

## КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД УСТАНОВЛЕННЯ ФАКТОРА БЕЗПЕКИ СХИЛУ ДОЛИНИ р. ДНІПРО

*Наведено результати встановлення стійкості схилу долини р. Дніпро в районі м. Києва. Розрахунком стійкості передує всебічний інженерно-геологічний аналіз схилу з побудовою тривимірної моделі. Це дозволило оптимізувати кількість, глибину і місце буріння розвідувальних свердловин. Обґрунтовано неможливість зведення споруди такого типу на зсувному схилі.*

**Ключові слова:** коефіцієнт стійкості схилу, круглоциліндрична поверхня ковзання, метод Бішона, зсувний схил.

**Вступ.** Необхідність дослідження стану схилу долини р. Дніпро у м. Києві була викликана запропонованим проектом так званої реконструкції ресторану «Курені», який насправді мав за мету побудову багатоповерхового готелю на зсувній ділянці розташування славнозвісного Зеленого театру.

Методи розрахунків стійкості схилів широко застосовуються інженерами-геотехніками і не є новими для спеціалістів. Основні теоретичні засади різняться залежно від визначення поверхні ковзання, врахування взаємодії між блоками, більш точного врахування опору блоків поверхні ковзання і т.ін. Ці методи давно застосовуються, та їх використання не є предметом дослідження.

Застосовуючи той або інший метод, спеціалісти добре знають, наскільки залежать результати від значення розрахункових характеристик ґрунтів. Іноді результати оцінювання стійкості схилу різняться в декілька разів залежно від застосованого значення ( $\varphi$  – кут внутрішнього тертя;  $c$  – питоме зчеплення). Тому ми запропонували комплексний метод оцінювання фактора безпеки, що складається із чотирьох послідовних кроків. По-перше, аналіз історії розвитку району розташування досліджуваного схилу з устанавленням закономірностей динаміки схилового процесу. По-друге, безпосереднє обстеження ділянки схилу з метою встановлення основних екзогенних процесів, які формують поверхню схилу. По-третє, закладення бурових свердловин для визначення основних характеристик ґрунтів. І четвертим кроком є оцінювання стійкості схилу за допомогою розрахункового методу, обраного за принципом відповідності існуючих ґрунтових умов до основних засад методу обчислення: у цьому випадку круглоциліндрична поверхня ковзання є заздалегідь устанавлений основний горизонт, що деформується при зміщенні.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Правобережні схили долини р. Дніпро біля Києва вивчалися багатьма дослідниками [1, 2].

Характер процесів переформування схилів дозволяє виділити на ділянці чотири зони:

1. Зона руйнування лесового уступу плато. Абсолютні позначки брівки плато складають 179,1 – 130,5 м. Потужність зони змінюється від 12 до 25 м. У геологічній будівлі схилу беруть участь еолово-делювіальні лесові суглинки, потужністю 6–12 м і морені відклади, представлені валунними суглинками і супісками, потужністю 1–1,5 м.

2. Зона нагромадження зруйнованого лесового матеріалу на поверхні строкатих глин і піщаників. Абсолютні позначки схилу в зоні нагромадження змінюються від 163,5 до 148,6 м. Потужність делювіальних накопичень на поверхні строкатих глин змінюється від 10 – 12 м в основі лесового плато до 3 – 5 м у зовнішній частині уступу. Ширина другої зони непостійна і змінюється від 5 – 10 м до 32 м. Кут нахилу поверхні до водосховища складає 5 – 8°.

3. Зона переміщення делювію вниз по схилу. Рух зруйнованих лесових порід, моренних відкладів і бурих глин відбувається по ерозійній вимоїні, виробленій у відкладеннях пісків полтавського і харківського віку. Абсолютні позначки верхньої частини зони складають 142 – 146 м, нижньої частини – 119 – 124 м, потужність зони переміщення – 20 – 25 м. Кут нахилу схилу до водосховища складає 27 – 45°.

4. Зона нагромадження схилового делювію на поверхні мергелів київської світи. На покрівлі мергелів київської світи, що більш стійкі до руйнування, ніж залягаючі вище породи, утвориться тераса шириною від 5 до 15 м. На її поверхні накопичується перезволожений схиловий делювій, що потім зміщується до урізу води і розмивається водосховищем. Абсолютні позначки зони змінюються від 92 до 102 м. Ухил нижньої акумулятивної тераси до водосховища складає 5 – 6°. Нижній уступ її складений мергелем і падає до водосховища майже прямою, його висота змінюється від 1 до 3 – 5 м.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** До цього часу стійкість схилів визначалася без урахування основних закономірностей їх розвитку під дією процесів схилоутворення, тому за **мету роботи** прийнято розрахунок стійкості описаного схилу як у природному стані, так і з урахуванням додаткового навантаження від запроєктованої будівлі з урахуванням його особливостей. Для досягнення поставленої мети використовується програма Stable, здатна допомогти розв'язати поставлені завдання.

**Основний матеріал і результати.** Геологічна будова ділянки Паркової дороги в районі Зеленого театру представлена наступними літологічними видами ґрунтів. У верхній частині досліджуваної ділянки схилу залягає шар насипних ґрунтів потужністю від 2 до 6 м, представлених суглинками коричневими з домішками будівельного сміття, місцями перекритий рослинним шаром. Нижче залягають четвертинні відклади, переміщені схиловими процесами та представлені суглинками світло-коричневими, сіро-коричневими твердої консистенції, глинами сірими з прошарками світло-коричневих, супісками сіро-жовтими пілуватими твердими, також пісками світло- та сіро-коричневими, місцями водонасиченими.

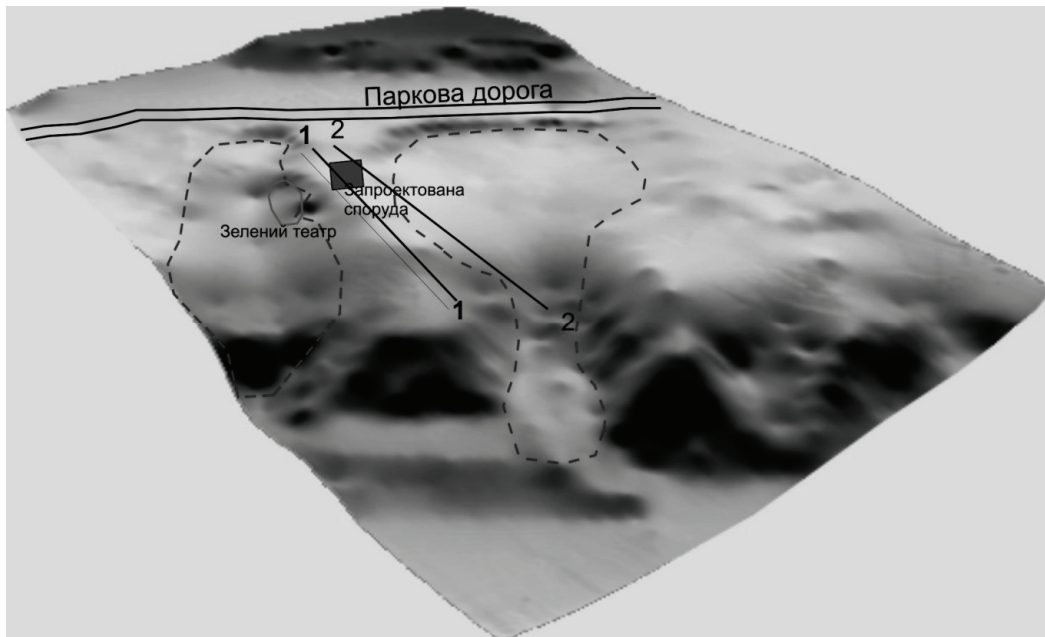
Корінні ґрунти представлені (зверху вниз) перешаруванням глин ясно-сірих, ясно-коричневих з прошарками суглинків напівтвердих і пісків нижньонеогенового віку, загальна потужність яких становить 25 м. Нижче залягають піски сіро-жовті пілуваті дрібні, щільні водонасичені з прошарками супісків і суглинків загальною потужністю до 10 м верхньопалеогенового віку. Вони підстилаються відкладами обухівської світи палеогену, представленими супісками сіро-блакитними з прошарками піску, потужність яких становить 15 м.

Зволоження ґрунтового масиву відбувається водами водоносного горизонту в харківських пісках, котрий залягає на глибині 12,6 м (абс. відм. 122,05 м). Живлення відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та витоків з підземних комунікацій.

Стан рельєфу ділянки оцінювався за допомогою побудови його тривимірної моделі у програмі «Серфер». Дослідити рельєф візуально доволі складно, враховуючи густий рослинний покрив.

У геоморфологічному відношенні досліджувана ділянка належить до середньої частини правобережного схилу долини р. Дніпра з абсолютними відмітками 149 – 152 м. Схил являє собою характерне для правобережної частини долини р. Дніпра сполучення так званих мисів (більш стійких до руйнування ділянок) із цирками – западинами у рельєфі схилу, котрі утворилися завдяки ерозійно-зсувним процесам [3]. Без рослинного покриву на рис. 1 можна бачити, що досліджувана ділянка розташована між двома давніми зсувними цирками, які тепер перебувають у стабільному стані. У верхній частині цирків на ділянці Паркової дороги сучасні екзогенні процеси розвинуті слабо і представлені незначними техногенними переплануваннями. У середній частині схилу спостерігається площинний змив, що фіксується по згладжених лійкоподібних поверхнях схилів [4].

Нижня частина схилу являє собою горбисто-западинну поверхню. Такий рельєф обумовлений накопиченням схилового делювію. Ці накопичення є нестійкими і при зволоженні (зливи, танення снігу і т.п.) можуть перейти у рухливий стан.



**Рисунок 1 – Рельєф ділянки, побудований у програмі «Серфер»**

Необхідно також звернути увагу на бокову поверхню так званих мисів: можна бачити, що вона руйнується лінійною ерозією. За методом аналогій, динаміка берегових схилів долини Дніпра призводить до руйнування мисів у процесі відступу схилу [5].

Запроектована будівля знаходиться на ділянці міжзсувного мису, який із часом буде руйнуватися з обох боків ерозійним розмивом. Зсуви для цієї ділянки схилу не характерні завдяки її геологічній будові, а саме відсутності основних горизонтів, що деформуються, бурих глин і глин кийської світи палеогену. Будівництво планується у середній частині схилу, яка слугує так званою ділянкою транзиту рухомого матеріалу зруйнованих схилових відкладів до підніжжя схилу.

Лінії розрізів підібрані з урахуванням будови схилу: перша – ділянка так званого міжзсувного мису (лінія розрізу 1-1) і друга – ерозійно-зсувного цирку (лінія розрізу 2-2) (рис. 1).

**Метод оцінювання стійкості схилу.** Фактор безпеки схилу розраховувався за допомогою програми Stable версії 9.03, розробленої Канадським інститутом цивільних інженерів [6]. Програма призначена для визначення коефіцієнта запасу стійкості схилів. Як механізм втрати стійкості приймається механізм ковзання масиву, що сповзає, щодо нерухомої частини укосу. Опір зрушенню по поверхні ковзання розраховується для статичних умов. Уздовж усієї поверхні витриманий критерій руйнування ґрунту, прийнятий у законі Кулона.

Розрахунок виконувався на основі файлу даних, до якого входять геологічний розріз схилу, фізико-механічні властивості ґрунтів та поровий тиск, крім того, можуть ураховуватися зовнішні навантаження на схил, дані про блоки сковзання. Вхідні дані включають: розміри ділянки схилу; геологічну будову схилу; характеристики ґрунтів. Ці дані аналізуються методом Бішопа.

Під час розрахунку стійкості реальна напруга, що зрушує масив ґрунту, визначена розрахунковим шляхом, порівнюється з граничним опором зрушенню ґрунтів, які складають схил, і результат цього порівняння виражається у вигляді коефіцієнта запасу стійкості  $K$ . Коефіцієнт запасу стійкості схилу (укосу) – це мінімальний з коефіцієнтів запасу стійкості по всіх можливих поверхнях ковзання, які задовольняють заданим обмеженням, закладеним у методі розрахунку.

Метод Бішопа базується на аналізі зміщення блоків за круглоциліндричною поверхнею сковзання. Він дозволяє розраховувати коефіцієнт стійкості для круглоциліндричних поверхонь ковзання як відношення моментів утримуючих сил до зрушуючих за формулою

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum [cl + \tan \varphi (W \cos \alpha - \mu l)], \quad (1)$$

де  $W$  – загальна вага блока ґрунту;  $h$  – висота блока;  $b$  – ширина блока;  $l$  – довжина ВР;  $\alpha$  – кут між ВР і горизонталлю;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя;  $c$  – питоме зчеплення;  $\mu$  – поровий тиск.

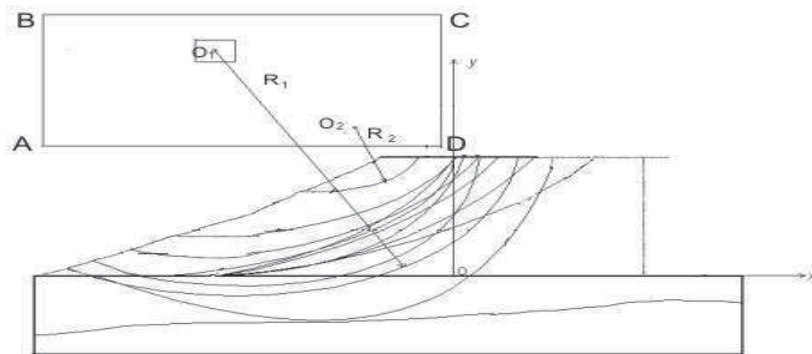
Стан мінімальної стійкості ділянки схилу може бути представлений за допомогою рівняння для деякого функціонала  $F$  і записується в такому вигляді:

$$K = K_{\min} = \min F(x_c, y_c, r, \gamma(x, y), \varphi(x, y), c(x, y), p(x, y)), \quad (2)$$

де  $x_c, y_c, r$  – відповідно абсциси, ординати центрів і радіуси кривих,  $\gamma(x, y), \varphi(x, y), c(x, y), p(x, y)$  – додатні функції зі значеннями відповідно питомої ваги, кута внутрішнього тертя, зчеплення ґрунтів, а також зовнішніх навантажень у межах поперечного перерізу.

Метод пошуку мінімальної стійкості заснований на покритті поперечного перерізу схилу сіткою неповторюваних кривих можливого зсуву для визначення кривої з  $K_{\min}$ . Множина центрів першого етапу пошуку і множина радіусів  $R$  повинні бути порівнянними з найбільшими лінійними розмірами схилу. Для цього використовується максимальна абсциса поперечного перерізу схилу для  $X$  і горизонтальна відстань між подошвою та брівкою схилу як максимальне значення для  $Y$  і  $R$  так, щоб центр та радіус критичної кривої не виходили за його границі при будь-яких обрисах схилу. При виході за границі прямокутника ABCD рішення стає невизначеним (рис. 2).

Пошук мінімального фактора безпеки на першому етапі (по абсцисах, ординатах і радіусах) має таку послідовність: автоматично задаються значення радіуса і координати центра дуги кола, яка позначає круглоциліндричну поверхню ковзання. Значення різняться одне від одного на 1 – 2 м, що порівнюється із середньо-мінімальною потужністю різних шарів ґрунту, які складають схил. За такою ж схемою виконується розбивання оцінюваного масиву ґрунту на блоки. На другому етапі множина центрів задається розміром кроку в 10 разів меншим. За основу приймається центр кривих, для яких фактор безпеки мав мінімальне значення.



**Рисунок 2 – Схема визначення поверхні ковзання з мінімальним фактором безпеки**

Метод розрахунку базується на розділенні схилового масиву на окремі блоки, максимальна кількість яких для програми Stable може досягати 120. Блоки розбиті таким чином, що всі їх границі знаходяться в точках геометричної безперервності. Так, не всі блоки мають однакову ширину. При моделюванні може статися, що не всі блоки повністю потрапляють у розріз схилу, деякі можуть виходити за його межі.

Програма не аналізує стійкість схилу, якщо на кривій ковзання розміщено менше ніж 25 блоків. З метою досягнення більшої точності розрахунків потрібно, щоб геометрична модель схилу не виходила за межі кривої ковзання. Кінцева кількість даних, необхідних для розрахунку в програмі Stable, наведена у таблиці 1.

Процес уведення даних починається з окреслення (ескізу) схилу. Визначаються геометричні розміри схилу: його довжина, висота, кут нахилу. Другим кроком є визначення ґрунтових умов, а саме за допомогою ліній окреслюються геологічні верстви. Геологічний розріз схилу вміщує лінію, що окреслює поверхню схилу, та лінії геологічних верств ґрунтів, які перетинаються. Кожна лінія визначається початковою й кінцевою точками з координатами (X, Y). Модель схилу можна побудувати з потрібною детальністю, не перевищуючи ліміти, наведені в таблиці 1.

**Таблиця 1 – Максимальна і використана кількість даних для програми Stable**

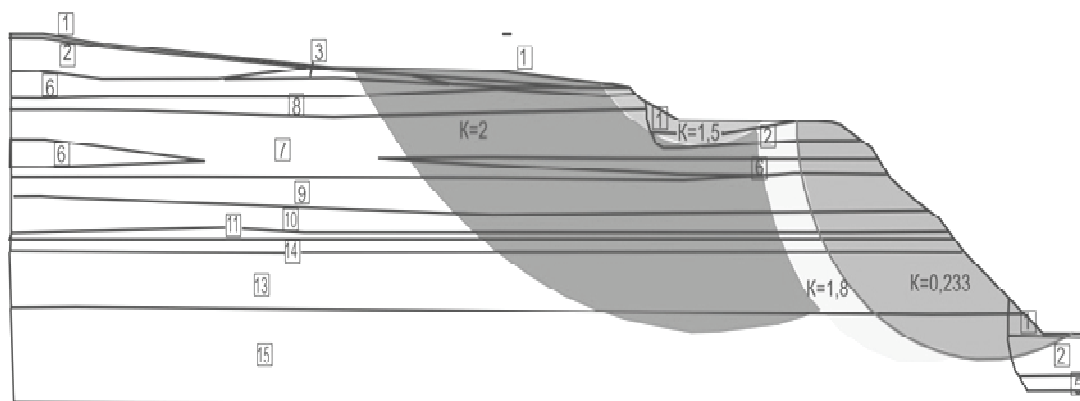
№	Тип даних	Використана кількість	Максимальна кількість
1	Загальна кількість точок	42	150
2	Загальна кількість ліній, що визначають ґрунтові умови схилу	6	150
3	Загальна кількість ліній, які визначають рівень ґрунтових вод	1	30
4	Лінії, що моделюють круглоциліндричну поверхню сковзання	19	19
5	Кількість типів ґрунтів для моделювання ґрунтових умов на схилі	6	48
6	Точки прикладання зовнішнього навантаження на схил	–	50

Уведення даних за геометричним обрисом схилу і його ґрунтовими умовами через програму TurboCad є найшвидшим і найзручнішим. Програма враховує сили тертя й зчеплення по вертикальних площинах (між блоками) як постійні для всього масиву ґрунту, що зрушується, так і змінні вздовж поверхні ковзання.

**Розрахунки стійкості схилу на ділянці ресторану «Курені».** Розрахунок виконувався для двох геологічних розрізів (рис. 1), розріз за лінією 1-1 проходить на ділянці так званого міжзсувного мису, а розріз за лінією 2-2 – ділянка зсувного цирку. Характеристики властивостей ґрунтів наведені у таблиці 2.

Розрахунки стійкості схилу за розрізом по лінії 1-1 показали, що за відсутності підземних вод на схилі й зовнішнього навантаження він стійкий у верхній, більш пологій частині, коефіцієнти стійкості перевищують 2,0. Нестабільного стану схил набуває на ділянках, де різко підвищується кут нахилу. На ділянці св.9 схил знаходиться у стані граничної рівноваги (рис. 3).

Інтерпретацію результатів розрахунків наведено на рисунку. 3.



**Рисунок 3 – Ділянки схилу, окреслені за значеннями коефіцієнта стійкості**

Таблиця 2 – Узагальнений геологічний розріз схилу

№	Назва ґрунту при розрахунках	Абсолютні позначки підлоги і покрівлі	Характеристика ґрунтів	Розрахункові значення		
				Питоме зчеплення $c$ , кПа	Кут внутр. тертя $\varphi$ , град.	Питома вага $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>
1	Soil-1 (t IV)	155-134	Насипні ґрунти неоднорідні представлені суглинками коричневими з домішками будівельного сміття, місцями перекритими рослинним шаром	0	0	16,4
2	Soil-2 (d-cIII-IV)	154-148.5	Суглинки світло-коричневі, сіро-коричневі тверді, та піски світло- та сіро-коричневі, місцями водонасичені	12	24	21,2
3	Soil-3 (d-cIII-IV)	148.5-147	Глини сірі з прошарками ясно-коричневих, тверді й напівтверді	82	12	19,4
4	Soil-6 (N <sub>1</sub> pt)	147-145	Глини світло-сірі з прошарками суглинків і глин світло-коричневих і білих	82	19	18,9
5	Soil-7 (N <sub>1</sub> pt)	145-137	Суглинки легкі сірі, ясно-коричневі, тверді з прошарками глин	102	15	18,7
6	Soil-8 (N <sub>1</sub> pt)	146-144	Суглинок прісноводний жовтувато- та зеленкувато-сірий, легкий, середній, пилюватий	105	32	18,4
7	Soil-9 (N <sub>1</sub> pt)	134-129	Пісок дрібний ясно-сірий, жовтий щільний	4	35	17,5
8	Soil-10 (N <sub>1</sub> pt)	129-126	Пісок коричневий щільний	2	36	17,7
9	Soil-11 (N <sub>1</sub> pt)	126-125	Супісок темно-коричневий з прошарками піску	28	24	19,2
10	Soil-13 (N <sub>3</sub> hr)	123-115	Супісок темно-зелений пилюватий, слюдистий, пластичний	15	22	19,4
11	Soil-14 (N <sub>3</sub> hr)	125-123	Суглинок легкий сіро-зелений, пилюватий, м'якопластичний	24	18	19,0
12	Soil-15 (P <sub>2</sub> kv)	115-100	Супісок сіро-блакитний текучий з прошарками піску	10	16	18,3

При розрахунках фактора безпеки для розрізу за лінією 2-2, що проходить через давній зсувний цирк, встановлено наступне: схил в основному стійкий у верхній частині (рис. 4), значення фактора безпеки наближуються до 2. Для нижньої частини схилу характерне зниження фактора безпеки до 0,359. Інтерпретацію результатів розрахунків наведено на рисунку 4.

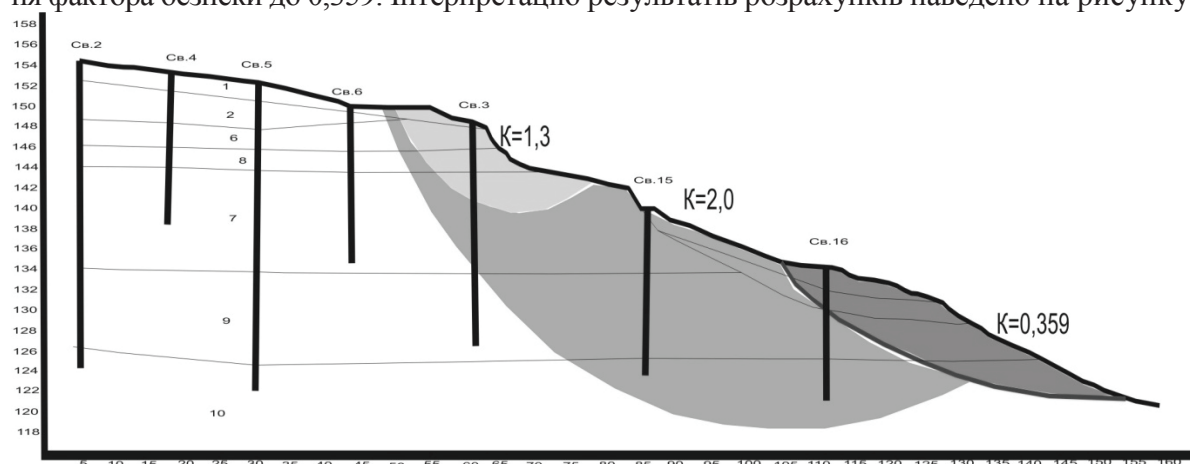
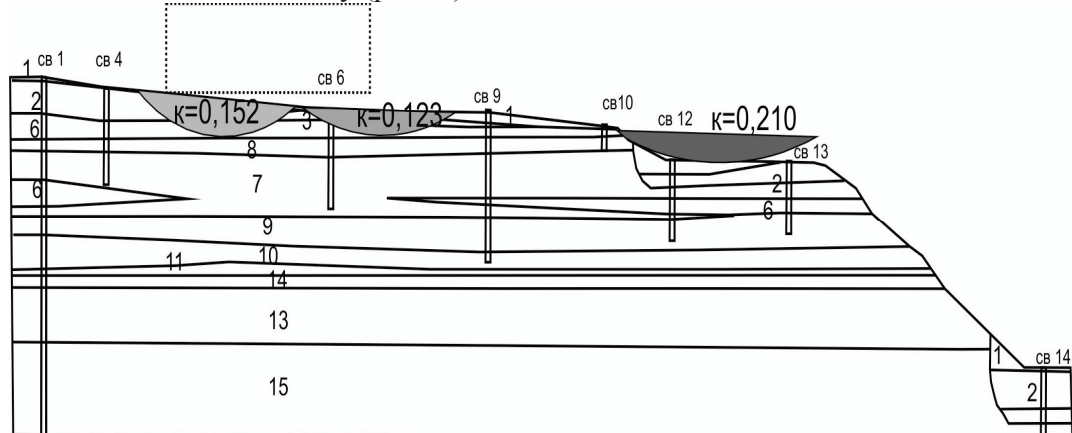


Рисунок 4 – Ділянки схилу (розр. за 2-2), визначені за результатами розрахунків

Розрахунки стійкості схилу після врахування навантаження від будівлі ( $23 \text{ т/м}^2$ ) свідчать про різке падіння значення фактора безпеки: навантаження призводить до роздавлювання верхньої частини схилу, складеної насипними ґрунтами, і весь схил переходить до нестійкого стану (рис. 5).



**Рисково 5 – Ділянки схилу, окреслені за значеннями коефіцієнта стійкості після врахування дії зовнішнього навантаження від запроєктованої будівлі**

Необхідно враховувати також тенденцію до руйнування мису яружною ерозією і площинним змивом.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили встановити, що схил, який планується як основа для споруди майбутнього ресторану «Курені», являє собою старий міжзсувний мис, який нині руйнується процесами лінійної ерозії та площинного змиву. Щодо стійкості схилу, то за розрахунками коефіцієнта стійкості встановлено наступне:

1. Основна частина схилу (рис. 3 і 4) є стабільною завдяки геологічній будові, а саме відсутності основних глинистих горизонтів, що деформуються.

2. Нижня частина схилу знаходиться у нестабільному стані, причому цей стан характерний як для старого цирку, так і для міжзсувного мису, пояснюється це зростанням кутів нахилу і літологічною будовою схилу: він складений піщаними ґрунтами, які легко руйнуються поверхневими водами.

3. Фактор безпеки для нижньої частини схилу, складеної насипними ґрунтами і схиловим делювієм, у западині старого зсувного цирку  $K=0,359$ .

4. Для фронтальної частини мису (рис. 4) коефіцієнт стійкості досягає граничного значення  $0,233$ .

5. Додаткове навантаження на схил, яке становить  $23 \text{ т/м}^2$ , призведе до руйнування його верхньої частини, складеної насипними ґрунтами. Зплановане додаткове навантаження на схил, що не перевищує  $5 \text{ т/м}^2$ , ніякого впливу на його стійкість мати не буде.

Розрахунки стійкості схилу повинні базуватися на ґрунтовному вивченні його геоморфологічної та геологічної будови з урахуванням основних закономірностей розвитку схилу під дією процесів схилоутворення. Аналіз динаміки зсувного процесу дозволяє вибрати оптимальний варіант розміщення свердловин з метою одержання максимальної інформації при мінімальних матеріальних затратах на їх буріння.

#### Література

1. Демчишин М.Г. О роли отложенной киевской свиты в развитии береговых склонов Днепра в пределах г. Киева / М.Г. Демчишин // ДАН УРСР, сер. Б, № 8. – 1981. – С. 21–24.
2. Демчишин М.Г. Инженерно-геологические условия правобережных склонов Среднего Днепра / М.Г. Демчишин, Е.Н. Беспалова // Основания и фундаменты. – 1987. – Вып. 20. – С. 15–19.

3. Беспалова О.М. Особенности динамики оползневых систем правобережья Среднего Приднепровья / О.М. Беспалова // Збірник праць молодих учених. – Київ, 2003. – С. 28–32.
4. Беспалова Е.Н. Влияние атмосферных осадков на развитие оползневого процесса в Среднем Приднепровье / Е.Н. Беспалова // Геологический журнал. – 2003. – № 2. – С. 36–39.
5. Беспалова О.М. Динаміка зсувного процесу Середнього Придніпров'я на прикладі ділянки Трипілля – Канів: автореф. канд. дис. геол. наук. – Київ: ІГН НАНУ, 2003. – 24 с.
6. O'Connor M.J. An extension of the Bishop and Morgenstern slope stability charts / M.J. O'Connor, R.J. Mitchell // Canadian Geotechnical Journal. – 1977. – 14(1). – P. 144–151.

*Е.Н. Беспалова, к. г. н., научный сотрудник  
Институт геологических наук НАН Украины*

## **КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УСТАНОВЛЕНИЯ ФАКТОРА БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СКЛОНА ДОЛИНЫ р. ДНЕПР**

*Приведены результаты установления устойчивости склона долины р. Днепр в районе г. Киева. Расчетам устойчивости предшествует всесторонний инженерно-геологический анализ склона с построением трехмерной модели. Это позволило оптимизировать количество, глубину и место бурения разведочных скважин. Обоснована невозможность возведения сооружения такого типа на оползневом склоне.*

**Ключевые слова:** коэффициент устойчивости склона, круглоцилиндрическая поверхность скольжения, метод Бишопа, оползневой склон.

*H. Bepalova, Doctor of Philosophy, scientific employee  
Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine*

## **COMPLEX METHOD FOR ESTABLISHING A FACTOR OF SAFETY FOR THE SLOPE OF THE VALLEY OF THE DNIEPER RIVER**

*The article presents the results of establishing stability of the slope of the valley Dnieper near Kiev. Before the Stability calculations was performed a comprehensive geotechnical analysis of the slope with the construction of three-dimensional model. This will optimize the number, location and depth of drilling exploratory wells. Prove the impossibility of constructing buildings on this type of landslide slopes.*

**Keywords:** safety factor of the slope, circular-cylindrical sliding surface, Bishop's method, landslide slope.

*Надійшла до редакції 16.10.2014  
© О.М. Беспалова*