

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.137.2:519.85

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, О. І. ДУБІНЧИК², В. Р. КІЛЬДСЄВ³

^{1*} Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olga_dubinchik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

³ Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ORCID 0000-0003-2803-8150

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТІЙКОСТІ ПРИРОДНИХ СХИЛІВ, СКЛАДЕНИХ НЕОДНОРІДНИМИ ТА ШАРУВАТИМИ ҐРУНТАМИ

Мета. В рамках теорії граничної рівноваги виконати математичне моделювання стійкості зсувонебезпечного схилу, складеного неоднорідними та шаруватими ґрунтами за допомогою програми «ОТКОС» для визначення параметрів стійкості природного схилу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети розглянуті і проаналізовані зсувонебезпечні ділянки Придніпров'я, природні та техногенні чинники, які активізують зсувні процеси. Зроблено порівняльний аналіз комплексу ОТКОС з існуючими професійними комплексами. Виконано розрахунки параметрів зсуву різними методами. **Результати.** Визначені розраховані параметри зсуву: коефіцієнт запасу стійкості, координата початку поверхні ковзання, глибина заколу, координата закінчення поверхні ковзання. Побудовані поверхні ковзання за різними методами розрахунку, діаграми закономірностей зміни коефіцієнта стійкості, діаграма деформованого стану зсувонебезпечного схилу, приуроченого до парку Зелений Гай м. Дніпро. **Наукова новизна.** Отримана можливість прогнозувати поведінку природних схилів, складених неоднорідними та шаруватими ґрунтами в процесі їх активації. **Практична значимість.** Розроблено методіку визначення параметрів стійкості схилу за допомогою комплексу ОТКОС та основи практичної роботи із комплексом SCAD для аналізу деформованого стану природного схилу.

Ключові слова: природний схил; неоднорідні та шаруваті ґрунти; зсувна ділянка; інженерно-геологічний розріз; стійкість схилу; поверхня ковзання; математичне моделювання; комплекс ОТКОС; коефіцієнт стійкості

Вступ

Аналіз зсувних та зсувонебезпечних ділянок території України свідчить про те, що прогнозування розповсюдження таких явищ повинно стати основним видом моніторингу, який має своєю задачею не наглядати за процесом зсувотворення, а передбачати його появу. Схили значної висоти, інженерно-геологічна будова яких з'ясована, повинні отримувати попередній аналіз міцності та стійкості із залученням розрахункових методів, що є частиною комплексної інженерно-геологічної оцінки і прогнозу стану зсувонебезпечних територій.

Аналіз результатів стійкості природних схилів, що складені неоднорідними та шаруватими ґрунтами, є актуальною проблемою у зв'язку із дефіцитом вільних земельних площ, освоєнням зсувонебезпечних територій під будівництво, а також активізацією і появою нових зсувів, обу-

мовлених втручанням людини в навколишнє середовище. Параметри навантаженого схилу впливають на стан споруди, що зводиться на ньому, оскільки схил є його основою. Порушення стійкості схилів є причиною величезних матеріальних збитків і можливих людських жертв. Тому контроль над цими процесами дуже важливий в ході зведення і експлуатації висотних житлових будинків.

Оцінка стійкості та міцності схилів на сучасному науковому рівні неможлива без вивчення властивостей порід, що складають схили, і обумовлена дуже великим числом інших різноманітних чинників. Схили потребують детального аналізу коефіцієнта запасу стійкості (надалі – коефіцієнту стійкості K_{sc}), а також величини напружень і положення зон концентрації від морфології, крутизни і висоти схилів, геологічної будови і властивостей порід, що

складають схили, від різноманітних зовнішніх дій, як природних, так і техногенних.

Особливої складності задача визначення коефіцієнту стійкості та напружено-деформованого стану схилів набуває у випадку, коли вони складені неоднорідними та шаруватими ґрунтами, інженерно-геологічні різниці яких (частіш усього, шари) мають значні зміни деформаційних властивостей. Однак, визначення вказаних параметрів дасть можливість впевненого рішення питання оцінки стійкості природних схилів і дозволить прогнозувати їх поведінку як в ході їх природного розвитку, так і у разі проведення в межах схилів будівельних робіт або при господарському їх освоєнні.

Мета

Аналіз міцності та стійкості порід схилів, складених неоднорідними та шаруватими ґрунтами, необхідно виконувати на всіх стадіях інженерно-геологічних досліджень для вирішення таких питань як вибір місця розташування споруд, визначення характеру і ступеня їх впливу на перерозподіл напружень в породах схилів, проектування комплексу заходів щодо захисту територій і споруд від несприятливих наслідків процесів зсувів на схилах.

Мета полягає у аналізі результатів стійкості природних схилів, що складені неоднорідними та шаруватими ґрунтами, та комплексному визначенні параметрів напружено-деформованого стану зсувонебезпечних схилів при математичному моделюванні на основі професійних комплексів ОТКОС і SCAD, що є актуальною науково-практичною задачею.

Методика

Активізація зсувів викликана як природними, так і техногенними чинниками. Серед основних природних чинників активізації слід виділити гідрологічні (підняття рівнів та зміна витрат води в поверхневих водотоках, рівні води та хвильовий режим морів, озер, інших водойм, ерозійна та абразійна дія поверхневих вод), метеорологічні (атмосферні опади, температура), гідрогеологічні (рівні, хімічний склад, умови споживання та скиду підземних вод), сейсмічні (землетруси). Активізація зсувів, що розвиваються на схилах різного генезису, досить часто пов'язана з проявом супутніх процесів – еро-

зійного та абразійного, що є чинниками підсилення основного процесу. Найбільшого розвитку вони набули на узбережжі Чорного та Азовського морів, а також у Черкаській, Харківській, Львівській, Чернівецькій, Закарпатській областях. Значних збитків від активізації процесу зазнають міста Київ, Дніпро, Кам'янське, Запоріжжя, Одеса, Полтава, Чернівці та інші [1].

Всі, без виключення, зсувні ділянки, що розташовані в балках міст Дніпра та Кам'янського, залишаються небезпечними для інженерних споруд та життя людей. Загалом до зсувонебезпечних зон відносяться території, розташовані на відстані 30...50 м від краю балок та ярів, особливо на тих площах, де можливі витoki води з водоводів, перенавантаження схилів будовами, відсутні заходи із запобігання виникненню зсувних процесів.

Розподіл зсувів у межах адміністративних утворень наведено на рис. 1. Загальна кількість зсувів складає 22942 одиниці та може змінюватися за рахунок ліквідації, злиття чи формування нових зсувів під впливом природних і техногенних чинників на території України [1, 2].



Рис. 1. Розподіл зсувів у межах адміністративних утворень

За результатами аерофотозйомок на території Дніпропетровської області було визначено 382 зсувні ділянки (12 з них – активні), з них близько тридцяти відноситься саме до міста Дніпра, причому генезис зсувоутворення свідчить про катастрофічно швидке зростання об'ємів, оскільки в 80-х роках минулого століття було зафіксовано лише 17 таких ділянок. Усього у зсувонебезпечних зонах міста розташовано понад 500 житлових будинків і близько

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

50 промислових підприємств [1, 2]. Такі дані свідчать про гостру актуальність задачі визначення міцності та стійкості зсувонебезпечних схилів. Площі зсувних та схильних до зсувоутворення ділянок в Придніпров'ї наведено в табл. 1 [3].

Таблиця 1

Площі зсувних та схильних до зсувоутворення ділянок в Придніпров'ї

Назва області	Кількість зсувів			Площа зсувів, км ²	
	загальна	активних	на забудованій території	загальна	активних
Дніпропетровська	382	12	165	20,84	0,4380
Запорізька	205	103	24	3,60	1,9430
Кіровоградська	140	12	18	3,04	0,2200
Київська	814	32	67	23,75	0,7700
Полтавська	824	4	116	63,90	0,0014
Черкаська	1033	161	281	33,99	4,6100

В Київській області зафіксовано 815 зсувів, активними є 32, площею 0,77 км², на забудованій території виявлено 67 зсувів. У межах м. Києва поширено 108 зсувів, з них 11 є активними. В межах території м. Києва активізація зсувів спостерігалась на схилах балки Голосіївської (урочище Мишоловка), Голосіївського району по вулицях: Квітки-Основ'яненко, 14; Кашенка, 154; Учбовій, 1 та Червонозоряному проспекті, 14, Солом'янського району, провулку Академіка Філатова (озеро Глінка) та Столичному шосе (зсув на Лисій горі). У стані часткової активізації знаходяться зсуви, що розташовані в урочищі Кожем'яки-Гончарі по вул. Воздвиженській (Подільський район), в результаті чого землю засипано 10 гаражів.

На схилах правого берега р. Дніпро в межах території м. Києва встановлено наступне [5, 2, 6]: до верхньочвертинних лесових утворень приурочено близько 37 % обвалів, зафіксованих в останні 100 років; до нижньочвертинних бурих глин – 22 %; до нижньо-, верхньонеогенових строкатих глин – 13 %; до середньочвертинних морен і пісків харківської свити – по 7 %; до нижньочвертинних прісноводних суглинків –

5 %; до нижньонеогенових відкладень полтавської свити – 4 %; до середньочвертинних надморенних і підморенних пісків – по 2 %; до спонділових глин середнього палеогену київської свити – близько 1 %.

У нижньокам'яновугільних і середньо- та верхньодевонських вапняках і доломіті, що складають високі (до 2000 м) і круті (в середньому 65°) схили, з 600 вивчених зсувообвальних схилів на частку зсувів доводиться 26 %, зсуво-обвалів – 53 %, обвалів – 7 %. У глинистих метаморфізованих сланцях, що ритмічно перешаровуються з конгломератами та брекчіями і пісковиками каракольської свити нижнього карбону, різко переважають обвали в приповерхневій зоні вивітрювання і розвантаження порід; на їх частку доводиться близько 6 %. Обвали тут складають близько 2 %. У пісковиках, конгломератах і брекчіях келематинської свити верхнього карбону обвали складають 2 %; зсуви-обвали – 3 %.

Інтенсивність прояву і типи обвалів по механізму зсуву визначаються речовинним і мінеральним складом порід (і їх домішок), що складають схили.

Інтенсивність розвитку зсувів та обвалів залежить від інтенсивності і знаку неотектонічних переміщень окремих ділянок земної кори (структурних блоків) [4, 7]. Неотектонічні рухи призводять до збільшення загальної роздробленості масивів порід при активізації стародавніх (складчастих) або утворенні нових (постскладчастих) розривних порушень, до посилення (або ослаблення) процесів ерозії і абразії. В результаті змінюються величини і характер розподілу природних напружень, міцностні і фільтраційні властивості масивів заводнених порід. Ці напруження в ослаблених зонах часто перевищують по величині міцність самих порід. Таким чином створюються умови для утворення зсувів. Встановлено, що в межах рівнинних, передгірних і гірничо-складчастих областей близько 60 % даних процесів, за інших рівних умов, доводяться на максимально підняті в сучасному рельєфі (для регіону) структурні блоки; тільки 6 % цих явищ зафіксовано в межах якнайменше піднятих блоків [8]. Причому в першому випадку об'єми зсувів складають сотні тисяч і мільйони кубічних метрів, а в другому основна маса накопичень має об'єми тисячі, десятки тисяч кубічних метрів. Структурні

блоки в часі і в просторі випробовують нерівномірні, імпульсні, диференційовані переміщення, а їх стародавні поверхні вирівнювання мають перекося. Ця особливість неотектонічних переміщень виразно відображається на інтенсивності розвитку зсувів в межах всіх вивчених регіонів. Вона сформульована в двох слідствах закону [9]:

– періодам різкої активізації неотектонічних переміщень структурних блоків земної кори відповідають періоди різкої активізації розвитку зсувних і обвальних процесів;

– максимальна кількість зсувів і обвалів приурочено до ділянок схилів, розвинених в межах структурно-тектонічних блоків з максимальною швидкістю новітніх здимань; на межі двох суміжних тектонічних блоків.

Існує велика кількість професійних комплексів які знаходять коефіцієнт стійкості укосу: ОТКОС (входить до комплексу програм SCAD Office), PLAXIS, «Стійкість укосу» (пакету прикладних програм «Еспрі»), Phase2 та інші. Але не всі ці комплекси відшукують деформований стан із визначенням поверхні ковзання.

Розрахунок схилу на основі гіпотези круглоциліндричної поверхні ковзання проводиться в широко використовуваному програмному продукті «Стійкість укосу» з пакету прикладних програм «Еспрі», в якому також реалізується побудова кривої ковзання.

Спеціалізована програма розрахунку стійкості схилу, реалізована на мові «Фортран», в основі якої лежить гіпотеза про прямолінійну поверхню ковзання також будує поверхню ковзання із мінімальним значенням K_{zc} .

Розрахунок стійкості схилу згідно критерію Кулона-Мору проводиться в програмному комплексі «Phase2», який може відображати і деформований стан схилу.

Аналіз стійкості згідно теорії граничної рівноваги на методах Федоровського-Курілло проводиться в програмі ОТКОС комплексу «SCAD Office» без побудови деформованого стану.

Виконані дослідження показали, що початкова умова розглянутої задачі: $K_{zc} = 1$ при $h = h_{zc}$ не дотримується або дотримується з наявністю певної погрішності (всі значення K_{zc} перевищують 1), а всі розглянуті методи мають істотну різницю в результатах.

Проблему пошуку деформованого стану зсувонебезпечного схилу вирішує MCE, реалізований в програмному комплексі PLAXIS. Цей комплекс орієнтований на рішення складних геотехнічних задач, що виникають на етапах будівництва, експлуатації і реконструкції споруди і є пакетом прикладних обчислювальних програм для скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану системи «основа – фундамент – споруда».

В роботі [10] для оцінки загальної стійкості схилу використовувався метод Phi-c-reduction, при якому виконується пропорційне зниження міцностних характеристик до того моменту, поки не відбудеться руйнування.

За допомогою програмного комплексу PLAXIS можливо визначити максимальні величини переміщень в ґрунтах, їх напрям і характер, а також загальну стійкість схилу і лінію ковзання зсуву.

Програма ОТКОС входить в програмний комплекс SCAD Office і призначена для визначення коефіцієнта запасу стійкості укосів і схилів. Механізм втрати стійкості приймається як механізм ковзання масиву, що сповзає відносно нерухомої частини укосу. Опір зрушенню по поверхні ковзання розраховується для статичних умов та уздовж всієї поверхні, витримується критерій руйнування ґрунту, що приймається у вигляді закону Кулона. Реальне напруження зсуву, що знаходиться в ході розрахунку, порівнюється з граничним опором зрушенню, і результат цього порівняння виражається у вигляді коефіцієнта запасу стійкості K_{zc} .

Початковими даними для програми є розміри обвальної ділянки схилу, характеристики ґрунтів, положення і характеристики свердловин, навантаження, діючі на вказані ділянки схилу, значення сейсмічності майданчика в балах, прискорення в ґрунті при сейсмічній дії і кут додатку сейсмічного навантаження.

За допомогою програми ОТКОС можливо розрахувати K_{zc} за декількома розповсюдженими методами і побудувати лінію ковзання. Серед переваг програми ОТКОС слід зазначити простоту використання, досить високу точність визначення коефіцієнта запасу стійкості. Але, не дивлячись на це, ОТКОС програє PLAXIS тому, що не в змозі обчислювати деформований стан. В роботі [10] зроблено висновок, що ОТКОС можна застосовувати як допоміжну

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

програму для оперативного визначення лінії ковзання і коефіцієнта стійкості схилу, в той час, як програмний комплекс PLAXIS можна широко використовувати для повного аналізу стійкості схилів.

Результати

До моделювання був прийнятий реальний зсувонебезпечний схил, приурочений до парку Зелений Гай (Рибальська балка, м. Дніпро), складений неоднорідними та шаруватими грунтами. Дослідження проводились із автоматичним визначенням параметрів заколу, тобто програма ОТКОС після ряду ітерацій сама визначила наявність та координати заколу.

Оскільки задачею розрахунків є аналіз впливу розташування шару по висоті схилу на його стійкість, то варіювали положення шару по висоті. Пропонувалося три положення шару по висоті: Варіант 1 – 1 метр від поверхні (шар біля поверхні); Варіант 2 – 7 метрів від поверхні (шар посередині схилу); Варіант 3 – 15 метрів від поверхні (шар в підшві схилу). Варіант 3 найбільш відповідає реальній інженерно-геологічній будові схилу.

Фізико-механічні властивості ґрунтів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості ґрунтів схилу

Ґрунт	Кут внутр. тертя φ , град	Питоме зчеплення C , кПа	Питома вага сухого ґрунту γ_d , кН/м ³	Питома вага водонасич. ґрунту γ_w , кН/м ³
Супіски лесовидні	20	24	18,9	19,8
Суглинки лесовидні	22	35	19,0	20,7
Суглинки лесовидні	24	37	20,0	19,7

Окрім аналізу стійкості на основі програми ОТКОС, вказані три варіанти також були розраховані в ПОК SCAD для визначення деформованого стану та його аналізу. Відстані для визначення інтервалів початку і закінчення зсуву для всіх варіантів однакові: $r_1=10$ м; $r_2=20$ м; $r_3=60$ м; $r_4=75$ м.

Результати розрахунків за допомогою програми ОТКОС наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку параметрів зсуву різними методами

Параметр	Назва методу								
	Феленіуса			Бішопа (спрощений)			Корпуса інженерів № 1		
	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
Коефіцієнт стійкості K_{zc}	1,458	1,428	1,321	1,527	1,490	1,378	1,519	1,476	1,361
Координата x початку поверхні ковзання, м	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,0	20,0	20,0	20,0
Координата z початку поверхні ковзання (глибина заколу), м	0	0	0	0	0	0	0,717	1,075	0,717
Координата x закінчення поверхні ковзання, м	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	62,7	62,7	62,6
Параметр	Назва методу								
	Лоува і Карафайта			Янбу (спрощений)			Янбу (коригований)		
	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
Коефіцієнт стійкості K_{zc}	1,439	1,411	1,328	1,374	1,343	1,260	1,464	1,424	1,327
Координата x початку поверхні ковзання, м	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Координата z початку поверхні ковзання (глибина заколу), м	1,792	1,433	1,075	2,15	1,433	1,383	1,792	1,433	1,075
Координата x закінчення поверхні ковзання, м	63,0	63,0	62,3	63,0	62,73	61,73	62,73	62,73	62,29

© О. Л. Тютюкін, О. І. Дубінчик, В. Р. Кільдєєв, 2018

Характер розвитку поверхонь (ліній) ковзання методів Феленіуса, Бішопа (спрощений) і Корпуса інженерів № 1 майже ідентичний, тобто положення початку і закінчення лінії різняться незначно (як і в методах Лоува і Карафайта та Янбу (коригований)), в межах 0,3...1,27 м.

Важливим показником, який характеризує адекватність обраного методу реальному схилу, є координата z початку поверхні ковзання, тобто глибина заколу. В методах Феленіуса і Бішопа (спрощений) вона дорівнює нулю, оскільки ці два методи базуються на круглоциліндричних поверхнях без можливості автоматичного визначення місця заколу, а в методах Корпуса інженерів № 1, Лоува і Карафайта, Янбу (спрощений), Янбу (коригований) має значну варіацію – 0,717...1,792 м. Крім того, метод Янбу (спрощений) показує аномальне значення (2,15 м), оскільки глибина заколу понад 2,0 метри на реальному схилі не спостерігається.

Усі шість методів свідчать про зменшення коефіцієнту стійкості K_{zc} при зануренні шару по глибині схилу, причому варіант 3 є варіантом з найнижчим K_{zc} у всіх методах (рис. 2).

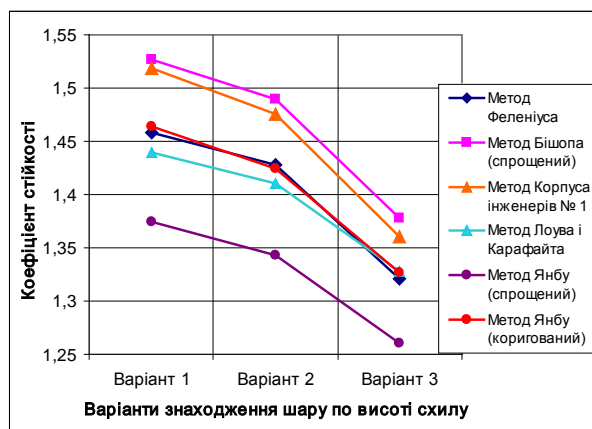


Рис. 2. Діаграма закономірностей зміни коефіцієнта стійкості K_{zc} в шести методах для трьох варіантів розташування шару по висоті

Найнижче значення K_{zc} надає метод Янбу спрощений ($K_{zc} = 1,260$ для варіанту 3), найбільше – метод Лоува і Карафайта ($K_{zc} = 1,519$ для варіанту 1). Середні значення K_{zc} для варіанту 1 – 1,464; для варіанту 2 – 1,429; для варіанту 3 – 1,329. В подальшому варіант 3 приймається за основний при дослідженні впливу потужності шару.

Після визначення з високим рівнем достовірності поверхні ковзання за допомогою програми ОТКОС, проведено математичне моделювання зсувонебезпечного схилу, складеного неоднорідними та шаруватими ґрунтами. Для цього був використаний схил, який брав участь у математичному моделюванні стійкості схилу за допомогою програми ОТКОС, однак модель є просторовою на основі об'ємних елементів. На рис. 3 наведена розрахункова схема схилу, яка реалізована у комплексі SCAD.

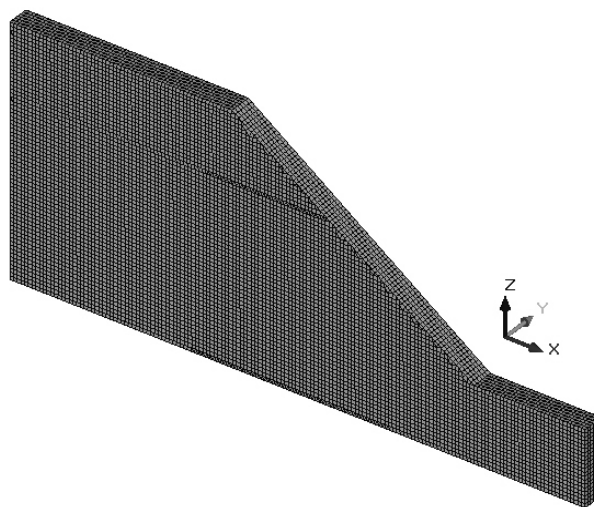


Рис. 3. Розрахункова схема схилу

Загальна кількість вузлів схеми: варіант 1 – 53011 штук (задача середньої розмірності), кількість скінченних елементів – 44934 штук; варіант 2 – 53060 штук (задача середньої розмірності), кількість скінченних елементів – 88 704 штук; варіант 3 – 45006 штук (задача середньої розмірності), кількість скінченних елементів – 45564 штук. Скінченні елементи у схемі прийняті сумісними, тобто всі вузли сусідніх елементів співпадають, що позитивно впливає на точність рішення. Розміри скінченних елементів коливаються у межах $0,45 \times 0,5 \times 0,5$ м до $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м, тобто дискретизація схеми достатньо мілка, що є особливістю автоматичної триангуляції. У схемі застосовані як тетраедричні скінченні елементи (у моделюванні укусу), так і паралелепіпеди (у моделюванні тіла схилу та основи).

Представлений шаруватий масив повторює реальний схил. Фізико-механічні властивості ґрунтів обрані із таблиць у відповідності із даними звіту про інженерно-геологічні дослі-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дження (вологість, консистенція, число розкошування, число пластичності) (табл. 4).

Таблиця 4

Властивості ґрунтів для моделей SCAD

Ґрунт	Модуль пружності E, МПа	Коефіцієнт Пуасона, μ	Питома вага водонасич. ґрунту γ_w , кН/м ³
Супіски лесовидні	17,5	0,3	19,8
Суглинки лесовидні	27,0	0,3	20,7
Суглинки лесовидні	29,0	0,3	19,7

На схему накладені граничні умови: понизу моделі заборона переміщення по всіх трьох осях X, Y та Z, по боках основи – заборона по осях X та Y, по поперечних сторонах моделі – Переміщення по осі X

заборона по осі Y. На верх та відкоси моделі граничні умови не накладалися. Такі граничні умови найбільш повно відповідають реальній роботі схилу.

При розрахунку методом скінченних елементів був застосований мультифронтальний метод розкладення матриці жорсткості із автоматичною оптимізацією ширини стрічки, як найбільш прогресивний метод роботи із матрицями, який застосовано у комплексі SCAD. Результатами розрахунку являються загальні переміщення та напруження моделі, причому нижченаведені результати показують характерну картину їх розподілення у схилі. На рис. 4 наведені результати розрахунку методом скінченних елементів.

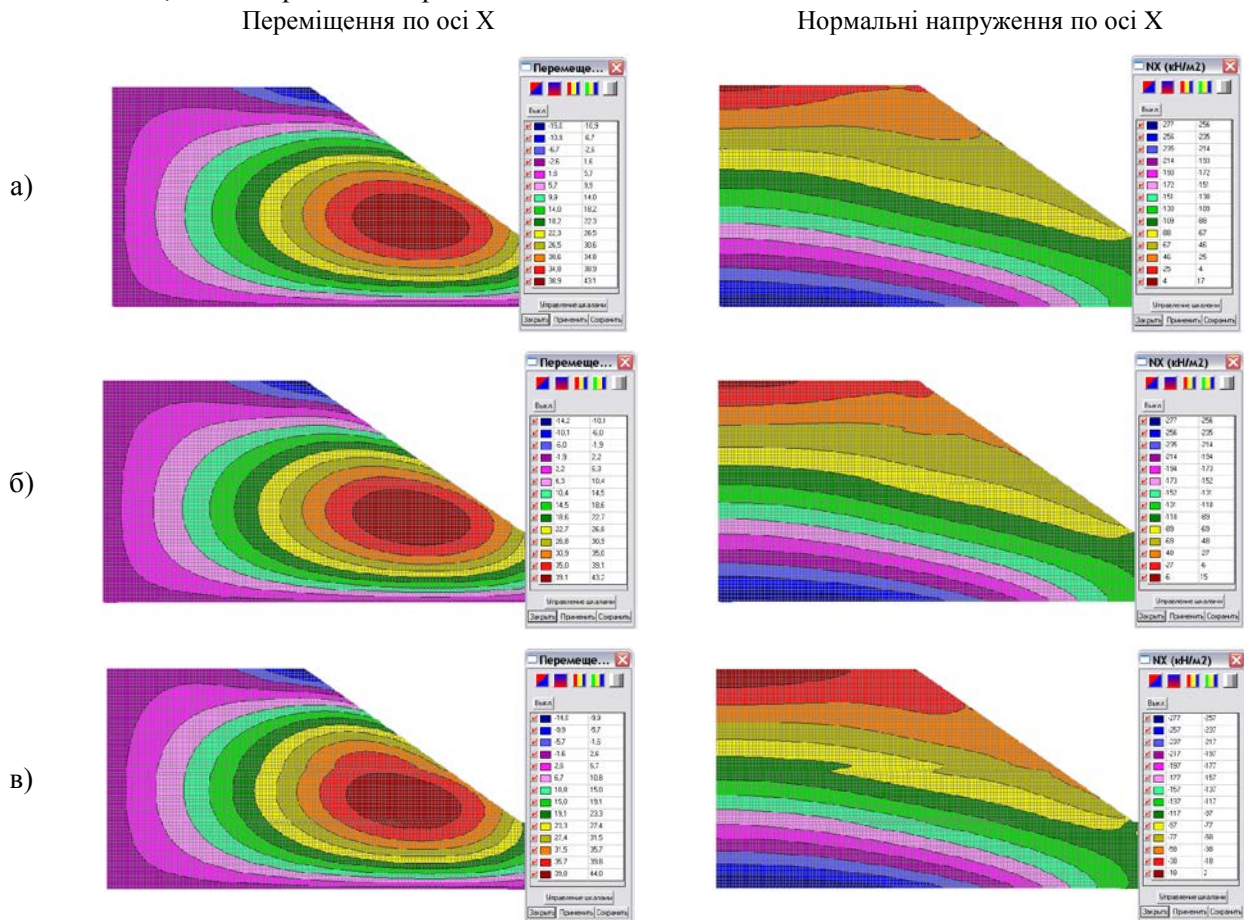


Рис. 4. Результати розрахунку схилу:

а) варіант 1; б) варіант 2; в) варіант 3

Усі геометричні розміри та загальні навантаження на модель зберігаються та контролюються у ході виконання розрахунку, що можливе у застосованому розрахунковому комплексі. Протоколи виконання розрахунку схилу на міцність, який свідчить про відсутність помилок у вихідних даних, представлено мовою оригіналу комплексу SCAD.

Висновки

При проведенні аналізу зсувонебезпечних територій Придніпров'я, а також проблеми визначення стійкості природних схилів, що складені неоднорідними та шаруватими ґрунтами, та після критичного огляду, обрано, що комплексне математичне моделювання стійкості на основі методик граничної рівноваги та міцності за допомогою методу скінченних елементів є найбільш адекватним задачі, що розв'язується.

Доведено, що саме комплексний аналіз коефіцієнту стійкості K_{zc} із дослідженням кривої ковзання в комплексі ОТКОС та напружено-деформованого стану в комплексі SCAD надає найбільш репрезентативну інформацію про поведінку природних схилів, що складені неоднорідними та шаруватими ґрунтами.

Аналіз компонент деформацій та напружень (рис. 4) свідчить про те, що зміна положення шару по висоті неоднорідного або шаруватого схилу якісно значно впливає на горизонтальну компоненту напружень, оскільки на границях шарів відмічається зміна ізоліній, що пояснюється різними значеннями модулю пружності шарів, що взаємодіють. Кількісно розподіл горизонтальних переміщень також змінюється, причому при зміні положення шару по висоті схилу ця компонента зменшується. Інший розподіл спостерігається для вертикальних переміщень (не наведені задля економії місця), оскільки вони збільшуються (рис. 5).

Аналіз напруженого стану дозволяє зробити наступні висновки. Нормальні напруження по осі X (горизонтальні) в зоні переходу шарів мають значні зміни ізоліній, які характеризуються переломами. Максимальні значення (рис. 4) між варіантами не змінюються і для трьох варіантів складають $-0,277$ МПа. Ідентичний характер змін демонструють нормальні напруження по осі Z (вертикальні) (не наведені задля економії місця).

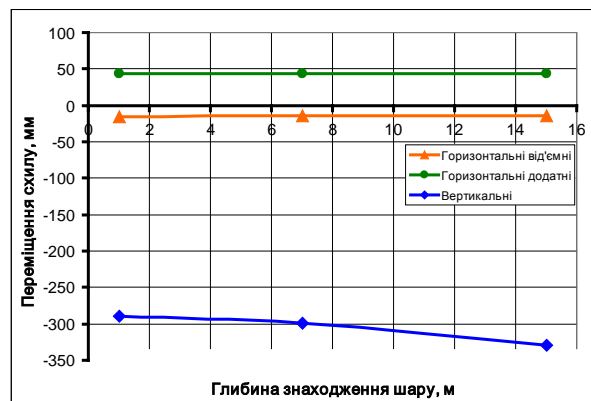


Рис. 5. Діаграма деформованого стану зсувонебезпечного схилу при зміні положення шару по висоті

Максимальні значення між варіантами не змінюються, значення напружень для трьох варіантів складають $-0,646$ МПа. Аналіз дотичних напружень, які є найбільш впливовими для виникнення зсуву, також особливих побоювань не викликає, оскільки вони в приукопній зоні (не наведені задля економії місця) незначні і складають: для варіанту 1 – $-0,029$ МПа, для варіанту 2 – $-0,031$ МПа, для варіанту 3 – $-0,004$ МПа. Важливою закономірністю є те, що при зануренні шару по висоті неоднорідного схилу дотичні напруження значно змінюються кількісно і якісно. Загальним висновком аналізу впливу потужності шару на стійкість схилу є те, що зміна такого чинника максимально впливає на вертикальні переміщення. Причому збільшення цієї компоненти пов'язане із зміною положення шару по висоті, який розвиває максимальні деформації в пасивній зоні зсувонебезпечного схилу у варіанті 3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік [Текст]. – Київ : Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, 2015. – 356 с.
2. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні в 2014 році [Текст]. – Київ : Міністерство надзвичайних ситуацій в Україні, 2015. – 365 с.
3. Петренко, В. Д. Оцінка стійкості природних схилів методами математичного моделювання в програмі «ОТКОС» [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, О. І. Дубінчик, В. Р. Кільдєєв // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 8. – С. 23-32.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

4. Баранов, И. В. Определение момента потери устойчивости при расчетах склонов и откосов [Текст] / И. В. Баранов, Ш. Р. Незамутдинов, А. И. Сапожников. – Москва : 1989. – 254 с.
5. Малышев, М. В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений [Текст] / М. В. Малышев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 136 с.
6. Тихвинский, И. О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов [Текст] / И. О. Тихвинский. – Москва : Наука, 1988. – 142 с.
7. Гинзбург, Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции [Текст] / Л. К. Гинзбург. – Москва : Стройиздат, 1979. – 80 с.
8. Емельянова, Е. П. Основные закономерности оползневых процессов [Текст] / Е. П. Емельянова. – Москва : Недра, 1972. – 281 с.
9. Маслов, Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними) [Текст] / Н. Н. Маслов. – Москва : Стройиздат, 1977. – 320 с.
10. Левченко, С. О. Сравнительный анализ использования программ PLAXIS и ОТКОС при оценке устойчивости оползневого склона с учетом сейсмических воздействий [Текст] / С. О. Левченко // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Київ : ДП НДІБК, 2012, – Вип. 76. – С. 601-606.
11. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов. Основные компоненты грунта и их взаимодействие [Текст] / М. Н. Гольдштейн. – Москва : Стройиздат, 1971. – 375 с.
12. Музаев, И. Д. Математическое моделирование некоторых опасных экзогенных и гидравлических процессов [Текст] / И. Д. Музаев, В. Г. Созанов // Вычислительные технологии. – № 3. – Т. 1. – 1996. – С. 66-71.
13. Оползни. Исследование и укрепление. [Текст] / Под ред. Шустера Р. и Кризека Р. – Москва : Мир, 1981. – 368 с.
14. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Київ : Сталь, 2002. – 600 с.
15. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Київ : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
16. Купрій, В. П. Моделювання напружено-деформованого стану кріплення глибокого котловану [Текст] / В. П. Купрій, Д. В. Тютюкін // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 89-95.
17. Сивцов, А. А. Алгоритм расчета устойчивости крепи вертикальных горных выработок с учетом их контактного взаимодействия с массивом пород [Текст] / А. А. Сивцов, Г. В. Десятых // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 167-171.
18. Шаповал, А. В. Полевой метод определения упругих и реологических свойств грунта [Текст] / А. В. Шаповал, В. В. Крысан, В. Г. Шаповал, Е. В. Нестерова // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 229-233.
19. Гуслиста, Г. Є. Тестування методики спільного статичного розрахунку «споруда – ґрунтовий масив» [Текст] / Г. Є. Гуслиста, Д. О. Банніков // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 10-15.
20. Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., Boyce G. M. Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons, – New York : 2002, 216 p.
21. Albataineh, N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. – Ohio, United States: The University of Akron, 2006, 126 p.
22. Britto A.M., Gunn M.J. Critical State Soil Mechanics via Finite Elements. – Chichester: Ellis Horwood Limited, 1990, 486 p.
23. Huang Ching-Chuan, Lo Chien-Li, Jang Jia-Shiun, Hwu Lih-Kang. Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge. Engineering Geology. №101, 2008, pp. 134-145.

А. Л. ТЮТЬКИН^{1*}, О. И. ДУБИНЧИК², В. Р. КИЛЬДЕЕВ³

^{1*} Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта olga_dubinichik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

³ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ORCID 0000-0003-2803-8150

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УСТОЙЧИВОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ СКЛОНОВ, СЛОЖЕННЫХ НЕОДНОРОДНЫМИ И СЛОИСТЫМИ ГРУНТАМИ

Цель. В рамках теории предельного равновесия выполнить математическое моделирование устойчивости оползневого склона, сложенного неоднородными и слоистыми почвами с помощью программы ОТКОС для определения параметров устойчивости природного склона. **Методика.** Для достижения поставленной цели рассмотрены и проанализированы оползневые участки Приднпровья, природные и техногенные факторы, активизирующие оползневые процессы. Сделан сравнительный анализ комплекса ОТКОС с существующими профессиональными комплексами. Выполнены расчеты параметров сдвига различными методами. **Результаты.** Определены расчетные параметры сдвига: коэффициент запаса устойчивости, координата начала поверхности скольжения, глубина закола, координата окончания поверхности скольжения. Построены поверхности скольжения по разным методам расчета, диаграммы закономерностей изменения коэффициента устойчивости, диаграмма деформированного состояния оползнеопасного склона, приуроченного к парку Зелёный Гай м. Днепр. **Научная новизна.** Получена возможность прогнозировать поведение естественных склонов, сложенных неоднородными и слоистыми почвами в процессе их активации. **Практическая значимость.** Разработана методика определения параметров устойчивости склона с помощью комплекса ОТКОС и основы практической работы с комплексом SCAD для анализа деформированного состояния естественного склона.

Ключевые слова: природный склон; неоднородные и слоистые почвы, оползневой участок; инженерно-геологический разрез; устойчивость склона; поверхность скольжения; математическое моделирование; комплекс ОТКОС; коэффициент устойчивости

О. Л. TIUTKIN^{1*}, О. І. DUBINCHIK², V. R. KILDEEV³

^{1*} Department «Bridges and tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Department «Bridges and tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail olga_dubinchik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

³ Department «Bridges and tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53

ANALYSIS OF STABILITY RESULTS OF NATURAL SLOPES COMPOSED OF INHOMOGENOUS AND LAYERED SOILS

Purpose. In the framework of the theory of limit equilibrium, perform mathematical modeling of the landslide slope stability composed of heterogeneous and layered soils using the OTKOS program to determine the stability parameters of a natural slope. **Methodology.** To achieve this goal, the landslide areas of the Dnipro area, natural and man-made factors that activate landslide processes, are considered. A comparative analysis of the complex OTKOS with the existing professional complexes was conducted. Slide parameters by various methods were calculated. **Findings.** The calculated parameters of the slide are determined: the safety factor of the stability, the coordinate of the origin of the slide surface, the depth of the fishweir, the coordinate of the sliding surface end. The sliding surfaces according to different calculation methods are constructed, with the diagrams of the regularities of the stability coefficient change, the diagram of the deformed state of the landslide dangerous slope, relevant to the park Zelenyi Gai of Dnipro town. **Originality.** The possibility to predict the behavior of natural slopes composed of heterogeneous and layered soils during their activation has been received. **Practical value.** The technique for determining the slope stability parameters with the aid of the OTKOS complex and on the basic practical work with the SCAD complex for analyzing of the deformed state of the natural slope has been developed.

Keywords: natural slope; heterogeneous and layered soils, landslide area; engineering and geological section; slope stability; sliding surface; math modeling; complex OTKOS; coefficient of stability

REFERENCES

1. *Analitichnyj oghljad stanu tekhnoghennoi ta pryrodnoi bezpeky v Ukraini za 2015 rik* [Analytical review of the state of technogenic and natural safety in Ukraine for 2015]. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychajnykh sytuacij, Ukrainjskij naukovo-doslidnyj instytut cyvilnogho zakhystu [State Service of Ukraine for Emergencies, Ukrainian Research Institute of Civil Protection]. Kyjiv. 2015. 356 p.
2. *Natsionalna dopovid pro stan tekhnoghennoi ta pryrodnoi bezpeky v Ukraini v 2014 rotsi* [The National Report on the State of Techno and Natural Safety in Ukraine in 2014]. Kyjiv, Ministerstvo nadzvychajnykh sytuatsii Ukrainy Publ., 2015, 365 p.
3. Petrenko V. D., Tjutjkin O. L., Dubinchyk O. I., Kiljdjejev V. R. *Ocinka stijkosti pryrodnykh skhyliv metodamy matematychnogho modenljvannja v prohrami «OTKOS»* [Estimation of stability of natural slopes by methods of mathematical modulation in the program "OTKOS"]. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2015, issue 8, pp. 23-32.
4. Baranov I. V. *Opredelenie momenta poteri ustoychivosti pri raschetakh sklonov i otkosov* [Defining moment of loss of stability in calculations of slopes and slopes]. Moscow, 1989. 254 p.
5. Malyshev M. V. *Prochnost' gruntov i ustojchi-vost' osnovanij sooruzhenij* [Strength of soils and stability of the foundations of structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1980. 136 p.
6. Tihvinskij I. O. *Ocenka i prognoz ustojchi-vosti opolznevykh sklonov* [Assessment and prognosis of the stability of landslide slopes]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 142 p.
7. Ginzburg L. K. *Protivoopolznevyje uderzhi-vayushchie konstrukcii* [Anti-landslide retention structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1979. 80 p.
8. Emel'yanova E. P. *Osnovnye zakonomernosti opolznevykh processov* [Basic regularities of landslide processes]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 281 p.
9. Maslov N. N. *Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi)* [Soil mechanics in construction practice (landslides and their control)]. Moscow, Strojizdat Publ., 1977. 320 p.
10. Levchenko, S. O. *Sravnitel'nyj analiz yspol'zovannja programm PLAXIS y OTKOS pry ocenke ustojchivosti opolznevogho sklona s uchetom sejsmycheskykh vozdeystvij* [Comparative analysis of the use of PLAXIS and OTKOS programs in assessing the stability of the landslide slope, taking into account seismic impacts]. *Budivelnj konstrukcii. Mizhvidomchij naukovo-tekhnichnyj zbirnyk naukovykh pracj (budivnytvo)*. Kyjiv, DP NDIBK Publ., 2012, issue 76, pp. 601-606.
11. Goldshteyn M. N. *Mekhanicheskie svoystva gruntov. Osnovnye komponenty grunta i ikh vzaimodeystvie* [The mechanical properties of soils. The main components and their interaction soil]. Moscow, Strojizdat Publ., 1971. 375 p.
12. Muzaev I. D., V. G. Sozanov *Matematicheskoe modelirovanie nekotorykh opasnykh ekzogennykh i gidravlicheskich protsessov* [Mathematical modeling of same dangerous exogenous and hydraulic processes] *Vychislitelnye tekhnologii*. № 3. Vol. 1. 1996. pp. 66-71.
13. *Opolzni. Issledovanie i ukreplenie*. [Landslides. Research and strengthening.]. Moscow, Mir Publ., 1981. 368 p.
14. Perelmutter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost ikh analiza* [Computational models of structures and the possibility of their analysis]. Kyjiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
15. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Perelmutter A. V. i dr. *SCAD dlya polzovatelya* [SCAD user]. Kyjiv, VVP «Kompas» Publ., 2000. 332 p.
16. Kuprii V. P., Tjutjkin D. V. *Modeliuvannja napruzhenno-deformovanoho stanu kriplennia hlybokoho kot-lovanu* [Simulation of the stress-deformed state of deep recess mounting]. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 89-95.
17. Sivtsov A. A., Desyatykh G. V. *Algoritm rascheta ustoychivosti krepj vertikalnykh gornykh vyrabotok s uchetom ikh kontaktного vzaimodeystviya s massivom porod* [Algorithm for calculating the stability of the support of vertical mine workings, taking into account their contact interaction with the rock massif]. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 167-171.
18. Shapoval A. V., Krysan V. V., Shapoval V. G., Nesterova Ye. V. *Polevoy metod opredeleniya uprugikh i reologicheskikh svoystv grunta* [Field method for determining the elastic and rheological properties of soil]. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 229-233.
19. Huslysta, H. Ye., Bannikov D. O. *Testuvannia metodyky spilnogo statychnoho rozrakhunku «sporuda – gruntovyi masyv»*. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 10-15.

20. Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., Boyce G. M. *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, New York, 2002, 216 p.
21. Albataineh N. *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. Ohio, United States: The University of Akron, 2006, 126 p.
22. Britto A. M., Gunn M. J. *Critical State Soil Mechanics via Finite Elements*. Chichester. Ellis Horwood Limited, 1990, 486 p.
23. Huang Ching-Chuan, Lo Chien-Li, Jang Jia-Shiun, Hwu Lih-Kang Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge. *Engineering Geology*. № 101, 2008, pp. 134-145.

Надійшла до редколегії 17.10.2018.

Прийнята до друку 26.11.2018.