

АНОТАЦІЯ

Бондаренко Н. К. Параметричний аналіз напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2024.

Дисертація присвячена розробці наукової ідеї параметричного аналізу напружень та деформацій незакріпленої або закріпленої горизонтальної виробки, що взаємодіє з шаруватим масивом. Концептуально параметричний аналіз базується на математичному моделюванні на основі методу скінченних елементів. За допомогою авторських алгоритмів рішення цього методу, отримане для конкретного розрахункового випадку, екстраполюється на інші розрахункові випадки.

Актуальність досліджень визначення напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом, обумовлена наявністю проблем під час спорудження перегінних тунелів шляхом щитової проходки, зокрема метрополітену в місті Києві. Вплив шаруватості для Київського метрополітену можна визначити як негативний, оскільки конструкція перегінного тунелю, що взаємодіє з шаруватим масивом, деформується неоднорідно.

Основою параметричного аналізу є те, що напружено-деформований стан на коловій горизонтальній виробці із одиничним радіусом за допомогою *scaling*-параметрів (*scaling* – масштабування) можна екстраполювати на виробки будь-якого радіусу. Розробка теоретико-практичних основ параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом, є метою дисертаційної роботи.

Для досягнення мети проведено аналіз стану питання визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий

масив», а також методологічних підходів до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою.

Висновки аналізу підтверджують, що математичне моделювання на основі методу скінченних елементів дозволяє виконати всі завдання дисертації. Створено скінченно-елементні моделі системи «горизонтальна виробка – породний масив», які дозволяють варіацію радіусу виробки та деформаційних властивостей шаруватого масиву. Також побудовано скінченно-елементні моделі з одиничними параметрами, які є первинними для подальшого скейлінгу (масштабування).

За допомогою створених скінченно-елементних моделей визначено, що під час скейлінгу системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив» з одиничним геометричним параметром (радіус виробки $R=1$) слід збільшити напруження в n разів, а переміщення в n^2 , де n – відношення радіусів реальної системи та системи з одиничним геометричним параметром. Після цього слід застосувати отримані авторські закономірності для характерних точок виробки, щоб визначити напружено-деформований стан на обрисі виробки для інших значень відношення модулів пружності матриці і шару.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше з коефіцієнтом кореляції $R^2=0,97\dots0,99$ отримано закономірності напружень на контурі незакріпленої виробки в шаруватому масиві, які для трьох характерних точок є логарифмічними, а для двох точок мають лінійний характер. Доведено, що значення переміщень реальної закріпленої виробки на відміну від виробки з одиничним геометричним параметром збільшуються в стільки разів, наскільки збільшується модуль пружності масиву при незмінному рівні напружень.

Проведене порівняння результатів параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену з інструментальними вимірюваннями доводить високий ступінь адекватності розроблених авторкою теоретико-практичних положень параметричного аналізу, оскільки похибка між вертикальними переміщеннями, отриманими в ході математичного моделювання та маркшейдерських вимірювань, складає 3,0...14,5 %.

Ключові слова: горизонтальна виробка, шаруватий масив, параметричний аналіз, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, scaling-параметри.

Список публікацій здобувачки.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. Бондаренко, Н. К. Порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену / Н. К. Бондаренко, О. Л. Тютькін // Наука та прогрес транспорту. – 2022. – № 2(98). – С. 78-85. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267934> (фахове видання)

2. Bondarenko, N. Parametric analysis of the stress-strain state for the unsupported and supported horizontal underground workings / O. Tiutkin, N. Bondarenko // Acta Technica Jaurinensis. – 2022. – № 15(4). – P. 199-206. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00681> (фахове видання)

3. Бондаренко, Н. К. Критичний аналіз підходів до визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив» / Н. К. Бондаренко, О. Л. Тютькін // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2022. – № 22. – С. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268182> (фахове видання)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Тютькін, О. Л. Числовий аналіз варіантів закладення шаруватого масиву при взаємодії із виробкою кругового окреслення [Текст] / О. Л. Тютькін, Т. П. Решетняк, Н. К. Петросян* // Матеріали 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018. – С. 237-238. (тези конференції)

*Примітка. Н. К. Петросян – дівоче прізвище Н. К. Бондаренко.

5. Тютькін, О. Л. Основи параметричного аналізу напружено-деформованого стану незакріплених виробок в шаруватому масиві [Текст] / О. Л. Тютькін, Н. К. Петросян, Шибасєва А. В. // Матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку

залізничного транспорту», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2019. – С. 272-274. **(тези конференції)**

6. Tiutkin, O. Regularities of stress state of unsupported working occurring in a layered massif [Текст] / O. Tiutkin, N. Petrosian, A. Radkevych, A. Alkhdour // International Conference Essays Of Mining Science And Practice // E3S Web of Conferences 109, 00100 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100> **(тези конференції; видання індексується у наукометричній базі Scopus)**

7. Бондаренко, Н. К. Закономірності напружено-деформованого стану незакріпленої виробки як функції scaling-параметрів [Текст] / Н. К. Бондаренко, О. Л. Тютькін // Тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції «Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт», м. Харків, 15 листопада 2019 р. – С. 48-50. **(тези конференції)**

8. Alkhdour, A. Prediction of the stress-strain state of circular workings in a layered massif by scaling [Текст] / A. Alkhdour, A. Radkevych, O. Tiutkin, N. Bondarenko // II International Conference Essays of Mining Science and Practice, E3S Web of Conferences, 168, 00020 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800020> **(тези конференції; видання індексується у наукометричній базі Scopus)**

9. Тютькін, О. Л. Процес скейлінгу для визначення напружено-деформованого стану закріпленої виробки [Текст] / О. Л. Тютькін, Н. К. Бондаренко, І. А. Ларіонова // Матеріали 80 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020. – С. 163-166. **(тези конференції)**

10. Тютькін, О. Л. Особливості напружено-деформованого стану перегінних тунелів, пройдених в слабких шаруватих ґрунтах [Текст] / О. Л. Тютькін, Н. К. Бондаренко, І. А. Ларіонова // Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпровський національний університет

залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2021. – С. 193-195. (тези конференції)

11. Alkhdour, A. The parametric analysis of the supported circular working interacting with the layered massif [Текст] / A. Alkhdour, A. Radkevych, O. Tiutkin, N. Bondarenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 970, 012033 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012033> (тези конференції; видання індексується у наукометричній базі Scopus)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

12. Tiutkin, O. Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process [Текст] / O. Tiutkin, V. Petrenko, N. Petrosian, V. Miroshnyk, A. Alkhdour // Mining of Mineral Deposits. – 2018. – 12(4). – pp. 28-36. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.028> (видання індексується у наукометричній базі Scopus)

Внесок авторки в наукові публікації, що написані у співавторстві: у фахових статтях [1] і [2] аналізувала результати розроблених нею скінченно-елементних моделей та проводила порівняльний аналіз; у фаховій статті [3] проводила критичний аналіз підходів до визначення напружено-деформованого стану та брала участь у формуванні висновків; в статті [12], що індексується у наукометричній базі Scopus, виконувала аналіз результатів скінченно-елементних розрахунків; в матеріалах конференцій [6], [8] і [11], що індексуються у наукометричній базі Scopus, Н. К. Бондаренко викладала основи авторського параметричного аналізу, проводила математичне моделювання на основі чисельного аналізу; в тезах конференцій [4], [5], [7], [9] і [10] визначала мету і постановку завдань.

ABSTRACT

Nataliia Bondarenko Parametric analysis of the stress-strain state of a horizontal working interacting with a layered massif. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Building Industry and Civil Engineering. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2024.

The dissertation is devoted to the development of a scientific idea of a parametric analysis of stresses and strains of an unsupported or supported horizontal working interacting with a layered massif. Conceptually, parametric analysis is based on mathematical modeling using the finite element method. With the help of the author's algorithms, the solution of the finite element method, obtained for a specific calculation case, is extrapolated to other calculation cases.

The relevance of research on the determination of the stress-strain state of a horizontal working interacting with a layered massif is due to the presence of problems during the construction of running tunnels by shield tunneling, in particular, metro in Kyiv. The influence of layering for the Kyiv metro can be defined as negative, since the construction of the running tunnel interacting with the layered massif deforms non-uniformly.

The basis of parametric analysis is that the stress-strain state on a circular horizontal working with a unit radius can be extrapolated to workings of any radius using scaling parameters. The development of the theoretical and practical foundations of the parametric analysis of the stress-strain state of a horizontal working interacting with a layered massif is the goal of the dissertation work.

To achieve the goal, an analysis of the issue of determining the stress-strain state of the system “horizontal working – layered massif” was carried out, as well as methodological approaches to the layering of a rock massif weakened by horizontal mining.

The conclusions of the analysis confirm that mathematical modeling based on

the method of finite elements allows you to fulfill all the tasks of the dissertation. Finite-element models of the system “horizontal working – rock massif” were created, which allow variation of the working radius and deformation properties of the layered massif. Finite element models with single parameters are also built, which are primary for further scaling.

With the help of the created finite element models, it was determined that during the scaling of the system “horizontal working – layered massif” with a single geometric parameter (radius of the working $R=1$), the stress should be increased in n times, and the displacement in n^2 , where n is the ratio of the radii of the real system and the system with a single geometric parameter. After that, the obtained author's regularities should be applied for the characteristic points of the product to determine the stress-strain state on the outline of the product for other values of the ratio of the modulus of elasticity of the matrix and the layer.

The scientific novelty is that, for the first time, with a correlation coefficient $R^2=0.97 \dots 0.99$, the contour stress patterns of an unsupported working in a layered massif are obtained, which are logarithmic for three characteristic points, and linear for two points. It is proved that the displacement values of a real supported working, in contrast to a working with a single geometric parameter, increase as many times as the modulus of elasticity of the matrix increases at a constant stress level.

The comparison of the results of the parametric analysis of the Kyiv metro tunnel with instrumental measurements proves a high degree of adequacy of the theoretical and practical provisions of the parametric analysis developed by the author, since the error between the vertical displacements obtained during mathematical modeling and surveying measurements is 3.0 ... 14.5 %.

Keywords: horizontal working, layered massif, parametric analysis, stress-strain state, finite element method, scaling-parameters.