

УДК 624.131.7

МОЖЛИВОСТІ ТА МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МСЕ ТА ТЕОРІЇ ГРАФІВ

І.І. Солодей,

д-р техн. наук, професор

В.М. Павленко,

д-р філософії (Ph.D), асистент

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.3-12

У даній роботі розглянуто варіанти та межі застосування методу оцінки стійкості ґрунтових масивів з використанням комбінованого підходу на базі методу скінченних елементів та теорії графів. Наведено результати проведеної оцінки стійкості неоднорідного зсувонебезпечного схилу з використанням даного підходу в постановках задачі від природного стану схилу до забудованого схилу з конструкціями інженерного захисту.

Ключові слова: чисельні методи, теорія графів, коефіцієнт стійкості схилів, стійкість основ будівель і споруд, методи розрахунку схилів, моделювання схилів, метод скінченних елементів (МСЕ), напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ).

Вступ

Важливим етапом інженерних розрахунків для отримання достовірних результатів є підбір методу їх виконання. Незважаючи на той факт, що вибір методів і засобів розрахунку фактично здійснюється до його безпосереднього виконання, він має значний вплив, а неправильний вибір може призвести до значної похибки в отриманих результатах. При цьому, вибір методу може залежати від значної кількості факторів, таких як: мета розрахунку, тип навантажень, тип досліджуваного об'єкта, вимоги до точності, наявність необхідних засобів і даних та інші. Серед поширених методів для розв'язку складних задач механіки є чисельні методи, такі як: метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод граничних елементів та інші. Проте варто пам'ятати, що будь-який метод має межі раціонального застосування, що навіть більш характерно для методів, створених для вирішення специфічних задач. Серед них і метод, розроблений для оцінки стійкості основ будівель і споруд на зсувонебезпечних територіях, основна ідея якого полягає в комбінації методу скінченних елементів (МСЕ) та теорії графів, деякі теоретичні засади якого були висвітлені в публікаціях [1].

Можливості використання та межі застосування комбінованого підходу. Розгляд можливостей використання варто почати з огляду можливих форматів, в яких можлива його реалізація. В цьому аспекті можна виділити два основних напрямки застосування. Перший - у вигляді окремого інструментарію для розв'язання задач стійкості основ будівель і споруд. Основні етапи такого підходу наведені на блок-схемі, зображеній на рис. 1. У такому разі даний підхід буде використовуватися безпосередньо для вирішення таких задач як: побудова потенційної поверхні ковзання, визначення коефіцієнта стійкості, побудова епюри зсувного тиску. Другий напрям передбачає використання даного підходу в поєднанні з іншими методами, для нівелювання їх недоліків. Прикладом такого використання може бути застосування даного комплексного підходу з розповсюдженим в спеціалізованих геотехнічних програмних комплексах методом зниження міцності (SRM - strength reduction method) [5, 6, 8, 10]. Таке поєднання можливе з огляду на те, що комбінований підхід з використанням теорії графів і метод зниження міцності реалізуються на базі методу скінченних елементів, тому їх поєднання може бути реалізовано в межах одного програмного комплексу. Основна ідея такого застосування висвітлена на рис. 2, а ключовими його перевагами є проведення альтернативних розрахунків в межах одного розрахункового комплексу та потенційне зменшення кількості часу, необхідного для їх проведення.



Рис. 1. Блок-схема комплексного підходу при використанні МСЕ та підходів теорії графів



Рис. 2. Блок-схема комплексного підходу при використанні МСЕ, теорії графів та методу зниження міцності

Отже, можлива реалізація запропонованого комплексного підходу у вигляді окремого інструментарію, який дає змогу розв'язувати більшість задач, що виникають при оцінці стійкості зсувних та зсувонебезпечних масивів, та додатково можливим є створення комплексних рішень, що передбачають залучення і інших методів для усунення недоліків окремих методів чи у випадках, коли необхідне проведення альтернативних розрахунків.

Слід відмітити, що такі комбінації обмежуються випадками раціонального застосування безпосередньо методу скінченних елементів, який фактично заснований на механіці суцільного середовища. При цьому, враховуючи різноманітність зсувних процесів, можливість значної неоднорідності ґрунтового масиву та інші фактори, даний метод переважно орієнтований на оцінку стійкості зсувних і зсувонебезпечних схилів, складених з дисперсних ґрунтів.

Проте варто зазначити, що методику, яка створена на основі теорії графів, можливо адаптувати і для використання з іншими чисельними методами, такими як метод скінченних різниць чи метод граничних елементів.

Значно розширити межі використання підходу на основі теорії графів може його поєднання з дисконтинуальними чисельними методами, такими як: метод окремих елементів (DEM – Distinct Element Method), аналіз розривних деформацій (DDA – Discontinuous Deformation Analysis) та метод пов'язаних частинок (BPM – Bonded Particle Method). Розвиток даної групи методів розпочався з методу окремих елементів [4], в подальшому він був використаний для ґрунтів,

змодельованих у вигляді дисків, багатограних блоків та сферичних елементів. Ці методики уже значною мірою поширені в геотехнічних розрахунках та використовуються в тому числі для оцінки стійкості схилів. Перевагою цієї групи методів є можливість моделювання таких видів руху окремих елементів, як обертання, або від'єднання, а також розпізнавати нові контакти між частинами, що виникають під час обчислення. Використання наведеної групи методів може бути незамінним при розрахунках, пов'язаних з такими явищами як обвали, перекидання масивів гірських порід, комбіновані та складні зсуви та інші. Варто зауважити, що використання теорії графів при проведенні оцінки стійкості схилів можливе і в поєднанні з даною групою методів, але потребує інших підходів до її реалізації [9, 12].

Іншим цікавим напрямком для розв'язання задач, пов'язаних з оцінкою стійкості зсувних і зсувонебезпечних схилів є підходи, засновані на використанні штучних нейронних мереж [7, 11].

Приклад практичного використання підходу на основі МСЕ та теорії графів при оцінці стійкості зсувонебезпечного неоднорідного схилу

Наведений комплексний підхід в якості окремого інструментарію був реалізований в програмному комплексі (ПК) SATER.LANDSLIDE, використання якого з ПК SATER.SOIL дає змогу розв'язувати задачі оцінки стійкості схилів в просторовій постановці з використанням напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ), що в свою чергу дозволяє зменшити необхідний розрахунковий час для отримання розв'язків просторових задач. При цьому оцінка напружено-деформованого стану (НДС) схилу проводиться за допомогою ПК SATER.SOIL, ці дані передаються в ПК SATER.LANDSLIDE, яка і проводить оцінку стійкості схилу. Використовуючи дані програмні комплекси було проведено оцінку стійкості зсувонебезпечного неоднорідного схилу, при цьому оцінка його НДС проводилася в просторовій постановці, а оцінка стійкості здійснювалася за трьома розрахунковими перерізами, відповідно за кожним з них проводилося визначення поверхні ковзання та визначався коефіцієнт стійкості. Розглядалося 5 постановок задач, починаючи від схилу в природному стані, далі - схил з додатковим навантаженням від дорожнього покриття та транспорту у верхній частині та з урахуванням ваги будівлі (у випадках з ґрунтами в природному стані та перезволоженому стані) та постановки з поетапним введенням конструкцій інженерного захисту. Окрім цього, додатково також проводилося визначення зсувного тиску та побудова його епюри у відповідності до ряду потенційних поверхонь ковзання.

Ділянка, для якої проводилась оцінка стійкості, складена переважно слабкими глинистими ґрунтами, фізико-механічні характеристики яких представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№ ПЕ	Найменування ґрунту	Щільність ґрунту, ρ , г/см ³	Питома вага ґрунту, γ , кН/м ³	Кут внутріш. тертя, φ , градус	Питоме зчеплення С, кПа	Модуль деформац., Е, МПа
1	Насипний ґрунт	<u>1,76</u> 1,96	<u>17,27</u> 19,23	<u>17</u> 10	<u>25,4</u> 11,7	6
2	Супісок	1,86	18,25	14	5	6
3	Супісок	1,83	17,95	16	6	8
4	Суглинок	<u>1,6</u> 1,95	<u>15,7</u> 19,13	<u>17</u> 8	<u>23,3</u> 9,9	<u>20</u> 9
4a	Суглинок	1,83	17,95	8	9,9	9
5	Суглинок	1,85	18,15	<u>13</u> 9	<u>17,7</u> 4,9	<u>7,4</u>
6	Супісок	1,9	18,64	<u>18</u> 9	<u>7</u> 3,3	10
7	Пісок дрібний, ср. щільності	1,98	19,42	28	1	25
8	Глина	1,89	18,54	15	58	11

Примітка: в чисельнику – дані для ґрунтів природної вологості, в знаменнику – при їх водонасиченні.

Варто зазначити, що для перевірки працездатності алгоритмів, закладених в ПК SATER.LANDSLIDE та верифікації результатів оцінки стійкості за допомогою наведеного комплексного підходу проводився розв'язок ряду тестових прикладів, лише незначна частина з яких була опублікована в працях [1], а також розв'язано іншу практичну задачу [3], в результаті яких була продемонстрована досить висока збіжність результатів в порівнянні з іншими методами.

Геологічна будова схилу та відповідні шари ґрунту зображені на рис. 3. Розглядалося три інженерно-геологічні розрізи, у відповідності до яких було обрано три розрахункові перерізи (поверхні ковзання для яких позначалися літерами А, В та С відповідно), проте враховуючи, що геологічна будова схилу не має різких змін на усій його протяжності, наведено буде графічні матеріали лише для розрізу 2-2, що знаходиться в середній частині схилу.

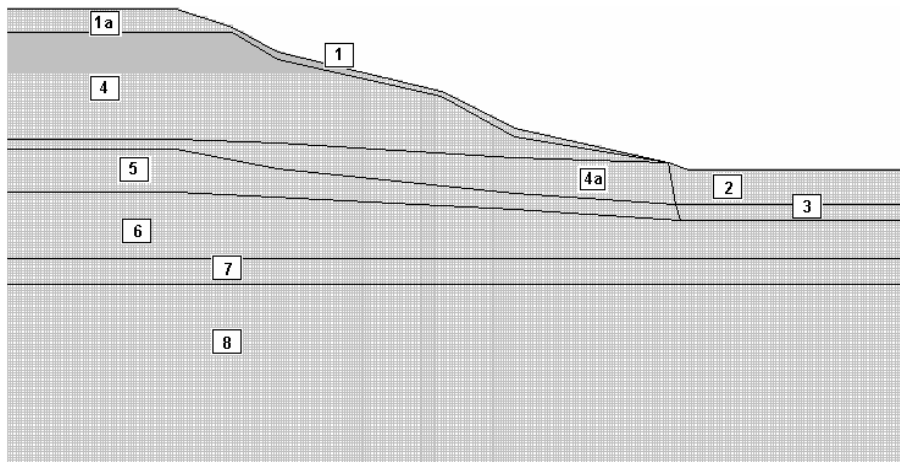


Рис. 3. Параметри ґрунтового середовища, ІГР 2 – 2

Для зведення будівлі також передбачена зміна геометрії схилу, що впливає на його загальну стійкість. На рис. 4 представлено схил до забудови (а) та відповідно забудований схил (б).

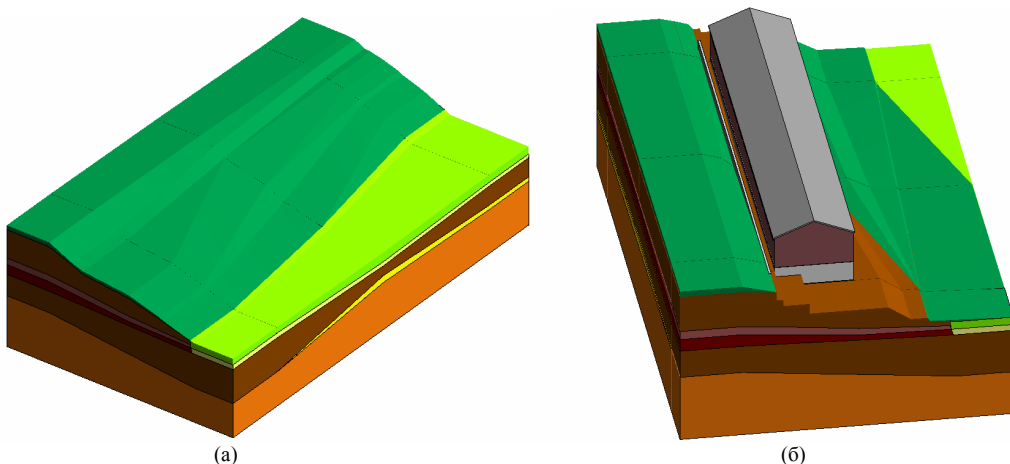


Рис. 4. Ілюстративне зображення схилу: (а) до забудови, постановка №1; (б) після забудови, постановки №2 та №3

В результаті проведеної оцінки стійкості даного схилу з використанням комплексного підходу на основі НМСЕ та теорії графів отримані значення коефіцієнтів стійкості для розрахункових перерізів 1-1, 2-2, 3-3, які склали 1.32, 1.20, 1.16 відповідно при природньому стані ґрунтів. Таким чином, згідно отриманих результатів схил перебуває у стійкому стані, проте зміна його геометрії, додаткові навантаження та інші негативні фактори

впливу можуть призвести до розвитку зсувних процесів, що підтвердилося в результаті розрахунків, проведених для інших постановок. Так, в подальшому проведено оцінку напружено-деформованого стану для постановок з додатковим навантаженням від дорожнього покриття та транспорту та будівлі для ґрунтів у природному стані та з урахування їх перезволоження. Для даних постановок додатково було проведено розрахунок коефіцієнта стійкості за методикою наведеною в [2], відповідно поверхні ковзання, за якими здійснювався розрахунок, мають позначення B1 та B1w та зображені на рис. 5. Поверхні ковзання, отримані для даних постановок за допомогою комплексного підходу B2 та B2w, наведені на рис. 6 та рис. 7, де також наведені ізолінії пластичних деформацій. Отримані наступні коефіцієнти стійкості за даними поверхнями: $k_{st,B1} = 1,08$ та $k_{st,B1w} = 0,81$, $k_{st,B2} = 0,87$ та $k_{st,B2w} = 0,63$. Різниця в отриманих результатах пояснюється переважно різницею в формі поверхонь ковзання.

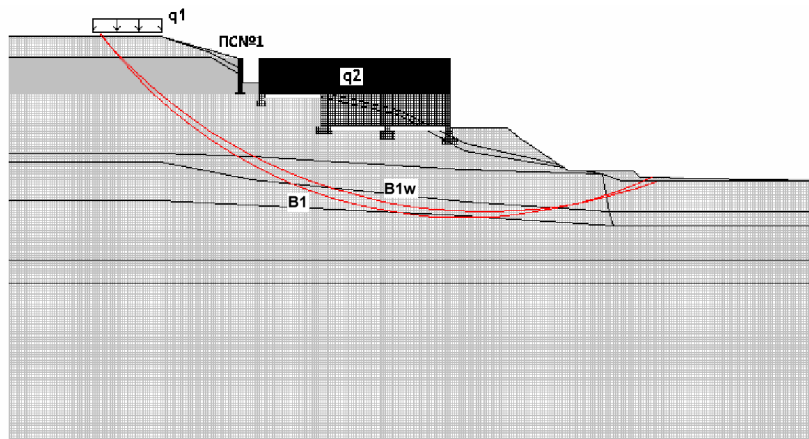


Рис. 5. Розрахунковий переріз 2-2, поверхні ковзання B1, B1w (B1 – природна вологість, B1w – водонасичення ґрунтів)

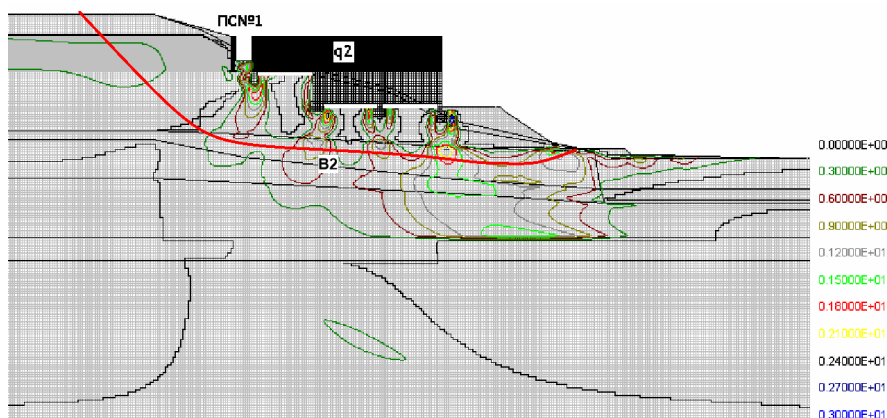


Рис. 6. Розрахунковий переріз 2-2, ізолінії інтенсивності пластичних деформацій, %, природна вологість ґрунтів, поверхня ковзання B2

Наведені результати підтверджують необхідність проведення заходів з інженерного захисту території майданчика від зсувних процесів. Для отримання вихідних даних для підбору раціонального місця розміщення захисних споруд та їх проектування проводилося визначення зсувного тиску на погонний метр споруди та побудована його епюра, яка зображена на рис. 8. В подальшому розглядалося ще дві постановки з поетапним введенням захисних споруд (у вигляді підпірних стін ПСН№1 глибиною 16 м та ПСН№2 глибиною 17 м) до стабілізації схилу за потенційно можливих найбільш несприятливих умов. Варто відмітити, що розміщення лише однієї підпірної стіни №1 не призводить до стабілізації схилу (рис. 9, 10), тому було проведено

визначення зсувного тиску та побудована його епюра за поверхнею B3w, яка представлена на рис. 11.

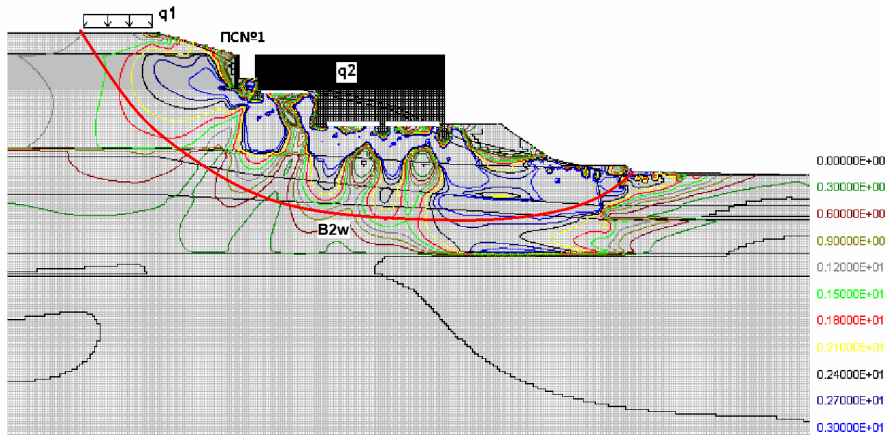


Рис. 7. Розрахунковий переріз 2-2, ізолінії інтенсивності пластичних деформацій, %, водонасичені ґрунти, поверхня ковзання B2w

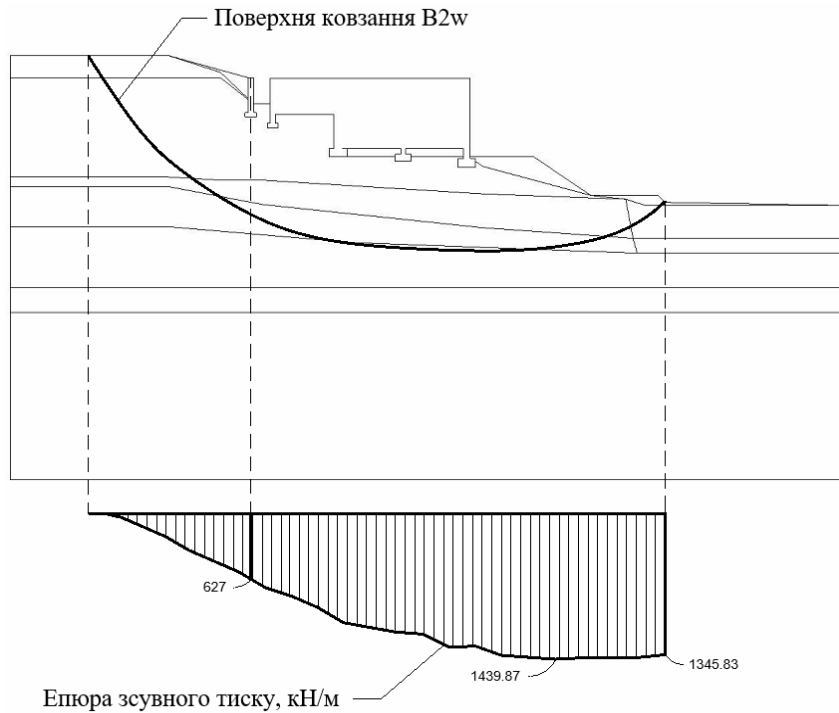


Рис. 8. Епюра зсувного тиску, що відповідає поверхні ковзання B2w, кН/м

З наведеного на рис. 12 видно, що додані до схеми підпірні стіни, навіть за найбільш несприятливих умов, перешкоджають утворенню нової поверхні ковзання та призводять до стабілізації схилу.

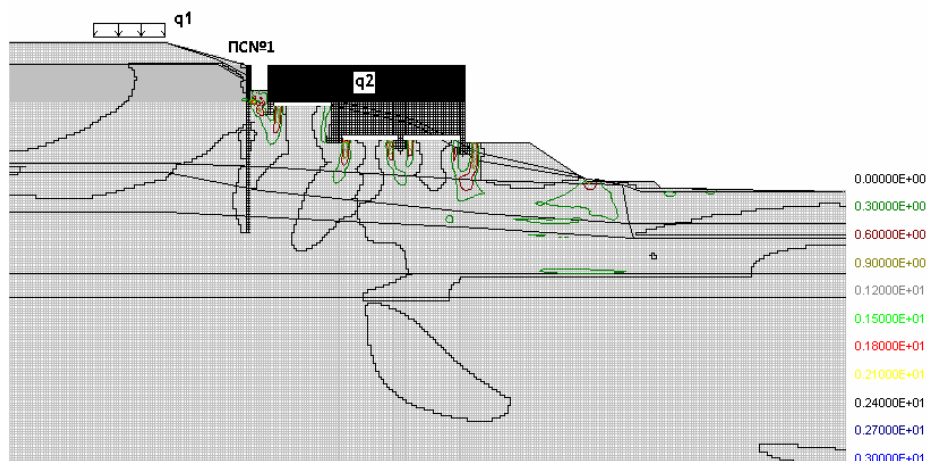


Рис. 9. Розрахунковий переріз 2-2, ізолінії інтенсивності пластичних деформацій, %, природна вологість ґрунтів. ПС №1 ($h = 16$ м)

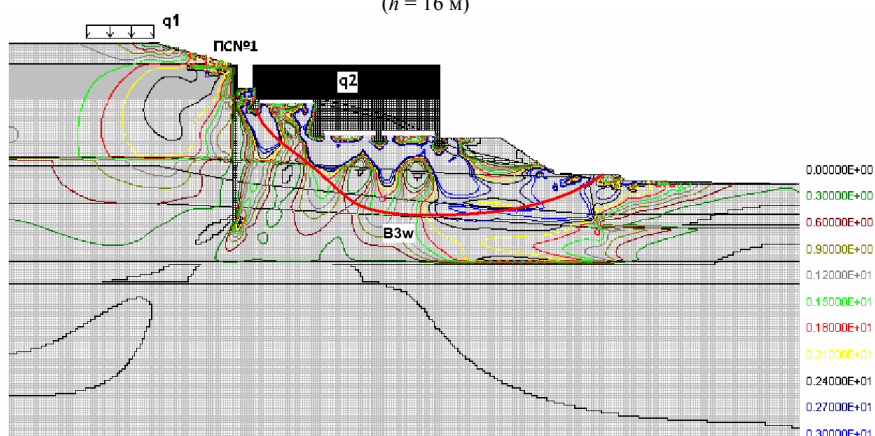


Рис. 10. Розрахунковий переріз 2-2, ізолінії інтенсивності пластичних деформацій, %, водонасичені ґрунти. ПС №1 ($h = 16$ м)

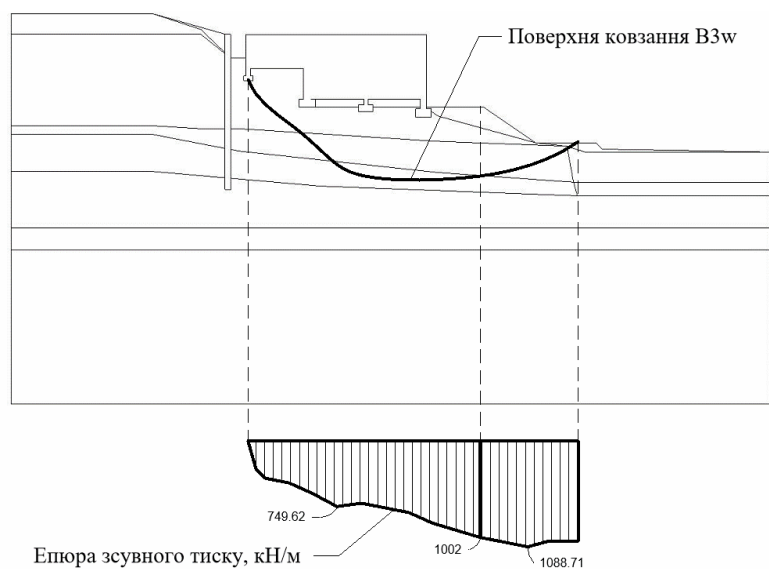


Рис. 11. Епюра зсувного тиску, що відповідає поверхні ковзання В3w, кН/м

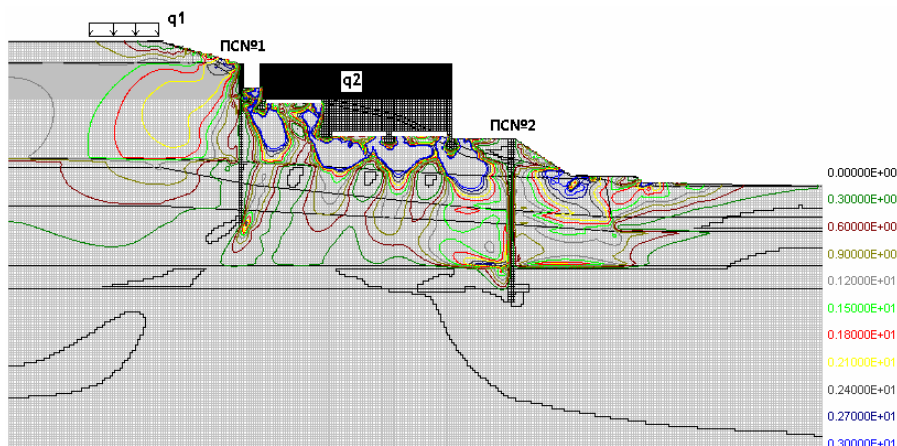


Рис. 12. Розрахунковий переріз 2-2, ізолінії інтенсивності пластичних деформацій, %, водонасичені ґрунти.
ПС №1 ($h = 16\text{м}$), ПС №2 ($h = 17\text{м}$)

Висновки. Розглянуто можливості та межі використання комплексного підходу, що базується на методі скінченних елементів та підходах теорії графів при розв’язанні задач оцінки стійкості ґрунтових масивів схилів в природньому стані та у випадку їх використання в якості основ будівель і споруд. Наведено результати практичного використання даного методу на основі розв’язку прикладної задачі з оцінки стійкості неоднорідного схилу, що підтверджує можливість застосування такого підходу в якості окремого інструментарію для розв’язку зазначеного класу задач.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Солодей І. І., Павленко В. М., Куліков О. П. Один із підходів до оцінки стійкості ґрунтового масиву у рамках сіткових методів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн. - К.: КНУБА, 2024. - Вип. 113. - С. 29-36.
2. Ломбардо В. Н., Грошев М. Е., Олімпієв Д. Н. Учет напряженно-деформированного состояния при расчетах устойчивости грунтовых плотин // Гидротехническое строительство, 1986. - № 7. - С. 16-18.
3. Павленко В. М. Поєднання чисельних методів з підходом на основі теорії графів для оцінювання стійкості схилів // Управління розвитком складних систем. - Київ, 2025. - № 61. - С. 202 – 209, dx.doi.org/10.32347/2412-933.2025.61.202-209.
4. Cundall P. A. A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems // Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. - Nancy, France, 1971. - 1. No. II-8.
5. Dawson E., Motamed F., Nesarajah S., Roth M. Geotechnical stability analysis by strength reduction. Slope Stability 2000: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000 // ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. - №101. - pp. 99-113.
6. Dawson E. M., Roth W. H., Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction // Geotechnique, 1999. - vol. 49. №6. - pp. 835-840.
7. Deng J. H., Lee C. F. Displacement Back Analysis for a Steep Slope at the Three Gorges Project Site // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001. - 38. - pp. 259–268.
8. Griffiths D. V., Lane P. A. Slope Stability Analysis by Finite Elements // Geotechnique, 1999. - 49(3). - pp. 387-403.
9. Guan, Y., Liu, X., Wang, E., Wang, S. The stability analysis method of the cohesive granular slope on the basis of graph theory // Materials, 2017. - vol. 10(3). - 240 p.
10. Matsui T., San K. C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique // Soils and Foundations, 1992. - vol. 32. - pp. 59-70.
11. Sakellariou M. G., Ferentinou M. D. A Study of Slope Stability Prediction Using Neural Networks // Geotechnical and Geological Engineering, 2005. - 23. - pp. 419–445.
12. Zheng, W., Zhuang, X., Tannant, D.D., Cai, Y., Nunn, S. Unified continuum/discontinuum modeling framework for slope stability assessment // Eng. Geol., 2014. - 179. - pp. 90–101.

REFERENCES

1. Solodei I. I., Pavlenko V. M., Kulikov O. P. Odyin iz pidkhodiv do otsinky stiikosti gruntovoho masyvu u ramkakh sitkovykh metodiv (One of the approaches to assessing the stability of the soil massif within the grid methods) // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirn. - K.: KNUBA, 2024. - Vyp. 113. - S. 29-36.
2. Lombardo V. N., Hroshev M. E., Olympyev D. N. Uchet napriazhenno-deformirovannoho sostoiannya pry raschetakh ustoichyvosti hruntovykh plotyn (Taking into account the stress-strain state in calculating the stability of earth dams) // Hydrotekhnicheskoe stroitelstvo, 1986. - № 7. - S. 16-18.

3. Pavlenko V. M. Poiednannia chyselnykh metodiv z pidkodom na osnovi teorii hrafiv dlia otsiniuvannia stiikosti skhyliv (Combination of numerical methods with the approach based on graph theory in slope stability assessment) // Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. - Kyiv, 2025. - № 61. - S. 202 – 209, dx.doi.org/10.32347/2412-933.2025.61.202-209.
4. Cundall P. A. A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems // Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. - Nancy, France, 1971. - 1. No. II-8.
5. Dawson E., Motamed F., Nesarajah S., Roth M. Geotechnical stability analysis by strength reduction. Slope Stability 2000: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000 // ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. - №101. - pp. 99-113.
6. Dawson E. M., Roth W. H., Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction // Geotechnique, 1999. - vol. 49. №6. - pp. 835-840.
7. Deng J. H., Lee C. F. Displacement Back Analysis for a Steep Slope at the Three Gorges Project Site // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001. - 38. - pp. 259–268.
8. Griffiths D. V., Lane P. A. Slope Stability Analysis by Finite Elements // Geotechnique, 1999. - 49(3). - pp. 387-403.
9. Guan, Y., Liu, X., Wang, E., Wang, S. The stability analysis method of the cohesive granular slope on the basis of graph theory // Materials, 2017. - vol. 10(3). - 240 p.
10. Matsui T., San K. C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique // Soils and Foundations, 1992. - vol. 32. - pp. 59-70.
11. Sakellariou M. G., Ferentinou M. D. A Study of Slope Stability Prediction Using Neural Networks // Geotechnical and Geological Engineering, 2005. - 23. - pp. 419–445.
12. Zheng, W., Zhuang, X., Tannant, D.D., Cai, Y., Nunoo, S. Unified continuum/discontinuum modeling framework for slope stability assessment // Eng. Geol., 2014. - 179. - pp. 90–101.

Стаття надійшла 19.09.2025

Солодей І.І., Павленко В.М.

МОЖЛИВОСТІ ТА МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МСЕ ТА ТЕОРІЇ ГРАФІВ

Підбір методу розв'язання складних інженерних задач є невід'ємною частиною будь-якого розрахункового процесу, від якого значною мірою залежить точність і достовірність отриманих результатів. При цьому всі методи і підходи, навіть найбільш універсальні, мають певні межі їх раціонального застосування. В такому разі важливо означити межі та можливості використання тих чи інших методів. У даній роботі коротко розглянуто межі використання комбінованого підходу на базі методу скінченних елементів та теорії графів, а також варіанти його використання у вигляді окремого інструментарію чи в поєднанні з іншими методами для нівелювання їх недоліків або для проведення альтернативних розрахунків. Окрім цього, розглянуто можливість поєднання підходу на основі теорії графів з іншими чисельними методами.

У роботі також наведено результати практичного використання даного комбінованого підходу при оцінці стійкості неоднорідного зсувонебезпечного схилу, розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану якого проводилися з використанням напіваналітичного методу скінченних елементів в просторовій постановці задачі, а оцінка стійкості проводилася з використанням підходів теорії графів за визначеними розрахунковими перерізами. В ході розв'язання даної задачі розглядалося поетапно п'ять різних постановок від схилу в природному стані до забудованого схилу з урахуванням можливого варіанту інженерного захисту даної ділянки. Відповідно, для одного з розрахункових перерізів наведено отримані значення коефіцієнтів стійкості, форми потенційних поверхонь ковзання, у відповідності до деяких із них проведено визначення та побудову епюр зсувного тиску, що може використовуватися як вихідні дані при розміщенні і розрахунках споруд інженерного захисту.

Ключові слова: чисельні методи, теорія графів, коефіцієнт стійкості схилів, стійкість основ будівель і споруд, методи розрахунку схилів, моделювання схилів, метод скінченних елементів, напіваналітичний метод скінченних елементів.

Solodei I.I., Pavlenko V.M.

POSSIBILITIES AND LIMITS OF APPLYING THE METHOD OF ASSESSING THE STABILITY OF SOIL MASSIFS USING FEM AND GRAPH THEORY

The selection of a method for solving complex engineering problems is an integral part of any calculation process, on which the accuracy and reliability of the obtained results largely depend. At the same time, all methods and approaches, even the most universal, have certain limits of their rational application. In this case, it is important to determine the limits and possibilities of using certain methods. This paper briefly considers the limits of using a combined approach based on the finite element method and graph theory, as well as options for its use as a separate toolkit or in combination with other methods to eliminate their shortcomings or to perform alternative calculations. In addition, the possibility of combining the approach based on graph theory with other numerical methods is considered.

The paper also presents the results of practical use of this combined approach in assessing the stability of a non-uniform landslide-prone slope, the calculation and analysis of the stress-strain state of which were carried out using the semi-analytical finite element method in the spatial formulation of the problem, and the stability assessment was carried out using graph theory approaches for the specified calculation sections. In the course of solving this problem, five different settings were considered in stages, from the slope in its natural state to the built-up slope, taking into account a possible option for engineering protection of this area. Accordingly, for one of the calculation sections, the obtained values of the stability coefficients and the shapes of potential sliding surfaces are given in accordance with some of them, shear pressure diagrams were determined and constructed, which can be used as initial data for the placement and calculations of engineering protection structures.

Keywords: numerical methods, graph theory, slope stability coefficient, stability of building and structure bases, slope calculation methods, slope modelling, finite element method, semi-analytical finite element method.

УДК 624.131.7

Солодей І.І., Павленко В.М. **Можливості та межі застосування методу оцінки стійкості ґрунтових масивів з використанням МСЕ та теорії графів** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 115. – С. 3-12.

У даній роботі розглянуто варіанти та межі застосування методу оцінки стійкості ґрунтових масивів з використанням комбінованого підходу на базі методу скінченних елементів та теорії графів. Наведено результати проведеної оцінки стійкості неоднорідного зсувонебезпечного схилу з використанням даного підходу в постановках задачі від природного стану схилу до забудованого схилу з конструкціями інженерного захисту.

Іл. 12., Табл. 1 Бібліогр., 14 назв.

UDC 624.131.7

Solodei I.I., Pavlenko V.M. **Possibilities and limits of applying the method of assessing the stability of soil massifs using FEM and graph theory** // Resistance of materials and theory of structures: Scientific-and-technical collected articles- K.: KNUBA, 2025. – Issue115. - P. 3-12.

This paper considers the options and limits of application of the method for assessing the stability of soil masses using a combined approach based on the finite element method and graph theory. The results of the assessment of the stability of a non-uniform landslide-prone slope using this approach in problem statements from the natural state of the slope to the built-up slope with engineering protection structures are presented.

Fig. 12. Tab. 1 Ref. 6.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки

Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: solodei.ii@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7638-3085>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор філософії (Ph.D) в прикладній механіці, асистент кафедри будівельної механіки ПАВЛЕНКО Василь Михайлович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки

Email: pavlenko_vm@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-5405>