплексно, досліджуючи криву зсуву разом з напружено-деформованим станом масиву, що можна виконати у програмних комплексах, які базуються на методах скінченних елементів. Без сумніву, перелічені аналітичні методи розрахунку земляного полотна потрібно враховувати під час створення скінченно-елементних моделей та порівнювати кінцевий результат.

Програмні комплекси є хорошим інструментом для дослідження стійкості завдяки швидкому вирішенню завдань, достовірності отриманих результатів, коригуванню та зміні початкових критеріїв. Оскільки на будь-якому етапі розрахунків можливий візуальний аналіз розвитку напружено-деформованого стану моделі у вигляді графіків, епюр, переміщень і т. д.

Програмний комплекс PLAXIS популярний серед геотехнічних інженерів, що підтверджує чимало наукових праць. Також слід зазначити, що програмний комплекс забезпечує високі показники ефективності, надійності й економічності проектованих споруд.

Бібліографічний список

1. Фоменко И. К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов. *Инженерная геология*. 2012. Т. 6. С. 44–53.
2. Bai T., Qiu T., Huang X., Li C. Locating Global Critical Slip Surface Using the Morgenstern-Price Method and Optimization Technique. *International Journal of Geomechanics*. 2014. Vol. 14(2). P. 319–325.
3. Петренко В. Д., Тютюкін О. Л., Дубінчик О. І., Кільдєєв В. Р. Оцінка стійкості природних схилів методами математичного моделювання в програмі «ОТКОС». *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2015. № 8. С. 23–32.
4. Попов И.И., Шпаков П.С., Поклад Г.Г. Устойчивость породных отвалов. Алма-Ата: Наука КазССР, 1987. 224 с.
5. Лучко Й. Й. Ґрунтознавство, механіка ґрунтів, основи та фундаменти: навч. посіб. Львів: Каменяр, 2013. 320 с.
6. Терцаги К. Теория механики грунтов / К. Терцаги; пер. с нем. И. С. Устевский; ред. пер. с нем. Н.А. Цытович. Москва: Госстройиздат, 1961. 507 с.
7. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Москва: Гостехиздат, 1954. 275 с.
8. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти: підручник / В. Б. Швець та ін. Дніпропетровськ: Пороги, 2012. 197 с.

9. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Москва: Высшая шк., 1991. 447 с.
10. Taylor D. Stability of earth slope. *Journ. of the Boston Society of civil Eng.* 1937. Vol. 3.
11. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения. Энергия, Лен. отд-ние, 1967. 460 с.
12. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes, Sweden.* 1954. Vol. 3. P. 43-49.
13. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique.* 1955. Vol. 5. P. 7-17.
14. Morgenstern N. R. and Price V.E. The analysis of the stability of general – slip surface. *Geotechnique.* 1965. Vol. 15. P. 70-93.
15. Гольдштейн М. Н., Бабицкая С. С. Расчет устойчивости откосов с учетом ползучего сдвига. *Вопросы геотехники.* Москва: Транспорт, 1964. № 7. С. 83–95.
16. Гольдштейн М. Н. Вариационный метод решения задач об устойчивости грунтов. *Вопросы геотехники:* тр. ДИИТ. Днепропетровск, 1969. № 16.
17. Дорфман А. Г. Вариационный метод исследования устойчивости откосов. *Вопросы геотехники.* Днепропетровск, 1965. С. 17–25.
18. Маслов Н. Н. Условия устойчивости откосов и склонов в гидротехническом строительстве. Москва: Госэнергоиздат, 1955. 53 с.
19. Шахуняц Г. М. Земляное полотно железных дорог. *Вопросы проектирования и расчета.* Москва: Трансжелдориздат, 1953. С. 828.
20. Шахуняц Г. М. К вопросу выбора рациональных методов расчета склонов. Оползни и борьба с ними: тр. Сев.-Кавказ. семинара. Ставрополь: Ставропольское книжное изд-во, 1964. С. 34–46.
21. Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams. *Proceeding of the Second Congress on Large Dams.* 1936. Vol. 4. P. 445–463.
22. Michael Duncan J. Soil Strength and Slope Stability. *John Wiley & Son.* 2005. P. 297.
23. Morgenstern N. R. The analysis of stability of general slip surface. *Geotechnique.* 1965. Vol. 15. P. 70–93.
24. Bishop A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique.* 1955. Vol. 5. P. 7–17.
25. Bishop A. W. Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique.* 1960. Vol. 10. P. 129–150.
26. Janbu N. Slope stability computation. *Embankment-Dam Engineering,* 1973. Casagtande volume. P. 47–86.
27. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.
28. Петренко В. Д., Тютюкін О. Л., Дубінчик О. І., Кільдєєв В. Р. Результати досліджень стійкості укосів земляного полотна високих насипів за допомогою програми «ОТКОС». *Українська залізниця.* 2017. № 3–4 (45–46). С. 18–21.
29. ДБН В.2.3-19:2018 Споруди транспорту. Залізничі колії 1520 мм. Норми проектування. Київ: Мінрегіон України, 2018.
30. Ковальов В. В. Моделювання роботи залізничних споруд із застосуванням сучасних методів розрахунку. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* 2012. Вип. 11 (176). С. 30–34.
31. Патронова О. PLAXIS – інструмент інженера-геотехника. *CADmaster.* 2002. № 3. С. 62–65.
32. Ашпиз Е. С., Вавринюк Т. С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты. *Мир транспорта.* 2012. № 3. С. 102–107.

Стаття надійшла 18.07.2019.