

АНОТАЦІЯ

Павленко В. М. Розв'язання просторової нелінійної задачі стійкості основ будівель і споруд на зсувонебезпечних територіях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». – Київський національний університет будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2025.

Залучення зсувних і зсувонебезпечних територій в господарську діяльність та їх забудова пов'язана зі складною інженерною задачею, що має бути вирішена на етапі розробки проектних рішень майбутніх будівельних об'єктів. Вона полягає в необхідності проведення оцінки стійкості ґрунтового масиву, що планується використовувати в якості основи для будівель і споруд, адже виникнення або активізація зсувних процесів може мати негативні наслідки не лише в економічному плані, а також нести безпосередню загрозу для життя і здоров'я людей. Розроблена значна кількість різноманітних методів для вирішення означеної задачі, використання яких зумовлюється переважно необхідною точністю отриманих результатів розрахунків та обмеженнями і недоліками тих чи інших методів. При цьому створення нових підходів і методів, які б базувалися на сучасних чисельних методах, з метою нівелювання недоліків інших методів залишається актуальною проблемою.

При цьому на даний час одним із найбільш розповсюджених і універсальних чисельних методів розрахунків задач з механічної інженерії загалом і в будівельній галузі зокрема, являється метод скінченних елементів (МСЕ). Його значне розповсюдження пов'язане з можливістю розв'язку різних видів задач, у тому числі: просторових, з урахуванням різних типів нелінійності, тих що залежать від часу, механіки руйнування, стійкості, теплопровідності, повзучості та багатьох інших. Підвищити ефективність МСЕ можливо за допомогою введення додаткових гіпотез, які певною мірою звужують коло задач, при цьому дозволяючи значною мірою зменшити тривалість розрахункового процесу. Одним з таких методів являється напіваналітичний метод скінченних елементів

(НМСЕ). Розвиток НМСЕ пов'язаний з такими видатними науковцями як: В.А. Баженов, О. Зенкевич, О.С. Сахаров, О.І. Гуляр, Ю.М. Шевченко, М.М. Шапошніков та іншими.

У представлений роботі пропонується новий підхід до розв'язання задач стійкості основ будівель і споруд на зсувонебезпечних територіях, який дозволить використовувати переваги МСЕ при визначенні напружено-деформованого стану схилу, в тому числі з можливістю застосування НМСЕ для зменшення обчислювальних витрат при розв'язанні просторових задач, комбінуючи ці методи з алгоритмами, створеними на основі теорії графів для проведення оцінки стійкості ґрунтового масиву, даючи змогу при цьому вирішувати такі задачі як: визначення коефіцієнта стійкості, побудова потенційної поверхні ковзання, побудова епюри зсувного тиску.

В першому розділі наведено огляд теорії і методів дослідження стійкості основ будівель і споруд на зсувонебезпечних територіях, а саме: існуючі класифікації зсувних процесів, потенційні природні і техногенні фактори впливу, методи оцінки стійкості та їх особливості.

Складна природа зсувів спонукала до створення широкого кола різноманітних класифікацій, в яких основними критеріями поділу являються такі ознаки як: глибина захоплення, ступінь активності, масштаб прояву, швидкість руху та механізм зміщення зсувних мас, структура та інші. При цьому одними з найбільш корисних при розв'язанні такого класу задач є поділ саме за механізмом зміщення ґрунтових мас, що підтверджується розповсюдженням даних класифікацій в науковій літературі.

Враховуючи відсутність уніфікованої класифікації зсувів, що пояснюється значним різноманіттям особливостей схилів, важливим є виділення і аналіз ключових чинників, що можуть впливати на стійкість конкретного схилу, які обов'язково мають враховуватися при оцінці їх стійкості. В роботі виділені основні природні та техногенні чинники, які додатково розподілені на підгрупи відповідно до їх першочергового впливу на схил.

Розглянуті найбільш розповсюджені методи оцінки стійкості схилів, виділені основні їх переваги і недоліки. Значна увага була приділена методам граничної рівноваги та методу зниження міцності через широке використання даних методів в спеціалізованих розрахункових комплексах, що мають функціонал для проведення оцінки стійкості схилів і укосів.

На основі проведеного аналізу існуючих методів, їх переваг і недоліків, було прийнято рішення про створення нового комплексного підходу, що поєднує застосування методу скінченних елементів та підходи теорії графів для створення інструментарію розв'язання задач стійкості схилів та наведено основні його положення. Залучення методу скінченних елементів дозволяє використовувати сучасні ґрунтові моделі, що дає змогу більш точно моделювати властиву ґрунтам нелінійну поведінку під дією навантажень.

В другому розділі основна увага приділяється створенню умов для залучення НМСЕ до розв'язку означеного класу задач, що дозволить підвищити ефективність чисельного розв'язку просторових нелінійних задач стійкості основ будівель і споруд на зсвонебезпечних територіях. Розглянуто основні математичні співвідношення пружно-пластичної дилатансійної моделі ґрунтового середовища. Для зменшення трудоемкості розв'язку пропонується використання моментної схеми скінченного елемента (МССЕ), яка дозволяє уникнути інтегрування по площині СЕ, зберігаючи при цьому високу ефективність дискретизації об'єкта. Для моделювання неоднорідної структури схилу розроблені спеціальні ґрунтові неоднорідні призматичні СЕ НМСЕ з довільними граничними умовами на їх торцях, в яких переміщення у напрямку твірної апроксимуються розкладанням за системою координатних функцій поліномами Лагранжа і Міхліна. Для перевірки ефективності запропонованих підходів розглянуто ряд тестових прикладів.

У третьому розділі висвітлено розроблений алгоритм розв'язання задач стійкості основ будівель і споруд на базі теорії графів, в якому відображені основні кроки для реалізації запропонованого комплексного підходу. Використання даного підходу починається з визначення напружено-

деформованого стану схилу за допомогою МСЕ, вихідними даними для якого являються результати інженерно-геологічних вишукувань. В подальшому використовуються підходи та алгоритми теорії графів для вирішення задач стійкості ґрунтового масиву схилу. Для цього, базуючись на скінченно-елементній моделі, будується зважений граф, вага ребер якого визначається на основі отриманих результатів оцінки НДС схилу. Використовуючи алгоритми пошуку найкоротшого шляху для зважених графів, стає можливою локалізація потенційної поверхні ковзання, відповідно до якої можна визначити коефіцієнт стійкості та побудувати епюру зсувного тиску. Отримані результати дають змогу не лише оцінити стійкість схилу, але і отримати дані, необхідні для розробки заходів інженерного захисту та проектування утримуючих споруд. Також розглянуто можливість вирішення просторових задач за допомогою запропонованого підходу.

Використовуючи розроблений підхід розв'язано ряд тестових прикладів, при розв'язку яких оцінювалася збіжність отриманих результатів у порівнянні з іншими методами оцінки стійкості схилів. Також досліджувався вплив на результати в залежності від зміни наступних чинників: розміру та типу скінченних елементів, геометричних параметрів схилу, фізико-механічних характеристик ґрунтів.

В четвертому розділі розв'язано прикладні задачі з оцінки стійкості схилів, а саме: проаналізовано НДС схилів, проведено оцінку стійкості за рядом потенційних поверхонь ковзання при різних постановках задач (від природного стану до найбільш несприятливих умов), побудовано епюру зсувного тиску для визначення навантажень на утримуючі споруди, запропоновано заходи інженерного захисту, проаналізовано вплив цих заходів на НДС схилу. Отримані результати підтвердили можливість використання запропонованого підходу при вирішенні складних прикладних задач з оцінки стійкості основ будівель і споруд на територіях з потенційним розвитком зсувних процесів та зсувних територіях.

В результаті проведених досліджень запропоновано новий комплексний підхід для вирішення задач оцінки стійкості основ будівель і споруд на

зсувонебезпечних територіях на базі метода скінченних елементів та з використанням алгоритмів та підходів теорії графів. Розв'язання просторових нелінійних задач пропонується виконувати з залученням напіваналітичного методу скінченних елементів. Для моделювання неоднорідної структури схилу пропонується застосовувати розроблені спеціальні неоднорідні ґрунтові призматичні СЕ НМСЕ. Розроблено нову ефективну методику і алгоритми для її реалізації, ключовою особливістю яких являється можливість використання скінченно-елементної моделі при побудові графу, що значно спрощує обмін інформацією між нею і побудованим графом. Проведено аналіз збіжності та достовірності отриманих результатів у порівнянні з іншими методами на основі значної кількості тестових задач. Отримано результати оцінки стійкості реальних об'єктів з використанням запропонованого підходу, що дало змогу порівняти їх не лише з іншими методами, але і з натурними спостереженнями за розвитком зсувних деформацій.

Ключові слова: зсуви, зсувні і зсувонебезпечні території, основа, поверхня ковзання, коефіцієнт стійкості, стійкість схилу, числове моделювання, метод скінченних елементів (МСЕ), напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ), моментна схема скінченного елемента (МССЕ), напружено-деформований стан, нелінійний розрахунок, моделювання схилів, теорія графів.

SUMMARY

Pavlenko V. M. Solving the spatial nonlinear problem of stability of the bases of buildings and structures in landslide-prone areas. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 131 "Applied Mechanics". – Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The involvement of landslide and landslide-prone areas in economic activity and their development is associated with a complex engineering problem that must be solved at the stage of developing design solutions for future construction projects. It consists of the need to assess the stability of the soil massif that is planned to be used as a base for buildings and structures because the occurrence or intensification of landslide processes can have negative consequences not only in economic terms, but also pose a direct threat to human life and health. A significant number of various methods have been developed to solve the specified problem, the use of which is mainly due to the required accuracy of the obtained calculation results and the limitations and shortcomings of certain methods. At the same time, the development of new approaches and methods that would be based on modern numerical methods to eliminate the shortcomings of other methods remains an insistent problem.

At the same time, one of the most widespread and universal numerical methods for calculating problems in mechanical engineering in general and in the construction industry in particular is the finite element method (FEM). Its significant spread is associated with the possibility of solving various types of problems including: spatial, various types of nonlinearity, depend on time, fracture mechanics, stability, thermal conductivity, creep and many others. It is possible to increase the efficiency of FEM by introducing additional hypotheses that to some extent narrow the range of problems, while allowing to significantly reduce the duration of the calculation process. One of these methods is the semi-analytical finite element method (SAFEM). The development of SAFEM is associated with such prominent scientists as: V.A.

Bazhenov, O. Zenkevych, O.S. Sakharov, O.I. Gulyar, Yu.M. Shevchenko, M.M. Shaposhnikov and others.

The presented work proposes a new approach to solving the stability problems of the bases of buildings and structures in landslide-prone areas, which will allow using the advantages of FEM in determining the stress-strain state of the slope, including the possibility of using SAFEM to reduce computational costs when solving spatial problems, combining these methods with algorithms developed based on graph theory for assessing the stability of the soil massif, while allowing solving such problems as: determining the stability coefficient, indicate location a potential slip surface, constructing a shear pressure diagram.

The first chapter provides an overview of the theory and methods of studying the stability of the bases of buildings and structures in landslide-prone areas, namely: existing classifications of landslide processes, potential natural and technogenic factors of influence, and methods for assessing stability and their features.

The complex nature of landslides has prompted the development of a wide range of various classifications, in which the main criteria for division are such features as: depth of capture, degree of activity, scale of manifestation, speed of movement and mechanism of displacement of landslide masses, structure, and others. At the same time, one of the most useful in solving this class of problems is the division according to the mechanism of displacement of soil masses, which is confirmed by the distribution of these classifications in the scientific literature.

Given the lack of a unified classification of landslides, which is explained by the significant diversity of slope features, it is important to identify and analyze key factors that can affect the stability of a particular slope, which must be taken into account when assessing their stability. The paper highlights the main natural and technogenic factors, which are further divided into subgroups according to their primary impact on the slope.

The most common methods for assessing slope stability are considered, and their main advantages and disadvantages are highlighted. Considerable attention was paid to the methods of limit equilibrium and the method of strength reduction due to the

widespread use of these methods in specialized computational complexes that have functionality for assessing the stability of slopes.

Based on the analysis of existing methods, their advantages and disadvantages, it was decided to develop a new comprehensive approach that combines the application of the finite element method and graph theory approaches to create a toolkit for solving slope stability problems, and its main provisions are given. The use of the finite element method allows the use of modern soil models, which allows for more accurate modelling of the nonlinear behaviour inherent in soils under the action of loads.

In the second chapter, the main attention is paid to creating conditions for involving SAFEM in the solution of the specified class of problems, which will allow to increase efficiency of the numerical solution of spatial nonlinear problems of stability of bases of buildings and structures in landslide-prone areas. The main mathematical relations of the elastic-plastic dilatancy model of the soil environment are considered. To reduce the complexity of the solution, the use of a moment scheme of the finite element (MSFE) is proposed, which allows to avoid integration over the FE plane, while maintaining high efficiency of object discretization. To model the inhomogeneous structure of the slope, special soil inhomogeneous prismatic FE SAFEM with arbitrary boundary conditions at their ends have been developed, in which the displacements in the direction of the generator are approximated by expansion in the system of coordinate functions by Lagrange and Michlin polynomials. To verify the efficiency of the proposed approaches, several test examples are considered.

The third chapter highlights the developed algorithm for solving problems of stability of bases of buildings and structures based on graph theory, which reflects the main steps for implementing the proposed comprehensive approach. The use of this approach begins with determining the stress-strain state (SSS) of the slope using the FEM, the initial data for which are the results of engineering and geological surveys. Further, graph theory approaches and algorithms are used to solve problems of stability of the soil mass of the slope. For this, based on the finite element model, a weighted graph is constructed, the weight of the edges of which is determined based on the

obtained results of assessing the slope's SSS. Using algorithms for finding the shortest path for weighted graphs, it becomes possible to localize the potential sliding surface, according to which the stability coefficient can be determined and a shear pressure diagram can be constructed. The results obtained make it possible not only to assess the stability of the slope, but also to obtain the data necessary for developing engineering protection measures and designing retaining structures. The possibility of solving spatial problems using the proposed approach was also considered.

Using the developed approach, a number of test cases were solved, during the solution of which the convergence of the obtained results was assessed in comparison with other methods of assessing slope stability. The influence on the results depending on the change in the following factors was also studied: the size and type of finite elements, the geometric parameters of the slope, the physical and mechanical characteristics of the soils.

In the fourth chapter, applied problems on assessing slope stability were solved, namely: the slope stability was analyzed, the stability was assessed for several potential sliding surfaces under different problem statements (from the natural state to the most unfavourable conditions), a shear pressure diagram was constructed to determine the loads on the retaining structures, engineering protection measures were proposed, and the influence of these measures on the slope stability was analyzed. The results obtained confirmed the possibility of using the proposed approach in solving complex applied problems of assessing the stability of the bases of buildings and structures in areas with potential development of landslide processes and landslide areas.

As a result of the conducted research, a new comprehensive approach was proposed for solving problems of assessing the stability of building and structure foundations in landslide-prone areas based on the finite element method and using algorithms and approaches of graph theory. It is proposed to solve spatial nonlinear problems using the semi-analytical finite element method. For modelling the inhomogeneous structure of the slope, it is proposed to use the developed special inhomogeneous soil prismatic FE SAFEM. A new effective methodology and algorithms for its implementation have been developed, the key feature of which is the

possibility of using a finite element model when constructing a graph, which significantly simplifies the exchange of information between it and the constructed graph. An analysis of the convergence and reliability of the obtained results in comparison with other methods was carried out based on a significant number of test problems. The results of assessing the stability of real objects using the proposed approach were obtained, which made it possible to compare them not only with other methods but also with field observations of the development of shear deformations.

Keywords: landslides, landslide and landslide-prone areas, bases, sliding surface, stability coefficient, slope stability, numerical modelling, finite element method (FEM), semi-analytical finite element method (SAFEM), moment scheme of the finite element (MSFE), stress-strain state, nonlinear calculation, slope modelling, graph theory.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

а) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «А»:

1. Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М. Класифікація і причини виникнення зсувних процесів та методи розрахунку схилів. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. Вип. 109. С. 184-202. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.184-202> (Видання індексується в міжнародній наукометричній базі *Web of Science*).

Особистий внесок автора: оформлення графічних матеріалів, висновків, текстова частина, що стосується методів граничної рівноваги.

2. Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М. Постановка задачі моделювання зсувних процесів в пластичних ґрунтах. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2023. Вип. 110. С. 47-62. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.47-62> (Видання індексується в міжнародній наукометричній базі *Web of Science*).

Особистий внесок автора: текстова частина про можливість використання методу скінченних елементів для вирішення поставленої задачі з можливістю використання комплексних моделей.

3. Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М. Особливості методів оцінки стійкості зсувних та зсувонебезпечних схилів. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2023. Вип. 111. С. 25-38. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.25-38> (Видання індексується в міжнародній наукометричній базі *Web of Science*).

Особистий внесок автора: оформлення графічних матеріалів, проведені розрахунки тестових задач, текстова частина про порівняння результатів розрахунків, отриманих за допомогою різних методів.

4. Солодей І.І., Павленко В.М. Використання теорії графів для оцінки стійкості зсувних і зсувонебезпечних схилів. *Опір матеріалів і теорія споруд*.

2024. Вип. 112. С. 19-27. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.19-27>
(Видання індексується в міжнародній наукометричній базі *Web of Science*).

Особистий внесок автора: оформлення графічних матеріалів, текстова частина про застосування теорії графів у задачах стійкості будівель і споруд на зсувонебезпечних територіях шляхом перетворення моделі методу скінченних елементів в граф.

5. 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*. 2024. Вип. 113. С. 29-36. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.29-36> (Видання індексується в міжнародній наукометричній базі *Web of Science*).

Особистий внесок автора: оформлення графічних матеріалів, текстова частина, що містить запропонований алгоритм розв'язку задач з оцінки стійкості ґрунтових масивів з описом основних його етапів.

б) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»:

6. Павленко В.М. Поєднання чисельних методів з підходом на основі теорії графів при оцінці стійкості схилів. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2025. №61. С. 202 – 209. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.202-209>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Павленко В. М., Солодей І. І. Аналіз класифікацій і причин виникнення зсувних процесів та методів розрахунку схилів. *Modern research in world science: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів: SPC “Sci-conf.com.ua”, 2022. С. 446-450.

Особистий внесок автора: аналіз методів розрахунків, оформлення висновків.

8. Солодей І., Павленко В. Особливості моделювання зсувних процесів у малозв'язних пластичних ґрунтах. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів: зб. матеріалів Міжнар. наук.-техн. on-line конф.* Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С.145-147.

Особистий внесок автора: проаналізовано взаємозв'язок результатів розрахунків, отриманих за допомогою інтегральних методів, від прийнятих математичних моделей.

9. Солодей І.І, Павленко В.М. Оцінка стійкості ґрунтового масиву з використанням сіткових методів. *Актуальні проблеми розрахунків будівельних конструкцій: науково-технічний симпозіум, тези доповідей.* Київ: SCAD SOFT, 2024. С. 16-22.

Особистий внесок автора: оформлення графічних матеріалів, проведені розрахунки тестових задач, текстова частина, порівняння результатів, отриманих запропонованим підходом, з результатами, отриманими іншими методами.

10. Павленко В. М., Солодей І. І. Використання напіваналітичного методу скінченних елементів в задачах деформування ґрунтових основ. *Global trends in science and education: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ: SPC “Sci-conf.com.ua”, 2025. С. 239-245.

Особистий внесок автора: текстова частина з описом напіваналітичного методу скінченних елементів.