

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.131.53

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, О. І. ДУБІНЧИК², В. Р. КІЛЬДЄЄВ³, Р. Б. НОВІК⁴

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

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

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

⁴ Кафедра військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 722 61 10, ел. пошта r.b.novik@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2571-6641

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ

Мета. Аналіз методів розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів і подальший розвиток їх в європейських нормативних документах. **Методика.** Розглянуті варіанти методів розрахунку стійкості укосів різними авторами. В варіаційних методах приймалися різні визначення функціонала і потім знаходиться його мінімум. В способі М. М. Герсєванова функціонал являв собою суму горизонтальних сил, які діяли на масив із гіпотетичного ґрунту. В методі Ю. І. Соловйова функціонал – це відношення роботи сил, які утримують схил до роботи сил, які зсувають на переміщення. В способі Копаші – це сума вертикальних навантажень, які діють на поверхню ковзання в сипучому середовищі. В скороченому методі Терцагі шукається мінімум відношення моменту сил, які утримують до моменту сил, які зсувають укис. **Результати.** Дослідженнями міцності та стійкості схилів успішно займалися вітчизняні та зарубіжні вчені. Це є складна задача, що визначається необхідністю одночасного врахування двох основних чинників: рельєфу і гравітаційної сили. Основним для визначення стійкості схилів є уявлення про те, що напружений стан порід у верхній частині земної кори формується діючими повсюдно гравітаційною і тектонічною силами. Вагомий внесок в перерозподіл напружень вносить рельєф земної поверхні. **Наукова новизна.** В Єврокод 7 дається рекомендація можливості виконати попередній розрахунок природного укусу з використанням характеристичних значень, який дає приблизне уявлення про величину загального коефіцієнта надійності до початку проектування. **Практична значимість.** Часто як будівельні майданчики використовуються території, безпосередньо розташовані на схилах. Основами для фундаментів будівель і споруд є ґрунтові масиви, які знаходяться в складних інженерно-геологічних умовах. Зсуви є геологічним процесом, який виникає на будь-якій ділянці схилу або укусу, внаслідок порушення рівноваги порід при збільшенні крутизни схилу в результаті підмиву водою, ослаблення міцності порід при вивітрюванні або перезволоженні опадами і підземними водами, дією сейсмічних поштовхів, будівельною і господарською діяльністю людей. Визначення коефіцієнта стійкості є необхідною умовою для висновку про можливість використання схилів для будівництва.

Ключові слова: зсувонебезпечний схил; зсув; поверхня ковзання; методи розрахунку стійкості схилів; довготривала стійкість зсувних схилів

Вступ

Зсув являє собою відокремлену від схилу масу порід, що сповзає вниз по похилій площині, не втрачаючи зв'язності та монолітності. Зсув – це рухома маса гірських порід. Зазвичай вона складається з пухкого ґрунту, який вже не здатний витримувати навантаження власної ваги, через що відбувається зміщення.

Це геологічне явище дуже небезпечне, оскільки такі маси гірських порід можуть руйнува-

ти собою різні об'єкти, накриваючи їх. Існує безліч причин, через які може виникати це явище. Так, зсуви часто утворюються на різних схилах, берегах водойм, дні морів. Хоча можуть спостерігатись і в інших місцях. Причому утворитися вони можуть самі по собі, а можуть і під зовнішнім впливом (Зоценко, Коваленко, Хілобок, & Яковлев, 2004).

Зволоження та розмивання гірських порід дощовою водою є найчастішою причиною зсувів. Адже внаслідок цього ґрунт стає більш ва-

жким та рухливим. Ось і відбувається його зміщення під впливом власної ваги. Підмивання берегів водою також є причиною зсувів. Особливо це характерно для річок, оскільки вода в них рухається швидко. Розмивання гірських порід може відбуватися і зсередини. Часто геологічні об'єкти складені водоносними і водотривкими породами, які чергуються. Через це підземні води впливають на ґрунт.

Землетруси – ще одна причина утворення зсувів. Викликаючи коливання літосфери, землетруси провокують появу зсувів (ДБН В. 1.1-12: 2006, 2007) (рис. 1). Подібні зсуви виникають і на дні морів чи океанів. З'являються вони під впливом води та різних процесів, що відбуваються у водоймищі. Такі зсуви є наймасштабнішими і найсильнішими. Вони можуть стати причиною утворення цунамі, що є вкрай небезпечним.



Рис. 1. Зсув в результаті землетрусу 2001 року в Сальвадорі

Надмірне навантаження на гірські породи також може викликати їхній рух. Найчастіше відбувається це внаслідок будівництва та господарської діяльності.

Зсуви є причиною руйнування доріг, будівель, комунікацій та різноманітних важливих об'єктів (рис. 2). Також серйозну шкоду завдає це явище і сільськогосподарським угіддям (ДБН В.1.1-24:2009, 2010).

За потужністю зсувного процесу, тобто за залученням в рух мас гірських порід, зсуви діляться на: 1) малі – до 10 тис. м³; 2) середні – 10...100 тис. м³; 3) великі – 100...1000 тис. м³; 4) дуже великі – понад 1000 тис. м³.



Рис. 2. Зсув в Японії

Поверхня, по якій зсув відривається і переміщається вниз, називається поверхнею ковзання або зміщення. По глибині залягання поверхні ковзання зсуви бувають: 1) поверхневі – не глибше 1 м – спливи, спливи; 2) дрібні – до 5 м; 3) глибокі – до 20 м; 4) дуже глибокі – глибше 20 м.

За положенням поверхні зсуву і складу зсувного тіла зсуви діляться на (Petrenko, Tiutkin, Ihnatenko, & Kovalchuk, 2018):

а) асеквентні – виникають у однорідних нешаруватих товщах порід; положення криволінійної поверхні ковзання залежить від тертя і зміщення ґрунтів;

б) консеквентні (ковзаючи) – утворюються при неоднорідному складанні схилу; зсув відбувається по поверхні розділу шарів або по тріщинах;

в) інсеквентні – виникають також при неоднорідному складі схилу, але поверхня зміщення перетинає шари різного складу; зсув врізається в горизонтальні або похилі шари.

Зсуви, що утворюються на природних схилах та у схилах виїмок, поділяють на групи (Abramson, Lee, Sharma, & Boyce, 2002; Bromhead, 2005).

Група 1. *Структурні зсуви* (структура – однорідні зв'язні глинисті породи: глини, суглинки, глинисті мергелі). Причини виникнення: надмірна крутість схилу (укосу); переванта-

ження верхньої частини схилу різними відвалами та інженерними спорудами; порушення цілісності порід схилу траншеями, нагірними канавами чи ярами; підрізування схилу біля його підосви; зволоження підосви схилу.

Характерні місця виникнення зсувів: у штучних земляних спорудах із крутими укосами; у виїмках, що утворюються в однорідних глинистих ґрунтах на водороздільних ділянках височини; у глибоких розрізах для відкритої розробки родовищ корисних копалин; у насипах, відсипаних такими ж породами при перезволоженні ґрунтово-рослинного шару та глинистих порід, що залягають біля денної поверхні.

Група 2. *Контактні (зповзаючі) зсуви* – зв’язні глинисті породи, що залягають у вигляді пластів з добре вираженими площинами напластування (глини, суглинки, мергелі, нещільні вапняки, неміцні глинисті сланці, лес, лесоподібні суглинки та ін.).

Причини утворення: надмірно круте падіння шарів; перевантаження схилу відвалами чи різними земляними спорудами; порушення цілісності порід на схилі траншеями чи нагірними канавами; підрізування схилу; змочування площин напластування підземними водами.

Характерні місця виникнення зсувів: на природних схилах височин та долин річок (на косогорах); у схилах виїмок, що складаються з шаруватих порід, у яких падіння шарів спрямоване у бік схилу або до виїмки.

Залежно від висоти розташування поверхні ковзання над підосвою схилу (укосу, виїмки) та його крутості, зсуви можуть переходити в обвали з подальшим їх перекиданням до нижнього краю поверхні ковзання.

Зрізуючі зсуви. Причини утворення: ті ж, що і при контактних зсувах, але в умовах глибших порушень гірських порід тектонікою, тріщинами.

Характерні місця виникнення зсувів: на схилах пагорбів і долин річок, складених шаруватими породами, які залягають горизонтально або з ухилом у бік, протилежний схилу. При зсувах, одночасно приходять в рух цілі групи пластів.

Структурно-пластичні (зсуви видавлювання). Причини виникнення: нерівномірне розвантаження гірських порід, що залягають над пластичними глинами (на каналах, у виїмках, у долинах річок, біля берегів морів та озер); пе-

ревантаження схилів (укосів) відвалами та спорудами; зволоження ґрунтів в основі схилів (укосів).

Характерні місця виникнення зсувів: по підосві щільних порід залягають м’які пластичні глини; у верхній частині схилу на поверхні землі (зсувні тераси – уступи з глибокими тріщинами); у підосви схилу (видавлені породи збурюються у вигляді окремих пагорбів або суцільного валу).

Група 3. *Суффозійно-структурні зсуви* – зв’язні глинисті породи, що залягають у чергуванні з пластами та лінзами водоносного піску. Основні причини утворення зсувів – винесення пилуватих та піщаних частинок породи підземними водами: при спадах припливів та відливів морів; при інтенсивному розморожуванні ґрунтів зимового промерзання; під час замочування піщаних порід на схилі за рахунок атмосферних опадів та господарських вод.

Характерні місця виникнення: на схилах пагорбів або в укосах виїмок, складених щільними глинами або важкими суглинками та мореними глинами, що залягають у чергуванні з пластами та лінзами водоносного піску. Зміщення земляних мас відбувається за шаром розрідженого піску без яскраво вираженої поверхні ковзання. Маси землі, що відірвалися, рухаються стрибками, іноді з дуже великою швидкістю.

Суффозійно-пластичні зсуви. Основні причини утворення: ті ж, що і при утворенні суффозійно-структурних зсувів; інтенсивне вивітрювання гірських порід на схилах з утворенням усадкових тріщин на поверхні землі; зволоження та зменшення міцності гірських порід при промерзанні та відтаюванні.

Характерні місця виникнення: такі ж, як і у суффозійно-структурних; зміщення земляних мас відбувається, як правило, при слабо вираженій поверхні відриву маси, що зміщується від основного масиву землі.

Суффозійно-просадочні зсуви. Причини виникнення: винесення підземними водами пилуватих та піщаних частинок із основи лесових порід.

Група 4. *Зсуви в земляних греблях і зсуви залізничних насипів.* Зсуви в земляних греблях та автодорожніх насипах зустрічаються рідко і нічим не відрізняються від зсувів залізничних насипів. Часто саме вони є причиною обмежен-

ня швидкості руху поїздів. Залізничні насипи представляють штучні земляні споруди. Міцність та стійкість їх залежить від: геологічної будови та гідрогеологічних умов основи; матеріалу, з якого вони відсипаються (складу та стану ґрунтів); умов та способів відсипання насипу; від контуру їх поперечного профілю.

Зсув насипу на надійній основі утворюється, як правило, при надмірній крутості схилу, а також за відсутності підготовки на поверхні схилу або основи насипу (при відсутності уступів) і при рясному зволоженні поверхні основи водами, що протікають (при відсутності водовідведення).

Зсуви насипів на ненадійній основі утворюються в насипах, відсипаних на болотах чи заболочених заплавах річок. Зсувні деформації насипів виражаються у відриві однієї частини насипу від іншої, осіданні її по дуже крутій поверхні ковзання та видавлюванні з-під неї м'яких мулистих ґрунтів основи. Видавлений ґрунт розподіляється біля підосви зсувного укосу насипу у вигляді поздовжнього валу.

Зсуви, спричинені зміною природних умов, не починаються раптово. Початковою ознакою зсувних рухів служить поява тріщин на поверхні землі, розривів доріг та берегових укріплень, зміщення дерев та ін. З максимальною швидкістю зсуви рухаються у початковий період, потім їхня швидкість уповільнюється.

Є зсуви, які викликані господарською діяльністю людини. Вони пов'язані з перевантаженням зсувних схилів насипами та різними інженерними спорудами, витіканням води з водопровідних комунікацій, закриттям виходів підземних вод та ін.

За механізмом зсувного процесу, зсуви діляться на два основних види:

Зсуви ковзання. В таких зсувах руйнування проходить у вигляді зсуву ґрунту по доній або декількох поверхнях. Рух зсувного масиву може здійснюватися по криволінійній поверхні (обертальний рух), по плоскій або ломаній лінії.

Особливе положення займають зсуви видавлювання (випирання). В таких зсувах розвивається пластична течія слабого ґрунту під тиском більш міцних порід, які залягають вище. Зміщення супроводжується виникненням тріщин в покривних жорстких породах, які осідають вниз. По підосві зсуву виникають вали

випирання із підстиляючих слабких порід, що підвищує стійкість схилу. Поверхня зміщення в таких зсувах – криволінійна.

Зсуви течії. Форма масиву, який рухається, і характер розподілу швидкостей і зміщень нагадує в'язку рідину. Поверхні ковзання всередині маси, яка рухається, невиразні, або з'являються лише на короткий час, тоді як межа між матеріалом, що рухається і нерухомим може бути чіткою.

Зсуви течії виникають в водонасичених глинистих ґрунтах із слабим зчепленням в умовах миттєвого росту тиску води в порах ґрунту. При цьому відбувається руйнування структури ґрунту. Він набуває характер в'язкої рідини, здатної переміщатися при малих ухилах.

Крім типових зсувів широке розповсюдження мають поверхневі зсуви – обмежені по потужності і площі розповсюдження грязьові потоки. Таке поверхнєве зміщення ґрунту називається опливін, виникає під дією стікаючих по схилу атмосферних опадів в періоди їх інтенсивного випадання або танення (Шустер, & Кризек, (Eds.), 1981).

Мета

Метою наукової статті є аналіз методів розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів і подальший розвиток їх в європейських нормативних документах, а також узагальнений огляд історії розвитку методів визначення стійкості природних схилів і укосів з використанням припущень і варіаційного обчислення, а також рекомендацій Єврокоду 7 стосовно аналізу довготривалої стійкості природних укосів.

Методика і результати

Питання стійкості схилів і укосів завжди цікавили вчених.

М. М. Герсєванов був першим дослідником (1923 р.), який застосував варіаційне обчислення для вирішення проблеми стійкості основ, зокрема для визначення мінімального значення горизонтального навантаження, яке може сприяти стінка набережної (Гольдштейн, 1969).

Задача була поставлена таким чином: із всіх можливих кривих ковзання ґрунту, потрібно знайти таку, при якій масив основи стінки має мінімальний опір зсуву. М. М. Герсєванов ввів

припущення про деякий гіпотетичний ґрунт, який має таку властивість, що по вертикальним перерізам відсутнє тертя і зчеплення, тоді як по інших площинах цей гіпотетичний ґрунт має ті ж самі значення кута внутрішнього тертя і зчеплення, що і реальний ґрунт. Це перше застосування варіаційного методу в механіці ґрунтів. Ця ідея була важливим кроком в розвитку теоретичної механіки ґрунтів.

К. Терцагі в своєму методі розрахунку стійкості схилів (1936 р.) використав ту саму гіпотезу про властивості ґрунтів, яку прийняв М. М. Герсєванов. Він звів цю варіаційну задачу до звичайної задачі на екстремум, яку вирішив в кінцевих різницях шляхом поділу укусу вертикальними перерізами на відсіки кінцевої ширини. Він відмовився від варіаційної постановки задачі, задавшись формою поверхні ковзання, прийняв її за круглоциліндричну, яка проходить через нижню бровку укусу. К. Терцагі запропонував знаходити показник стійкості у вигляді відношення моменту сил утримуючих (сил тертя і зчеплення по поверхні ковзання) до моменту сил зсуваючих укис (дотичні складові ваги відсіків), взятих відносно центра поверхні ковзання:

$$K_i = \frac{M_{\text{упр}}}{M_{\text{зс}}} \quad (1)$$

К. Терцагі запропонував визначати коефіцієнт стійкості для декількох взятих на вважання більш або менш вірогідних положень поверхонь ковзання, і вибирати із них мінімальний коефіцієнт стійкості.

В 1962 р. Ю. І. Соловйов запропонував при розрахунках стійкості укусів в такому ж гіпотетичному ґрунті використати принцип можливих переміщень. Поверхня ковзання при цьому повинна розглядатись як поверхня контакту між клином руйнування і підстиляючим ґрунтом, по якій на клин діють односторонні сили зв'язку і зовнішні дотичні сили зчеплення і тертя.

Функціонал Ю. І. Соловйова являє собою відношення робіт утримуючих і зсуваючих сил на переміщення, яке для всіх відсіків має однакову горизонтальну складову. Це означає, що при ковзанні всього клина він зберігає суцільність і в ньому відсутні розриви, але можуть проходити дотичні зміщення по вертикальним

площадкам, по яким опір зсуву відсутній. Можливі переміщення, які допускаються зв'язками системи, будуть проходити вздовж поверхні ковзання і для любого відсіку будуть рівні:

$$k = \frac{\int_0^1 SdF}{\int_0^1 SdT} = \frac{\int_0^1 F(x, y, y')dx}{\int_0^1 \Phi(x, y, y')dx} \quad (2)$$

Важливою умовою було те, що при розгляді всього клина руйнування не потрібно було враховувати роботу внутрішніх сил на відносних переміщеннях окремих його елементів. При умові гіпотетичного ґрунту Герсєванова і при умові, що відсіки є жорсткими, а їх віртуальні переміщення не порушують кінематичних зв'язків, умова виконується. При цьому поверхня ковзання повинна бути круглоциліндричною, або п'яти відсіків повинні мати форму, яка дозволяє їм ковзати по поверхні зсуву без нахилу і деформації.

В 1965 році О. Г. Дорфман дав загальне рішення задачі, поставленої Ю. І. Соловйовим. Він показав, що крива, яка дає екстремум виразу відношення інтегралів, повинна задовольняти рівнянню:

$$\left(F_y - \frac{d}{dx} F_y' \right) \times \times \int_0^{x_n} \Phi dx - \left(\Phi_y - \frac{d}{dx} \Phi_y' \right) \int_{x_0}^{x_n} F dx = 0 \quad (3)$$

О. Г. Дорфман вирішив задачі стійкості схилів при довільному обрисі укусу, наявності слабкої основи, врахування фільтраційного тиску. Однак, в рішеннях є недолік, всі вони побудовані для гіпотетичного ґрунту Герсєванова.

В 1969 році О. Г. Дорфман застосував метод згладжування в розривних варіаційних задачах (Дорфман, 1969). Така задача виникає коли лінія ковзання проходить в шаруватому ґрунті, області з фільтрацією. Всі судження проводяться так, ніби задача не є суцільною, і тільки в кінцевих формулах враховується її особливість. Метод лінеаризації в деякому сенсі протилежний методу згладжування – суцільна задача приводиться до розривної. Суть методу полягає в заміні заданої кривої апроксимуючою лома-

ною лінією. Для кожної ланки цієї ломаної інтегруються рівняння екстремалей: шукане рішення (наближення) отримується за варіаційними умовами на кінцях ланок. Метод лінеаризації дозволяє отримати рішення з довільно високою точністю.

В 1955 році Я. Копаші надрукував роботу «Про поверхні ковзання і руйнуючі напруження в земляних спорудах». Він вирішує задачу варіаційним методом і шукає поверхню ковзання, яка дає мінімальний сумарний опір дії зовнішнього навантаження і власної ваги. Копаші не задається гіпотетичними властивостями ґрунтів, а обмежується лише умовою, щоб цей розподіл задовольняв рівнянням рівноваги:

$$\sum X = 0; \sum Y = 0; \sum M = 0. \quad (4)$$

При розрахунках стійкості укосів напівемпіричними методами розглядається плоска задача. Вона не завжди відповідає природі явища, тому що не враховує тертя на торцях клина сповзання. Розрахунок стійкості укосів з урахуванням просторовості у 1972 році запропонував У. Х. Магдеев (Магдеев, 1972).

Поряд з визначенням стійкості схилів важливим питанням є прогнозування подальшого стану цього схилу. Стан зсувного схилу характеризується коефіцієнтом стійкості. Однак величина цього коефіцієнту не є достатнім показником для прогнозування подальшого зсувного процесу і оцінки довготривалої стійкості схилу.

Прийнято, що зсув починається тоді, коли коефіцієнт стійкості стає нижче одиниці, причому інтенсивність процесу, ступінь його активності вища, коли коефіцієнт стійкості нижче.

В природних умовах під впливом зсувних факторів пониження коефіцієнта стійкості проходить поступово. Часто спостерігається зміна періодів поступового зміщення періодами різкого, іноді катастрофічного зсуву.

Для оцінки довготривалої стійкості зсувних схилів М. Н. Гольдштейном була запропонована залежність (Гольдштейн, Туровская, Тимофеева, 1969):

$$K_{\partial.c} = \frac{S_M}{S_e}. \quad (5)$$

Значення коефіцієнта довготривалої стійкості зсувонебезпечного схилу має границі в наступному діапазоні від

$$K_{\partial.c} = \frac{S_M}{S_n} \text{ до } K_{\partial.c} = 1, \quad (6)$$

де S_M – величина мінімального опору зсуву, яка відповідає середньому нормальному тиску по поверхні зсуву (знаходиться по графіку мінімального опору зсуву); S_e – середній опір ґрунту зсуву по поверхні зсуву, яке відповідає теперішньому стану схилу; S_n – піковий опір ґрунтів зсуву.

Коли схил досягає гранично пологого стану $S_e = S_M$, коефіцієнт довготривалої стійкості $K_{\partial.c} = 1$. Чим менше значення $K_{\partial.c}$, тим більш катастрофічний характер має зсувний процес.

Наукова новизна та практична значимість

В Єврокодї 7 Геотехнічне проектування Частина 1 Загальні правила (ДСТУ-Н Б EN 1997-1:2010, 2011) також розглядаються питання стійкості природних схилів і укосів. Зазначено, що при аналізі схилу повинні бути розглянуті всі можливі граничні стани ґрунту, для задоволення принципів вимог по стійкості, зменшенні деформацій, довговічності і обмеженню переміщень сусідніх будівель і мереж. Можливими граничними станами, які потрібно розглядати можуть бути:

- втрата загальної рівноваги ґрунту і пов'язаних з ним споруд;
- недопустимі переміщення ґрунту внаслідок деформацій зрушення, осідань, вібрацій або піднімання;
- пошкодження або втрата експлуатаційних якостей будь яких сусідніх споруд, доріг, або інженерних мереж, викликані переміщеннями ґрунту.

Загальна стійкість ділянки і переміщення ґрунтів природного характеру перевіряється з урахуванням попереднього досвіду. Загальна стійкість ґрунтів розглядається там, де є існуючі споруди, нові споруди, схили і виїмки.

Проблеми стійкості, пов'язані з повзучістю виникають в зв'язних ґрунтах на схилах. Нескельні ґрунти без зчеплення і тріщинуваті скельні теж можуть бути нестійкими на схилах.

Перевірка загальної стійкості укосів виконується за граничними станами за втратою несучої здатності з використанням проектних величин дій, міцносних властивостей, а також окремих коефіцієнтів. При аналізі загальної

стійкості ґрунту, необхідно розглядати всі можливі форми руйнування. При виборі методу розрахунку необхідно враховувати: шаруватість ґрунту; наявність порушень; фільтрацію; короткострокову і довгострокову стійкість; деформації повзучості; тип руйнування (колова чи не колова поверхня зсуву).

Якщо ґрунт відносно однорідний, то можна розглядати колові поверхні руйнування. Для схилів з шаруватих ґрунтів, характеристики опору яких відрізняються, розглядаються неколові поверхні руйнування. Для схилів, які раніше піддавалися руйнуванню і є небезпека повторних зсувів, розглядаються колові і неколові поверхні ковзання.

Висновки

Оцінка стійкості укосів і схилів є актуальною проблемою в зв'язку з дефіцитом вільних земельних площ, освоєнням зсувонебезпечних територій під будівництво, а також активізацією і появою нових зсувів, обумовлених втручанням людини в навколишнє середовище.

Оцінка стійкості та міцності схилів на сучасному науковому рівні базується до наукових розробках, гіпотезах та припущеннях вчених попередніх поколінь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons.

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

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

Гольдштейн, М. Н. (1969). Вариационный метод решения задач об устойчивости грунтов. *Вопросы геотехники*, 16, 3-22.

Гольдштейн, М. Н., Туровская, А. Я., & Тимофеева, Т. А. (1969). О длительной устойчивости оползневых склонов. *Вопросы геотехники*, 16, 75.

Дорфман, А. Г. (1969). Методы решения вариационных задач и их применение в механике грунтов. *Вопросы геотехники*, 16, 23-26.

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

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

ДСТУ-Н Б EN 1997-1:2010 (2011). *Єврокод 7. Геотехнічне проектування. Частина 1. Загальні правила (EN 1997-1 : 2004, IDT)*. Київ: Мінрегіонбуд України.

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

Магдеев, У. Х. (1972). Расчет устойчивости откосов с учетом пространственности. *Вопросы геотехники*, 20, 86-91.

Шустер, Р., & Кризек, Р. (Eds.) (1981). *Оползни. Исследование и укрепление*. Москва: Мир.

O. L. TIUTKIN^{1*}, O. I. DUBINCHYK², V. R. KILDIEIEV³, R. B. NOVIK⁴

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

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

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

⁴ Department of Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technology, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (063) 722 61 10, e-mail r.b.novik@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2571-6641

ANALYSIS OF THE METHODS OF STABILITY CALCULATING OF LANDSLIDE SLOPES

Purpose. Analysis of the methods of stability calculating of landslide slopes and their further development in European normative documents. **Methodology.** Variants of methods for calculating the stability of slopes by different authors are considered. Various definitions of the functional were adopted in variational methods, and then the

minimum was found. In M. M. Gersevanov's method, the functional was the sum of horizontal forces that acted on an array of hypothetical soil. In the method of Y. I. Solovyov, the functional is the ratio of the work of the forces that maintain the slope to the work of the forces that shift to the movement. In Kopashi's method, it is the sum of vertical loads that act on the sliding surface in a loose medium. In the abbreviated Terzaghi's method, the minimum ratio of the moment of the holding forces to the moment of the forces that shift the slope is sought. **Findings.** Domestic and foreign scientists have successfully studied the strength and stability of slopes. This is a complex task determined by the need to simultaneously take into account two main factors: relief and gravitational force. The basis for determining the stability of slopes is the idea that the stressed state of rocks in the upper part of the earth's crust is formed by universally acting gravitational and tectonic forces. The relief of the earth's surface makes a significant contribution to the redistribution of stresses. **Originality.** Eurocode 7 recommends the possibility of performing a preliminary calculation of the natural slope using characteristic values, which gives an approximate idea of the value of the overall reliability factor before the start of design. **Practical value.** Areas located directly on slopes are often used as construction sites. The bases for the foundations of buildings and structures are soil massifs that are in difficult engineering and geological conditions. Landslides are a geological process that occurs on any part of a slope or slope as a result of a disturbance in the balance of rocks when the steepness of the slope increases as a result of water washing, the weakening of the strength of rocks due to weathering or rewetting by precipitation and groundwater, the effect of seismic shocks, construction and economic activities of people. Determining the stability factor is a necessary condition for concluding that the slopes can be used for construction.

Keywords: landslide slope; landslide; sliding surface; methods of calculating the slopes stability; long-term stability of landslides

REFERENCES

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons. (in English)
- Bromhead, E. N. (2005). *The stability of slopes*. London and New York: Taylor & Francis. (in English)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Y., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 14, 101-109. (in English)
- Goldshcheyn, M. N. (1969). Variatsionnyy metod resheniya zadach ob ustoychivosti gruntov. *Voprosy geotekhniki*, 16, 3-22. (in Russian)
- Goldshcheyn, M. N., Turovskaya, A. Ya., & Timofeeva, T. A. (1969). O dlitelnoy ustoychivosti opolznevnykh sklonov. *Voprosy geotekhniki*, 16, 75. (in Russian)
- Dorfman, A. G. (1969). Metody resheniya variatsionnykh zadach i ikh primenenie v mekhanike gruntov. *Voprosy geotekhniki*, 16, 23-26. (in Russian)
- DBN V.1.1-12:2006 (2007). *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy*. Kyiv: Minbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.1.1-24:2009 (2010). *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv. Osnovni polozhennia proektuvannya*. Kyiv: Minrehionbud. (in Ukrainian)
- DSTU-N B EN 1997-1:2010 (2011). *Yevrokod 7. Heotekhnichne proektuvannya. Chastyna 1. Zahalni pravyla (EN 1997-1 : 2004, IDT)*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Kovalenko, V. I., Khilobok, V. H., & Yakovliev, A. V. (2004). *Inzhenerna heolohiia: Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenti*. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
- Magdeev, U. Kh. (1972). Raschet ustoychivosti otkosov s uchetom prostranstvennosti. *Voprosy geotekhniki*, 20, 86-91. (in Russian)
- Shuster, R., & Krizek, R. (Red.) (1981). *Opolzni. Issledovanie i ukreplenie*. Moskva: Mir. (in Russian)

Надійшла до редколегії 01.09.2022.

Прийнята до друку 04.10.2022.