

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ КОСТЯНТИНІВНА

УДК 624.191.81:539.4.014

**ДИСЕРТАЦІЯ
ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ВИРОБКИ,
ЩО ВЗАЄМОДІЄ ІЗ ШАРУВАТИМ МАСИВОМ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Бондаренко Н. К.

Науковий керівник: Тютюкін Олексій Леонідович,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2024

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.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 11 |
| 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «ГОРИЗОНТАЛЬНА ВИРОБКА – ШАРУВАТИЙ МАСИВ» | 17 |
| 1.1 Аналіз науково-технічної задачі спорудження горизонтальної виробки під час щитової проходки..... | 17 |
| 1.2 Аналіз методологічних підходів до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою..... | 26 |
| 1.3 Аналітичний та чисельний підходи до визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – породний масив» | 33 |
| 2 ОСНОВИ ПАРАМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ВИРОБКИ В ШАРУВАТОМУ МАСИВІ..... | 45 |
| 2.1 Розробка скінченно-елементної моделі системи «горизонтальна виробка – породний масив» | 45 |
| 2.2 Сутність параметричного аналізу визначення напружено-деформованого стану горизонтальної виробки..... | 51 |
| 2.2.1 Параметричний аналіз визначення напружено-деформованого стану незакріпленої виробки | 55 |
| 2.2.2 Параметричний аналіз визначення напружено-деформованого стану закріпленої виробки | 57 |
| 2.3 Первинний параметричний аналіз напружено-деформованого стану на основі моделі з одиничними параметрами | 59 |
| 2.4 χ -параметр як основа параметричного аналізу незакріпленої виробки в шаруватому масиві..... | 65 |
| 2.5 Скейлінг (scaling) як інструмент параметричного аналізу | 69 |
| 3 ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ І ЗАКОНОМІРНОСТІ НДС ЗАКРІПЛЕНОЇ ВИРОБКИ, ЩО ЗАЛЯГАЄ В ШАРУВАТОМУ МАСИВІ..... | 78 |

| | |
|--|-----|
| | 10 |
| 3.1 Параметричний аналіз деформованого стану закріпленої виробки на основі еквівалентної жорсткості оправи..... | 78 |
| 3.2 к-параметр як основа параметричного аналізу закріпленої виробки в шаруватому масиві..... | 90 |
| 3.3 Закономірності НДС закріпленої виробки в шаруватому масиві | 93 |
| 3.4 Параметричний аналіз реальних перегінних тунелів метрополітену.... | 99 |
| 4 ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПАРАМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ З ІНСТРУМЕНТАЛЬНИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ..... | 106 |
| ВИСНОВКИ..... | 116 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 118 |

ВСТУП

Під час спорудження метрополітену на основі сучасного розуміння створення складних підземних об'єктів горизонтальні виробки займають приблизно 85...95 % від загальної протяжності. Виробками такого орієнтування в підземному просторі є перегінні тунелі, що сполучують станційні комплекси і призначені для швидкого та безаварійного переміщення метропоїзду, а також комфортного та безпечного пересування пасажирів.

В Україні і досі основною конструкцією перегінного тунелю, що споруджується в горизонтальній виробці, є збірна оправа колового окреслення, яка збирається з залізобетонних або чавунних елементів (блоків або тюбінгів). Лише після 2016 року, коли турецька компанія LİMAK («Представництво Лімак Іншаат Санаї ве Тіджарет Анонім Шіркети») запропонувала для умов Дніпровського метрополітену стратегію Новоавстрійського способу спорудження тунелів (NATM), з'явився альтернативний варіант кріплення – багаташарова оправа з торкрет-бетону та монолітного бетону. Але все ж концепція спорудження зі збірних елементів є найбільш розповсюдженою під час будівництва Харківського і особливо Київського метрополітенів.

Така ситуація є об'єктивною і диктується інженерно-геологічними та гідрогеологічними умовами спорудження метрополітенів в цих містах, а також широким впровадженням сучасної технології спорудження горизонтальних виробок – щитової проходки. Придбання українськими будівельниками прохідницьких щитів фірм «Herrenknecht» та «Lovat», зокрема з можливістю привантаження забою різного характеру, а також освоєння технологічних циклів проходки, вивантаження породи і монтажу оправи дозволило АТ «Київметробуд» і АТ «Харківметробуд» споруджувати перегінні ділянки між станціями з високим темпом проходки.

Проте, на якому б високому рівні не були відпрацьовані алгоритми проходки та монтажу оправи за допомогою високотехнологічних прохідницьких комплексів, під час спорудження Харківського та Київського

метрополітенів з'явилися проблеми під час роботи щита, які були пов'язані з особливостями інженерно-геологічного розрізу м. Києва та меншою мірою м. Харкова. Інженерно-геологічні умови цих міст, особливо м. Києва на лівому березі р. Дніпро, характеризуються явною шаруватістю, тобто ґрунти різного геологічного походження і, відповідно, різних деформаційних та міцнісних параметрів складені в літологічні різниці більш-менш горизонтального розташування. Відповідно, прохідницький щит врізається в декілька шарів, які під додатковим навантаженням деформуються неоднаково, а потім починає неконтрольовані рухи ножової частини («пірнання»), що можна характеризувати як неприпустиме явище під час будівництва.

Але і після спорудження оправи горизонтальної виробки, тобто в експлуатаційній стадії, вплив шаруватості можна визначити як негативний, оскільки конструкція перегінного тунелю, що взаємодіє з шаруватим масивом, деформується неоднорідно. Це пояснюється наявністю шару з іншими, ніж параметри масиву, характеристиками, в якому він знаходиться («матриця»), і, відповідно, формуванням складної картини напружено-деформованого стану (НДС), на який впливають властивості оправи, матриці і шару.

Виникає актуальна науково-технічна задача визначення НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив», яка в рамках механіки суцільного середовища або ширше механіки твердого деформівного тіла є фундаментальною задачею пошуку НДС незакріпленого або закріпленого отвору в середовищі з різними властивостями. Ця задача є класичною і має десятки рішень для окремих випадків, проте вона дуже рідко розглядає середовище як неоднорідне, а шаруватість породного масиву є саме явною неоднорідністю. Деякі поодинокі теоретичні рішення задачі для системи «горизонтальна виробка – шаруватий породний масив» є дуже спеціальними та потребують потужного математичного апарату. Для умов же щитової проходки на етапі проектування або навіть у ході розробки ґрунту потрібне оперативне втручання, що базується на прогнозуванні зміни НДС по причині зміни шарів.

Науковою ідеєю дисертаційної роботи є розробка параметричного аналізу

напружень та деформацій незакріпленої та закріпленої горизонтальної виробки, що взаємодіє з шаруватим масивом. Концептуально параметричний аналіз базується на математичному моделюванні методом скінченних елементів (МСЕ), рішення якого для конкретного розрахункового випадку за допомогою авторських алгоритмів екстраполюється на інші розрахункові випадки. Глобально наукова ідея дозволяє привести до системи чисельні рішення, які багатьма авторитетними авторами і донині вважаються такими, що не підлягають екстраполяції.

Дисертаційна робота виконана відповідно до тематики науково-дослідних робіт Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) (до грудня 2021 року – Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ)), а саме держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) «Аналітичні закономірності напружено-деформованого стану оправи шахтних стовбурів при проведенні спеціальних робіт» (номер державної реєстрації 0117U006810), «Наукове обґрунтування інноваційних технологій відновлення об'єктів транспортної інфраструктури України» (номер державної реєстрації 0119U001139), «Математичне моделювання взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим масивом при будівництві залізничних тунелів» (номер державної реєстрації 0119U001140), «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Технічні науки" Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна на 2021 рік» (номер державної реєстрації 0122U000381) та «Теоретико-практичні основи визначення напружено-деформованого стану в оправах підземних конструкцій метрополітенів» (номер державної реєстрації 0121U108031). Авторка була виконавицею робіт у вказаних НДР, результати дисертаційної роботи у вигляді основ параметричного аналізу застосовувалися під час роботи над ними.

Метою дисертаційної роботи є розробка теоретико-практичних основ параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані та вирішені такі **завдання дослідження:**

1. Провести аналіз стану питання визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив», зокрема методологічних підходів до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою.

2. Створити скінченно-елементні моделі системи «горизонтальна виробка – породний масив», які дозволяють варіацію радіусу виробки та деформаційних властивостей шаруватого масиву, зокрема моделі з одиничними параметрами.

3. Розробити основи параметричного аналізу визначення напружено-деформованого стану горизонтальної незакріпленої або закріпленої виробок, обґрунтувавши авторські гіпотези результатами чисельного аналізу скінченно-елементних моделей при варіації їхніх деформаційних та геометричних властивостей.

4. Визначити параметр масштабування напружено-деформованого стану незакріпленої виробки в однорідному та шаруватому породних масивах, обґрунтувавши його уведення в систему параметричного аналізу результатами розрахунків скінченно-елементних моделей та отримавши закономірності, що дозволяють екстраполювання авторських рішень на інші розрахункові випадки.

5. Виконати параметричний аналіз деформованого стану закріпленої виробки, увівши поняття еквівалентної жорсткості оправи, та отримати закономірності її напружено-деформованого стану в шаруватому масиві.

6. Провести порівняння результатів параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену з інструментальними вимірюваннями і оцінити достовірність розробленої авторкою системи параметричного аналізу.

Об'єктом дослідження є незакріплена або закріплена горизонтальна виробка, що взаємодіє із шаруватим масивом.

Предметом дослідження є параметри напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив».

Методом дослідження є метод скінченних елементів, чисельний аналіз

на його основі проводився за допомогою професійного розрахункового комплексу Structure CAD for Windows, version 7.31 R.4 (SCAD). За допомогою цього комплексу були створені скінченно-елементні моделі (СЕ-моделі) горизонтальних виробок із варіацією деформаційних та геометричних параметрів шаруватого масиву. Експериментальні дані, опрацьовані авторкою, являли собою результати маркшейдерських вимірювань оправи перегінних тунелів під час спорудження підземних об'єктів Київського метрополітену, виконані спеціалістами АТ «Київметробуд» та ДП «Укргеодезмарк».

Наукова новизна отриманих результатів.

1. 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, значення ж переміщень реальної закріпленої виробки на відміну від виробки з $R=1$ збільшуються в стільки разів, наскільки збільшується модуль пружності матриці при незмінному рівні напружень.

2. Вперше визначено, що для отримання напружень і переміщень незакріпленої виробки в шаруватому масиві будь-якого радіусу слід збільшити напруження в n разів (де n – відношення радіусів), а переміщення – в n^2 разів системи з одиничним радіусом $R=1$, тобто достатньо розрахувати лише один випадок шаруватості із визначеною товщиною шару та відношенням модулів пружності матриці і шару, щоб визначити напружено-деформований стан виробок з іншими геометричними і деформаційними параметрами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці положень параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки в шаруватому масиві, який дозволяє отримувати переміщення та напруження на коловій виробці із одиничним радіусом та за допомогою авторських параметрів екстраполювати його на виробки будь-якого радіусу, а також в практичних розрахунках для незакріпленої виробки при різних значеннях уведеного авторкою χ -параметру (відношення модулів пружності матриці і шару) та для закріпленої за допомогою k -параметру

(відношення модулів пружності конструкції і матриці) визначати НДС горизонтальної виробки і виконувати підбір матеріалу оправи.

Особистий внесок здобувача. Ряд наукових робіт був опублікований у співавторстві з іншими вченими. Слід відмітити, що в цих працях авторкою визначені мета і постановка наукових завдань та виконана їхня практична реалізація з допомогою авторської методики параметричного аналізу.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи викладалися на таких наукових заходах: 78 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», 17-18 травня 2018 р., ДНУЗТ, м. Дніпро; 79 Міжнародна науково-практична конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», 16-17 травня 2019 р., ДНУЗТ, м. Дніпро; International Conference Essays of mining science and practice, 25-27 червня 2019 р., м. Дніпро; I Міжнародна науково-технічна конференція «Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт», 15 листопада 2019 р., м. Харків; II International Conference Essays of Mining Science and Practice, 22-24 квітня 2020 р., м. Дніпро; 80 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», 17-18 вересня 2020 р., ДНУЗТ, м. Дніпро; VII Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 01-02 жовтня 2020 р., ДНУЗТ, м. Дніпро; 81 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», 22-23 квітня 2021 р., ДНУЗТ, м. Дніпро; III International Conference Essays of Mining Science and Practice, 06-08 жовтня 2021 р., м. Дніпро.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг – 128 сторінок, з них 102 сторінки основного тексту, 52 рисунки на 46 сторінках, 4 таблиці на 4 сторінках, список використаних джерел з 99 назв на 11 сторінках.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «ГОРИЗОНТАЛЬНА ВИРОБКА – ШАРУВАТИЙ МАСИВ»

1.1 Аналіз науково-технічної задачі спорудження горизонтальної виробки під час щитової проходки

Освоєння підземного простору великих міст України – один з перспективних і ефективних напрямів у вирішенні територіальних, транспортних, екологічних та соціальних проблем XXI століття. Спорудження метрополітенів, транспортних і комунікаційних тунелів закритим способом із застосуванням щитової проходки є найбільш технологічно відпрацьованим процесом у всьому комплексі підземного будівництва, що дозволяє проводити роботи на широкому фронті без перекриття руху на міських магістралях, що експлуатуються, і забезпечити нормальне функціонування транспортної й інженерної інфраструктури міста (Kolymbas, 2005; Maidl, B., Herrenknecht, Maidl, U., & Wehrmeyer, 2012; Pshynko, Radkevych, Netesa, M., & Netesa, A., 2020).

Щитова проходка, навіть за наявності складних інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов (грунтові масиви, складені слабкими та водонасиченими породами; наявність неоднорідності порід та шаруватості масиву; присутність міцних порід), наразі є основною технологією спорудження горизонтальних виробок метрополітену, тобто перегінних тунелів. Доволі значні капіталовкладення, що присутні на початку впровадження щитової проходки (досить кошковий тунелепрохідницький комплекс), достатньо швидко окупаються, оскільки існує залежність зниження вартості будівництва перегінного тунелю (на 1 пог. м) від його довжини (із асимптотичним тяжінням до мінімальної середньої вартості, грн./пог. м).

Постійні інновації під час розробки тунелепрохідницьких щитів на сьогоднішній день дають змогу свідчити, що різними компаніями, відомими у світі (Herrenknecht, Lovat, Robbins тощо), розроблені комплекси для майже

всього спектру порід за Протод'яконовим (від слабких пливунів $f=0,5$ – *ЕРВ*-щити або *тix*-щити до міцних порід з $f=10...16$). Важливим під час провадження щитової проходки є не лише найвища ступінь механізації всього циклу робіт (від розробки та навантаження породи, монтажу оправи до чекання швів та гідроізоляційних робіт), а й висока ступінь безпеки для робітників, які увесь цикл роботи захищені конструкцією щита.

Однак, при всіх існуючих перевагах щитової проходки, слід відмітити, що з геомеханічної позиції існують і деякі недоліки. Під час роботи щита в слабких водонасичених масивах, зокрема шаруватих та пливунних, існує проблема неконтрольованого випуску породи в робочу камеру. Навіть в конструкціях щитів, що мають привантаження забою будь-якого характеру (глинясте, ґрунтове або повітряне), існує можливість поступового проникнення слабких піщаних або глинястих ґрунтів із достатньо високою швидкістю.

Це, в свою чергу, викликає деформації земної поверхні, які відіграють роль додаткового навантаження, перш за все, на основи і фундаменти, а потім і на несучі конструкції каркасів будівель і споруд (ДБН В.2.3-7:2018, 2018). Ще однією причиною такого негативного впливу підземних виробок є збільшення деформацій їхньої оправи. Відсутність належних заходів щодо захисту міської забудови призводить до аварій. Прогнозування можливих геодинамічних процесів, розробка і своєчасна реалізація адекватних захисних заходів у зоні підземного будівництва є важливим завданням для проєктувальників, будівельників та інвесторів, оскільки поряд з виникненням очевидних незручностей і небезпеки для громадян, витрати на ремонт і відновлення пошкоджених будівель, а також на відшкодування збитку їхнім власникам стають порівнянні з вартістю самої підземної споруди.

Найважливішу роль в аналізі НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив» відіграє дослідження механізму роботи, існування та взаємодії двох частин цієї системи. Причому з'ясування механізму роботи – фундаментальне знання, яке дозволить проводити такі види досліджень як чисельний аналіз, імітаційне моделювання, побудову моделі за допомогою його

первісних фундаментальних властивостей тощо.

Дослідження згаданої вище системи, наприклад, для конкретних умов Київського метрополітену, особливо для лівого берега Дніпра, значно ускладнюється наявністю шаруватості, що геологічно обумовлена формуванням Київської області. Наявність перешарування пісків та суглинків, суглинків та глини, що характерна для Києва (спондилова глина), призводить до складності проведення щитової проходки, оскільки прохідницький агрегат розроблює одночасно декілька шарів різної міцності та деформаційної здатності. Відомі випадки, коли щитовий комплекс під час роботи на правому березі стикався не тільки з шаруватістю, а й кардинальною неоднорідністю у вигляді валунів в мореній глині (флювіогляціальні відкладення).

І все ж слід ще раз підкреслити, що на сьогодні в світі під час будівництва метрополітенів щитова проходка в різних, особливо складних інженерно-геологічних умовах, є найбільш ефективним та доцільним методом спорудження перегінних тунелів (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютюкін, 2005; Maidl, B., Herrenknecht, Maidl, U., & Wehrmeyer, 2012; De Oliveira, Thewes, Diederichs, & Langmaack, 2018). Це пояснюється тим, що сутнісні основи щитової проходки базуються на врахуванні взаємодії оправи з оточуючим масивом, забезпечуючи високий темп проходки та зведення оправи при найвищому рівні безпеки робіт.

Але слід також відмітити особливості щитової проходки, які пов'язані із умовами взаємодії оправи з ґрунтовим масивом, складеним слабкими, неоднорідними та шаруватими ґрунтами (Attewell, & Hurrell, 1985; Chakeri, Ozelik, & Unver, 2013; Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017).

Одним із основних факторів, що визначають НДС оправи, є умова взаємодії останньої із ґрунтовим масивом. В свою чергу, НДС ґрунтового масиву, зокрема шаруватого, визначається його фізико-механічними властивостями. Щитова проходка має переваги і в тому, що в процесі робіт слідом за розробкою і випуском ґрунту, одразу встановлюють кільця оправи,

які сприймають навантаження і протидіють деформаціям ґрунтового масиву, не допускаючи значних деформацій поверхні землі.

Якщо в процесі проходки порушується технологія робіт, то на земній поверхні утворюється так звана мульда осідання значних розмірів, що не завжди допустиме. Якщо умовами будівництва закладається обмеження деформації поверхні землі, то необхідно розробити спеціальну технологію робіт, а в деяких випадках і спеціальні пристрої до щита, які забезпечують мінімальні деформації ґрунту за щитовою оболонкою до встановлення оправи. Значний інтерес представляють результати натурних вимірювань навантаження на щит приладами, що входять в комплект щита і порівняння їх з теоретичними прогнозами розвитку гірського тиску.

На даний час склалися три основні напрямки в розробці методів розрахунків, що базуються на різних методах дослідження процесів, що супроводжують щитову проходку: 1) емпіричний, що використовує результати інструментальних спостережень і їхнє статистичне опрацювання (Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017; Петренко, Банніков, & Нетеса, 2020; Бондаренко, & Тютюкін, 2022а); 2) аналітичний, що спирається на замкнуті рішення задач геомеханіки і механіки гірських порід (Finno, & Clough, 1985; Attewell, & Hurrell, 1985; Yang, & Wang, 2011); 3) чисельний, побудований на структурному аналізі та рішеннях механіки суцільного середовища (Selby, 1988; Pang, Yong, & Dasari, 2005; Ding, Xian, & Liu, 2011).

Емпіричний напрямок досліджень процесу щитової проходки в ґрунтовому масиві, зокрема шаруватому, є найбільш відпрацьованим технічно та методологічно, результати його успішного застосування наведені в ряді статей (Chakeri, Ozcelik, & Unver, 2013; Петренко, В. І., & Петренко, В. Д., 2014; Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017). Цей підхід базується на застосуванні інструментальних вимірювань, зокрема маркшейдерських, з подальшою обробкою, яка полягає в статистичному аналізі та пошуку закономірностей напружень та деформацій в оправі перегінного тунелю залежно від часу та властивостей породного масиву.

Відповідно, прогнозна потужність емпіричного підходу значно знижена, оскільки отримані та проаналізовані результати на конкретному об'єкті складно екстраполювати на подібний об'єкт в інших інженерно-геологічних умовах. Проте, слід розуміти, що саме емпіричні дослідження є найбільш близькими до реальних умов і можуть слугувати базою для порівняння інших підходів.

Маркшейдерські вимірювання деформацій оправи горизонтальної виробки, що взаємодіє з породним масивом, разом з вимірюванням напружень в оправі (тензометричні) або за нею (динамометричні) складають комплекс усіх потрібних наукових фактів, на основі яких можна зробити висновки про експлуатацію підземної споруди. Інструментальних досліджень переміщень достатньо для визначення достовірності будь-яких аналітичних побудов, що далі в дисертаційній роботі і буде проведене.

Проте, більш доречним для прогнозування НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив» є аналітичний напрям, рішення якого мають ширшу область застосування. Різноманітні теорії, що враховують взаємодію у вказаній системі, базуються на визначених аналітичних закономірностях, які перевіряються за допомогою емпіричних методів, хоча в більшості застосовують відношення, що сутністю своєю мають правило «чорного ящика» (дія – відгук, тобто дія щитової проходки та в подальшому створеної оправи горизонтальної виробки – дія породного масиву та денної поверхні).

Так, в аналітичному методі визначення мульди осідання поверхні землі, викликаної проходкою перегінних тунелів, найбільш часто застосовують криву нормального розподілу Гаусса (Attewell, & Hurrell, 1985) (рис. 1.2):

$$\eta = \eta_m e^{-\frac{x^2}{2i^2}}, \quad (1.1)$$

де η – осідання поверхні землі (м) на відстані x від осі тунелю (м); η_m – максимальне осідання поверхні землі над віссю тунелю (м); i – абсциса точки перегину кривої мульди осідання (м).

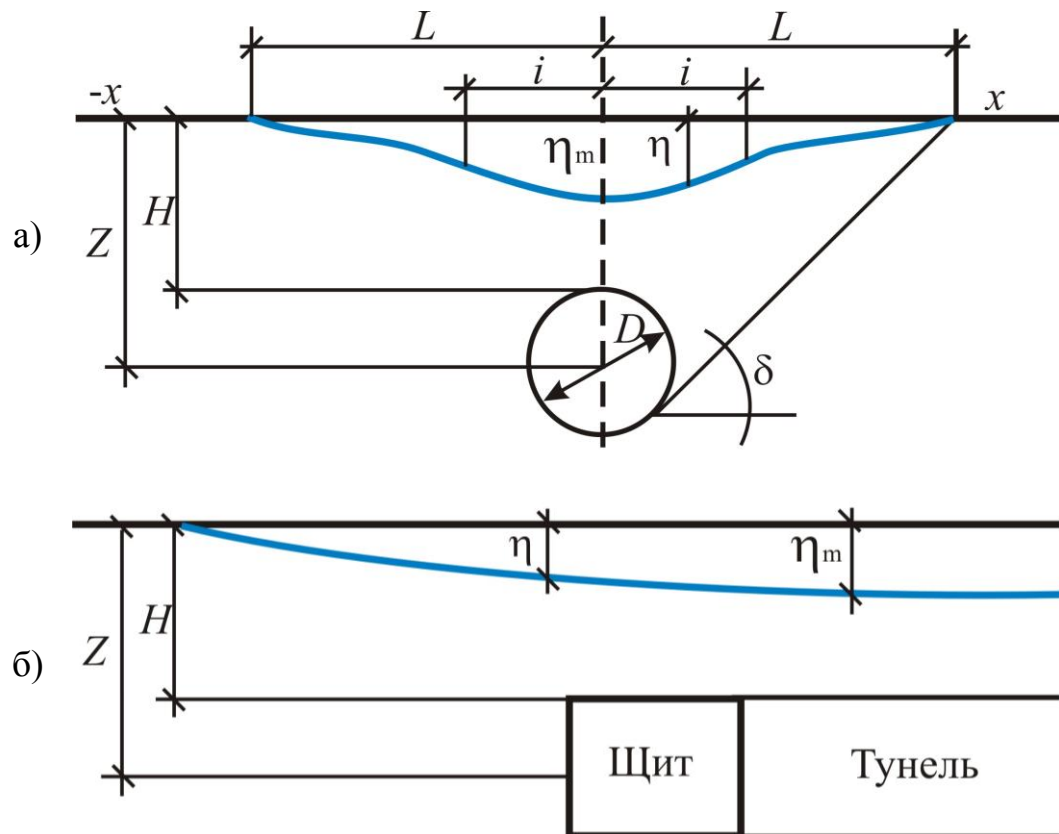


Рисунок 1.2 – Мульда осідання в поздовжньому (а)
та поперечному (б) напрямках

Шляхом диференціювання залежності (1.1) отримано формули для розрахунку нахилу j_x , кривизни k_x і радіуса R_x кривої осідання поверхні землі в поперечному перерізі мульди осідання (Attewell, & Hurrell, 1985):

$$j_x = -\eta_m \frac{x}{i^2} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}, \quad (1.2)$$

$$k_x = -\eta_m \frac{1}{i^2} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \left(1 - \frac{x^2}{i^2} \right), \quad (1.3)$$

$$R_x = -\frac{1}{\eta_m} \cdot \frac{i^4}{(i^2 - x^2)} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}. \quad (1.4)$$

Таким чином, після пошуку величин, що визначаються за формулами

(1.1)-(1.4), і порівняння показників із граничними значеннями мульди осідання, можливо, наприклад, обґрунтовувати перехід від залізобетонної оправи перегінного тунелю до чавунної. Цей крок пояснюється тим, що оправа із чавунних тьюбінгів характеризується більшим значенням модулю пружності і, відповідно, меншими деформаціями. Цей логічний крок хоча і потребує додаткового проектування, значно покращує ситуацію деформування слабкого шаруватого масиву, зменшуючи величини мульди осідання.

Проте, аналітичний метод має серйозний недолік. Він майже перекреслює основну перевагу методу, а саме можливість отримання замкненого рішення. Аналіз дає змогу стверджувати, що з аналітичних побудов по причині значного рівня абстрагування зникають обидві частини системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив». Розгляд отриманих закономірностей свідчить про те, що вирішення задачі про деформування денної поверхні зводиться до пошуку геометричних показників мульди осідання. Властивості оправи перегінного тунелю (модуль пружності та коефіцієнт Пуассона чавуну або залізобетону) та ґрунту оточуючого масиву, який в загальному випадку може бути шаруватим, зникають з рівнянь.

В останні десятиріччя саме розвиток чисельних методів механіки суцільного середовища дозволяє приступити до вирішення задачі визначення НДС системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив». Однак загальновідомо, що найбільш поширені чисельні методи рішення подібного класу складних геомеханічних задач, незважаючи на високу їхню точність, не володіють загальністю рішення. Тому необхідний новий методологічний підхід до вирішення даного завдання, метою якого є пошук поєднання умови найбільш широкої області застосування результатів досліджень з умовою мінімально допустимого обсягу обчислень з підбору різних варіантів поєднання геометричних (радіус виробки, положення шару у просторі ґрунтової (породної) матриці тощо) та деформаційних властивостей (модуль пружності та коефіцієнт Пуассона усіх частин системи), а також особливостей формування НДС системи «незакріплена виробка – шаруватий масив».

Наразі, вже були спроби врахування технологічних процесів щитової проходки для однорідного породного масиву. В роботі (Тютюкін, 2020) була розроблена скінченно-елементна модель, в якій був змодельований щит з конкретними геометричними розмірами й деформаційними характеристиками (рис. 1.3).

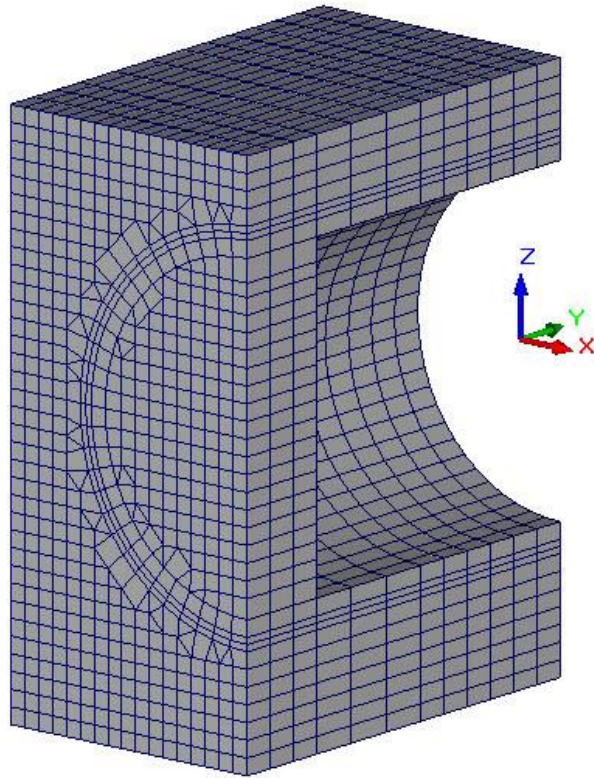


Рисунок 1.3 – Скінченно-елементна модель для випадку щитової проходки
(з роботи Тютюкін, 2020)

Однак, задачею дослідження у згаданому випадку було визначення дії щитових гідроциліндрів, які впливають на НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив» в напрямку, що перпендикулярний дії гірського тиску.

Слід зазначити, що спроба відтворення геомеханічних систем, що мають істотну неоднорідність геометричних і деформаційних параметрів її елементів, призводить до надзвичайної громіздкості кінцевих рівнянь і необхідності чисельних методів їх вирішення. Тому, з розвитком обчислювальної техніки все

більш перспективними представляються чисельні методи дослідження геомеханічних систем (методи скінченних, граничних, дискретних елементів тощо) зі складною просторовою геометрією і суттєвої деформаційною неоднорідністю елементів (Chou, & Bobet, 2002; Chakeri, Ozelik, & Unver, 2013; Fang, He, Nazem, Yao, & Grasmick, 2017). Різноманіття одержаних рішень методу скінченних елементів свідчить про перспективність розвитку даного методу досліджень для задач геомеханіки і його практичну універсальність.

Проте слід підкреслити і той факт, який усестороннє аналізувався прихильниками аналітичних рішень, що метод скінченних елементів по своїй сутності є тим інструментом, що дозволяє отримувати конкретні рішення. Таким чином, його застосування для вказаної геомеханічної задачі потребує узагальнення конкретних результатів та їхньої класифікації з метою систематизування.

1.2 Аналіз методологічних підходів до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою

В геомеханіці, механіці підземних споруд і ширше механіці твердого деформівного тіла задача визначення НДС гірського масиву, ослабленого горизонтальною незакріпленою або закріпленою виробкою є добре розробленою (приведені нижче результати аналізу опубліковані в статті (Бондаренко, & Тютюкін, 2022b)). Про це свідчить ряд фундаментальних робіт, в яких розглянуті виробки різних форм, що знаходяться в масиві різних властивостей – ізотропних, трансверсально-ізотропних, анізотропних, різного ступеня тріщинуватості, пружних, пружно-пластичних, в'язко-пружних, в'язко-пластичних тощо (Савін, 1968; Lee, & Rowe, 1989; Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005; Тютюкін, 2008; Deb, 2012; Тютюкін, 2020).

Отримані рішення для розподілу напружень та переміщень в однорідному масиві навколо горизонтальної виробки колового окреслення (класичне рішення Ламе, рішення Колосова – Мусхелішвілі, Родіна, Савіна, визначення напружень в пружно-пластичному масиві навколо виробки Лабаса – Рупенейта,

дослідження Буличова, Фотієвої тощо) (Савін, 1968; Bulytchev, 1994; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996). Для вирішення задачі визначення НДС незакріпленої горизонтальної виробки до широкого впровадження ЕОМ застосовувалися математичні методи, наприклад, комплексних потенціалів Г. В. Колосова – Н. І. Мусхелішвілі (Pimenov, & Pushkarev, 1991; Bulytchev, 1994; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996). Після потужного розвитку чисельних методів та їх реалізації на ПЕОМ в ряді розрахункових комплексів рішення вказаної задачі стало визначатися в ході математичного моделювання на основі чисельних методів.

Навіть при наявності класичних рішень кожен рік з'являються десятки досліджень, присвячені цій задачі. Невичерпність цієї наукової теми пояснюється тим, що вже отримані рішення не отримали чіткої класифікації і навіть існування фундаментальних праць, наприклад, Г. М. Савіна (Савін, 1968), не приводить різноманітні рішення в систематизований вигляд. У випадку шаруватих масивів ситуація ускладнюється, що позначено об'єктивністю: існуючі рішення не враховують зміну деформаційних характеристик (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона) оточуючого масиву по причині того, що застосований математичний апарат не в змозі охопити неоднорідність (макрошаруватість) (Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005).

В фундаментальних працях з геомеханіки та механіки підземних споруд шаруватість визначена як найважливіша структурна особливість оточуючого масиву (Pande, Beer, & Williams, 1990; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996; Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005; Kolymbas, 2005). Як правило, розрізняють два її типи: 1) мікрошаруватість, тобто шаруватість в межах одної літологічної різниці; 2) макрошаруватість – те саме в межах декількох літологічних різниць, які складають породний масив. Дана дисертаційна робота присвячена саме макрошаруватості.

Відомо запропоноване розділення масивів, властивості шарів яких змінюються плавно та стрибком, тобто породні або ґрунтові масиви в

залежності від різниці деформаційних характеристик шарів поділяються на два види (Kolymbas, 2005; Chapman, Metje, & Stärk, 2010): 1) ті, що складені шарами без різких стрибків деформаційних властивостей; 2) ті, що мають зміну деформаційних властивостей стрибком. В масивах першого виду плавність зміни їхніх властивостей забезпечує безперервність зміни поля деформацій і напружень. В масивах другого виду в менш деформованих шарах деформації досягають граничних значень та приводять до руйнування порід, водночас у пластичних шарах руйнування не спостерігається. Такі значні перепади в механічних властивостях приводить до різкого змінення напружень на контактах шарів. Однак ніякої конкретної межі, що відділяє перший вид від другого, яка могла б виражатися у відношенні модулів пружності шарів, наведено не було.

В роботі (Bulytchev, 1994) наведене деяке узагальнене математичне поняття суцільності породного масиву, зокрема шаруватого, запропоноване Г. А. Крупенніковим. Це поняття «квазісуцільного масиву» записане в математичному вигляді наступним чином:

$$\Delta A < \varepsilon \text{ при } \Delta a < l_0, \quad (1.4)$$

де ΔA – різниця значень напружень в сусідніх точках масиву з прирощенням координат Δa ; l_0 – лінійний розмір елементарного об'єму; ε – похибка у визначенні A , що допускається (до 15 % від середнього значення напружень).

Цей математичний критерій «квазісуцільного масиву» під час чисельних розрахунків породних масивів не відіграє ролі межового, оскільки в недоторканому шаруватому масиві перша частина критерію завжди виконується автоматично (похибка напружень менше 15 % від середнього значення), а у випадку виробки масив автоматично перестає бути «квазісуцільним» і його стан характеризується значними концентраціями напружень.

Виникнення та застосовність прийому Г. А. Крупеннікова пояснюється об'єктивними причинами, оскільки на час його впровадження не існувало можливості розглядати шаруватий масив як такий, що складений породами, котрі мають явно виражені відмінності деформаційних характеристик. Приведення шаруватого масиву до «квазисуцільного» за допомогою вказаного прийому є штучним, хоча і дозволяє виконання розрахункових процедур, які були неможливі, якщо б шаруватість була врахована повною мірою.

Подібний методологічному прийому Г. А. Крупеннікова підхід, але з іншої інтерпретації шаруватого масиву, полягає в приведенні його деформаційних властивостей до деяких середньозважених. Не викликає сумнівів, що такий прийом визначення НДС значно спрощує задачу, однак під час його застосування повністю зникають особливі ефекти, пов'язані саме з шаруватістю (стрибкоподібна зміна напружень та деформацій на межі розділу, сумісне деформування двох або більше шарів з суттєво різними деформаційними характеристиками, потенційна можливість розшарування тощо).

Даний прийом, який достатньо часто застосовувався під час вирішення задачі визначення НДС горизонтальної виробки в шаруватому масиві, не може вважатися адекватним ситуації формування та розподілу напружень та переміщень, проте може застосовуватися частково. Коректне застосування цього прийому можливе лише тоді, коли деформаційні характеристики ґрунтових або породних шарів є близькими за своїми значеннями. В такому випадку отримані рішення поставленої задачі є вірними та такими, що відображають реальну картину взаємодії в системі «горизонтальна виробка – шаруватий масив».

Однак, слід підкреслити, що, як і для прийому Г. А. Крупеннікова, не визначено чітких меж або навіть діапазонів деформаційних характеристик, в яких можливо коректно застосовувати приведення шаруватого масиву до «квазисуцільного» або такого, що має середньозважені параметри. Проте, ряд задач, що вирішені на основі другого прийому, свідчать про те, що його

застосування більш коректне, ніж для прийому Г. А. Крупеннікова, якщо шаруватий масив складений схожими між собою породами.

Так, в роботі Petrenko, Huzchenko, Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V. (2014) реальна стратиграфічна колонка і деформаційні властивості, які застосовуються в числових розрахунках, замінені відповідно приведеною стратиграфічною колонкою і середніми розрахунковими значеннями властивостей ґрунтових шарів (рис. 1.4).

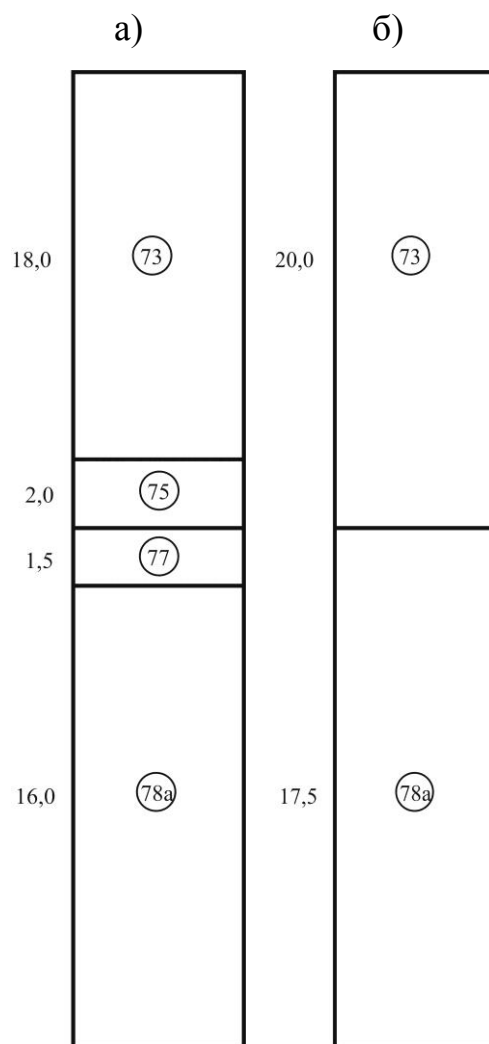


Рисунок 1.4 – Стратиграфічні колонки масиву навколо тунелю (в колах вказані номери інженерно-геологічних елементів: а) реальна; б) приведена (Petrenko, Huzchenko, Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V., 2014)

Така заміна реальної стратиграфічної колонки приведеною вважається

авторами правомірною, оскільки товщина шарів, які не враховуються, незначна (1...2 м) і таким чином не може значно впливати на картину розподілу деформацій. Відповідно, в рамках цього методологічного прийому впроваджене використання середньозважених деформаційних характеристик, виходячи з деяких граничних геометричних параметрів шару, зокрема, його товщини.

І прийом Г. А. Крупеннікова, і прийом зведення деформаційних властивостей до деяких середньозважених значень відносяться до методологічних підходів, що намагаються спростити задачу визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив». Хоча вони і надали можливість вирішення деяких часткових випадків вказаної задачі, їх слід характеризувати як такі, що, по причині уведення додаткових гіпотез, не враховують специфіку генезису напружень та розвитку деформацій в шаруватому масиві як такому.

Однак, застосування такого методологічного підходу є об'єктивним, оскільки задача визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив» є складною по причині саме шаруватого масиву. В 1945 році Дональд М. Бьормінстер в трилогії робіт (Burminster, 1945a; 1945b; 1945c), присвячених лінійному, плоскому та просторовому випадкам задачі шаруватості (двох або декількох шарів), окреслив і такий спрощений методологічний підхід. Проте, основною методологією залишалася та, що базується на класичному аналітичному підході, зокрема на відомих задачах теорії пружності Фламана та Буссинеска. Отримані автором рішення потребували потужного математичного апарату, але їх не можна характеризувати як узагальнені, оскільки рішення щодо отворів в шаруватому масиві були частковими і детально в задачі шаруватих основ автодоріг та аеродромів майже не розглядалися. Рішення цього класу задач для випадку шаруватості аналітичними методами мають дещо звужену область застосування, при цьому будучи обтяженими складними математичними рішеннями (Singh, 1970; Bahar, 1972; Yue, 1995; Dubinya, & Galybin, 2018).

Іноді задача впливу шаруватості перекривалася іншою задачею,

наприклад, врахування неоднорідності або анізотропії порід (Mozhevitinov, 1967; Sheinin, 1968; Lee, & Rowe, 1989; Fotieva, Bulychov, & Sammal, 1996). Це пояснюється тим, що така важлива характеристика, котра впливає на деформування незакріпленої або закріпленої горизонтальної виробки, як анізотропія, методологічно простіше враховується, ніж шаруватість (Lee, & Rowe, 1989; Franzius, Potts, & Burland, 2005). Існує досить репрезентативна кількість аналітичних рішень впливу анізотропії, що проаналізовані в фундаментальних та оглядових працях (Kolymbas, 2005; Brady, & Brown, 2006; Chapman, Metje, & Stärk, 2010; Hemphill, 2012). Пояснення ситуації, що склалася, полягає в тому, що ці дві особливості гірського масиву знаходяться на різних рівнях, оскільки анізотропія є властивістю саме породи або ґрунту (субмікроскопічний рівень розміру елемента неоднорідності знаходиться в діапазоні $10^{-5} \dots 10^{-2}$ м), а шаруватість відноситься до мегаскопічного рівню неоднорідності, розмір елемента неоднорідності якого складає більше 1,0 м (рис. 1.5 взято з роботи Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005).

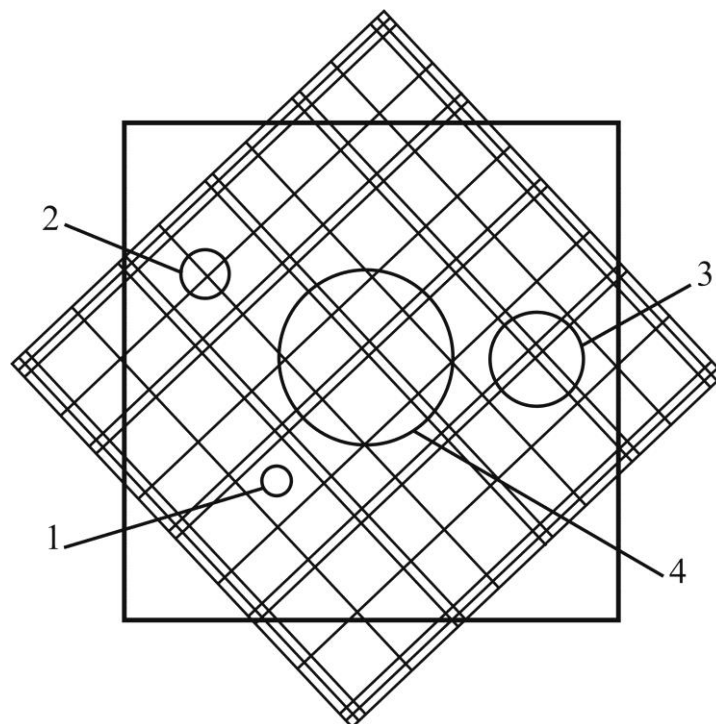


Рисунок 1.5 – Рівні неоднорідності в породному масиві:

- 1) мікроскопічний; 2) субмакроскопічний; 3) макроскопічний;
- 4) мегаскопічний (з роботи Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005)

Результати аналізу методологічних підходів до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою, свідчать, що найбільш адекватним задачі є такий, що враховує наявність шару ґрунту або породи в якості окремого елемента неоднорідності. Будь-які спрощення, що вводяться для рішення поставленої задачі, можуть характеризуватися як такі, що зменшують адекватність постановки задачі реальній системі «горизонтальна виробка – шаруватий масив».

Тим паче, що, навіть не вдаючись до спрощень, існують рішення геомеханіки (Петренко, & Тютюкін, 2003; Kovalevska, Samusia, Kolosov, et al., 2020; Zhang, Liang, & Feng, 2020; Chen, Zou, Wei, & Guo, 2023), а також механіки підземних споруд і геотехніки (Meguid, Saada, Nunes, & Mattar, 2008; Швець, Шаповал, Петренко, et al., 2008; Jones, & Hunt, 2011; Bobyleva, & Shamaev, 2017; Alkhdour, Tiutkin, Bannikov, & Heletiuk, 2022), що розглядали породний або ґрунтовий шар як мегаскопічний елемент неоднорідності із врахуванням особливих ефектів, що виникають по причині його наявності. Слід підкреслити, що деякі з них, такі як розшаровування (Fotieva, Bulyshev, & Sammal, 1996; Bobyleva, 2016; Pan, & Dias, 2016), добре розроблені для випадків шахтного будівництва, але для транспортного та підземного не є характерними, тому в цій роботі не розглядаються.

1.3 Аналітичний та чисельний підходи до визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – породний масив»

Особливості підходів до визначення НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив» можна розділити на три основні групи за можливістю урахування (Brady, & Brown, 2006; Бондаренко, & Тютюкін, 2022b)):

– будови гірських масивів, зв'язаних з наявністю в них породних шарів, які істотно відрізняються по механічним властивостям, і розділені різними поверхнями природної тріщинуватості з різним зчепленням та тертям по цим поверхням;

– особливостей деформування системи «горизонтальна виробка – породний масив», наприклад, характерних ознак щитової проходки, в ході вирішення задачі;

– геомеханічних процесів в породному масиві, що залежать від деформаційних характеристик ґрунтових шарів, розмірів і взаємного розміщення виробок.

Саме тому для вирішення задач геомеханіки необхідно отримати наступну інформацію (Kolymbas, 2005; Chapman, Metje, & Stärk, 2010):

– структуру, геометрію та фізико-механічні характеристики досліджуваного масиву;

– види і величини механічних дій, що прикладаються до визначених геометричних областей породного масиву;

– рід задачі, яка підлягає дослідженню (розподілення напружень та деформацій або переміщення та руйнування деякої ділянки породного масиву).

На основі представлених даних створюється розрахункова схема, від якої визначає вибір методу вирішення конкретної геомеханічної задачі (Бондаренко, & Тютюкін, 2022b). Таким чином, складається система математичних рівнянь, що виражає співвідношення заданих величин та тих, що відшукуються, яка повинна бути вирішена до отримання кінцевого значення. В багатьох задачах доводиться застосовувати чисельні методи, які дають розв'язок в межах визначеної похибки.

Оскільки створення розрахункових схем для задач системи «горизонтальна виробка – породний масив» пов'язане з необхідністю описання великого числа нерегулярних параметрів і складних граничних умов, дослідники вдаються до примусового спрощення в постановці задач і з метою зниження розмірності рівнянь, що описують систему, і функцій, що враховують особливості початкового навантаження і геометрії. Відповідно, з самого початку вноситься деяка похибка в розрахункову схему, таким чином, стає сповна виправданим широке вживання чисельних методів.

Все різноманіття розрахункових схем можна представити як комбінацію

декількох основних класів параметрів (Бондаренко, & Тютюкін, 2022b):

- геометричні ознаки, поняття плоского або просторового рішення;
- наявність або відсутність симетрії, використання однозв'язних, двух- і багатозв'язних областей тощо;
- зовнішні дії і механічні властивості породного масиву і інженерних конструкцій
- статичне або динамічне прикладення навантажень;
- урахування фільтрації рідини і газу;
- ізотропне, ортотропне або анізотропне середовище, пружна, пружно-пластична або в'язко-пластична деформація масиву без або з урахуванням його розміцнення і розпушування (деформування породного масиву в максимально загальному вигляді);
- конструктивно-технологічні особливості спорудження і функціонування виробок;
- конструктивно-технологічна схема проведення виробок.

Кожен клас розрахункових схем породжує окремий підхід у формуванні математичної моделі, а комбінація чинників, що враховуються, дозволяє ускладнювати або спрощувати пропоноване рішення. Тому історично можна спостерігати картину поетапного ускладнення математичних моделей, що використовуються в задачах, обумовлене зростанням продуктивності засобів обчислень, з одного боку, і ускладнення умов експлуатації підземних споруд, з іншої сторони.

Тому свого часу широкого вжитку знайшли аналітичні методи, за допомогою яких отримували певне математичне рішення, що дає можливість попередньої оцінки поведінки ґрунтового масиву при простих схемах навантаження, без врахування конструктивно-технологічних особливостей функціонування досліджуваної системи і в умовах однорідності розрахункової області. Не дивлячись на широкий розвиток подібних методів, всі вони страждають загальним недоліком, що вимушує ще на етапі створення розрахункової схеми прибїгати до спрощень, які негативно впливають на

точність кінцевого результату.

У роботі (Zhao, Janutolo, & Barla, 2012) представлена методика розрахунку різноманітних типів кріплення, що основана на методі коефіцієнтів передачі навантажень. Кріплення та оточуючий її масив розглядаються як сукупність кілець правильної та неправильної форми, що концентрично зв'язані одне з одним. В загальній постановці розв'язок задачі виконується для однорідного ізотропного масиву, але й приводиться методика врахування неоднорідності масиву та кута падіння породних шарів. При розрахунку кріплення за допомогою коефіцієнтів передачі навантажень використовують дві модифікації розрахункових схем: схему розрахунку по еквівалентним напруженням та схему розрахунку по знятих напруженнях.

Для визначення напружено-деформованого стану масиву порід у класичній роботі (Савін, 1968) автор запропонував декілька розрахункових схем, особливістю яких є розглядання виробок та їхнього кріплення як єдиного фактора, що збуджує поле напружень в однорідному масиві. При цьому особлива увага приділялася характеристикам зміни НДС в об'ємній системі з певними механічними порушеннями.

Цікавим підходом в вирішенні задач геомеханіки є дослідження теорії граничного стану. Її суть полягає у визначенні критичної величини деякого реального збудження, при якому система поки ще зберігає стійкість, а за її межею втрачає. При наявності в масиві протяжних поверхонь послаблень, розрахунок проводять з урахуванням визначення можливості його руйнування по цим поверхням. Такий підхід називають розв'язком задачі так званої спеціальної граничної рівноваги (Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005). В цьому випадку породний масив розглядається як система породних блоків, що взаємодіють по поверхням послаблень.

Авторами (Chapman, Metje, & Stärk, 2010) виконаний широкий аналіз математичних методів вирішення пружно-пластичних задач для породних масивів. Більшість розв'язків виконано в плоскій постановці. Як наводять автори, практично у всіх випадках мають місце значні відхилення поведінки

порід від їхнього описання, що використовуються в розрахункових схемах. Крім того, автори роблять висновок про те, що для урахування в вирішеннях складних граничних умов, неоднорідності середовища та невизначеності положення пружно-пластичної межі в вирішеннях задач геомеханіки необхідно використовувати чисельні методи.

Робота (Тютюкін, 2020) повністю присвячена реалізації розрахункових схем задач геомеханіки, що основані на застосуванні методу скінченних елементів. Розглянуті варіанти рішень як в пружній, так і в непружній постановці. Представлені в цій роботі результати достатньо наглядні, їхнє порівняння з аналітичними показало покращення точності розрахунку з ростом числа вузлових точок скінченних елементів.

Обсяг присвячених проблемі визначення НДС незакріпленого або закріпленого отвору або горизонтальної виробки праць (близько десятків тисяч сторінок і більше) характеризує дану задачу механіки підземних споруд або геомеханіки як водночас розроблену та таку, що потребує подальшої розробки. Парадоксальність цього твердження тільки уявна, оскільки, навіть за наявності відомих та класичних рішень, задача визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – породний масив» отримує нові підходи до її вирішення, уточнюючи власні можливості та окреслюючи потенціал отриманих результатів (приведені нижче результати аналізу опубліковані в статті (Бондаренко, & Тютюкін, 2022b)).

Вирішення цієї задачі має два підходи, кожен з яких має властиву їм низку методів. Цими підходами є аналітичний та чисельний, кожен з яких має особливу специфіку. Проводити ще один детальний аналіз цих підходів не є раціональним, оскільки він вже викладений в фундаментальних роботах (Заворицький, 1975; Kolymbas, 2005; Brady, & Brown, 2006; Chapman, Metje, & Stärk, 2010; Kuesel, King, & Bickel, 2012). В рамках цієї дисертаційної роботи лише будуть проаналізовані найбільш виразні приклади, що надають основи методики визначення НДС у випадку шаруватості або відображають специфічні ознаки згаданих підходів.

Не викликає сумнівів, що в останній час дослідження системи «горизонтальна виробка – породний масив» більшою мірою базуються саме на чисельному підході, залишивши аналітичному лише незначну долю від загального обсягу. Така ситуація є об’єктивною й демонструє певний перекид у методології. В низці робіт (Plewman, Deist, & Ortlepp, 1969; Hefny, & Chua, 2006; Migliazza, Chiorboli, & Giani, 2009; Петренко, В. Д., Тютькін, & Петренко, В. І., 2012; Nemirovskiy, & Турумов, 2021), присвячених аналізу та порівнянню обох підходів, все ж не надається категоричної відмови аналітичному підходу, тим паче, що на його основі отримуються нові рішення (Zhao, Janutolo, & Barla, 2012; Deev, Sammal’, & Baryshnikov, 2012; Turymbetov, Azhikhanov, Zhunisov, & Aimeshov, 2015).

Низка досліджень, виконаних авторитетними фахівцями Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», базується на обох підходах, отримуючи репрезентативні результати як в руслі аналітичного (Бондаренко, Ільяшов, Ковалевська, et al., 2008; Бондаренко, Ковалевська, Сіманович, et al., 2008), так і чисельного (Бондаренко, Ковалевська, Сіманович, & Фомічов, 2006 та 2007). Методологічна розробка питань визначення НДС закріпленої горизонтальної виробки відрізняється значною глибиною і у інших авторів (Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005; Шашенко, Сдвижкова, & Гапеев, 2008; Фомічов, Почепов, Лапко, & Фомічова, 2016), однак отримані рішення дуже складно екстраполювати на всі можливі випадки шаруватості в повному обсязі.

Більш глибокий аналіз цих робіт дозволяє отримати специфічні особливості вирішення поставлених в них задач та відшукати об’єктивні складнощі, що перешкоджають застосуванню вже отриманих рішень. Так, в роботі (Бондаренко, Ільяшов, Ковалевська, et al., 2008) наведена модель усередненої структури породного масиву (рис. 1.6). Модель свідчить про те, що залягання шарів є слабко похиленим, майже горизонтальним, що характерно також і для породних масивів м. Дніпра, Києва та Харкова, тобто відповідає вимогам класичної задачі визначення НДС системи «горизонтальна виробка –

породний масив» у випадку шаруватості. Проте, існуюча складність перенесення отриманих в роботі рішень виникає не з умов шаруватого масиву, а з роботи кріплення, а саме його деформаційної характеристики. Методики, отримані в згаданих роботах, враховують піддатливість шахтного кріплення, тобто таку його деформаційну здатність, яка відсутня в жорстких оправах тунелів та метрополітенів.

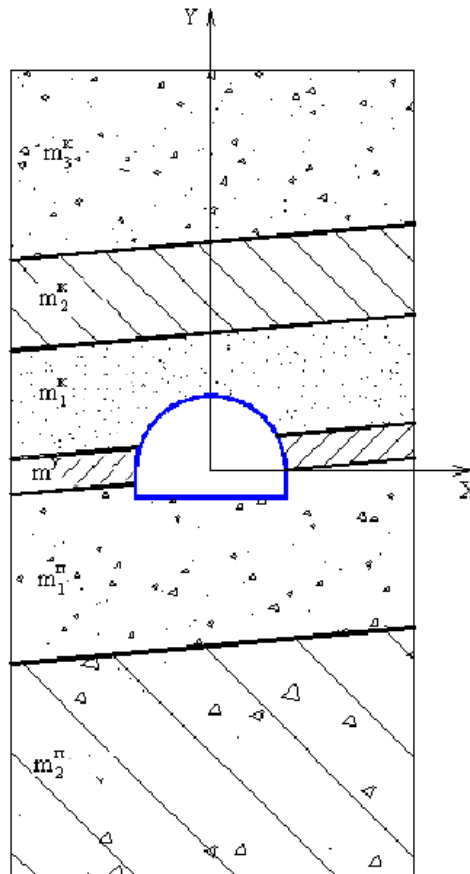


Рисунок 1.6 – Модель усередненої структури вуглевміщуючої товщі Західного Донбасу (з роботи Бондаренко, Ільяшов, Ковалевська, et al., 2008)

Логічно, що проаналізовані вище роботи не розглядають випадок незакріпленої виробки, що відповідає умовам розробки горизонтальних виробок (штреків) на глибинах сотень метрів. Незважаючи навіть на особливу шатрову форму кріплення (див. рис. 1.6), яка має особливості взаємодії, на відміну від кріплення колового окреслення, слід підкреслити, що на значних глибинах породний масив (однорідний або шаруватий), переходить з режиму пружного деформування до пластичного (Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова,

2005; Бондаренко, Ковалевська, Сіманович, & Фомічов, 2006 та 2007). Цей факт не дозволяє екстраполювати отримані рішення для умов неглибокого, на відміну від випадку шахт, залягання метрополітену (до 80...100 м), який розглядається в дисертаційній роботі.

Однак, деякі методологічні прийоми все ж коректно застосувати і для розрахункових випадків, що досліджуються, проаналізувавши та скоригувавши відповідним чином. Так, в роботі Фомічов, Почепов, Лапко, & Фомічова (2016), окрім детально наведеного алгоритму проведення чисельного аналізу та створення просторових моделей, отримано ряд характерних для шаруватого масиву ізополів зі зламами на межах шарів, що мають суттєво різні деформаційні характеристики (модулі пружності та коефіцієнти Пуасона) (рис. 1.7).

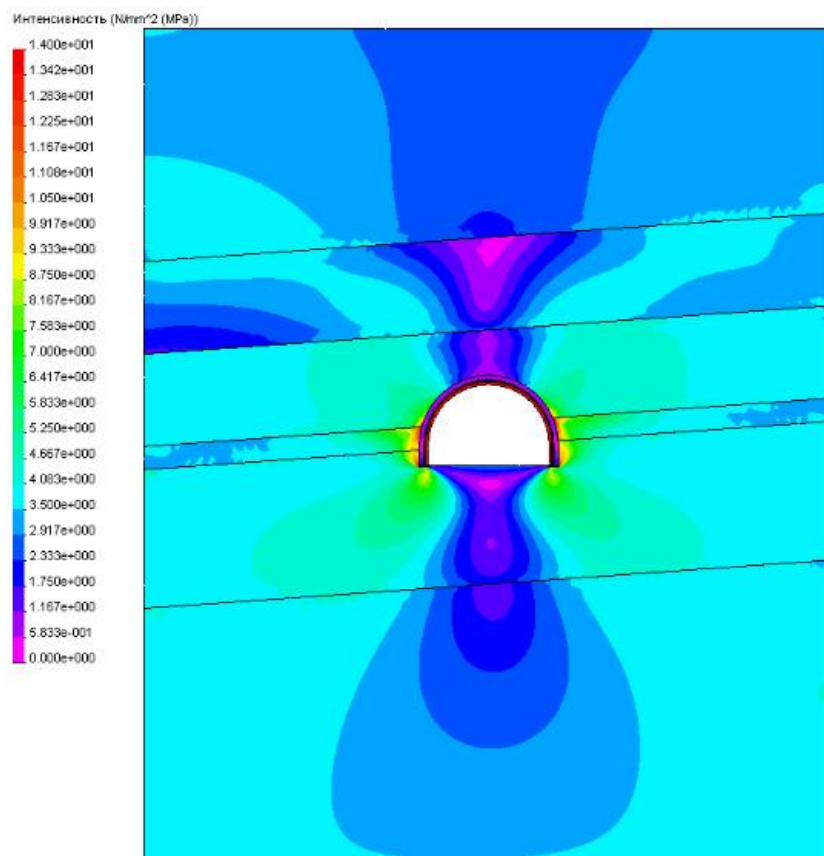


Рисунок 1.7 – Ізополя приведених напружень для скінченно-елементних моделей (з роботи Фомічов, Почепов, Лапко, & Фомічова, 2016)

Такий розподіл ізополів напружень виявляє саму сутність формування та існування НДС системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив», яку неможливо, як вже було доведено раніше, врахувати за допомогою прийому Г. А. Крупеннікова або зведення деформаційних властивостей до деяких середньозважених значень. Скінченно-елементна модель системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив» повинна відображати складну взаємодію між елементами, що мають відмінні між собою модулі пружності, тобто породний масив (матрицю), породний шар (або шари) та кріплення.

Не викликає сумнівів, що впровадження чисельних методів, зокрема, методу скінченних елементів, дозволило змінити концепцію досліджень в геомеханіці та механіці підземних споруд, перемістивши фокус до математичного та імітаційного моделювання. Це призвело до того, що будь-які підземні об'єкти зі складною формою або структурою були досліджені на основі скінченно-елементних моделей. Оскільки прикладів таких досліджень значна кількість, авторка наводить лише ті, що були проведені в Українському державному університеті науки і технологій (раніше – Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна) (Петренко, & Тютькін, 2003; Tiutkin, Petrenko, Petrosian, Miroshnyk, & Alkhdour, 2018; Tiutkin, Petrosian, Radkevych, & Alkhdour, 2019; Bannikov, & Tiutkin, 2020; Банніков, Купрій, & Вотченко, 2021; Тютькін, Банніков, Мірошник, & Гелетюк, 2021; Radkevych, Tiutkin, Kuprii, & Bielikova, 2022; Бондаренко, & Тютькін, 2022b).

Відомо, що вирішення задачі чисельного розрахунку НДС системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив» у випадку горизонтальних виробок, наприклад, перегінних тунелів існує в двох постановках: просторовій (3D) (Linkov, Filippov, Milova, & Zoubkov, 1998; Huang, Zhu, Liang, Lin, & Jia, 2006; Chapman, Metje, & Stärk, 2010; Do, Dias, Oreste, & Djeran-Maigre, 2014b; Turymbetov, Kuantbekov, Maulenov, & Aimeshov, 2019) або плоскій (2D) (Fumagalli, 2013; Do, Dias, Oreste, & Djeran-Maigre, 2014a). Обидві постановки мають недоліки та переваги. Наприклад, просторова постановка дозволяє

вирішувати задачу прогнозування осідань денної поверхні (мульди зсунення), оскільки скінченно-елементні моделі мають значну протяжність (сучасні розрахункові комплекси дозволяють створювати моделі довжиною сотні метрів, рис. 1.8).

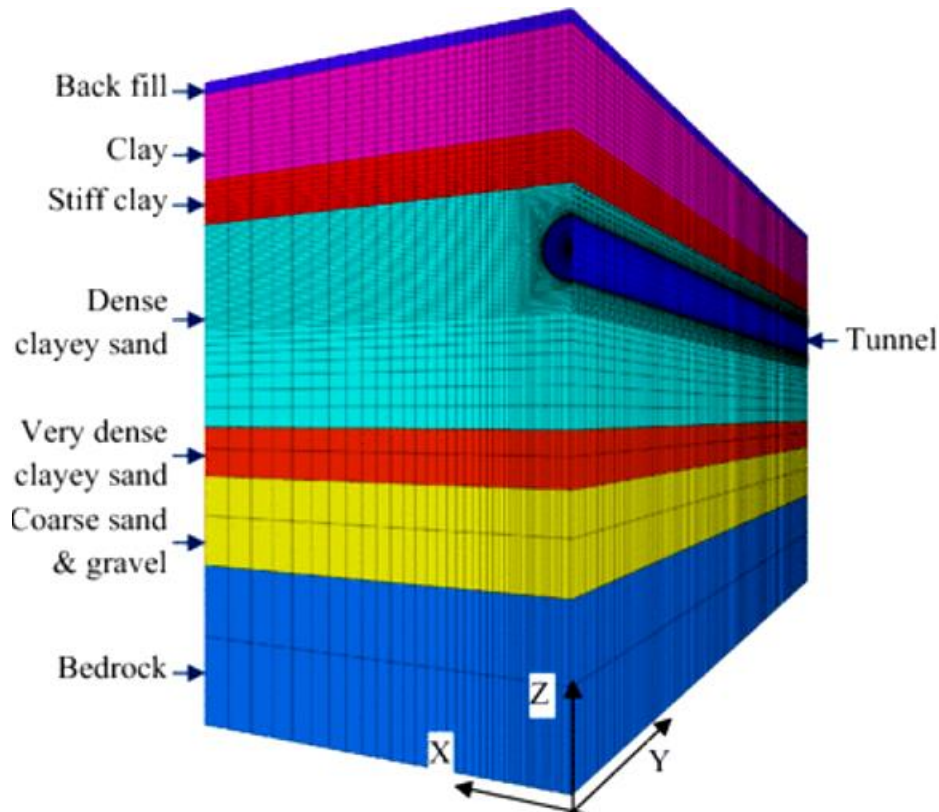


Рисунок 1.8 – Скінченно-елементна модель перегінного тунелю, що проходиться в шаруватому масиві (з роботи Do, & Dias, 2017)

Не викликає сумнівів, що модель, представлена на рис. 1.8, найбільш повно відповідає генезису деформування та накопичення напружень системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив», оскільки в ній відображені геометричні параметри шарів та їхні реальні, отримані під час лабораторних дослідів, деформаційні властивості. Слід також відмітити, що в просторових (3D) моделях можливо відображати особливості оправи, наприклад, етапність її спорудження або різні її типи і, відповідно, геометричні параметри елементів кріплення та їхні деформаційні властивості (рис. 1.9, Do, Dias, Oreste, & Djeran-Maigre, 2014b). Відповідно, якщо під час визначення НДС системи

«горизонтальна виробка – шаруватий масив» задача врахування технологічних процесів не ставиться, то вибір плоскої або просторової моделі базується лише на наявності апаратних можливостей, оскільки розрахунок 3D-моделей потребує більших комп'ютерних потужностей.

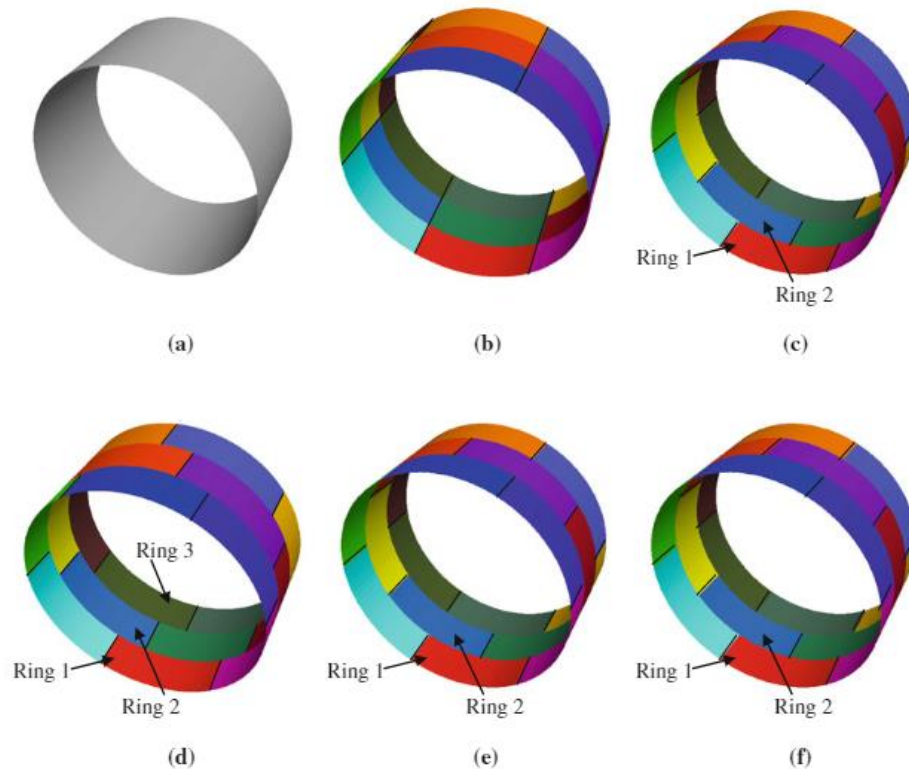


Рисунок 1.9 – Просторові скінченно-елементні моделі оправи перегінного тунелю, що споруджується щитовим способом (з роботи Do, Dias, Oreste, & Djeran-Maigre, 2014b)

Проте, існуючі на сьогодні дослідження, присвячені порівнянню плоскої та просторової постановок (Atkinson, & Potts, 1977; Svoboda, & Mašín, 2011; Do, & Dias, 2017), свідчать про те, що вибір кожної з них ґрунтується на типі задачі розрахунку НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив», а деякі автори, наприклад (Karakus, 2007), відстоюють коректність плоскої постановки. Аналіз впливу кріплення на НДС породного масиву на основі вирішення плоскої пружної задачі методом скінченних елементів виконаний в роботі (Deb, 2012). Такий диференційний підхід є коректним та логічним, оскільки

застосування плоскої постановки для протяжної горизонтальної виробки є достатнім (Chapman, Metje, & Stärk, 2010; Fumagalli, 2013).

Розуміючи більшу повноту застосування просторової постановки та відносну простоту плоскої, в подальшому авторка приходить до певного компромісу, створюючи просторову (а точніше «квазіпросторову») SE-модель з плоского прототипу, але обмежуючи її товщиною в 0,1 або 1 м та витримуючи умову плоскої деформації (Tiutkin, & Bondarenko, 2022). Такий методологічний крок в рамках задачі, що вирішується, є коректним, оскільки в дисертаційній роботі розглядаються породні шаруваті масиви, в яких наявні шари з незначним ухилом розташування, відмінні, наприклад, від випадків, що досліджувався в роботах (Meguid, Saada, Nunes, & Mattar, 2008; Bobyleva, 2016; Bobyleva, & Shamaev, 2017).

Доказом правильності застосування «квазіпросторової» скінченно-елементної моделі є також те, що під час її дослідження в програмному комплексі, НДС, що в ній формується, є повним, тобто таким, що має всі нормальні та дотичні компоненти. Це пояснюється тим, що в просторовій моделі товщиною в 0,1 або 1 м та уведеною умовою плоскої деформації, на відміну від плоскої пластинчастої, відсутні поздовжні переміщення, що є коректним для протяжної горизонтальної виробки, при цьому наявні поздовжні напруження, що діють в скінченно-елементній моделі.

2 ОСНОВИ ПАРАМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ВИРОБКИ В ШАРУВАТОМУ МАСИВІ

2.1 Розробка скінченно-елементної моделі системи «горизонтальна виробка – породний масив»

В механіці підземних споруд у сфері розрахунків НДС підземних горизонтальних виробок концептуально сформувався два напрями досліджень та методів: 1) засновані на аналітичному підході; 2) чисельні. Проведені багатьма дослідниками аналітичні огляди застосування даних методів (Савін, 1968; Заворицький, 1975; Kolymbas, 2005; Brady, & Brown, 2006; Chapman, Metje, & Stärk, 2010; Kuesel, King, & Bickel, 2012) дозволяють виділити ті особливості, які їм притаманні, причому цими особливостями найчастіше є переваги та недоліки.

Так, методи, засновані на аналітичному підході, відзначені універсальністю отриманих рішень, які можна застосовувати для різних умов, але їхнім недоліком є значна кількість припущень, введених при вирішенні рівнянь. Прикладом рішень аналітичними методами є застосування плоских схем для розрахунку станцій метрополітену колонного та пілонного типів, метод Метродіпротрансу та О. Ю. Бугаєвої для розрахунку тунелів кругового обрису та багато інших (Kolymbas, 2005; Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютюкін, 2005; Kuesel, King, & Bickel, 2012).

Чисельні методи, у свою чергу, відзначені можливістю розрахунку складних тунельних конструкцій, але недоліком рішень є те, що вони відносяться до конкретного випадку, що досліджується, і не можуть бути екстрапольовані на подібні випадки зі зміненими властивостями.

І все-таки останнім часом аналітичні методи значно рідше застосовують у розрахунках тунельних конструкцій, що пояснюється складністю їхнього застосування (ускладнений математичний апарат, недостатня програмна реалізація тощо). Вагомим аргументом для застосування чисельних методів є

невелика кількість об'єктів, що розраховуються, конкретний підхід до кожного з них більш доцільний і раціональний, ніж типовий розрахунок без урахування специфічних особливостей поведінки споруди.

Найбільш застосовуваним на сьогодні чисельним методом є МСЕ, що пояснюється достатньою розробленістю його теоретичних основ та інтегруванням як одного з методів теорії пружності (на основі варіаційних принципів) в механіку суцільного середовища, простотою алгоритмізації і, що важливо для практичного застосування, наявністю потужних професійних розрахункових комплексів (SCAD, LIRA, MSC/NASTRAN, ANSYS, PLAXIS та багато інших). Але в той же час у процесі застосування МСЕ в розрахунках підземних споруд, в тому числі і горизонтальних виробок, відбувався поступовий відрив від методології, розробленої аналітичними методами, що призвело до деякої однобокості досліджень у цій галузі.

Це пов'язано зі специфічними особливостями МСЕ, оскільки для отримання рішень високої точності слід розробити найбільш адекватну реальним умовам SE-модель, що є найважливішим етапом у розрахунках. МСЕ дозволяє розглядати напруження та переміщення у неоднорідних середовищах, тому розрахункова схема не повинна обмежуватися заміною оправи підземної споруди контактними епюрами. Досліджувана конструкція повинна розглядатися як сумісна система з врахуванням її реальної форми та деформаційних показників. Під час розрахунку оправ в шаруватому масиві, шари якого мають складні обриси, раніше проводилося спрощення меж та ділянок так, щоб було зручно призначати сітку розбивки (Швець, Шаповал, Петренко, et al., 2008). Спрощення вводиться із врахуванням мінімізації їхнього впливу на формування НДС в області, що піддається чисельному аналізу.

Проте все ж чисельні методи, будучи заснованими на принципах варіаційного обчислення та реалізованими на базі комп'ютерних програм, не вимагають введення в модель додаткових спрощень, необхідних реалізації рішення, наявних для аналітичних методів. Вважається, що отримане чисельне рішення конкретної задачі є унікальним, тобто апріорі неекстрапольованим на

подібні завдання з дещо зміненими характеристиками (Bulytchev, 1994, 1986; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996). Таким чином, низка аналітичних методів позиціонує свою методологію як майже універсальну.

Специфіка чисельних методів проголошується деякими авторами, що тяжіють до аналітичного підходу, як методологічний недолік (Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996; Deev, Sammal', & Baryshnikov, 2012; Kuesel, King, & Bickel, 2012), хоча отримання достатньо точного рішення для конкретного розрахункового випадку іноді важливіше, ніж отримання залежності, що можна застосувати для інших випадків, але під час отримання якої на основі аналітичних методів в постановку задачі було закладено деяка кількість припущень, які значно зменшують точність рішення. Також деякі дослідники, порівнюючи чисельні та аналітичні методи, зазначають, що останні дають можливість отримання рішень у замкнутому вигляді, тоді як перші реалізують вирішення конкретних завдань (Brady, & Brown, 2006; Deb, 2012; Kuesel, King, & Bickel, 2012). Дане положення також дещо неточне, оскільки наведені нижче основи параметричного аналізу дозволяють чисельне рішення конкретного розрахункового випадку екстраполювати на інші випадки.

Знання механізмів формування НДС системи «закріплена виробка – шаруватий масив» є ключовим питанням геомеханіки. Існуючі на даний момент методи пошуку НДС є набором розрізнених методик розрахунку окремих компонент напружень і деформацій, які можна застосовувати, як правило, в обмежених умовах досліджень. Вони в переважній більшості випадків носять суто емпіричний характер, тобто верифікуються шляхом фізичного моделювання. Така ситуація в багатьох випадках не дозволяє отримати кількісну картину розподілу НДС в системі «закріплена виробка – шаруватий масив». Отже необхідний новий методологічний прийом для вирішення даного завдання, який полягає у зміні геометричних параметрів та деформаційних характеристик елементів системи, що дозволяє прогнозувати зміну стану або виконувати оперативне визначення зміни НДС горизонтальної виробки.

Задача визначення закріпленої оправою виробки є задачею будівельної

механіки (і ширше механіки суцільного середовища) і полягає у визначенні НДС кільця, що миттєво вбудоване у невагому площину. Класичним рішенням для цієї задачі є формули Ламе, отримані французьким вченим для товстостінної труби, навантаженої зовнішнім та внутрішнім тиском. Однак, ці формули для випадку гірського масиву, що є не лише навантаженням (тиском), але й середовищем, що деформується, відображають лише напружений стан і тільки в конкретних часткових випадках. Замкнене рішення для кільця деякої жорсткості, що вставлене у виробку в масиві, отримане лише для деяких випадків, тобто спроби класифікувати існуючі розрахункові випадки не було.

Не викликає сумнівів, що чисельний аналіз на основі МСЕ повністю залежить від створення розрахункових моделей. Теоретично процес створення SE-моделі горизонтальної незакріпленої або закріпленої виробки полягає у наступному алгоритмові (Петросян, & Тютюкін, 2017; Tiutkin, & Bondarenko, 2022):

1. Створення геометрії.
2. Завдання граничних умов.
3. Завдання деформаційних показників.
4. Прикладення навантажень.

Досить часто під час створення SE-моделі у кожному кроці даного алгоритму допускаються незначні неточності, накопичення яких призводить до спотворення результатів, причому ці неточності носять формальний характер (Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005; Deb, 2012; Hemphill, 2012). Вважається, що створені SE-моделі є такими об'єктами математичного моделювання, які властиві тільки МСЕ, і їхня перевірка за допомогою аналітичних методів дещо утруднена. Проблема полягає в тому, що часто створення SE-моделі є складним завданням, і багато особливостей поведінки підземної споруди, достатньо повно розглянуті в аналітичних методах, не враховуються через складність моделювання. Відповідно розрив між двома підходами збільшується, що є негативним фактором для розвитку механіки підземних споруд і геомеханіки.

Для задач дисертаційної роботи розроблено базову СЕ-модель системи «горизонтальна виробка – породний масив», яка складається з прямокутних та квадратних СЕ (рис. 2.1) і максимально відображає геометрію виробки. Ця базова СЕ-модель в подальших дослідженнях, результати яких викладено та проаналізовано в дисертації, змінюється, про що наголошується в тексті.

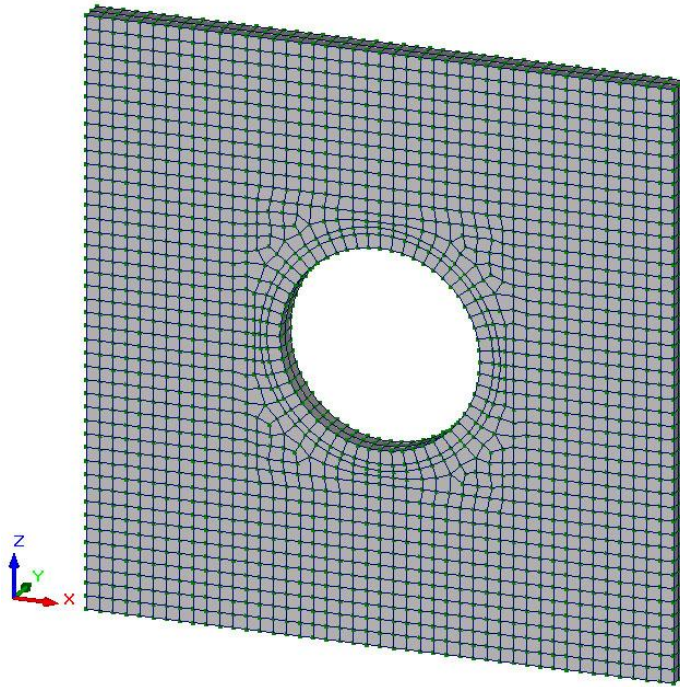


Рисунок 2.1 – СЕ-модель системи «горизонтальна виробка – породний масив»

СЕ-модель є просторовою («квазіпросторовою») на основі об’ємних СЕ, кількість вузлів – 5268 штук, СЕ – 3288 штук. Розміри моделі: висота – 20 м, ширина – 22 м, товщина – 1 м. Усі вузли моделі спільні, розмір СЕ – від $0,25 \times 0,25$ до $0,5 \times 0,5$ м, що для моделі з такими розмірами достатньо для процесу збіжності рішення та отримання достатньо точних результатів.

Слід також зазначити, що розрахована модель є абсолютно абстрактною з позиції геометричних розмірів і форми, які можуть бути різними, та деформаційних характеристик, межі зміни яких також можуть бути задані не довільно, а конкретно, у відповідності з наявними інженерно-геологічними умовами. Ця модель є ілюстрацією прийому визначення НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив», а не конкретного об’єкта, однак, шляхом застосування авторських алгоритмів, викладених нижче, вона може

бути скоригована в залежності до реальних випадків, в тому числі масиву з наявною шаруватістю.

Авторкою пропонується система граничних умов, яка розроблена на основі положень аналітичних методів та найбільш адекватна реальним умовам поведінки системи «горизонтальна виробка – породний масив»: верх моделі вільний від граничних умов; низ моделі – заборона переміщень по осям X, Y і Z; боки моделі – заборони по осям X та Y; торці моделі – заборона по осі Y.

Постановка граничних умов зверху та внизу найбільш зрозуміла, умови з боків моделі є наслідком доказу академіка О. М. Дінніка про розподіл вертикальних та горизонтальних напружень у недоторканому масиві ($\varepsilon_z \neq 0; \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$), а заборона по торцях моделює умову плоскої деформації ($\varepsilon_y = 0; \varepsilon_x = \varepsilon_z \neq 0$). Таким чином, така система граничних умов найбільш адекватна реальним умовам.

Під час розробки моделей використовувалися наступні практичні рекомендації (Петросян, & Тютюкін, 2017; Тютюкін, 2020):

1. Під час створення геометрії моделі, крім відображення реальних розмірів споруди, слід звернути увагу до збіжності рішення при зміні розмірів СЕ, і навіть розмірів розрахункової області. Основною рекомендацією є те, що модель має бути просторовою на основі об'ємних СЕ, як найбільш адекватна реальним конструкціям.

2. Під час призначення граничних умов можна використовувати запропоновану авторкою систему як найбільш адекватну роботі тунельних конструкцій.

3. Під час визначення деформаційних характеристик частин системи «горизонтальна виробка – породний масив» слід імітувати у СЕ-моделі їхню зміну за допомогою результатів лабораторних випробувань.

4. Найбільш адекватним завантаженням моделі є власна вага, що дозволяє не вводити до уваги додаткові припущення і веде до підвищення точності отриманих результатів.

2.2 Сутність параметричного аналізу визначення напружено-деформованого стану горизонтальної виробки

Під параметричним аналізом в рамках даної дисертаційної роботи будемо розуміти чисельний аналіз МСЕ, в ході якого конкретне чисельне рішення за допомогою визначених авторських алгоритмів екстраполюється на інші розрахункові випадки. Саме ці алгоритми допомагають вирішувати питання уявної неможливості розповсюдження чисельного рішення, що задекларовано авторами, які тяжіють до чітких аналітичних рішень. Однак, як буде обґрунтовано далі, параметричний аналіз не розриває зв'язків з аналітичним підходом (Тютюкін, Петросян, & Шибасєва, 2019). Більше того, під час отримання рішення для закріпленої виробки в шаруватому масиві, підхід параметричного аналізу базується на ідеї аналітичного підходу, основи якого викладені нижче.

Відомо, що представники аналітичного підходу (А. А. Піменов, М. С. Буличов, Н. Н. Фотієва, В. І. Пушкар'єв, А. М. Саммаль та інші) базують свої рішення на теоретичних закономірностях теорії функцій комплексного змінного Колосова – Мусхелішвілі (Pimenov, & Pushkarev, 1991; Bulytchev, 1994; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996; Deev, Sammal', & Baryshnikov, 2012), тобто одній з теорій, притаманних механіці суцільного середовища, або ширше механіки твердого деформівного тіла.

Практично ця теорія реалізується за допомогою конформних відображень, сутність яких наступна. Реальна виробка колового окреслення (або в загальному вигляді навіть неколового) із визначеним конкретним радіусом R за допомогою прямого відображення перетворюється на колову виробку із одиничним радіусом $\rho = 1$, до якого застосовуються закономірності теорії Колосова – Мусхелішвілі (Pimenov, & Pushkarev, 1991). Потім, після отриманого рішення НДС на коловій виробці із одиничним радіусом, воно, шляхом зворотного конформного відображення, переноситься на реальну виробку із визначеним конкретним радіусом R . Для виробок різного окреслення рівняння для контуру підземної виробки записується в

комплексному вигляді:

$$z = x + iy = M \left(\xi + \frac{C_1}{\xi^n} + \frac{C_2}{\xi^m} \right), \quad (2.1)$$

де M – масштабний параметр, який визначає розміри контуру (в роботах (Pimenov, & Pushkarev, 1991; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996) визначається літерою R , але, щоб не сплутати його з радіусом виробки, в дисертаційній роботі позначення змінене); C_1 , C_2 , n , m – параметри, що визначають окреслення та форму контуру; $\xi = \rho e^{i\Theta}$, $\rho = 1$; $i = \sqrt{-1}$; Θ – полярний кут.

При відповідному підборі параметрів C_1 , C_2 , n , m трьохчленна формула дає можливість описати коловий, еліптичний, склепінчастий, квадратний та прямокутний контури виробок (Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996). Застосування цієї трьохчленної формули називається конформним відображенням і являє собою математичну операцію теорії функцій комплексного змінного, сутність якої полягає в тому, що з її допомогою виробка колового окреслення перетворюється у виробки інших окреслень. Ця формула при $\rho \geq 1$ представляє собою аналітичну функцію $z = \omega(\xi)$, яка конформно відображає зовнішність одиничного кола з радіусом $\rho = 1$ на зовнішність вказаних геометричних контурів. Застосовується вона для дослідження НДС однорідного ізотропного масиву навколо горизонтальних виробок одним з методів теорії функцій комплексного змінного – методом Колосова – Мухелішвілі.

Якщо початковий напружений стан породного масиву є гідростатичним (коефіцієнт розпору $\lambda = 1$), початкові напруження для нього визначаються аналітичними функціями:

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{2} M \gamma H \xi; \quad \psi(\xi) = 0, \quad (2.2)$$

а додаткові та повні напруження – функціями вигляду:

$$\varphi(\xi) = -\frac{1}{2} M\gamma H \frac{C_1}{\xi^n}; \quad \psi(\xi) = M\gamma H \frac{\xi^n(1+nC_1^2)}{nC_1 - \xi^{n+1}}. \quad (2.3)$$

Компоненти напружень σ_Θ , σ_ρ та $\tau_{\rho\Theta}$ в криволінійній ортогональній системі координат $\rho - \Theta$, яка надається конформним відображенням (2.1), знаходяться за формулами Колосова – Мусхелішвілі (Pimenov, & Pushkarev, 1991; Bulytchev, 1994):

$$\sigma_\rho + \sigma_\Theta = 4Me\Phi(\xi), \quad (2.4)$$

$$\sigma_\Theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\Theta} = \frac{2\xi^2}{\rho^2\omega(\xi)} [\omega(\xi)\Phi'(\xi) + \psi'(\xi)], \quad (2.5)$$

$$\Phi(\xi) = \frac{\varphi'(\xi)}{\psi'(\xi)}. \quad (2.6)$$

Підставивши значення (2.2) та (2.3) в (2.4), а потім підсумувавши і прийнявши $\rho = 1$ та $\sigma_\rho = 0$, отримано формулу для розподілу повних напружень σ_Θ на контурі по майданчиках, нормальним до контуру виробки:

$$\sigma_\Theta = 2\gamma H \frac{1 - n^2 C_1^2}{1 + n^2 C_1^2 - 2nC_1 \cos(n+1)\Theta}. \quad (2.7)$$

Очевидно, що ці функції коректні для дослідження НДС лише однорідного ізотропного масиву навколо горизонтальних виробок, їхнє застосування у випадку шаруватих масивів є проблематичним по причині значного ускладнення математичного апарату.

Критичний аналіз цього підходу свідчить про те, що, навіть за наявності

великої кількості вдалих рішень, деякі виробки (наприклад, підковоподібна) значно спотворюються в ході конформних відображень (Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996). Також зауваженням до методу є його значна заматематизованність. Однак, сам концептуальний прийом є плідним. Ідея його переосмислення в руслі чисельних рішень полягає в тому, що НДС на коловій виробці із одиничним радіусом за допомогою особливих параметрів (надалі вони отримають назву скейлінг-параметрів або *scaling*-параметрів від *scaling* – масштабування) можна екстраполювати на виробки будь-якого радіусу (Alkhdour, Radkevych, Tiutkin, & Bondarenko, 2020; Alkhdour, Radkevych, Tiutkin, & Bondarenko, 2022). Таким чином, отримати рішення для НДС на виробці з одиничним радіусом можна і не застосовуючи складних прямих і зворотних конформних відображень шляхом застосування скейлінгу (*scaling*), тобто масштабування властивостей системи під час зміни радіусу виробки (Бондаренко, & Тютюкін, 2019; Тютюкін, Бондаренко, & Ларіонова, 2020; Тютюкін, Бондаренко, & Ларіонова, 2021).

Безсумнівно, що застосування скейлінгу для незакріплених та закріплених виробок при повній тотожності методології все ж відрізняється і на теоретичному, і на практичному планах. Це є об'єктивним положенням, оскільки наявність оправи, що споруджується у незакріпленій виробці, кардинальним чином змінює НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив». Взаємодія інженерної споруди та породного масиву покладена основним принципом геомеханіки (Bulytchev, 1994; Fotieva, Bulychev, & Sammal, 1996; Brady, & Brown, 2006), але її поява максимально утруднює задачу пошуку НДС навіть в однорідному ізотропному масиві, не кажучи вже про наявність шаруватості. Тому слід підкреслити, що в рамках цієї дисертаційної роботи дуже чітко окреслені та виділені задачі, що мають рішення під час параметричного аналізу, та ті, що не можуть бути йому піддані.

Також слід наголосити, що скейлінг (*scaling*), заявлений як основний інструмент параметричного аналізу, не є універсальним. Це не знижує його цінності як методологічного прийому, оскільки низка задач, що вирішені за

його допомогою, охоплює майже всю потрібну сферу знань про НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив» в незакріпленому варіанті та надає найбільш важливі рішення для закріпленого випадку.

Перед тим, як перейти до детального викладення розв’язання поставлених задач, слід окреслити систему параметричного аналізу, побудовану авторкою для незакріпленої та закріпленої виробок, що пройдені в однорідному та шаруватому масивах, та визначити, яким чином ці задачі вирішені та які результати вони надають.

2.2.1 Параметричний аналіз визначення напружено-деформованого стану незакріпленої виробки

1) Первинний параметричний аналіз НДС на основі моделі з одиничними параметрами

Скейлінг (*scaling*) як інструмент пошуку НДС може масштабувати не тільки геометричні розміри горизонтальної виробки (радіус R для незакріпленої та товщину h й ширину b кріплення для закріпленої). Найбільш простим та вдалим його застосуванням є масштабування модулю пружності E та щільності γ ґрунту або породи оточуючого масиву. Результати розрахованої СЕ-моделі з вказаними одиничними параметрами та конкретним радіусом R шляхом скейлінгу можна екстраполювати на всі можливі значення модуля пружності та щільності ґрунту.

Таким чином, встановлено розподіли напруженого та деформованого станів СЕ-моделі з одиничними параметрами й запропоновано формули, що зв’язують параметри її НДС із моделлю з конкретними параметрами (щільність ґрунту, його модуль пружності). Запропоновано формули переходу від НДС СЕ-моделі з одиничними параметрами для конкретних випадків щільності ґрунту та його модуля пружності для первинного параметричного аналізу НДС незакріпленої виробки.

Безсумнівно, розв’язання такої задачі, яка в рамках аналітичного підходу була вирішена лише частково, дозволяє і зберегти його основні методологічні

прийоми, і отримати прості рішення для параметричного аналізу НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив». Ці рішення дозволяють оцінити вплив параметрів масиву на його НДС в незакріпленому варіанті системи.

2) Параметричний аналіз системи «незакріплена виробка – породний масив» на основі скейлінгу НДС

Оскільки введене припущення про існування деяких параметрів масштабування (*scaling*-параметрів), що дозволяють екстраполювати чисельне рішення МСЕ однієї системи «горизонтальна виробка – породний масив» на іншу, то було доведено, що у випадку незакріпленої виробки (однорідний або шаруватий масив) існують параметри, що доводять еквівалентність систем. Таке рішення в рамках параметричного аналізу максимально повно відтворює логіку аналітичного підходу із застосуванням конформних відображень, однак максимально спрощує рішення в математичному плані.

Так, визначено, що під час скейлінгу системи «незакріплена виробка – однорідний масив» або «незакріплена виробка – шаруватий масив» з одиничним геометричним параметром (радіус виробки $R=1$) слід збільшити напруження в n разів (*scaling*-параметр для напружень), а переміщення в n^2 (*scaling*-параметр для переміщень), де n – відношення радіусів реальної системи та системи з одиничним геометричним параметром.

3) Скейлінг-параметр χ (хі-параметр) для параметричного аналізу незакріпленої виробки в шаруватому масиві

Врахування різноманіття інженерно-геологічних умов і відповідно властивостей шарів ґрунту або породи, що складають оточуючий масив, є складною задачею, яка в повній мірі не вирішена. В рамках параметричного аналізу незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві, зроблене припущення, що існують еквівалентні системи шаруватих масивів.

Для отримання зміни НДС системи «незакріплена виробка – шаруватий масив» уведено χ -параметр, який характеризує відношення модулів пружності ґрунтових матриці і шару. Цей скейлінг-параметр дозволив узагальнити ряд випадків шаруватості і спростити розуміння взаємодії. Так, наприклад, дві

системи з різними моделями пружності та однаковим χ -параметром мають тотожні картини розподілу напружень та переміщень, що підтверджує авторське припущення.

2.2.2 Параметричний аналіз визначення напружено-деформованого стану закріпленої виробки

1) Параметричний аналіз деформованого стану закріпленої виробки на основі еквівалентної жорсткості оправи

Проведення аналізу НДС горизонтальної виробки в закріпленому варіанті, на відміну від незакріпленого, на перший погляд, не дає можливості пошуку скейлінг-параметрів для екстраполювання рішення одиначної моделі на інші розрахункові випадки. Однак, були віднайдені скейлінг-параметри для зміни або деформованого (жорсткість на згин EI конструкції), або напруженого (κ -параметр) станів. Слід ще раз підкреслити, що для закріпленого варіанту можливі лише часткові рішення, оскільки немає універсальності в розподілі НДС під час одночасної варіації властивостей матриці, шару і оправи.

Уведене припущення, що жорсткість на згин EI конструкції, що закріплює виробку, є параметром, що характеризує деформування системи. Відповідно, існують еквівалентні системи кріплень з різною товщиною та матеріалом оправи, які деформуються однаково. Скейлінг жорсткості на згин є основою параметричного аналізу деформованого стану закріпленої виробки. При цьому, саме первинні параметри (товщина h й ширина b кріплення) не надають можливості отримати закономірності НДС закріпленої виробки.

2) Скейлінг-параметр κ (каппа-параметр) для параметричного аналізу закріпленої виробки в шаруватому масиві

За прикладом χ -параметру для незакріпленого варіанту, для закріпленої виробки уведено κ -параметр, що є відношенням деформаційних характеристик конструкції (оправи) та породного масиву. Відповідно, плідним і простим з практичної точки є чисельний аналіз системи (радіус виробки $R=1$) з тим же самим κ -параметром з подальшим скейлінгом напружень та переміщень.

Під час скейлінгу слід зменшити значення переміщень в стільки разів, наскільки збільшується модуль пружності матриці, а напруження змінювати не потрібно. Таким чином, звичайне масштабування системи «закріплена виробка – шаруватий масив» при одному і тому ж положенні шару дозволяє визначити НДС для закріплених виробок будь-яких радіусів. Такий параметричний аналіз є теоретично обґрунтованим та зручним практично, оскільки один розрахунок надає можливості екстраполювати його результати на всі інші подібні розрахункові випадки.

3) Матриця скейлінг-параметрів для прогнозування зміни деформованого стану при заміні матеріалу кріплення

Найменш загальним рішенням в рамках параметричного аналізу є створення матриці скейлінг-параметрів, що базується на жорсткості на згин EI конструкції і яка дозволяє оперативно прогнозувати заміну деформування оправи під час зміни її матеріалу.

Система вказаних дій під час параметричного аналізу на основі скейлінгу параметрів породного масиву та кріплення, а також масштабування напружень та переміщень є такою, що потребує визначеного алгоритму її практичного застосування. Деякі позиції параметричного аналізу можна виконувати одночасно, наприклад, для незакріпленої виробки в шаруватому масиві проводити розрахунок на основі СЕ-моделі з одиничним геометричним параметром (радіус $R=1$) та одиничними модулем пружності E та щільністю γ ґрунту або породи оточуючого масиву. Після такого комбінування можна провести скейлінг напружень і переміщень з одночасним масштабуванням модуля пружності та щільності до значень реального ґрунту.

Для закріпленої виробки слід користуватися послідовним алгоритмом параметричного аналізу, наприклад, прогнозувати переміщення оправи на основі еквівалентної жорсткості в конкретному випадку залягання шару, а потім застосовувати матрицю скейлінг-параметрів для оцінки впливу зміни матеріалу оправи при її постійній товщині.

З розділення двох випадків (незакріплений та закріплений)

«горизонтальна виробка – породний масив» слідує те, що на даному етапі розвитку, тобто із отриманням результатів, що викладені в дисертаційній роботі та низці статей, параметричний аналіз слід проводити виключно в рамках випадку. Тобто, застосування скейлінгу незакріпленого випадку слід проводити окремо від оперування скейлінг-параметрами для закріпленого. Також одночасний параметричний аналіз спочатку незакріпленого та закріпленого випадків дещо проблематичний, тому слід проводити послідовний аналіз з оцінкою НДС системи «незакріплена горизонтальна виробка – породний масив» з переходом до розрахункових випадків спорудження кріплення.

Таким чином, базуючись на припущенні еквівалентності систем, розроблено основи параметричного аналізу системи «горизонтальна виробка – породний масив» в незакріпленому та закріпленому варіантах та врахуванням однорідності та шаруватості масиву. Викладені нижче наукові результати з високим ступенем довіри свідчать про те, що система параметричного аналізу є достовірною та такою, що не має логічних або математичних протиріч.

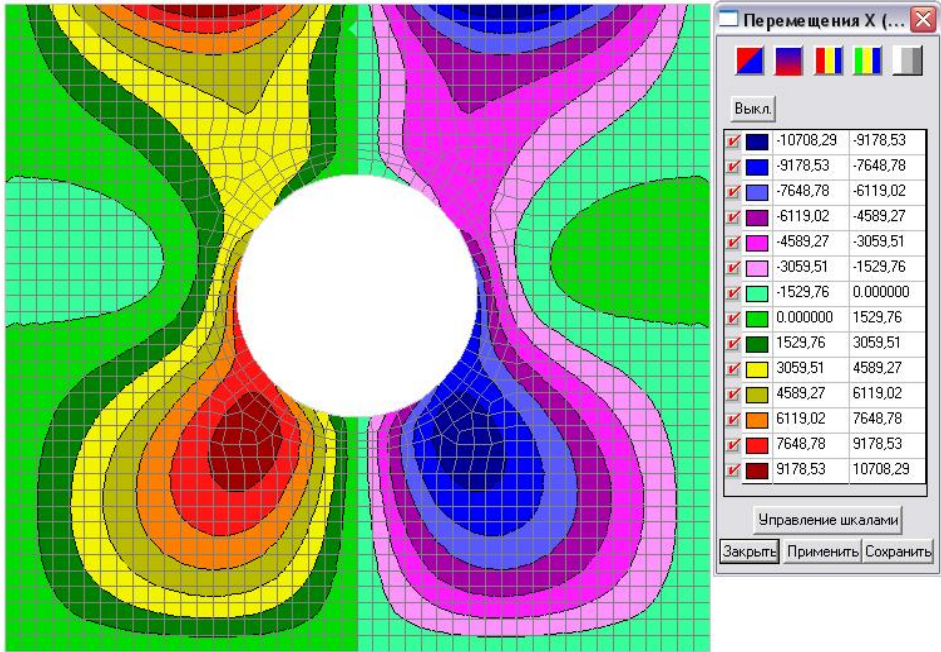
2.3 Первинний параметричний аналіз напружено-деформованого стану на основі моделі з одиничними параметрами

Для первинного параметричного аналізу МСЕ, реалізованого з використанням професійного розрахункового комплексу SCAD (Карпіловський, Криксунов, Перельмутер, et al., 2000; Перельмутер, & Слівкер, 2002), скористаємося розробленими моделями з одиничними параметрами. У досліджених моделях з одиничними параметрами точно відображені геометричні параметри підземної виробки, а модуль пружності E та щільність матеріалу γ (породи або ґрунту) дорівнюють одиниці (методика та результати були викладені в наукових статтях Петросян, & Тютюкін, 2017 та Tiutkin, & Bondarenko, 2022). Слід також зазначити, що всі подальші рішення реалізуються в пружній постановці, оскільки пружно-пластичне рішення доволі складно розв'язати (Shashenko, Napieiev, Shapoval, & Khalymendyk, 2019).

Нижче наведені результати дослідження даної моделі цілком

відповідають принципам теорії пружності, проте ніде не наводилися у вигляді систематизованих положень і, тим більше, формул. Провівши розрахунок SE-моделі з одиничними параметрами (див. рис. 2.1), отримані наступні результати (рис. 2.2-2.3).

Переміщення по горизонтальній осі



Переміщення по вертикальній осі

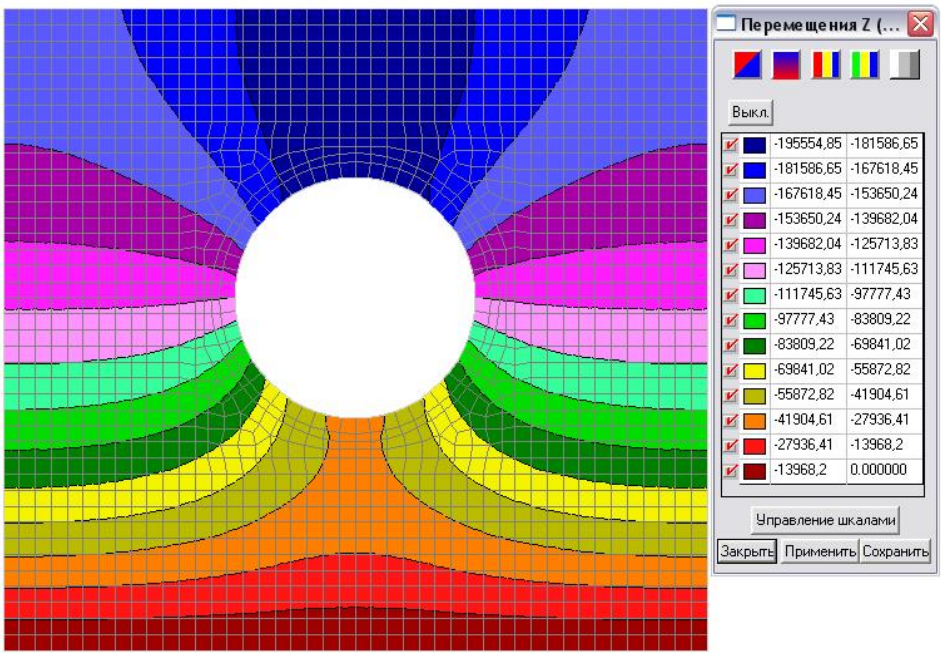
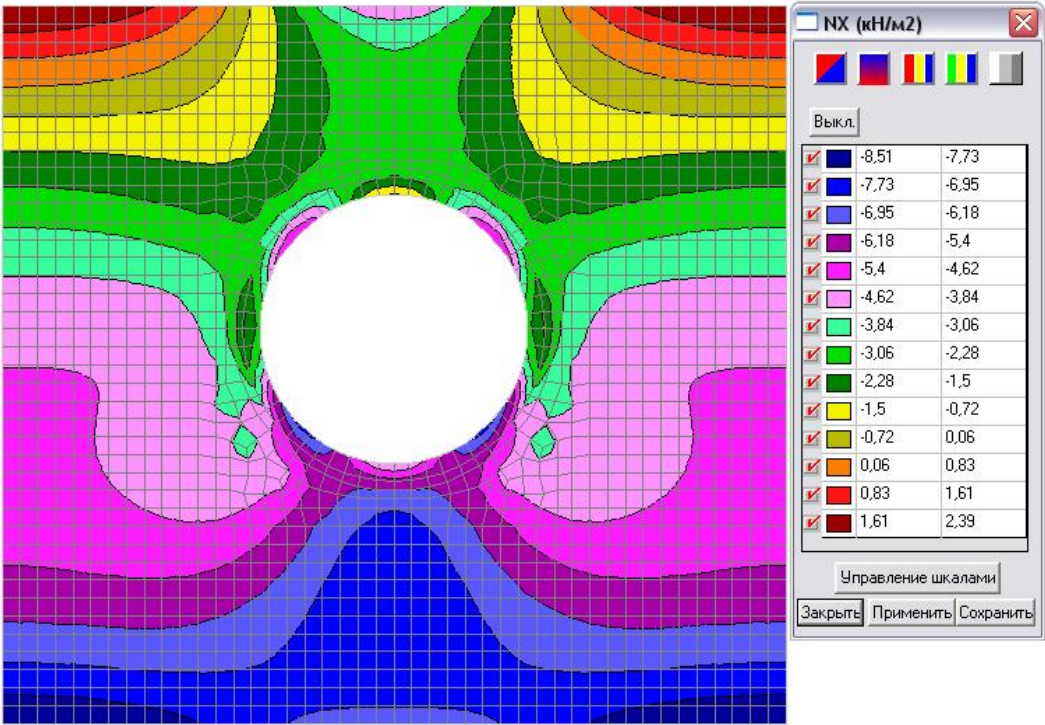


Рисунок 2.2 – Деформований стан SE-моделі з одиничними параметрами

Напруження по горизонтальній осі



Напруження по вертикальній осі

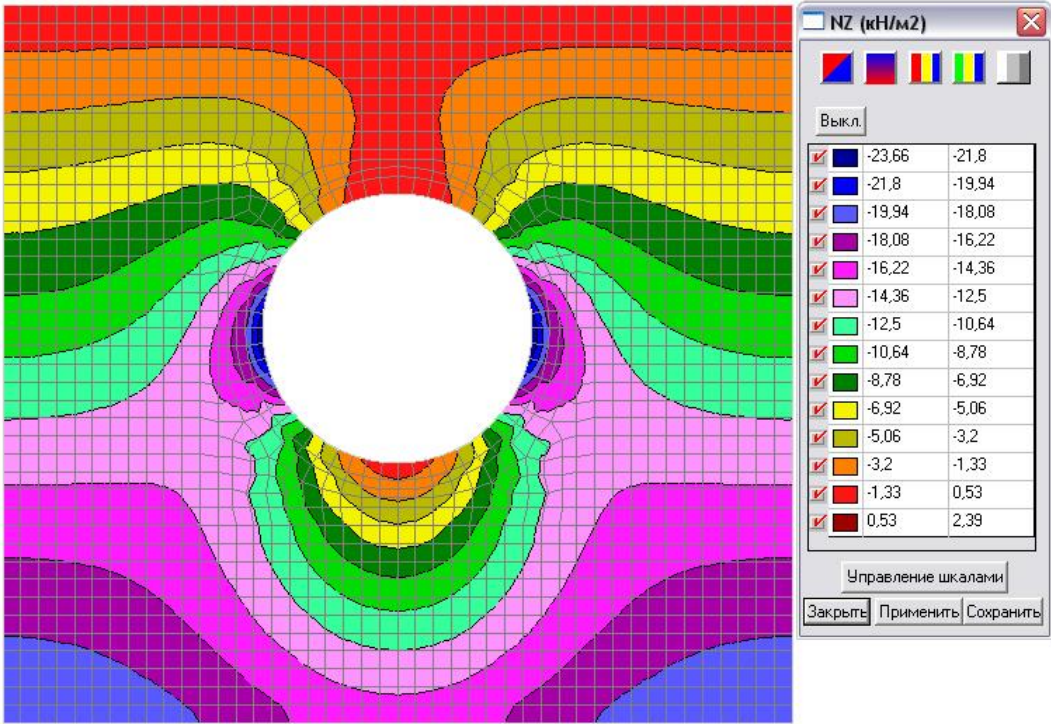


Рисунок 2.3 – Напружений стан SE-моделі з одиничними параметрами

Отримавши розподіл ізополів напружень та переміщень у моделі з одиничними параметрами, досить легко перейти до реального випадку за допомогою авторського алгоритму первинного параметричного аналізу:

1) для отримання реальних переміщень S_r , слід переміщення в моделі з одиничними параметрами S_e перемножити зі значенням реальної питомої ваги γ_r та розділити їх на реальне значення модуля пружності E_r та одиничне значення питомої ваги:

$$S_r = S_e \frac{\gamma_r}{E_r}. \quad (2.8)$$

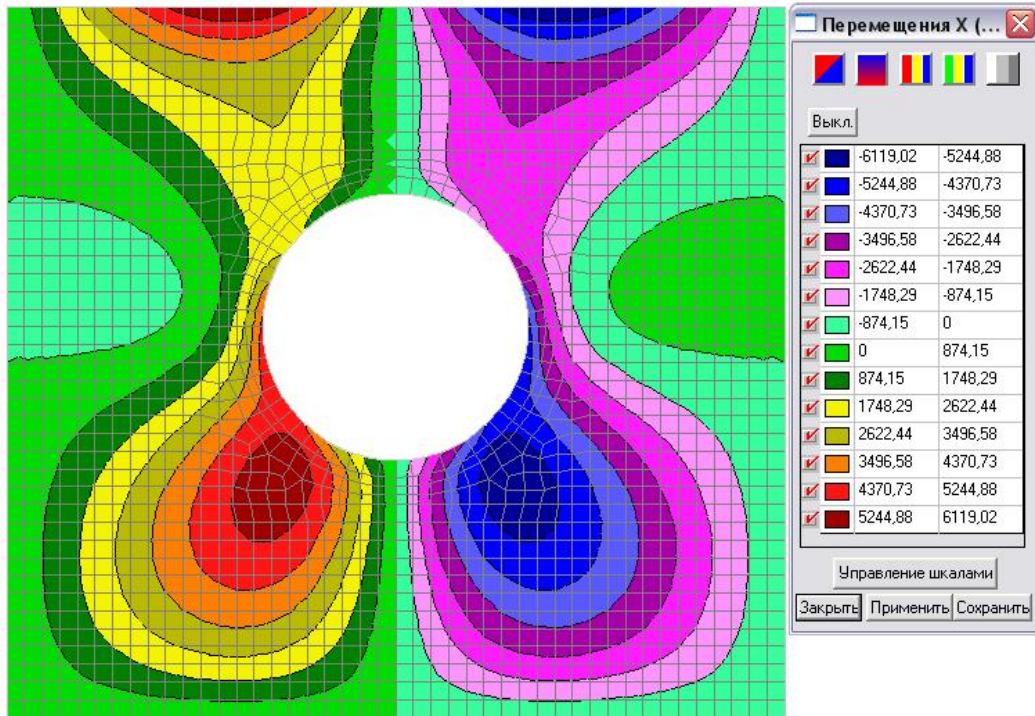
2) для отримання реального напруження σ_r , слід напруження в моделі з одиничними параметрами σ_e перемножити зі значенням реальної питомої ваги і розділити на одиничне значення питомої ваги γ_r :

$$\sigma_r = \sigma_e \gamma_r. \quad (2.9)$$

Для перевірки адекватності розподілу НДС в СЕ-моделі та отриманих формул нижче наводяться результати розрахунку СЕ-моделі з такими значеннями реальних характеристик ґрунту: модуль пружності $E_r=35$ МПа; питома вага $\gamma_r=20$ кН/м³ (рис. 2.3-2.4).

Як видно з наведених результатів чисельних розрахунків, ізолінії та ізополя напруженого та деформованого станів ідентичні в якісному відношенні, а кількісно їхні відмінності можна отримати за формулами, представленими вище. Так, якщо напруження, позначені у вікні правіше за картини переміщень на рис. 2.2 помножити на 20 (реальна питома вага) і розділити на 1 (одиничне значення питомої ваги) та 35 (модуль пружності), то вийдуть значення переміщень на рис. 2.4; якщо значення напруження на рис. 2.3, в) і г) помножити на 20 (реальна питома вага) і розділити на 1 (одиничне значення питомої ваги), вийдуть значення напружень на рис. 2.5.

Переміщення по горизонтальній осі



Переміщення по вертикальній осі

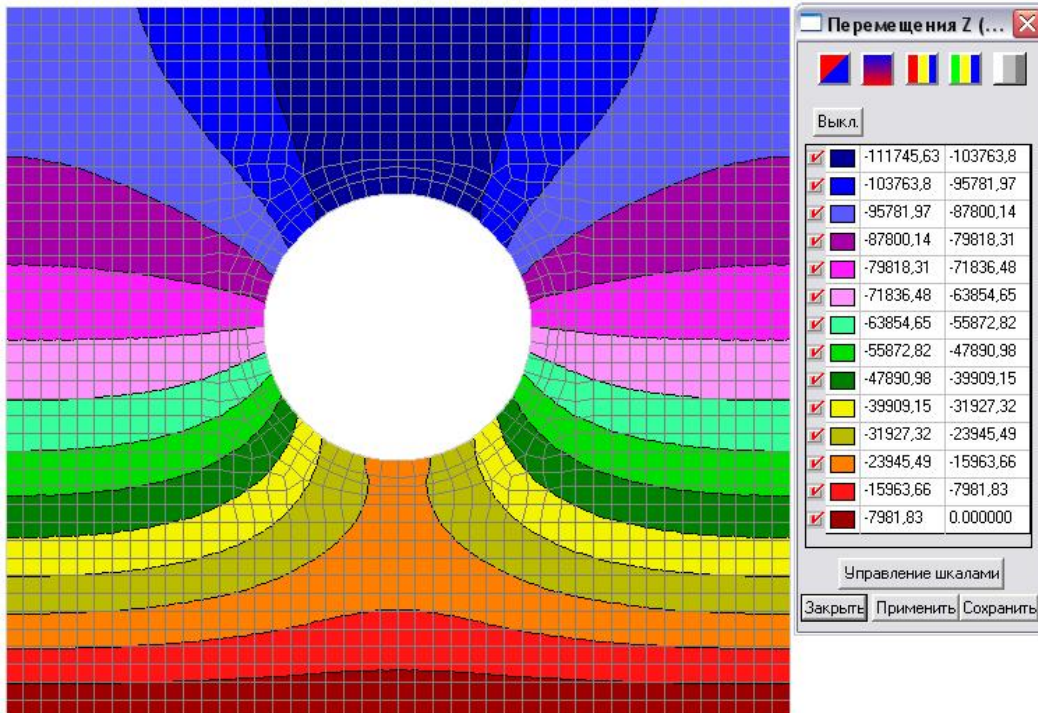
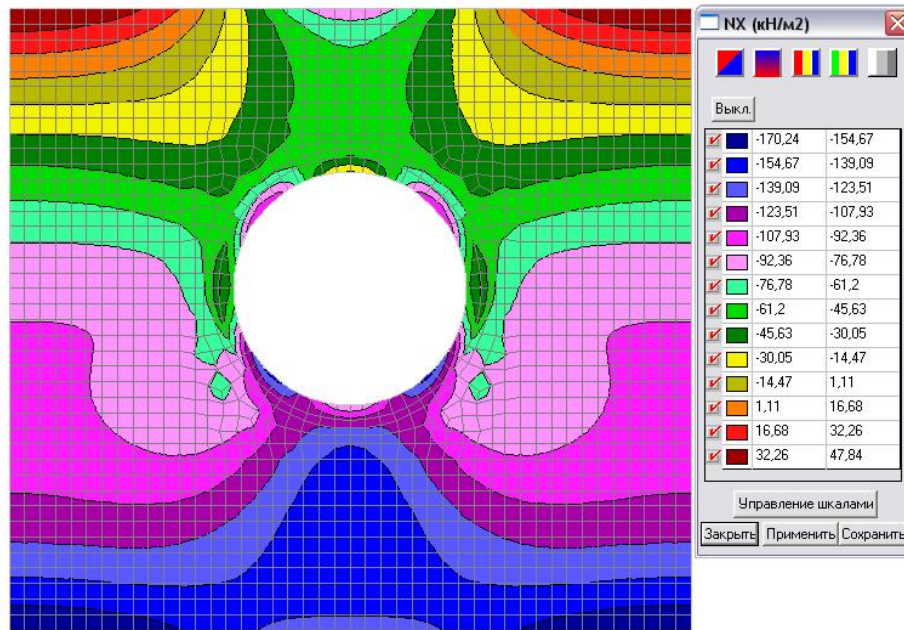


Рисунок 2.4 – Деформований стан SE-моделі
з конкретними параметрами

Напруження по горизонтальній осі



Напруження по вертикальній осі

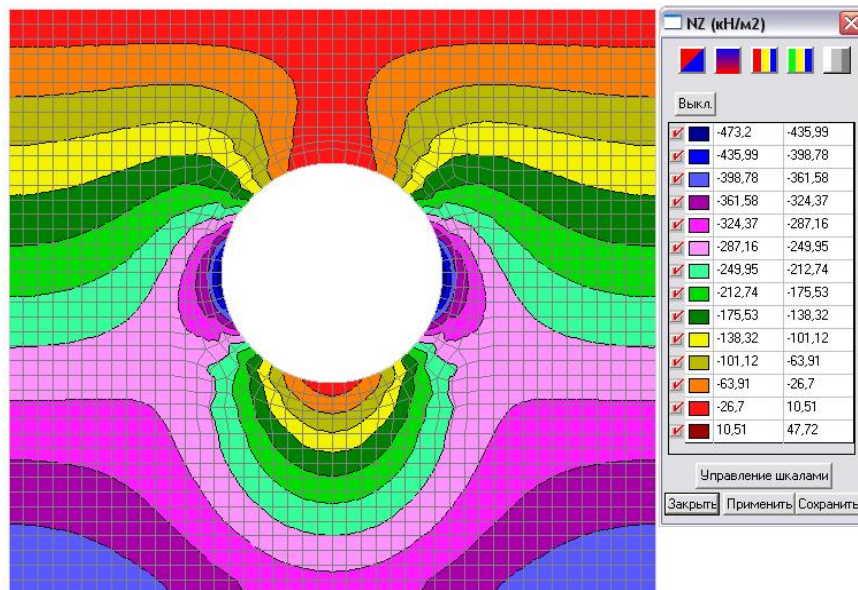


Рисунок 2.5 – Напружений стан SE-моделі
з конкретними параметрами

Для визначення НДС незакріплених виробок певного діаметру достатньо провести один чисельний розрахунок SE-моделі з одиничними параметрами та за допомогою простих аналітичних формул екстраполювати НДС цієї моделі на всі можливі випадки реальних виробок.

2.4 χ -параметр як основа параметричного аналізу незакріпленої виробки в шаруватому масиві

Як стверджувалося вище, в якості наукової гіпотези, на якій ґрунтуються основи параметричного аналізу незакріпленої виробки в шаруватому масиві, є те, що існує набір відносних параметрів, які дозволяють екстраполювати конкретне рішення МСЕ (наприклад, на тих же СЕ-моделях із одиничними параметрами) на інші розрахункові випадки (Тютюкін, Решетняк, & Петросян, 2018). Для цього уведено χ -параметр, який характеризує відношення модулів пружності матриці і шару, що дозволяє узагальнити ряд випадків шаруватості:

$$\chi = \frac{E_m}{E_s}, \quad (2.10)$$

де E_m – модуль пружності матриці; E_s – модуль пружності шару.

Була скоригована раніше розроблена СЕ-модель незакріпленої виробки (Петросян, & Тютюкін, 2017), що залягає в шаруватому масиві (проведено більш детальну дискретизацію розрахункової області), яка розрахована для десяти значень χ -параметру (рис. 2.6, а).

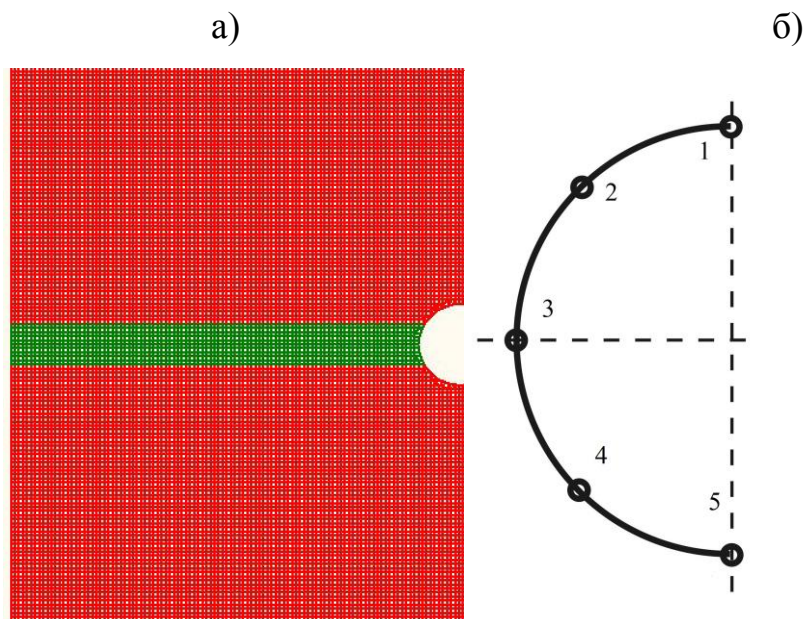


Рисунок 2.6 – СЕ-модель незакріпленої виробки

в шаруватому масиві (а) та схема характерних точок на контурі виробки (б)

Масив результатів в ході чисельного аналізу був проаналізований, і для подальшого визначення закономірностей напруженого стану було обрано п'ять характерних точок контуру виробки, в яких визначаються величини компонент напружень. Надана схема застосовується в дисертаційній роботі і надалі під час аналізу НДС (рис. 2.6, б). На рис. 2.7 наведені характерні ізолінії та ізополя напружень контуру незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві, які були проаналізовані.

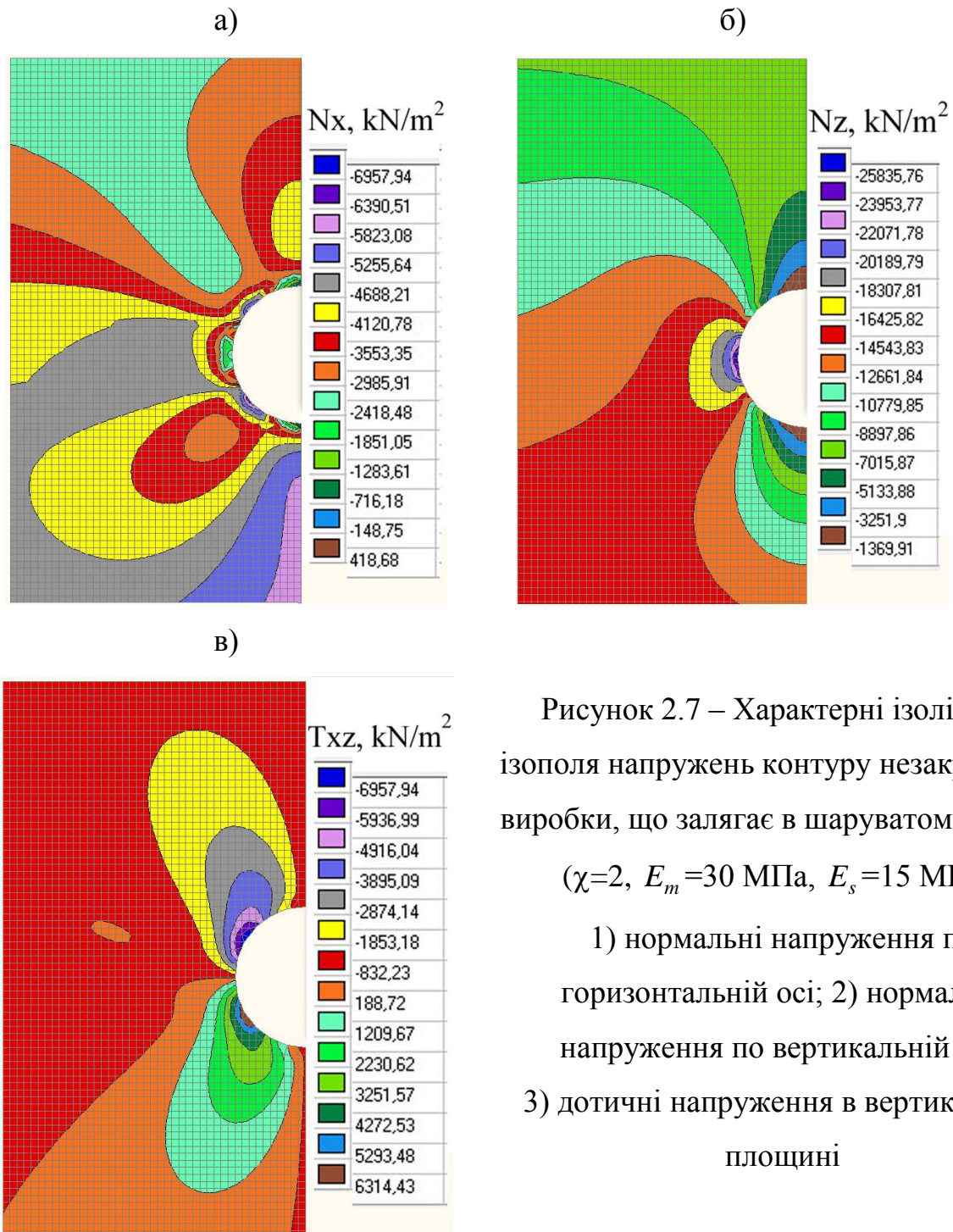


Рисунок 2.7 – Характерні ізолінії та ізополя напружень контуру незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві ($\chi=2$, $E_m=30$ МПа, $E_s=15$ МПа):

- 1) нормальні напруження по горизонтальній осі;
- 2) нормальні напруження по вертикальній осі;
- 3) дотичні напруження в вертикальній площині

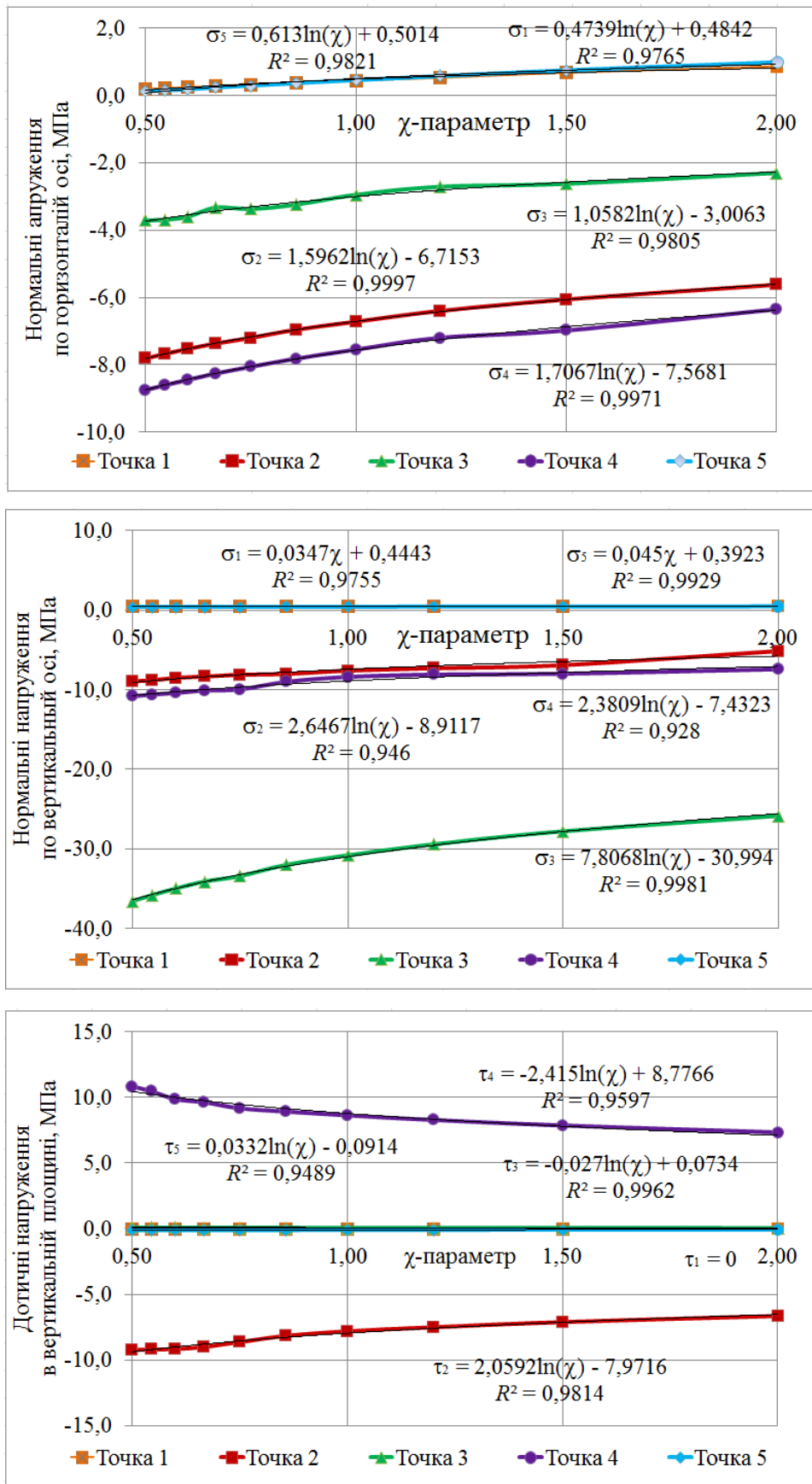


Рисунок 2.8 – Графіки залежності напружень на контурі незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві, від χ -параметру

На основі отриманих результатів для характерних точок побудовані графіки закономірностей напружень контуру незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві від χ -параметру (рис. 2.8). Графіки апроксимовано в Microsoft Excel, причому отримані логарифмічні закономірності апроксимації мають коефіцієнт кореляції $R^2=0,97\dots0,99$, що свідчить про їхній майже функціональний характер.

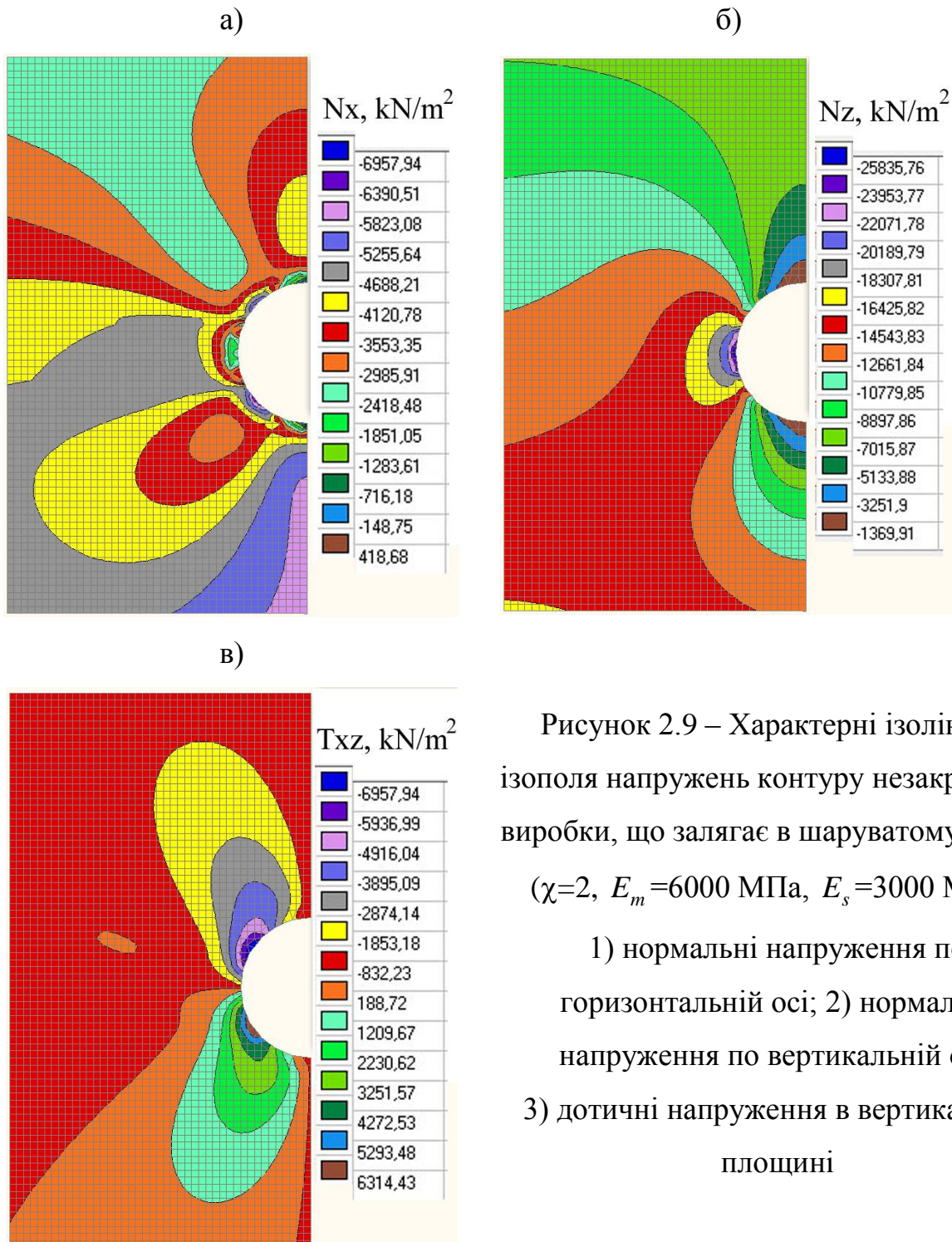


Рисунок 2.9 – Характерні ізолінії та ізополя напружень контуру незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві ($\chi=2$, $E_m=6000$ МПа, $E_s=3000$ МПа):

- 1) нормальні напруження по горизонтальній осі;
- 2) нормальні напруження по вертикальній осі;
- 3) дотичні напруження в вертикальній площині

Для підтвердження авторських побудов, що обґрунтовуються отриманими логарифмічними закономірностями напруженого стану в характерних точках на контурі виробки від χ -параметру, проведено контрольний розрахунок із значенням $\chi=2$, але із зміненими деформаційними характеристиками матриці і шару (рис. 2.9).

Порівняння компонент напружень, представлених на рис. 2.7 і 2.9, свідчить про їхню ідентичність, а також дає змогу зробити висновок, що весь спектр випадків незакріпленої виробки в шаруватому масиві при різних деформаційних властивостях матриці і шару, є еквівалентним при однаковому χ -параметрі. Тобто, яким би чином не змінювалися кількісно значення модулів пружності матриці і шару, при однакових значеннях χ -параметру напружений стан випадків буде ідентичним.

Отримані закономірності напружень контуру незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві, мають функціональний характер і є логарифмічними (лише для двох точок вони мають лінійний характер). Це дозволяє в практичних розрахунках при різних значеннях χ -параметру вираховувати напруження в п'яти характерних точках виробки, лише визначивши відношення між деформаційними властивостями матриці і шару.

2.5 Скейлінг (scaling) як інструмент параметричного аналізу

Для реалізації авторської ідеї, викладеної в п. 2.2, були проведені розрахунки двох геомеханічних систем: «незакріплена виробка – однорідний масив» та «незакріплена виробка – шаруватий масив». Спочатку аналізувалися системи з реальними геометричними параметрами (радіус незакріпленої виробки приймався рівним радіусу перегінного та станційного тунелю метрополітену, комунального тунелю тощо), а потім для скейлінгу (зміни масштабу геометричних параметрів) розраховувалися системи з одиничним геометричним параметром – радіусом ($R=1$).

Після комплексу проведених розрахунків визначено закономірність зміни напружень та переміщень двох геомеханічних систем («незакріплена виробка –

однорідний масив» та «незакріплена виробка – шаруватий масив»). Можна стверджувати, що для того, щоб визначити напруження та переміщення в реальних геомеханічних системах, достатньо виконати розрахунки на колійній виробці із одиничним радіусом, а потім виконати скейлінг напружень та переміщень (при постійному значенні деформаційних параметрів обох систем).

Важливим під час застосування скейлінгу є те, що він повністю коректний при його застосуванні для шаруватих масивів. Для прогнозування змін НДС системи «незакріплена виробка – шаруватий масив» розроблено дві SE-моделі незакріпленої виробки, причому потужність шару в кожній з них змінено у відповідності до радіусу виробки (рис. 2.10). В SE-моделях для відтворення спектру деформаційних характеристик матриці (оточуючого масиву) і шару застосовано χ -параметр, який характеризує відношення модулів пружності матриці і шару (Tiutkin, Petrosian, Radkevych, & Alkhdour, 2019).

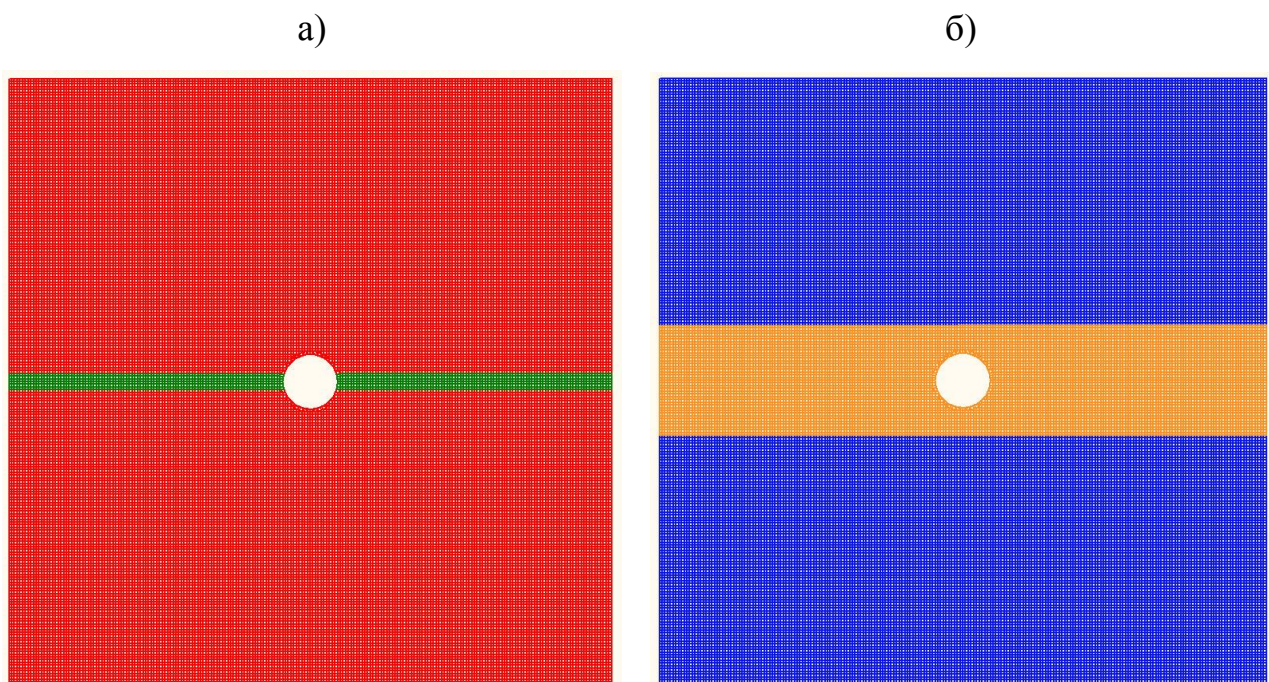


Рисунок 2.10 – SE-моделі незакріпленої виробки радіусом R , що залягає в шаруватому масиві: а) товщина шару $0,5R$; б) товщина шару $4R$

На рис. 2.11-2.12 наведені характерні ізолінії та ізополя НДС контуру незакріпленої виробки в шаруватому масиві із однаковими значеннями χ -параметру та різною товщиною шару.

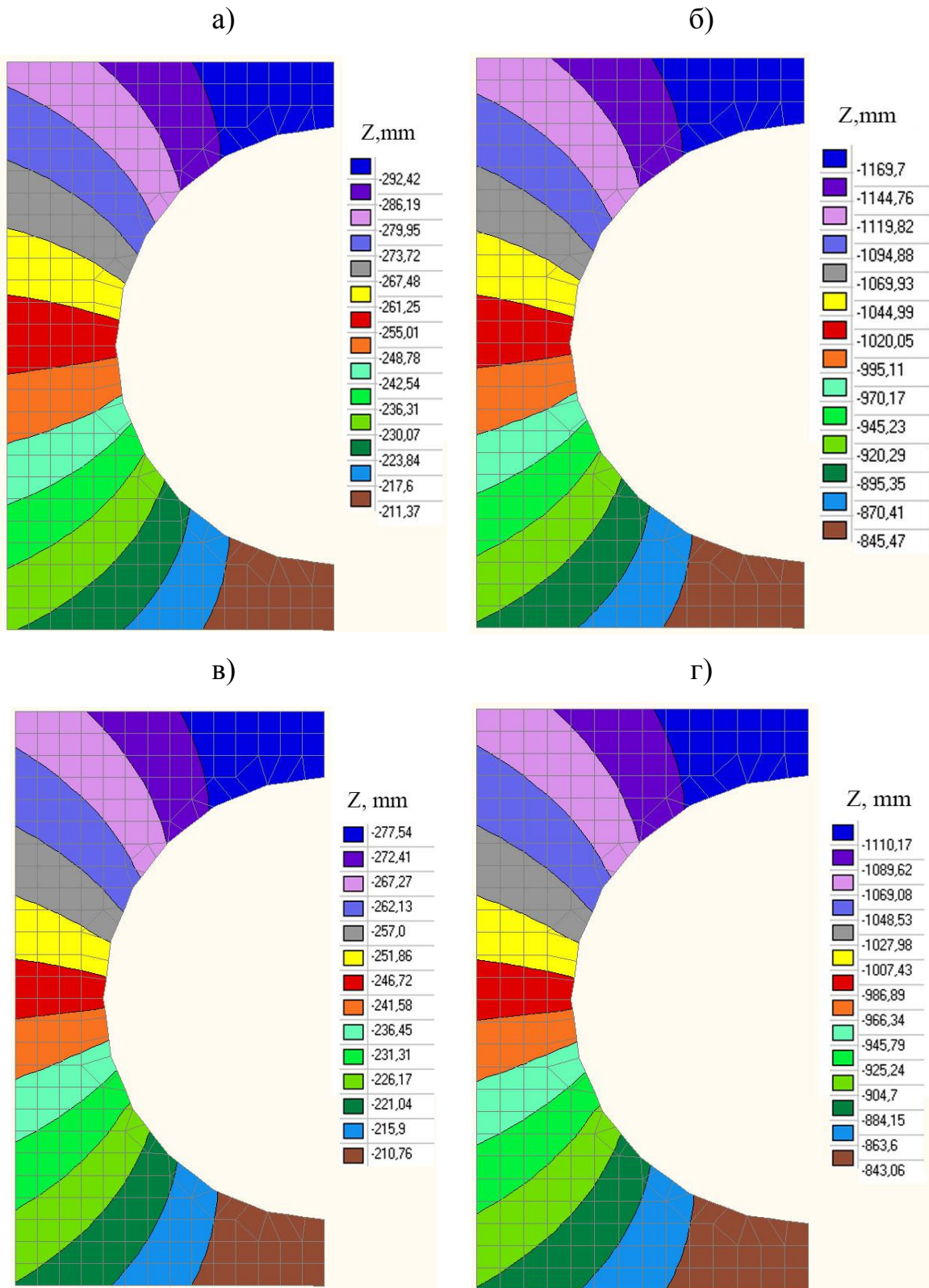


Рисунок 2.11 – Характерні ізолінії та ізополя вертикальних переміщень контуру незакріпленої виробки $R=1$, що залягає в шаруватому масиві ($\chi=2$, $E_m=30$ МПа, $E_s=15$ МПа): а) товщина шару $0,5R$, діаметр виробки 1 м; б) товщина шару $0,5R$, діаметр виробки 2 м; в) товщина шару $4R$, діаметр виробки 1 м; г) товщина шару $4R$, діаметр виробки 2 м

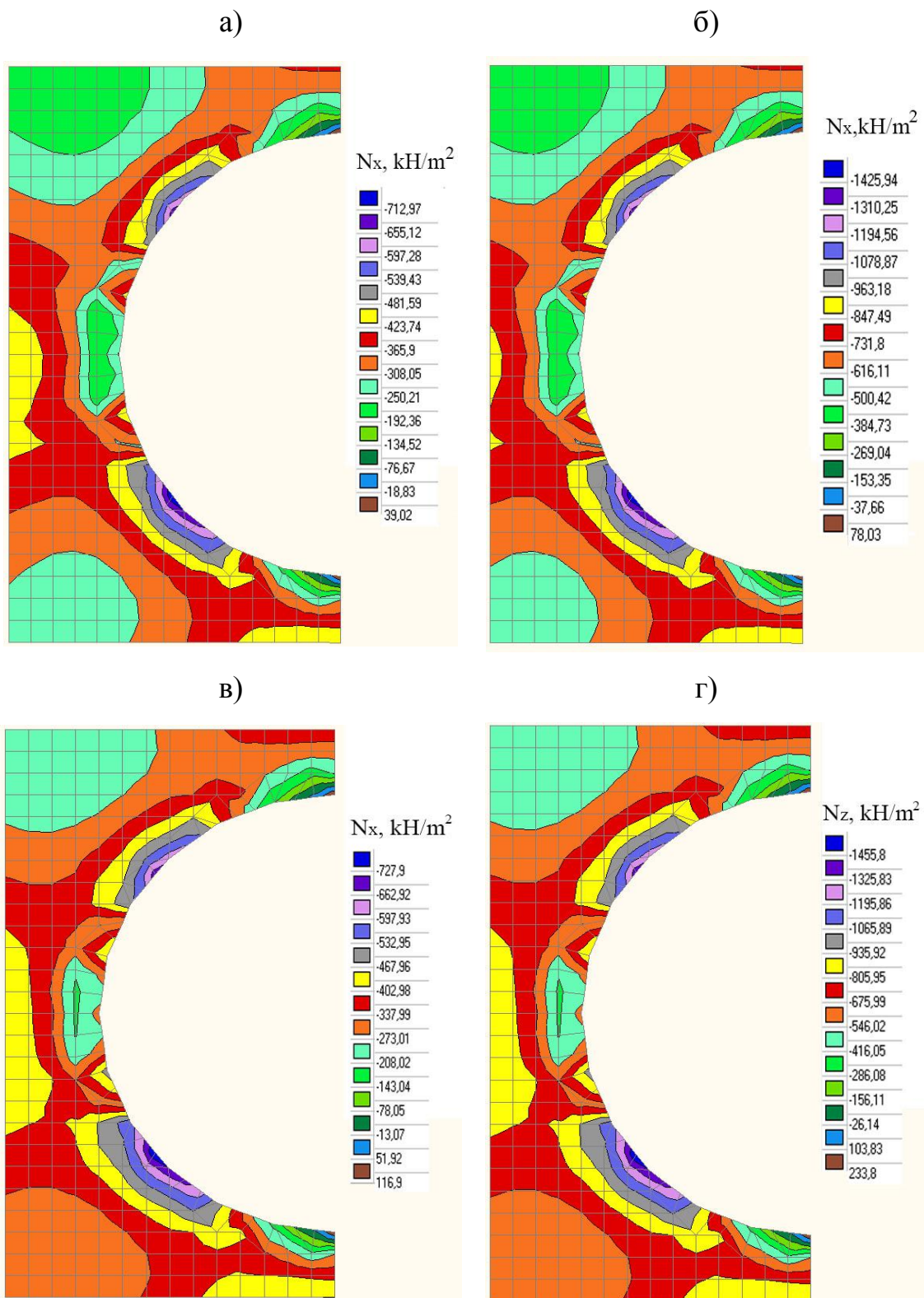


Рисунок 2.12 – Характерні ізолінії та ізополя нормальних напружень по горизонтальній осі контуру незакріпленої виробки $R=1$, що залягає в шаруватому масиві ($\chi=2$, $E_m=30$ МПа, $E_s=15$ МПа): а) товщина шару $0,5R$, діаметр виробки 1 м; б) товщина шару $0,5R$, діаметр виробки 2 м; в) товщина шару $4R$, діаметр виробки 1 м; г) товщина шару $4R$, діаметр виробки 2 м

Аналіз масиву результатів системи «незакріплена виробка – шаруватий масив» (наведені лише найбільш характерні дані, що безперечно доводять положення цієї роботи) дає змогу стверджувати, що для отримання напружень і переміщень незакріпленої виробки із реальним радіусом, як і для випадку системи «незакріплена виробка – однорідний масив», достатньо під час скейлінгу збільшити напруження в n разів, а переміщення – в n^2 системи з одиничним геометричним параметром. Таким чином, достатньо розрахувати лише один випадок шаруватості із визначеною товщиною шару та χ -параметром, щоб, застосовуючи *scaling*-параметри, можна було визначити НДС виробок інших геометричних параметрів. Відповідно, на основі отриманих результатів можливе прогнозування НДС горизонтальних виробок колового окреслення в шаруватому масиві.

Для того, щоб процес прогнозування був більш детальним, масив результатів в ході чисельного аналізу був проаналізований для п'яти характерних точок (див. рис. 2.6, б). На основі отриманих результатів побудовані графіки закономірностей переміщень і напружень контуру незакріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві від χ -параметру (рис. 2.13-2.20) (Tiutkin, Petrosian, Radkevych, & Alkhdour, 2019).

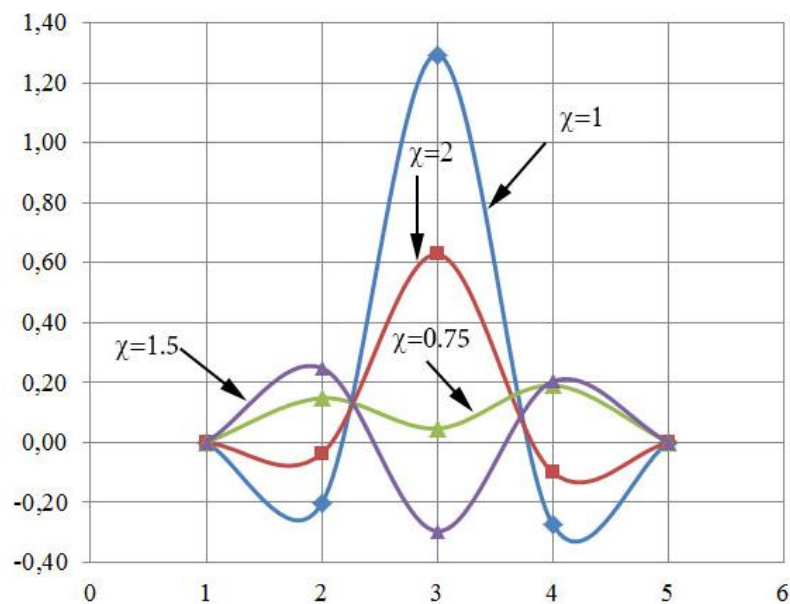


Рисунок 2.13 – Горизонтальні переміщення (мм) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $0,5R$

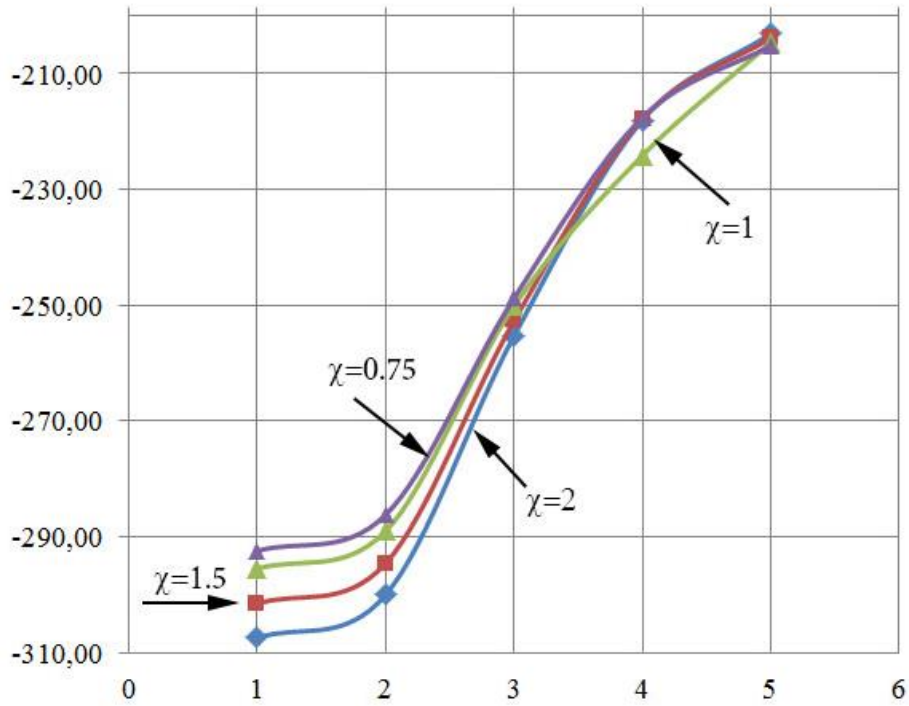


Рисунок 2.14 – Вертикальні переміщення (мм) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $0,5R$

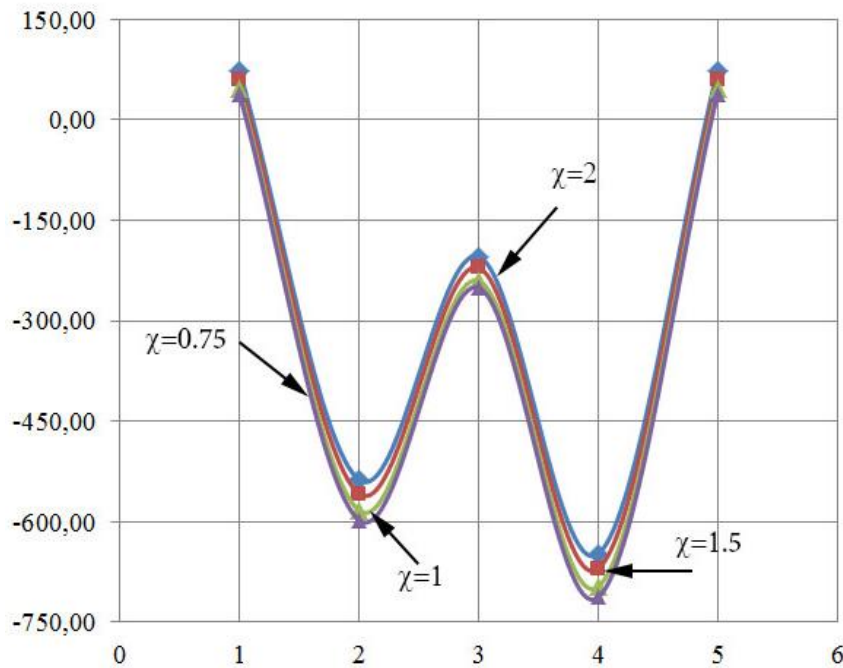


Рисунок 2.15 – Нормальні горизонтальні напруження (кН/м^2) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $0,5R$

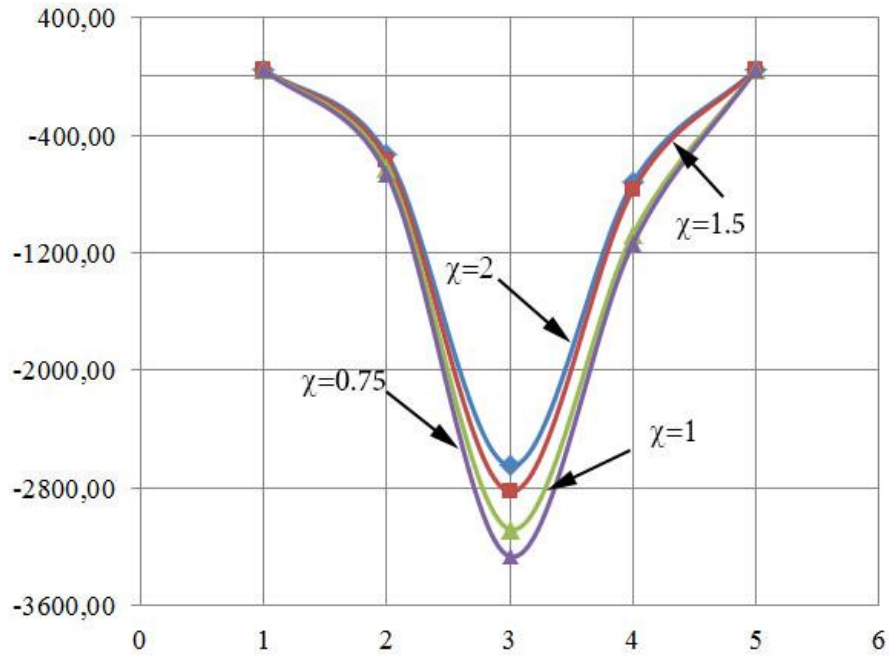


Рисунок 2.16 – Нормальні вертикальні напруження (kN/m^2) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $0,5R$

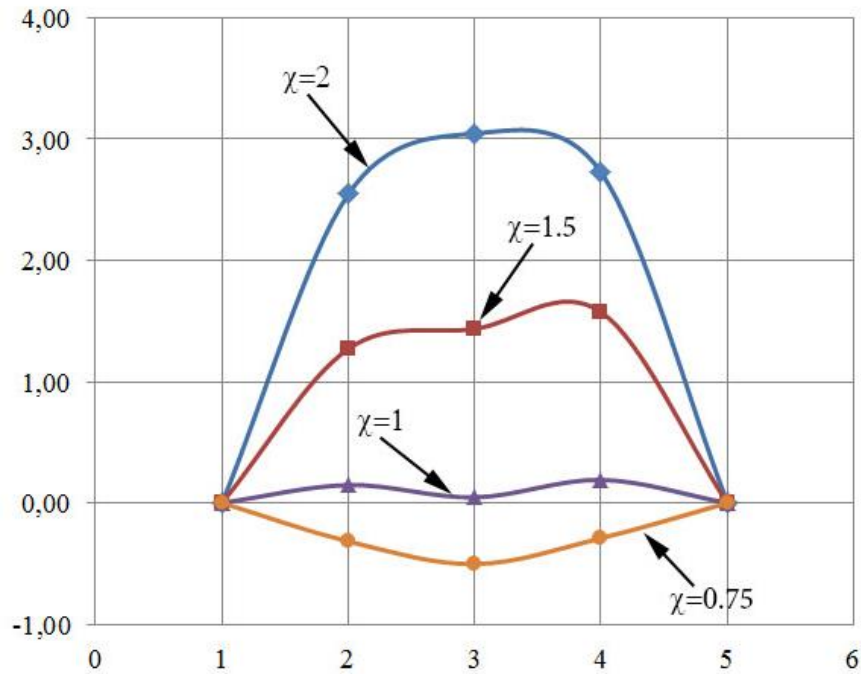


Рисунок 2.17 – Горизонтальні переміщення (мм) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $4R$

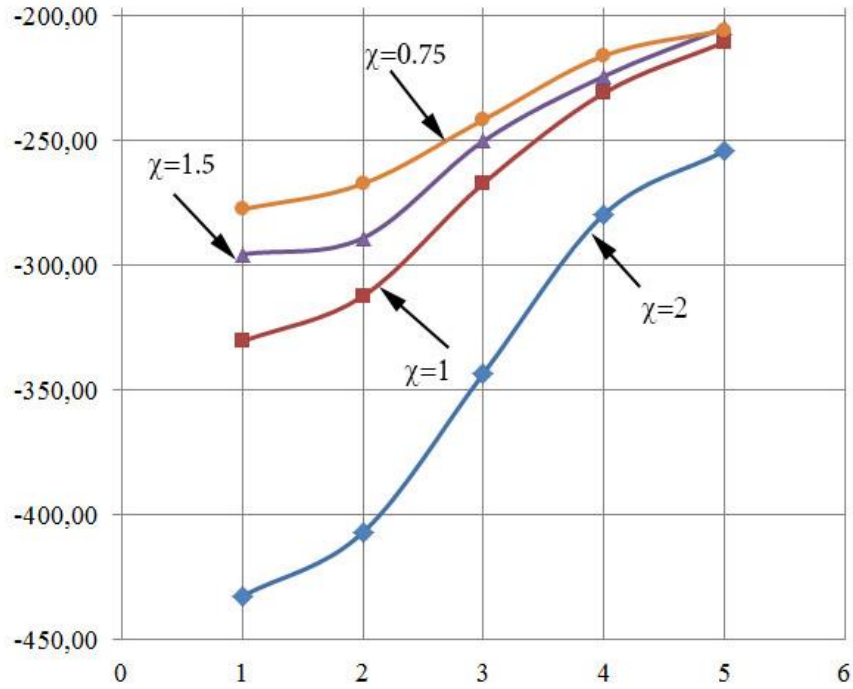


Рисунок 2.18 – Вертикальні переміщення (мм) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $4R$

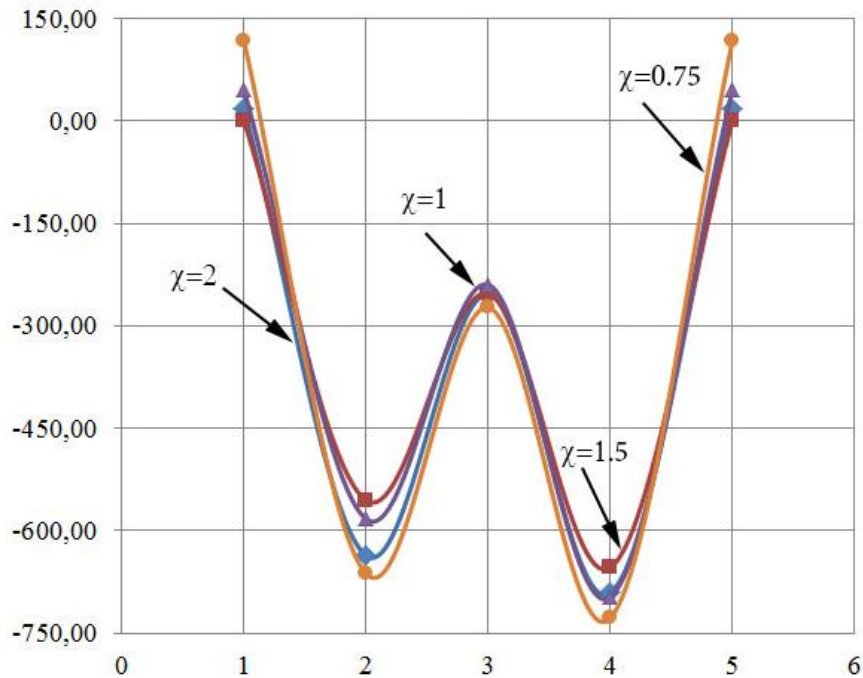


Рисунок 2.19 – Нормальні горизонтальні напруження (kN/m^2) в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $4R$

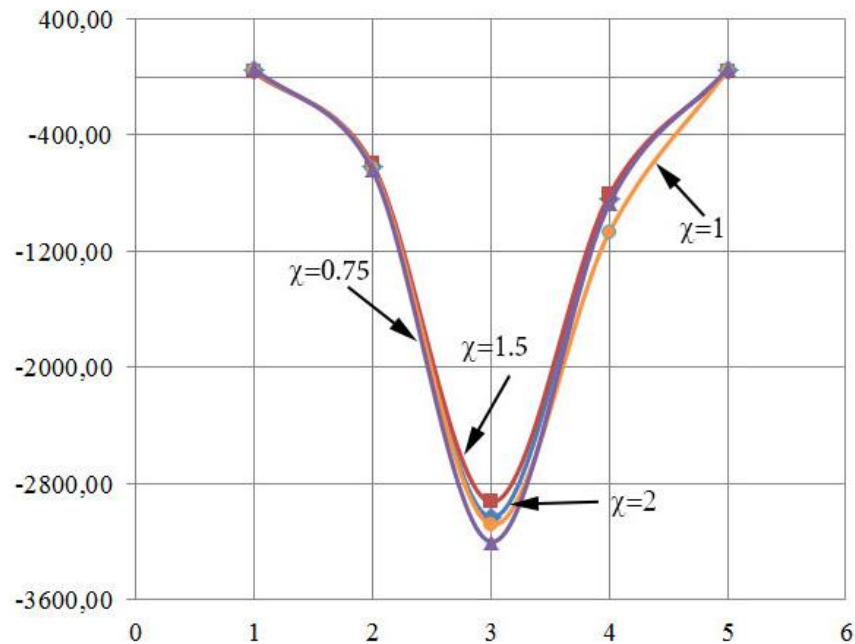


Рисунок 2.20 – Нормальні вертикальні напруження (кН/м²)

в характерних точках виробки з одиничним діаметром при товщині шару $4R$

На представлених рисунках не наведено параметри НДС при товщині шару, що знаходиться в діапазоні $0,5R \dots 4R$. Однак достатньо розрахувати один конкретний варіант виробки, щоб, застосовуючи *scaling*-параметри, визначити НДС виробок будь-якого діаметру. Практичним чином це полягає в тому, що значення на представлених графіках можна помножувати на *scaling*-параметри (збільшити напруження в n разів, а переміщення в n^2 разів), оскільки розрахована виробка має одиничний діаметр.

Визначені закономірності дозволяють прогнозування НДС горизонтальних виробок в шаруватому масиві за допомогою скейлінгу. В практичному плані це відкриває можливість до аналізу ситуації із варіацією параметрів, що гостроактуально для проходки підземних виробок в шаруватому масиві. Оперативний аналіз переміщень та напружень може дозволити ще на стадії аналізу інженерно-геологічної ситуації та проектування накреслити раціональний план і профіль траси. Таке прогнозування дозволяє вирішити задачу міцності та стійкості горизонтальних виробок, що залягають в шаруватому масиві.

3 ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ І ЗАКОНОМІРНОСТІ НДС ЗАКРІПЛЕНОЇ ВИРОБКИ, ЩО ЗАЛЯГАЄ В ШАРУВАТОМУ МАСИВІ

3.1 Параметричний аналіз деформованого стану закріпленої виробки на основі еквівалентної жорсткості оправи

Оскільки під час постановки кріплення в горизонтальну виробку НДС системи кардинально змінюється, провести первинний параметричний аналіз НДС подібним чином, як для незакріпленої виробки, неможливо. Це пояснюється тим, що оправа виконується з різних матеріалів (бетон, залізобетон, чавун) та має діапазон товщини (для горизонтальних виробок перегінних тунелів діаметром 5,6...6 м товщина складає $h=0,15...0,3$ м, для станційних діаметром 8,5...9,5 м – $h=0,5...0,55$ м). Будь-яка зміна параметрів оправи переформовує НДС системи «горизонтальна виробка – породний масив», і до сих пір немає замкнених аналітичних рішень розподілу компонент напружень та деформацій для всіх можливих випадків.

В цій дисертаційній роботі уводиться наступна пропозиція, що частково дозволяє оцінити деформований стан під час зміни товщини оправи і її матеріалу. Керуючим параметром, що впливає на зміну переміщень системи «горизонтальна закріплена виробка – породний масив», є як товщина h й ширина b кріплення, так і більшою мірою жорсткість на згин EI . Цей параметр є інтегральним, оскільки пов'язує в собі деформаційну властивість матеріалу оправи (модуль пружності EI) і її геометричні розміри (момент інерції $I = bh^3/12$, де b – ширина оправи, яка знаходиться для перегінного тунелю в діапазоні 1,0...1,2 м, а для станційного – 0,5...0,75 м).

Як видно, з параметричного аналізу системи «горизонтальна закріплена виробка – породний масив» виведено напружений стан, що пояснюється об'єктивними причинами. Навіть якщо прийняти деформаційні характеристики породного масиву (модуль пружності E_m та коефіцієнт Пуассону μ_m) постійними для всіх можливих розрахункових випадків, то зміна геометричних параметрів кріплення (товщина h й ширина b) призводить до значної зміни

компонент напружень. Так, навіть за усіх постійних параметрах обох частин системи «горизонтальна закріплена виробка – породний масив» та зміні лише товщини h з кроком 0,1 м якісна зміна ізополів напружень горизонтальної й вертикальної нормальних та дотичної компонент настільки суттєва, що вивести закономірність дуже складно. Це пояснюється саме зміною взаємодії між кріпленням та породним масивом, які підлаштовуються один під одного, створюючи майже унікальний напружений стан для розрахункових випадків з незначно варійованою товщиною h . В наступному розділі цієї дисертаційної роботи будуть надані результати часткового параметричного аналізу напруженого стану для закріпленої виробки.

Таким чином, якщо прийняти жорсткість на згин EI керуючим параметром деформування, можна розглянути наступну розрахункову ситуацію. Для двох опор перегінного тунелю з внутрішнім діаметром 5,1 м та виконаних з різних матеріалів (залізобетон і чавун) повинна існувати рівність $E_1 I_1 = E_2 I_2$, тобто:

$$E_1 \frac{b_1 h_1^3}{12} = E_2 \frac{b_2 h_2^3}{12}, \quad (3.1)$$

яка спрощується, якщо обрати ширину b однаковою для двох опор ($b=1,0$ м).

Відповідно, задача за допомогою дещо штучного прийому, що введений лише для її спрощення, повертається до пошуку еквівалентної товщини опор. Однак слід підкреслити, що в загальному випадку, коли ширина оправи b може не бути однаковою (0,75 м для чавунної оправи та 1,2 м для високоточних трапецієподібних залізобетонних блоків з гумовою гідроізоляцією), керуючим параметром залишається жорсткість на згин EI .

Задавшись модулями пружності (чавун $E_1=20,1 \cdot 10^4$ МПа та залізобетон $E_2=32,5 \cdot 10^3$ МПа) та розв'язавши рівняння (3.1), отримуємо:

$$h_2 = \sqrt[3]{\frac{12E_1I_1}{E_2}}. \quad (3.2)$$

Якщо задатися товщиною чавунної оправи $h_1=0,15$ м, еквівалентна товщина залізобетонної оправи буде дорівнювати $h_2=0,275$ м. Цей розрахунковий випадок є дещо гіпотетичним, оскільки при реальній товщині чавунної оправи ($h_1=0,15$ м) вона все ж має не суцільний прямокутний переріз (як у залізобетонного суцільного блока), а подібний швелеру (чавунний тубінг). Але для тестового розрахунку, який доведе авторську пропозицію оперування еквівалентною жорсткістю на згин EI , можна поки що не враховувати реальну геометрію поперечного перерізу елемента (рис. 3.1).

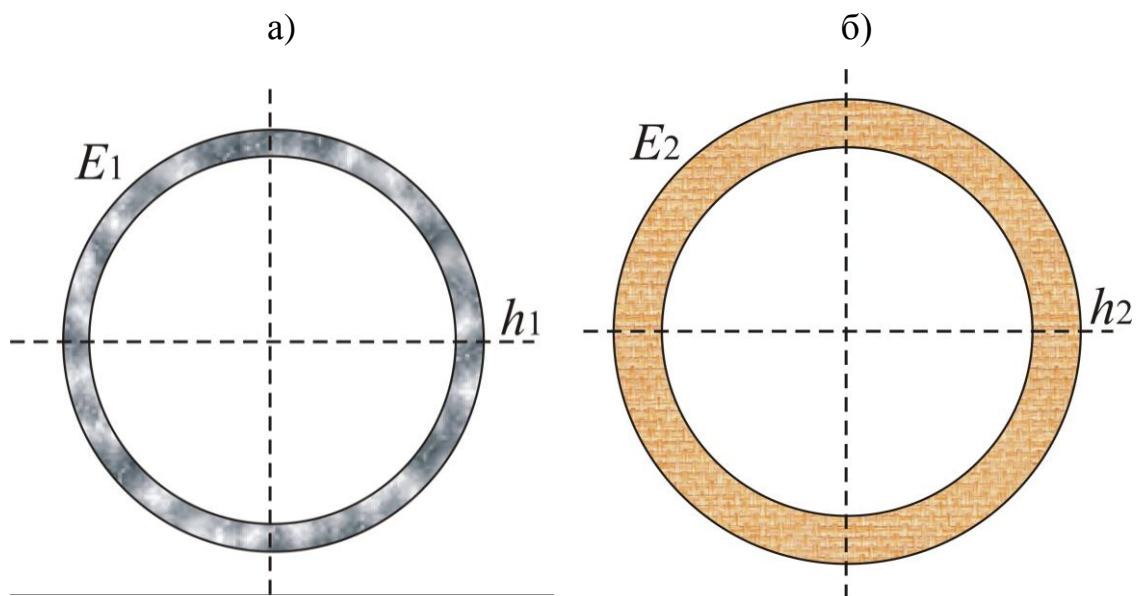


Рисунок 3.1 – Схеми закріпленої горизонтальної виробки з внутрішнім діаметром 5,1 м та еквівалентними EI :

а) товщиною $h_1=0,15$ м (чавун); б) товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон)

СЕ-моделі є просторовими на основі об'ємних елементів бібліотеки SCAD, кількість вузлів: 18912 (чавун) та 23156 (залізобетон); СЕ: 9216 (чавун) та 11316 (залізобетон). Усі вузли моделі спільні, розмір СЕ – від $0,12 \times 0,12$ до $0,15 \times 0,18$ м, що для моделі з такими розмірами достатньо для процесу збіжності рішення та отримання достатньо точних результатів. В обох моделях

над склепінням і під лотком – 5 м, по боках моделі – 3 м. Цих розмірів достатньо, щоб деформування закріпленої горизонтальної виробки відбувалося вільно, без затискань, про що свідчать проаналізовані далі параметри НДС.

Моделі створені за допомогою процесу автоматичної триангуляції, що є вбудованим процесором спеціалізованого комплексу SCAD (рис. 3.2).

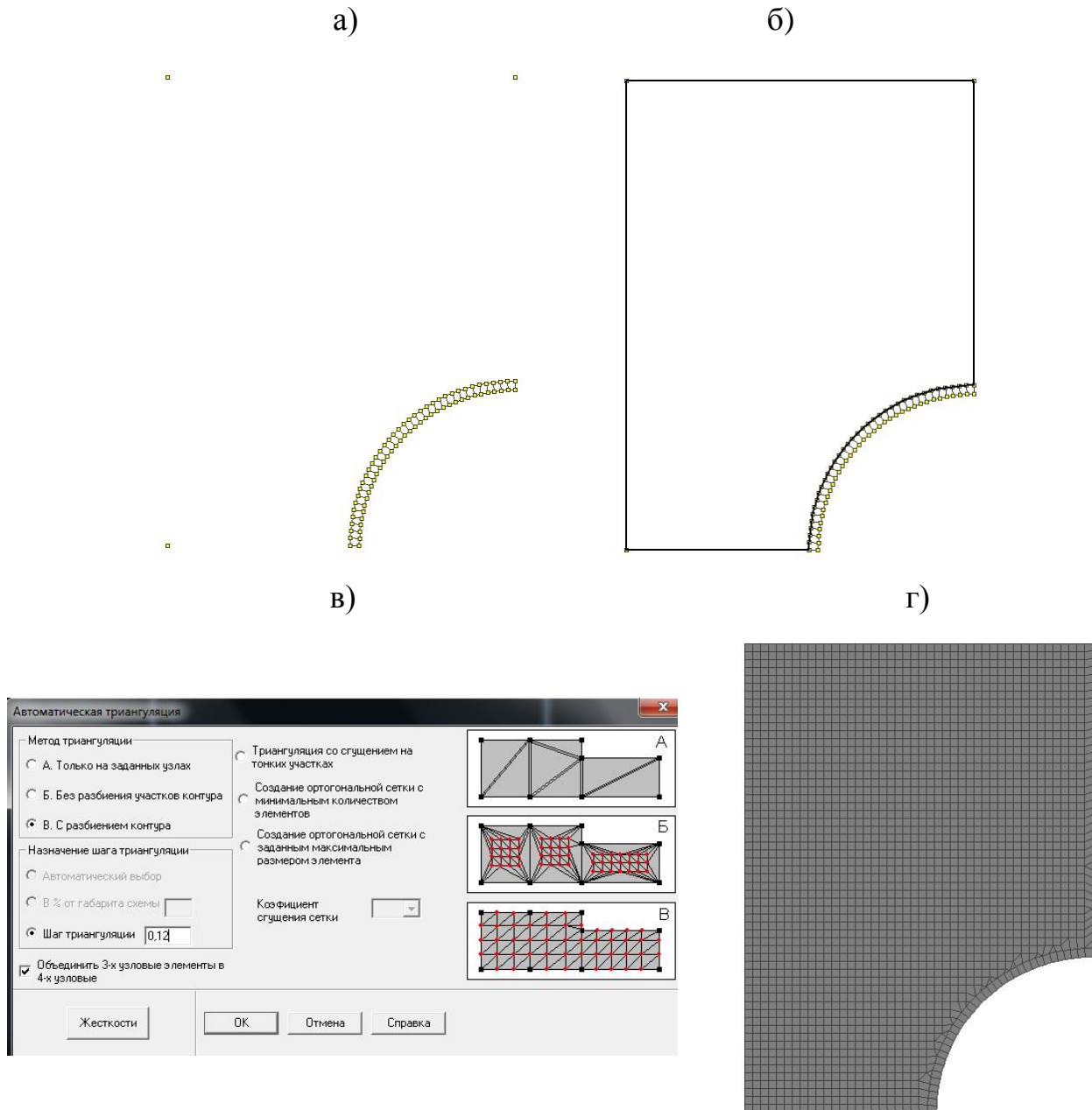


Рисунок 3.2 – Покроковий алгоритм автоматичної триангуляції SCAD

Однією зі стратегій SCAD є створення об'ємних моделей на основі плоского прототипу. Для цього достатньо змоделювати чверть плоскої моделі, а потім, шляхом геометричних перетворень та копіювання створити суцільну

робочу модель. Для цього з пластинчастих елементів створюється оправа (рис. 3.2, а) та трьома точками намічується майбутня область масиву. Потім розпочинається триангуляція цієї області, яка обводиться спеціальною полілінією контуру (рис. 3.2, б). Залишається лише виконати умову (рис. 3.2, в), підібравши розмір СЕ та встановити результати триангуляції в готову схему (рис. 3.2, г). Такий процес дозволяє створити більш деталізовану зону навколо оправи, що позитивно впливає на точність результатів, оскільки розмір елементів цієї області та самої оправи є дуже близьким (рис. 3.3).

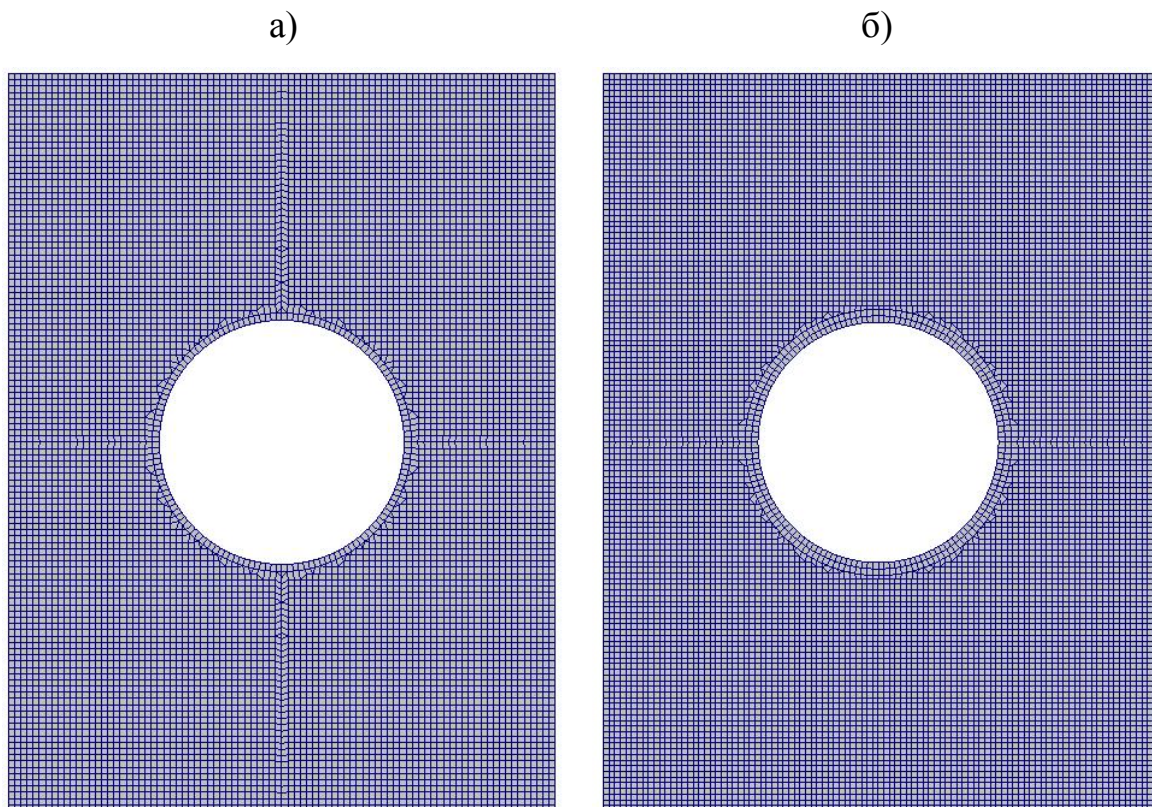


Рисунок 3.3 – Фрагменти СЕ-моделей закріпленої горизонтальної виробки:

а) товщиною $h_1=0,15$ м (чавун); б) товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон)

Для перевірки адекватності розподілу переміщень в СЕ-моделях нижче наводяться результати розрахунку з наступними значеннями реальних характеристик ґрунту: модуль пружності $E_m=35$ МПа; питома вага $\gamma_m=20$ кН/м³ (рис. 3.4-3.5). Також наведено компоненти напружень (рис. 3.6) для ілюстрації того факту, що при тотожних картинах деформованого стану напруження в оправах з різних матеріалів не є однаковим.

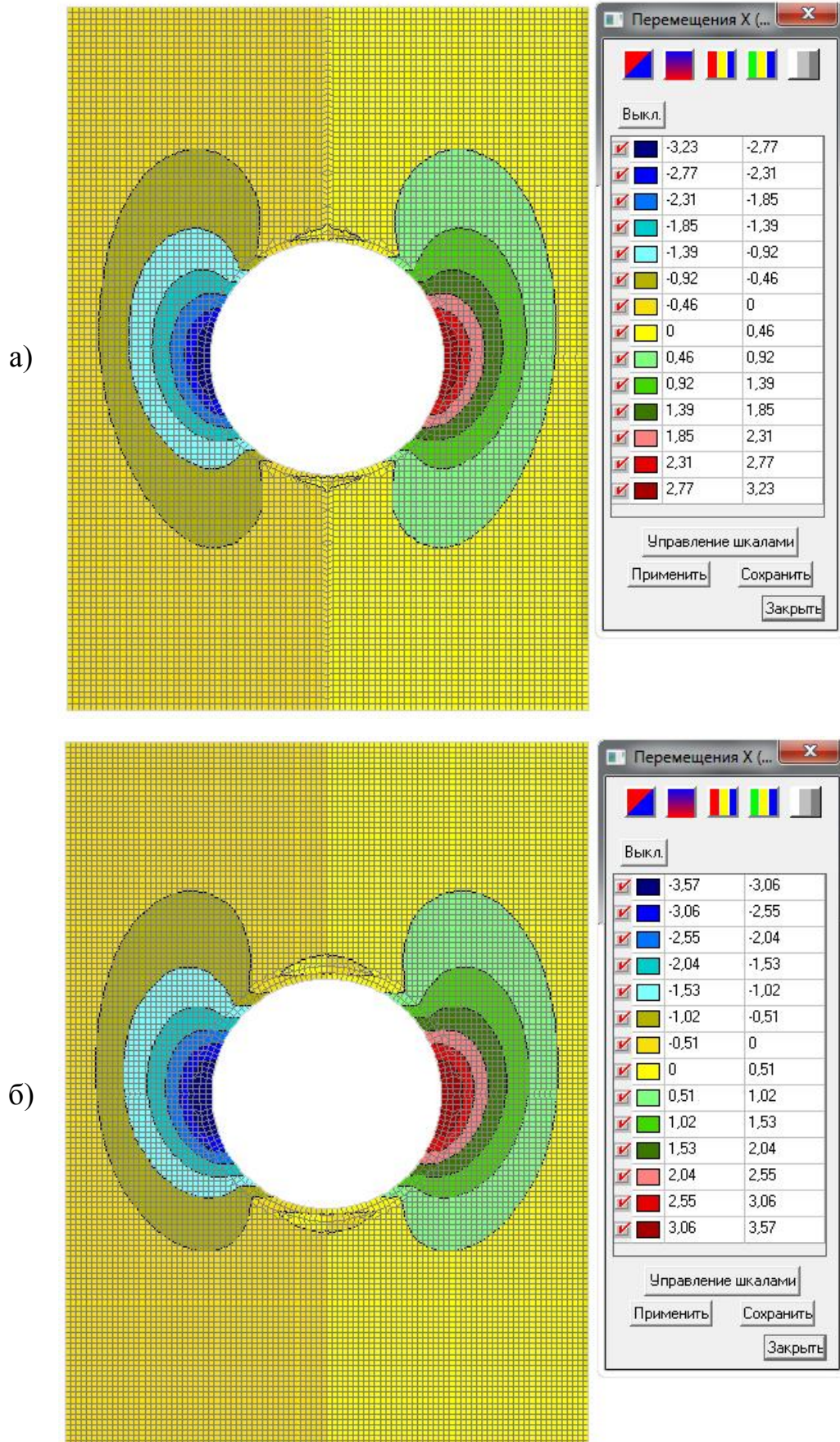


Рисунок 3.4 – Деформований стан СЕ-моделей (горизонтальні переміщення):

а) товщиною $h_1=0,15$ м (чавун); б) товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон)

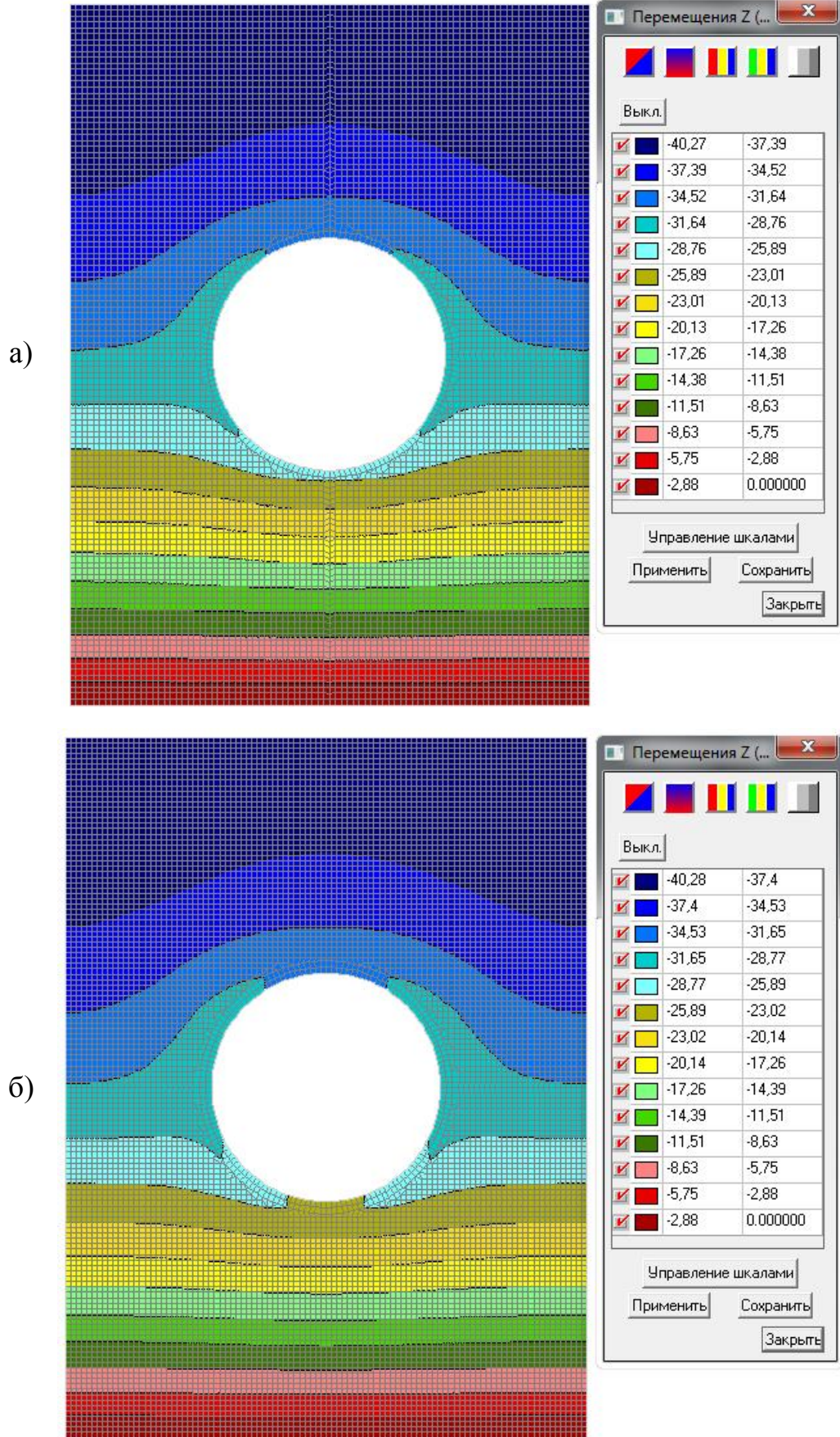


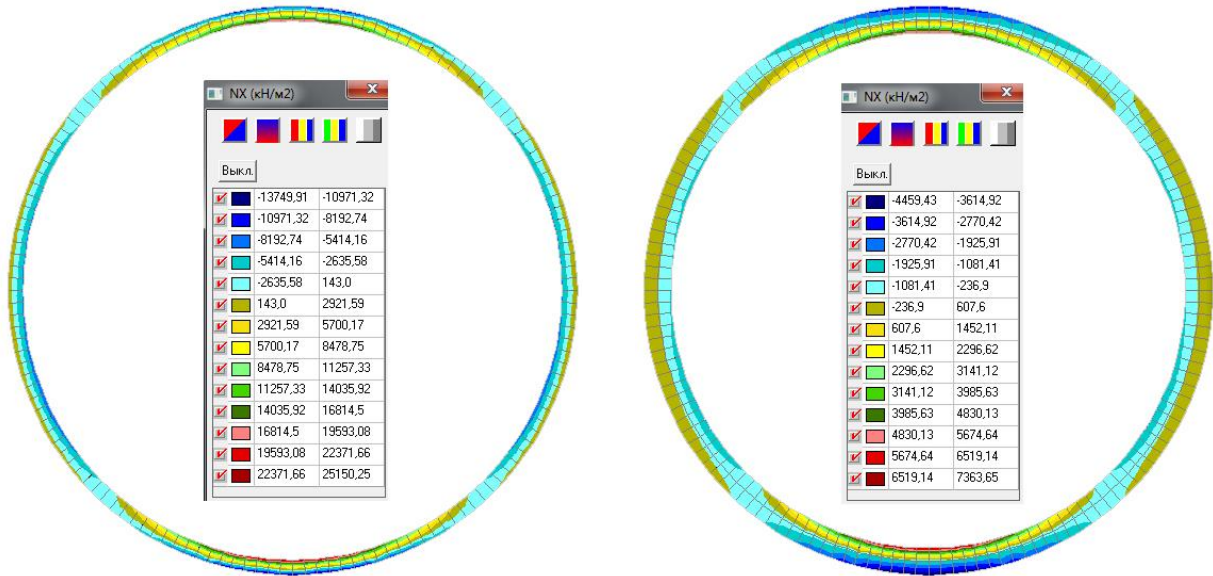
Рисунок 3.5 – Деформований стан SE-моделей (вертикальні переміщення):

а) товщиною $h_1=0,15$ м (чавун); б) товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон)

а)

б)

Горизонтальні нормальні напруження



Вертикальні нормальні напруження

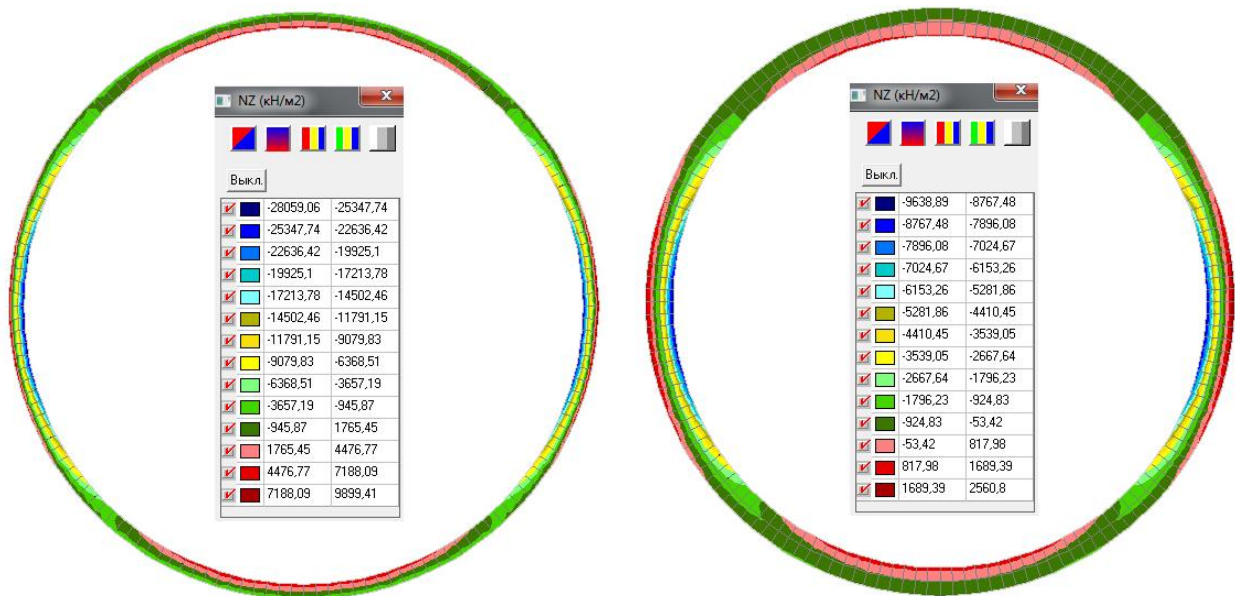


Рисунок 3.6 – Напружений стан фрагменту SE-моделей (оправа):
 а) товщиною $h_1=0,15$ м (чавун); б) товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон)

Перед тим, як перейти до детального аналізу деформованого стану, слід підкреслити, що отримання закономірностей зміни напружень від жорсткості на згин EI в рамках даної роботи не проводилося. Однак, якісний аналіз горизонтальної та вертикальної компонент нормальних напружень демонструє їхню схожість. За великим рахунком, розподіл напруженого стану із

концентраторами горизонтальної компоненти в замку та лотку кільця оправи та вертикальної компоненти в точці на горизонтальному діаметрі є класичним і підтвердженим багатьма авторитетними літературними джерелами (Савін, 1968; Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова, 2005). Проте слід підкреслити, що жорсткість на згин EI не є керуючим параметром, який надає змогу проведення параметричного аналізу саме напруженого стану, повністю задовольняючи пошук переміщень.

Так, аналіз компонент деформованого стану (рис. 3.4-3.5) дає змогу зробити висновок, що для СЕ-моделей з товщиною $h_1=0,15$ м (чавун) та товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон) вертикальні і горизонтальні переміщення є майже ідентичними. Деяка відмінність виникла по причині того, що питома вага, яка враховувалася комплексом SCAD під час розрахунку деформацій, для чавуну ($72,0$ кН/м³) майже в три рази більше, ніж для залізобетону ($24,5$ кН/м³). У випадку горизонтальних переміщень похибку також внесла різниця між значеннями коефіцієнта Пуассону ($0,3$ для чавуну та $0,2$ для залізобетону), про що свідчить якісний розподіл горизонтальної компоненти переміщень, оскільки у випадку чавуну ізополі є більш видовженими по висоті на відміну від оправи із залізобетону. На вертикальну компоненту переміщень значення коефіцієнта Пуассону не впливає, що є очікуваним, оскільки відповідає механіці деформування закріпленої горизонтальної виробки.

Кількісний аналіз значень демонструє, що для СЕ-моделі з товщиною $h_1=0,15$ м (чавун) максимальні горизонтальні переміщення складають $3,23$ мм, максимальні вертикальні переміщення – $-40,27$ мм та для СЕ-моделі товщиною $h_2=0,275$ м відповідно $3,57$ мм та $-40,28$ мм. Відповідно значення похибок ($9,5$ % для горизонтальних переміщень та $0,03$ % для вертикальних) не є значними, і можна стверджувати, що авторська гіпотеза про рівність жорсткості на згин повністю підтверджується.

Після цього підтвердження можна увести нову гіпотезу про те, що якщо існує рівність $E_1I_1 = E_2I_2$, то має існувати і такий вираз $E_1I_1 = E_2I_2 = E_{екв}I_{екв}$, де

$E_{екв}$ та $I_{екв}$ – відповідно деякі значення модулю пружності та моменту інерції, що є еквівалентними та не мають прив'язки до конкретного матеріалу та перерізу. Така гіпотеза дозволяє створювати СЕ-моделі з одиничними параметрами (товщина $h_{екв}=0,1$ м й ширина $b_{екв}=1,0$ м) оправи та, підбираючи еквівалентний модуль пружності $E_{екв}$, отримувати деформований стан, який є тотожним, наприклад, для оправи з чавунних тубінгів (або для шахтного кріплення КШП, що має незамкнутий коробчастий (шатровий) перетин).

Для цього рівняння (3.1) слід вирішити відповідно еквівалентного модуля пружності:

$$E_{екв} = \frac{12E_1I_1}{h_{екв}}, \quad (3.3)$$

$$E_{екв} = \frac{12E_2I_2}{h_{екв}}. \quad (3.4)$$

Отримані формули реалізують пошук еквівалентного модуля пружності $E_{екв}$ як на основі модуля пружності чавуну E_1 , так і на основі модуля пружності залізобетону E_2 . Для вже перевічених вище випадків СЕ-моделей з товщиною $h_1=0,15$ м (чавун) та товщиною $h_2=0,275$ м (залізобетон), СЕ-модель з еквівалентною товщиною $h_{екв}=0,1$ м повинна мати еквівалентний модуль пружності $E_{екв}=67,8 \cdot 10^4$ МПа. Порівняння жорсткостей на згин також виявляє незначну похибку (близько 0,4 %), якою можна знехтувати: якщо розраховувати еквівалентний модуль пружності $E_{екв}$ за товщиною $h_1=0,15$ м (чавун, $E_1=20,1 \cdot 10^4$ МПа), то $E_1I_1=56531,3$ кН·м², а при товщині $h_2=0,275$ м (залізобетон, $E_2=32,5 \cdot 10^3$ МПа) – $E_2I_2=56324,9$ кН·м².

Для перевірки цієї авторської гіпотези нижче наводяться значення деформованого стану СЕ-моделі з еквівалентною товщиною $h_{екв}=0,1$ м та еквівалентним модулем пружності $E_{екв}=67,8 \cdot 10^4$ МПа (рис. 3.7).

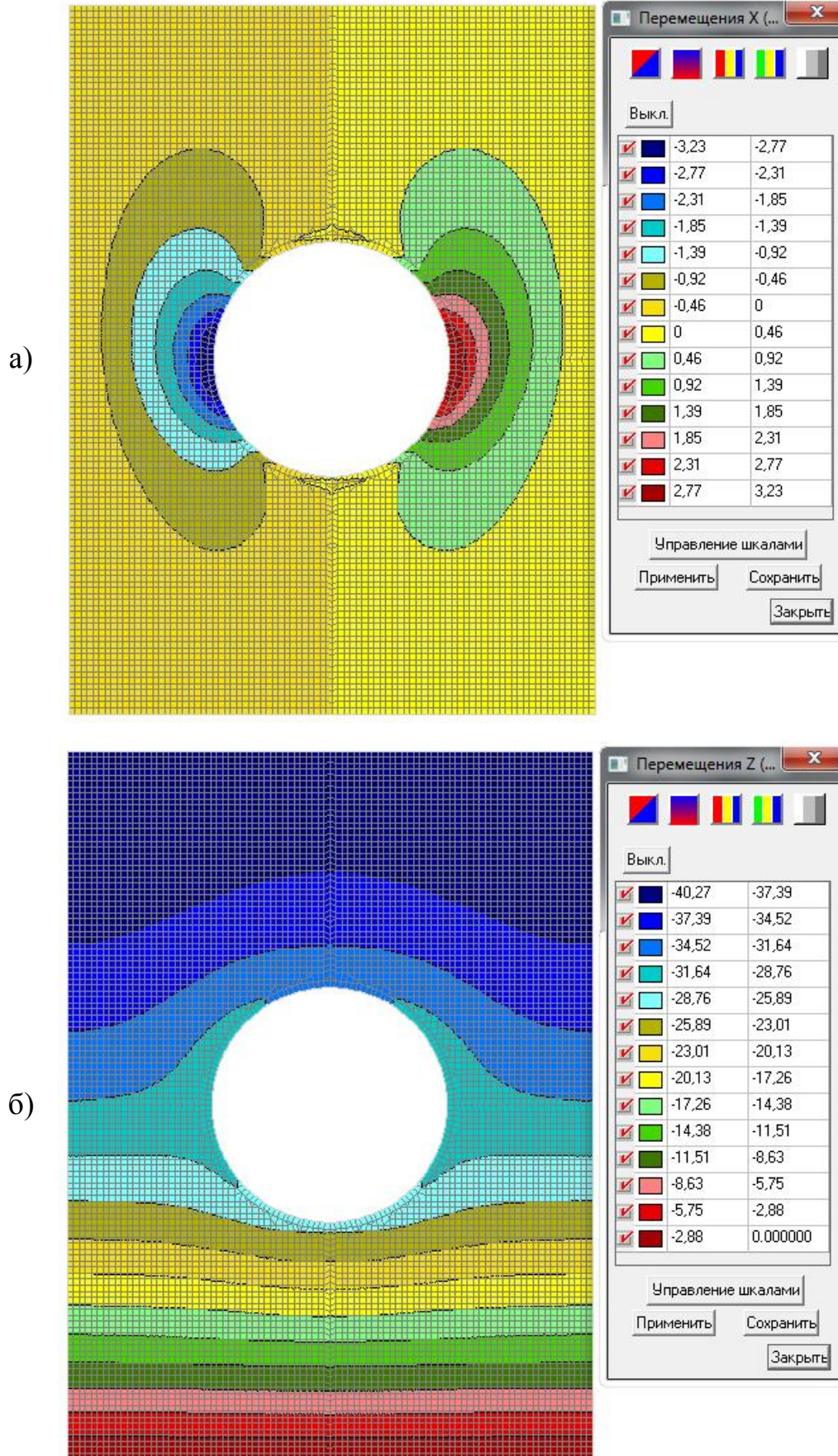


Рисунок 3.7 – Деформований стан SE-моделі з еквівалентною товщиною:

а) горизонтальні переміщення; б) вертикальні переміщення

3.2 k -параметр як основа параметричного аналізу закріпленої виробки в шаруватому масиві

Застосовуючи переосмислену в руслі чисельного підходу ідею аналітичного підходу, викладену в п. 2.2, отримано рішення для НДС закріпленої виробки з одиничним радіусом шляхом застосування скейлінгу, тобто масштабування НДС під час зміни радіусу виробки (Тютюкін, Бондаренко, & Ларіонова, 2020). Базова SE-модель (див. рис. 2.1) була скоригована (в ній змодельована оправа) і є просторовою («квазіпросторовою») на основі об'ємних SE (кількість вузлів – 97240, SE – 48196). Розміри моделі: висота – 22 м, ширина – 22 м, товщина – 0,1 м. В моделі породного масиву зроблено отвір радіусом $R=1,0$ м з оправою товщиною h , що дорівнює 0,1 м (модель з одиничним геометричним параметром) (рис. 3.9).

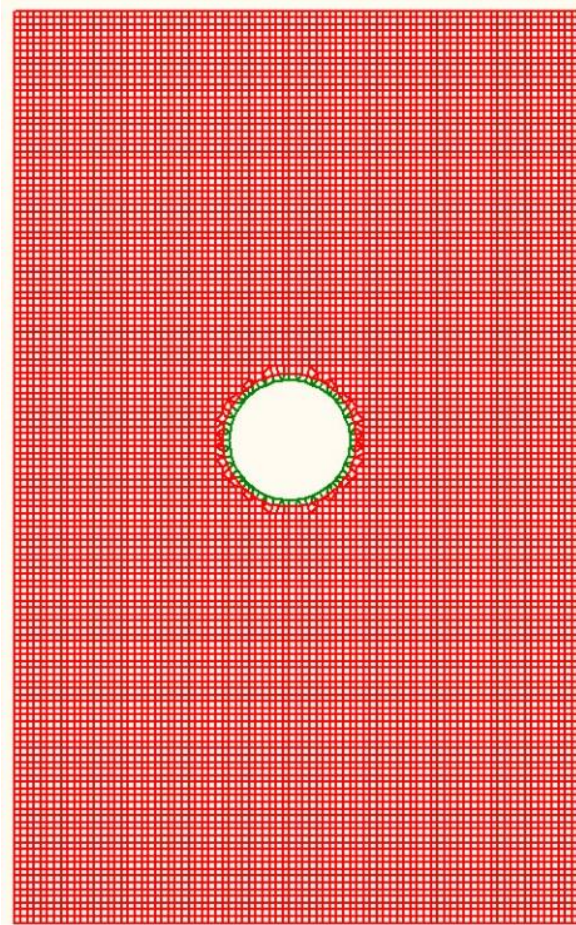


Рисунок 3.9 – SE-модель системи «закріплена виробка – однорідний масив»

Були розроблені дев'ять СЕ-моделей системи «закріплена виробка – однорідний породний масив» з різним значенням к-параметру (каппа-параметру), який визначається як відношення:

$$\kappa = \frac{E_k}{E_m}, \quad (3.5)$$

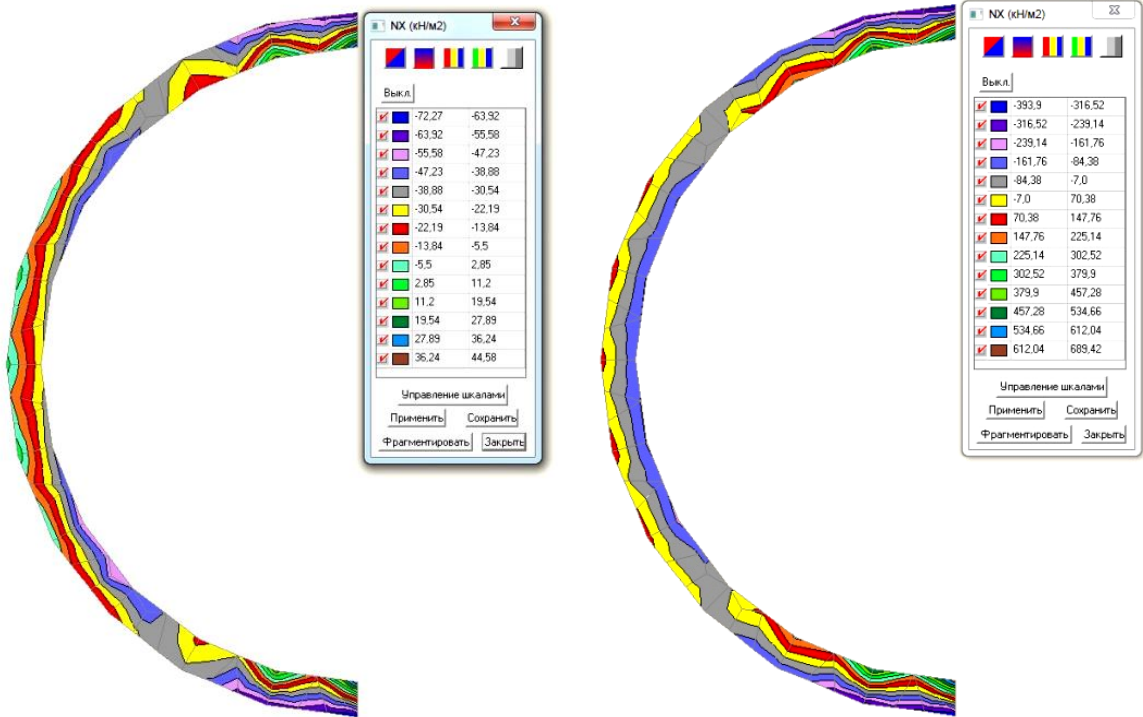
де E_k – модуль пружності конструкції, E_m – модуль пружності матриці.

Уведений в аналіз к-параметр, на відміну від χ -параметру, надає залежності не матриці та шару, а пов'язує саме деформаційну характеристику конструкції та масиву. Так запроваджено тому, що одразу система «закріплена виробка – шаруватий масив» не може бути піддана параметричному аналізу, оскільки в ній з'являються три змінні модулі пружності, відповідно матриці, шару та конструкції. Рішення такої задачі в явному вигляді не наведено в фундаментальних працях, що пояснюється об'єктивною складністю задачі. В неявному вигляді рішення може бути отримане лише частково, після заміни модуля пружності конструкції на її опір, що є штучним прийомом, який відкидає вплив деформаційних характеристик.

Було розраховано три характерні варіанти: Варіант 1 з $\kappa=50$ ($E_m=1$ МПа, $E_k=50$ МПа; $E_m=100$ МПа, $E_k=5 \cdot 10^3$ МПа; $E_m=25 \cdot 10^3$ МПа, $E_k=12,5 \cdot 10^5$ МПа); Варіант 2 з $\kappa=100$ ($E_m=1$ МПа, $E_k=1 \cdot 10^3$ МПа; $E_m=40$ МПа, $E_k=40 \cdot 10^3$ МПа; $E_m=30 \cdot 10^3$ МПа, $E_k=30 \cdot 10^6$ МПа); Варіант 3 з $\kappa=1250$ ($E_m=1$ МПа, $E_k=1250$ МПа; $E_m=35 \cdot 10^3$ МПа, $E_k=43,75 \cdot 10^6$ МПа; $E_m=50 \cdot 10^3$ МПа, $E_k=62,5 \cdot 10^6$ МПа).

Після комплексу проведених розрахунків визначено закономірності зміни напружень та переміщень в характерних точках оправи (див. рис. 2.6, б), що залягає в шаруватих масивах з однаковим к-параметром, але різними модулями пружності конструкції і матриці. Отримані результати НДС (для економії місця наведено лише характерні напруження та переміщення, рис. 3.10).

а) б)
Горизонтальні нормальні напруження



Вертикальні переміщення

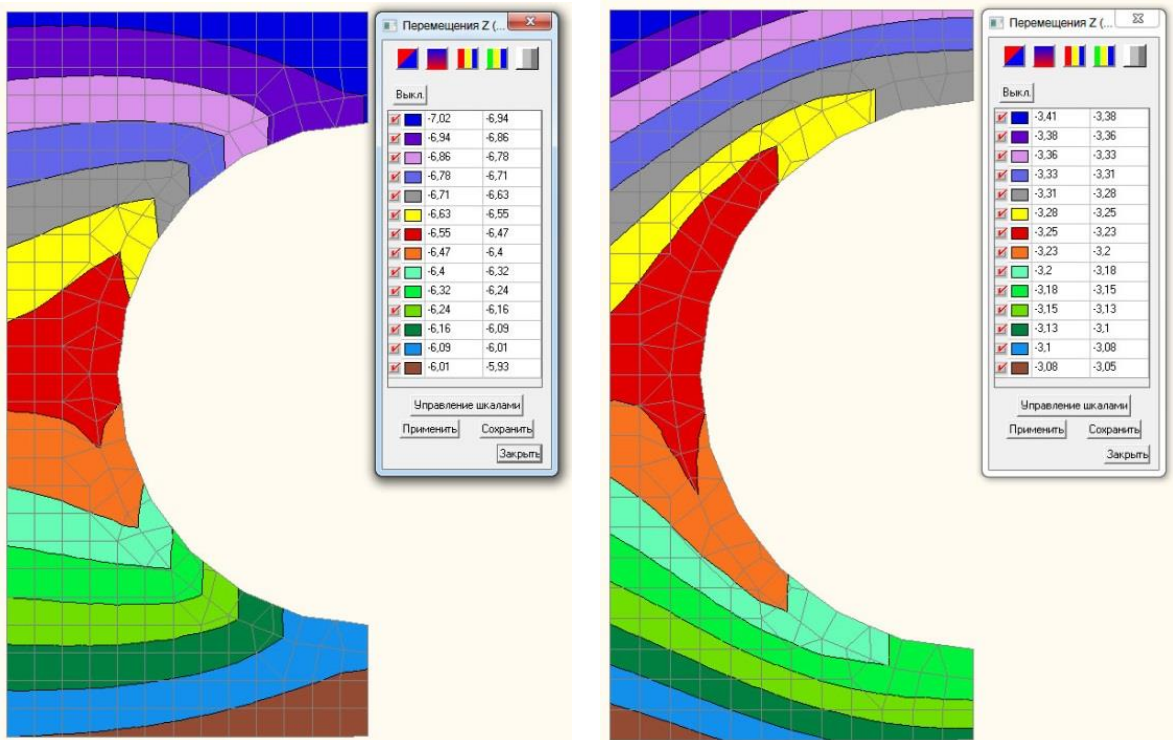


Рисунок 3.10 – Напружено-деформований стан SE-моделі:

а) $\kappa = 50$, $E_m = 25 \cdot 10^3$ МПа, $E_k = 12,5 \cdot 10^5$ МПа;

б) $\kappa = 1250$, $E_m = 50 \cdot 10^3$ МПа, $E_k = 62,5 \cdot 10^6$ МПа

Можна зробити висновок, що для визначення напружень та переміщень в різних, але еквівалентних системах, достатньо виконати розрахунки одиничної системи з тим же самим k -параметром, а потім виконати скейлінг напружень та переміщень. Під час скейлінгу слід зменшити значення переміщень в стільки разів, наскільки збільшується модуль пружності матриці, при цьому напруження не змінюються. Таким чином, отримана передумова для застосування скейлінгу для визначення НДС закріплених виробок, причому далі розглянуті випадки шаруватого масиву.

3.3 Закономірності НДС закріпленої виробки в шаруватому масиві

Не викликає сумнівів, що щитова проходка мінімально впливає на оточуючий ґрунтовий масив, в якому реалізується надана технологія. Процес спорудження оправи колового окреслення відбувається під захистом хвостової оболонки прохідницького щита, при цьому суміщаючись із розробкою та вивантаженням ґрунту. Це є причиною мінімального деформування масиву та поверхні землі.

Найважливішу роль у геомеханічному аналізі НДС системи «прохідницький щит – оправа перегінного тунелю – оточуючий масив» відіграє врахування та взаємодія трьох частин цієї системи. Поведінка шаруватих та слабких ґрунтів під навантаженням вивчена досить детально, але єдиного аналітичного підходу до сих пір не запроваджено, що пояснюється значним спектром ґрунтових умов та взаємодій, які виникають у процесі розвитку НДС в масиві слабких та шаруватих порід.

Це пояснюється, з одного боку, труднощами вивчення систем визначеної вологості та літологічного складу, а з іншого боку обмеженістю спостережень за поведінкою шаруватого масиву в період проходки тунелів. Проте наявність такої прогнозовної інформації в деяких випадках є гостроактуальною, оскільки зміна деформаційних властивостей ґрунтів, що може бути непередбачуваною, потребує оперативних дій. Методика прогнозних розрахунків, крім використання загальних теоретичних положень геомеханіки та побудови

відповідних розрахункових схем, має яскраво виражений конкретний характер внаслідок особливостей інженерно-геологічних, гідрогеологічних та гірничо-технологічних умов зведення підземної споруди.

В рамках аналітичного підходу дуже складно розробити спеціальну стратегію робіт, яка дозволить, маючи значний комплекс прогнозних даних, передбачати потенційні сценарії зміни НДС системи «прохідницький щит – оправа перегінного тунелю – оточуючий масив». Однак, в рамках чисельного методу МСЕ інструментом такої прогнозної стратегії є параметричний аналіз закріпленої виробки, якою є перегінний тунель метрополітену, що взаємодіє із шаруватим ґрунтовим масивом.

На відміну від аналітичного підходу, під час параметричного аналізу значення НДС системи «закріплена виробка – шаруватий масив» можна отримати лише після проведення параметричного аналізу за допомогою алгоритму з двох кроків. Кожен крок відповідає за перетворення НДС в SE-моделях і пов'язаний із оперуванням скейлінг-параметрами. При цьому можливе отримання НДС для випадку оправи із чавуну при наявності розрахованих напружень та переміщень для оправи із залізобетону (Alkhdour, Radkevych, Tiutkin, & Bondarenko, 2022).

Крок 1. Розрахунок НДС виробки із одиничним радіусом та скейлінг переміщень та напружень для випадку конкретного радіуса R (основи скейлінгу та результати його застосування наведені вище і в науковій роботі Alkhdour, Radkevych, Tiutkin, & Bondarenko, 2020). В ході такого розрахунку товщина оправи h повинна бути постійною, а значення модуля пружності E_k оправи дорівнювати значенню для залізобетону ($E_k = 32,5 \cdot 10^3$ МПа).

Крок 2. Добуток переміщень та напружень в характерних точках оправи (точка 1 – склепіння, точка 3 – точка на горизонтальному діаметрі, точка 5 – лоток, див. схему на рис. 2.6, б) на матрицю параметрів, яка є постійною для усіх радіусів виробки R . В ході цієї математичної дії переміщення та напруження, отримані для оправи із залізобетону, перетворюються на ті ж самі показники, але для конструкції із чавуну.

Базова СЕ-модель була скоригована (відображено шаруватий масив, проведено більш детальну дискретизацію розрахункової області) і є просторовою («квазіпросторовою») на основі об'ємних СЕ. Розміри моделі та її кількісні характеристики такі ж самі, що і в п. 3.1. В моделі породного масиву (модуль пружності матриці $E_m=30$ МПа) зроблено отвір радіусом R та шаром слабкого ґрунту (модуль пружності $E_s=10$ МПа; χ -параметр дорівнює 3). Оправа, застосована в моделі, має товщину $h=0,1$ м (модель з одиничним геометричним параметром) (рис. 3.11).

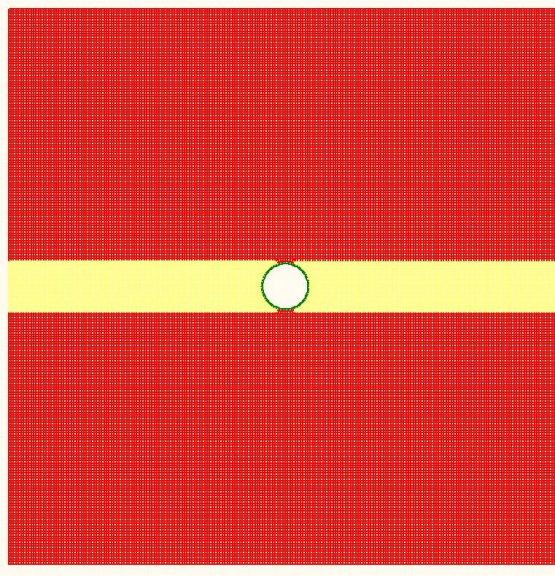


Рисунок 3.11 – СЕ-модель системи «закріплена виробка – шаруватий масив»

Для підтвердження авторських положень було розроблено шість СЕ-моделей системи «закріплена виробка – шаруватий масив»: три із оправою товщиною 0,1 м, змінним радіусом ($R_1=1,0$ м; $R_2=5,0$ м; $R_3=10,0$ м) та модулем пружності залізобетону $E_k=32,5 \cdot 10^3$ МПа; три із оправою товщиною 0,1 м, змінним радіусом ($R_1=1,0$ м; $R_2=5,0$ м; $R_3=10,0$ м) та модулем пружності чавуну $E_k=20,1 \cdot 10^4$ МПа. На рисунках 3.12 і 3.13 наведені характерні ізолінії та ізополя вертикальних переміщень z та вертикальних напружень N_z фрагментів двох СЕ-моделей (результати для третьої моделі, а також ізолінії та ізополя горизонтальних переміщень x та горизонтальних напружень N_x , які також аналізувалися, в дисертаційній роботі не наводяться).

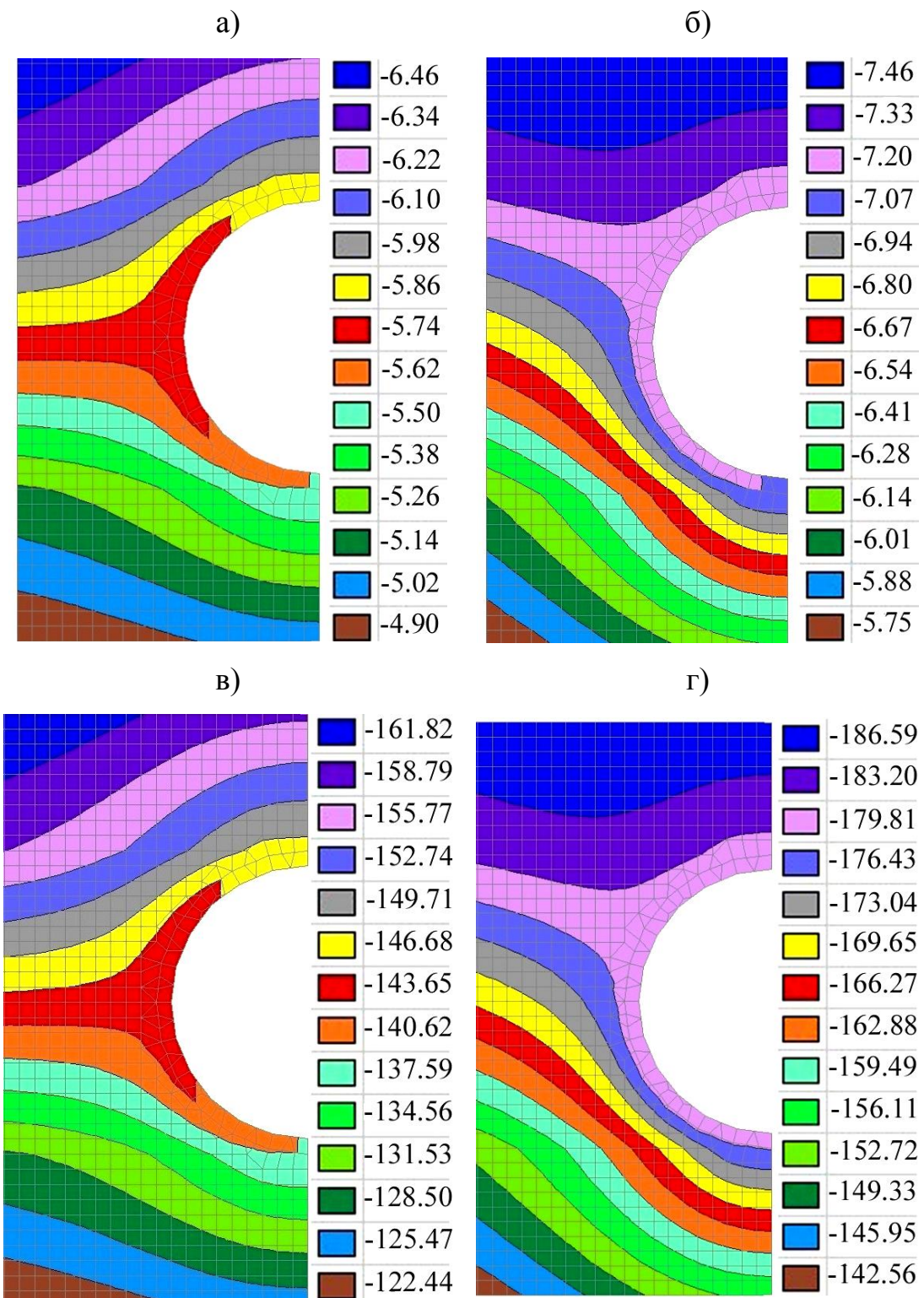


Рисунок 3.12 – Ізолінії та ізополя вертикальних переміщень z (мм) у фрагментах СЕ-моделей: а) радіус виробки $R_1=1,0$ м, залізобетонна оправа товщиною 0,1 м; б) радіус виробки $R_1=1,0$ м, чавунна оправа товщиною 0,1 м; в) радіус виробки $R_2=5,0$ м, залізобетонна оправа товщиною 0,1 м; г) радіус виробки $R_2=5,0$ м, чавунна оправа товщиною 0,1 м

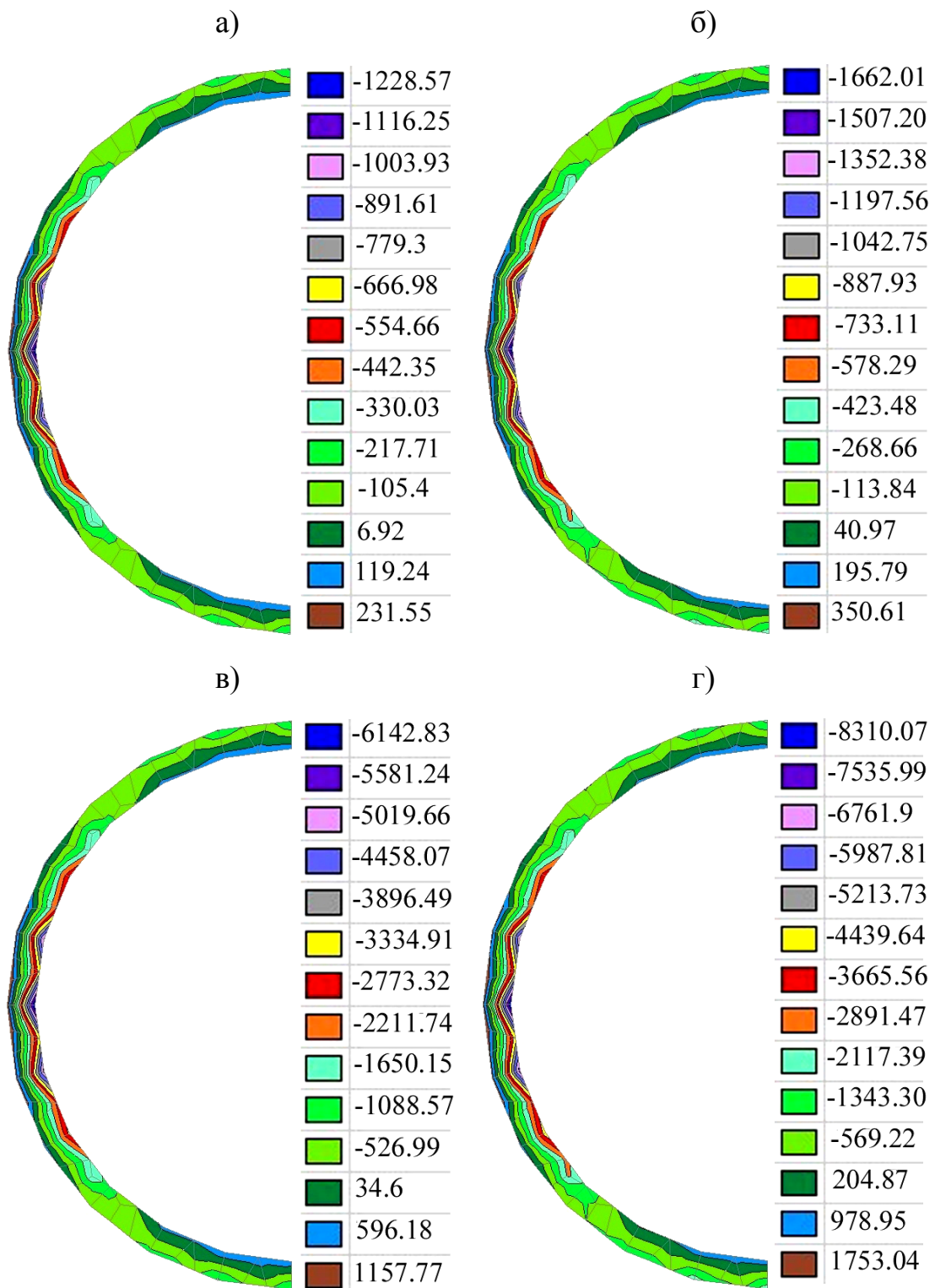


Рисунок 3.13 – Ізолінії та ізополя вертикальних напружень N_z (kN/m^2) у фрагментах СЕ-моделей: а) радіус виробки $R_1=1,0$ м, залізобетонна оправа товщиною 0,1 м; б) радіус виробки $R_1=1,0$ м, чавунна оправа товщиною 0,1 м; в) радіус виробки $R_2=5,0$ м, залізобетонна оправа товщиною 0,1 м; г) радіус виробки $R_2=5,0$ м, чавунна оправа товщиною 0,1 м

Якісна відмінність розподілу вертикальних переміщень z для оправ із різним матеріалом (рис. 3.12) пояснюється впливом відношення модулів пружності матриці, шару та конструкції, кількісний аналіз свідчить про однозначну дію більш жорсткої з них (чавунна оправа товщиною 0,1 м).

Якщо проаналізувати рис. 3.13, можна відмітити, що якісно вертикальні напруження N_z не змінюються, тому і кількісний аналіз значень в характерних точках не викликає труднощів. Матриця скейлінг-параметрів, за допомогою яких можливо знайти НДС чавунної оправы в її трьох характерних точках (див. рис. 2.6, б), маючи переміщення та напруження в залізобетонній конструкції, наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Матриця скейлінг-параметрів

| Параметр НДС | Точка 1 | Точка 2 | Точка 3 |
|--|---------|---------|---------|
| Горизонтальні переміщення x , мм | 0 | 0,22 | 0 |
| Вертикальні переміщення z , мм | 1,23 | 1,25 | 1,28 |
| Горизонтальні напруження N_x , кН/м ² | 1,47 | 1,44 | 1,47 |
| Вертикальні напруження N_z , кН/м ² | 1,47 | 1,35 | 1,47 |

Для оперативного прогнозного розрахунку в подальшому можливо створити програмний комплекс, який буде мати базу даних щодо потенційних показників модулів пружності ґрунтової матриці та шару, їхнє відношення, а також значень залізобетонної оправы. Такий комплекс дозволить в ході щитової проходки оцінювати деформований стан масиву та розміри мульди осідання та рекомендувати зміну матеріалу оправы на чавун за допомогою матриці параметрів. В теперішніх умовах будівництва Київського метрополітену, що характеризуються значним рівнем шаруватості та достатньо широким діапазоном деформаційних властивостей ґрунтів, застосування параметричного аналізу є тим інструментом, що дозволить плідно вирішувати задачі, що ставляться під час щитової проходки та потребують швидкого вирішення.

3.4 Параметричний аналіз реальних перегінних тунелів метрополітену

Результати параметричного аналізу реальних перегінних тунелів Київського метрополітену викладені в роботі (Бондаренко, & Тютюкін, 2022а). Вони є основою для порівняння з інструментальними даними (вертикальні переміщення кілець). До параметричного аналізу прийняті такі кільця оправи перегінних тунелів: 1) кільце № 1 (дільниця між станціями «Славутич» – «Осокорки», ПК215+04); 2) кільце № 2 (дільниця між станціями «Осокорки» – «Позняки», ПК228+00); 3) кільце № 3 (дільниця між станціями «Позняки» – «Харківська», ПК236+39).

Оправа реального перегінного тунелю є стандартною конструкцією, що застосовується під час щитової проходки Київського метрополітену. Параметри оправи наступні: внутрішній діаметр – 5,1 м (габарит перегінного тунелю), зовнішній діаметр – 5,6 м, матеріал високоточних трапецієподібних блоків з гумовою гідроізоляцією шириною 1,2 м – залізобетон (модуль пружності $E_k = 32,5 \cdot 10^3$ МПа).

Саме ці кільця обрані тому, що в них спостерігався максимальний рівень вертикальних переміщень, причиною чого є вплив інженерно-геологічних умов Сирецько-Печерської лінії на лівому березі р. Дніпро, які характеризуються шаруватістю слабких та водонасичених ґрунтів. Їхні властивості, що були відтворені в СЕ-моделях, наведені в табл. 3.2-3.3. Аналіз цих властивостей свідчить про те, що інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) є такими, що мають малі деформаційні характеристики, а саме максимальний модуль пружності $E_m = 45$ МПа (глина тугопластична (ІГЕ-73)) та мінімальний $E_m = 10 \dots 15$ МПа (якщо не брати до уваги ІГЕ-1, яке не бере участь у проходці, межами діапазону є супісок текучий (ІГЕ-27) та пісок мілкий гумусований (ІГЕ-10)). Таким чином, к-параметр для меж визначеного діапазону модуля пружності матриці $E_m = 10 \dots 45$ МПа складає відповідно $\kappa = 722,2 \dots 3250$, що, зважаючи на результати попереднього пункту, свідчить про те, що залізобетонної оправи не вистачає, щоб протидіяти значному деформуванню ґрунтового масиву.

Таблиця 3.2 – Нормативні фізико-механічні характеристики та розрахункові параметри ґрунтів

| ІГЕ | Найменування | Коефіцієнт міцності f | Вологість W , д. од. | Щільність ρ , т/м ³ | Модуль пружності E , МПа |
|-----|---|-------------------------------|---------------------------|--|----------------------------------|
| 1 | Насипний ґрунт | 0,4...0,6 | 0,100 | 1,70 | 5 |
| 9 | Пісок мілкий середньої щільності | 0,4 | 0,190 | 1,95 | 25 |
| 10 | Пісок мілкий гумусований | 0,4 | 0,230 | 1,93 | 15 |
| 11 | Супісок пластичний | 0,4 | 0,180 | 1,90 | 12 |
| 20а | Пісок мілкий середньої щільності, водонасичений | 0,4 | 0,240 | 1,90 | 25 |
| 23 | Суглинок твердий | 0,6 | 0,180 | 2,05 | 14 |
| 23а | Суглинок м'якопластичний | 0,4 | 0,230 | 2,02 | 13 |
| 27 | Супісок твердий | 0,6 | 0,149 | 2,02 | 18 |
| | Супісок пластичний | 0,5 | 0,200 | 1,99 | 15 |
| | Супісок текучий | 0,4 | 0,251 | 2,02 | 10 |
| 30 | Пісок середній, водонасичений | 0,4 | 0,200 | 1,99 | 35 |
| 52 | Пісок крупний, щільний | 0,6 | 0,239 | 2,00 | 35 |
| 71 | Суглинок тугопластичний | 0,5 | 0,320 | 1,92 | 38 |
| 73 | Глина тугопластична | 1,0 | 0,273 | 1,99 | 45 |

Таблиця 3.3 – Нормативні фізико-механічні характеристики та розрахункові параметри ґрунтів

| ПЕ | Найменування | Питоме зчеплення C , кПа | Кут внутрішнього тертя φ , град | Розрахунковий опір R_0 , кПа |
|-----|---|----------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Насипний ґрунт | 1...2 | 14...25 | 50 |
| 9 | Пісок мілкий середньої щільності | 1 | 3 | 200 |
| 10 | Пісок мілкий гумусований | 3 | 29 | 150 |
| 11 | Супісок пластичний | 12 | 22 | 120 |
| 20а | Пісок мілкий середньої щільності, водонасичений | 1 | 32 | 250 |
| 23 | Суглинок твердий | 45 | 15 | 140 |
| 23а | Суглинок м'якопластичний | 25 | 13 | 130 |
| 27 | Супісок твердий | 40 | 21 | 180 |
| | Супісок пластичний | 15 | 16 | 150 |
| | Супісок текучий | 15 | 14 | 100 |
| 30 | Пісок середній, водонасичений | 1 | 36 | 350 |
| 52 | Пісок крупний, щільний | 1 | 32 | 350 |
| 71 | Суглинок тугопластичний | 47 | 18 | 170 |
| 73 | Глина тугопластична | 78 | 15 | 300 |

Значення χ -параметру для меж визначеного діапазону, що характеризує відношення між модулем пружності матриці та шару, знаходиться в діапазоні $\chi=2,0\dots2,33$ (до 3,0 у випадку піску мілкового, водонасиченого (ПГЕ-30) з $E_m=30$ МПа). Якщо звернутися до рис. 2.12, то не виникає сумнівів, що вертикальні переміщення в характерних точках незакріпленої виробки при товщині шару навіть $0,5R$ для $\chi=2,0$ є такими, що призведуть виробку $R=3,0$ м до обвалення. Тому застосування щитової проходки, під час якої всі частини виробки захищені конструкцією прохідницького щита, є логічним та доцільним, однак потребує обґрунтування в закріпленому варіанті, а саме рішення застосування залізобетонної оправи.

Розрахунок НДС виробки із одиничним радіусом та скейлінг переміщень та напружень для випадку конкретного випадку радіуса $R=3,0$ м дає змогу зробити висновок, що для діапазону $k=1000\dots3000$ (залізобетонна оправа, що знаходиться в ґрунтовій матриці, складеній слабкими пісками, супісками та суглинками) застосування оправи із залізобетонних блоків потребує перегляду і заміни на чавунну оправа. Щоб проаналізувати цей розрахунковий випадок і довести вірність авторських положень параметричного аналізу були розраховані реальні кільця оправи Київського метрополітену в реальному ґрунтовому масиві.

Для цього розроблені три СЕ-моделі вказаних вище кілець оправи, причому вони базувалися на коригованій СЕ-моделі системи «закріплена виробка – шаруватий масив» (див. рис. 3.11). Відображено геометричні розміри перегінних тунелів між станціями «Славутич» – «Осокорки», «Осокорки» – «Позняки» та «Позняки» – «Харківська», а також деформаційні характеристики та щільність ґрунтів оточуючого шаруватого масиву (табл. 3.2-3.3). Причому слід відмітити, що масив, який характеризується значними нашаруваннями, дещо спрощено, а шари з близькими модулями пружності (в рамках діапазону $\chi=1,05\dots1,07$) вважаються за один шар із осередненими характеристиками E_m (рис. 3.14, а) (застосування такого прийому описане в Petrenko, Huzchenko, Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V., 2014).

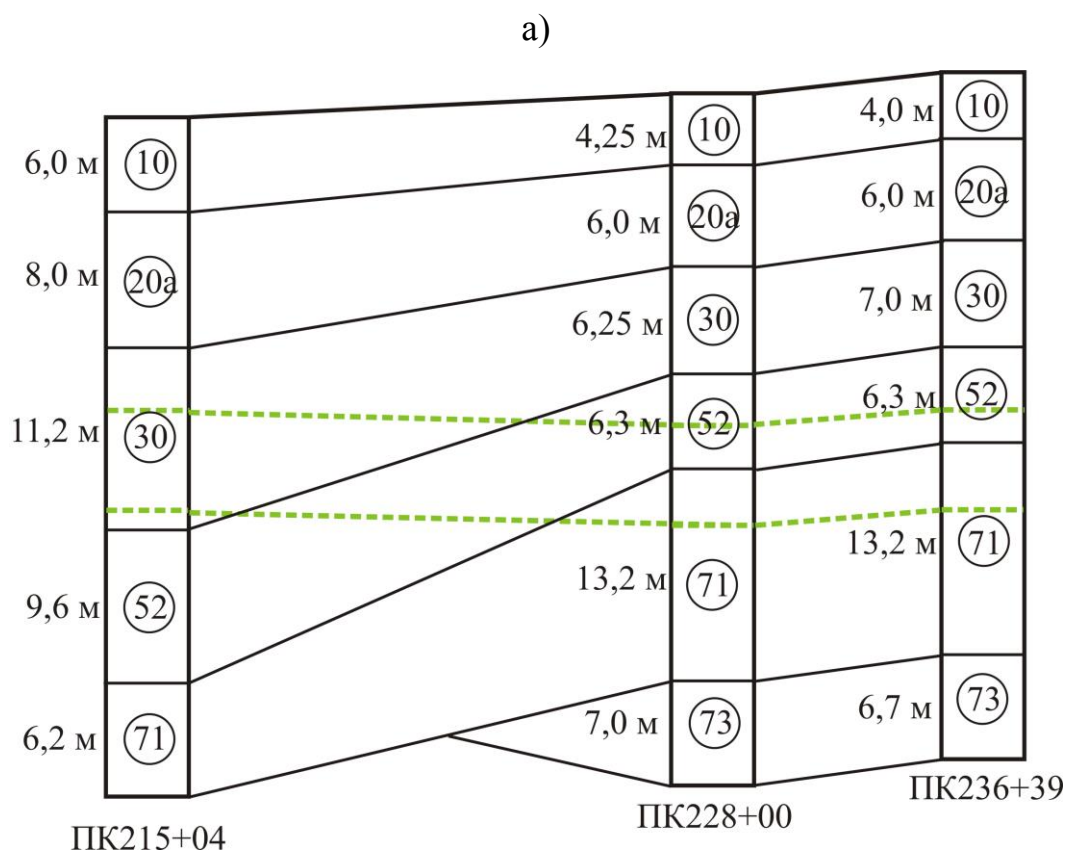


Рисунок 3.14 – Спрощений інженерно-геологічний розріз (а) (зеленою пунктирною лінією показано розташування перегінного тунелю) і карти деформаційних характеристик SE-моделей, що йому відповідають (б)

Після надання деформаційних характеристик (рис. 3.14, б), прикладення власної ваги та граничних умов, проводився чисельний аналіз, потрібні для порівняльного аналізу результати якого наведені на рис. 3.15.

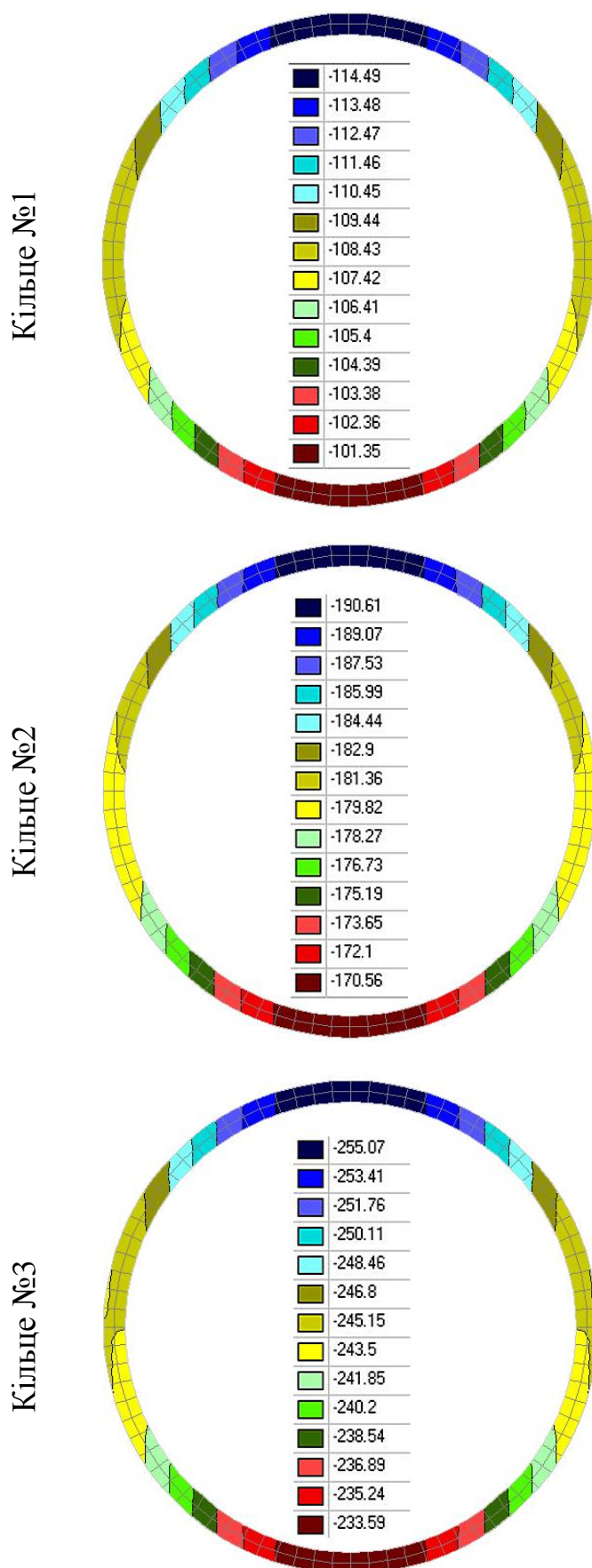


Рисунок 3.15 – Вертикальні переміщення фрагмента СЕ-моделі
(оправа перегінного тунелю)

Оскільки результати вимірювання під час маркшейдерських досліджень, наведені нижче в Розділі 4, отримані для шелиги склепіння (характерна точка 1 на рис. 2.б, б), то максимальні значення чисельного аналізу надаються саме для неї. Аналіз деформованого стану свідчить, що вертикальні переміщення точки 1 для кільця № 1 (ПК 215+04) становлять -114,49 мм, кільця № 2 (ПК228+00) – -190,61 мм, кільця № 3 (ПК236+39) – -255,07 мм. Якщо скористатися скейлінг-параметром для чавуну (див. табл. 3.1), то перехід на такий матеріал зменшить вертикальні переміщення шелиги в 1,23 рази, що значно знизить максимальні деформації оправи горизонтальної виробки.

Максимальні вертикальні переміщення кільця № 2 і 3 пояснюються тим, що вони перетинають два шари ґрунту, що було досліджено раніше для випадку переходу перегінного тунелю від буцацьких пісків до спондилової глини (Petrenko, Huzchenko, Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V., 2014). В рамках дисертаційної роботи даний випадок не розглядався, однак віднайти для нього систему параметрів та застосувати скейлінг нескладно. Найбільш характерним випадком, що відображає авторські побудови, є кільце № 1, яке знаходиться в шарі слабкого ґрунту, тобто майже повністю відповідає розрахунковому випадку (див. рис. 3.12).

Також слід підкреслити, що розглянуті розрахункові випадки кільця №№ 1-3 дещо ускладнюються наявністю декількох шарів, а основи параметричного аналізу, запропоновані авторкою, розроблені для поодинокого шару, що розташований посередині виробки. Відповідно, під час порівняння вертикальних переміщень, отриманих в ході чисельного аналізу та маркшейдерських вимірювань, спостерігаються деякі похибки. Проте, як свідчить досвід аналізу НДС системи «закріплена виробка – шаруватий масив», найбільшу долю у формуванні напружень та деформацій надає саме шар із зниженим на відміну від матриці модулем пружності, що перетинає виробку.

4 ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПАРАМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ З ІНСТРУМЕНТАЛЬНИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ

Застосування щитової проходки під час спорудження перегінних тунелів метрополітену або розкриття виробок великого діаметру по частинах потребує чіткого знання НДС оточуючого виробку масиву. Ця задача пов'язана із іншою, не менш важливою геомеханічною задачею, що полягає у визначенні міцності та стійкості незакріпленої виробки. Проте для щитової проходки ця друга задача не є основною, що пояснюється особливостями процесу розробки породи, під час якого оболонка щита підтримує породний масив.

Однак проблема розвитку значних деформацій при забезпеченні міцності оточуючого масиву під час щитової проходки не зникає. Вона трансформується у проблему забезпечення геометричного положення кілець оправи згідно з проектом. Досвід будівництва Київського метрополітену в слабких шаруватих ґрунтах свідчить про те, що постановка кільця в проектне положення є досить складною задачею, про що було відмічено в роботі (Тютюкін, 2020). При повному забезпеченні глобальної стійкості виробки, що закріплена циліндричною конструкцією щита, її локальний вплив на слабкі породи оточуючого масиву призводить до постійної зміни осі тунелю в профілі. Тому дослідження деформованого стану і в цьому випадку є важливим і актуальним.

Окрім проаналізованих особливостей забезпечення нормативного деформованого стану щитової проходки під час спорудження перегінних тунелів метрополітену, слід відмітити ще один важливий факт. Актуальним питанням цих методів спорудження підземних об'єктів є прогнозування зміни НДС у випадку зміни характеристик шару. Поведінка слабких шаруватих ґрунтових масивів під навантаженням вивчена досить широко, але різноманітність існуючих інженерно-геологічних умов до цього часу не дозволяє виробити єдиний підхід до різних явищ. Це пояснюється, з одного боку, труднощами вивчення шаруватості, а з іншого боку – обмеженістю

спостережень за поведінкою слабких ґрунтів у період проходження тунелів. В умовах Київського метрополітену спостерігалися випадки, коли існуюча траса тунелю в плані протягом перегінного тунелю між двома станціями значно змінювала своє положення на відміну від проєктного.

Метою порівняння, виконаного в даному розділі, є отримання достовірності розробленої авторкою системи параметричного аналізу, доказом якої повинен бути близький збіг отриманих результатів чисельного аналізу з інструментальними вимірюваннями. Подібним аналізом авторка дисертаційної роботи вже займалася під час написання підрозділу 3.2 в монографії (Тютюкін, 2020), досліджуючи лівий перегінний тунель між станціями «Либідська» та «Деміївська» Оболонсько-Теремківської лінії Київського метрополітену.

Також авторкою для вирішення існуючої в Київському метрополітені проблеми виникнення значних деформацій оправи перегінних тунелів мілкового закладення, які взаємодіють із шаруватим масивом, що складений слабкими і водонасиченими ґрунтами, проводився аналіз результатів натурних досліджень деформованого стану вже побудованих перегінних тунелів Київського метрополітену на лінії від станції «Видубічи» до станції «Вирлиця» Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену (Тютюкін, Бондаренко, & Ларіонова, 2021). Під час аналізу переміщень було визначено, що комплексом причин виникнення значних деформацій (100...250 мм) є сукупне деформування оправи під дією власної ваги шаруватого масиву із малим модулем пружності та розвиток деформацій у часі, пов'язаний з додатковим деформуванням оправи під вібродинамічною дією рухомого складу.

В рамках дисертаційної роботи більш детально проаналізовано переміщення оправи перегінних тунелів, споруджених на основі щитової проходки (Бондаренко, & Тютюкін, 2022а), які також є частиною Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену та приурочені до лівого берега р. Дніпро (рис. 4.1). Надалі розглядаються лише переміщення самої оправи перегінних тунелів, однак в наявних умовах відмічалось також і значне деформування денної поверхні з утворенням мульди осідання.

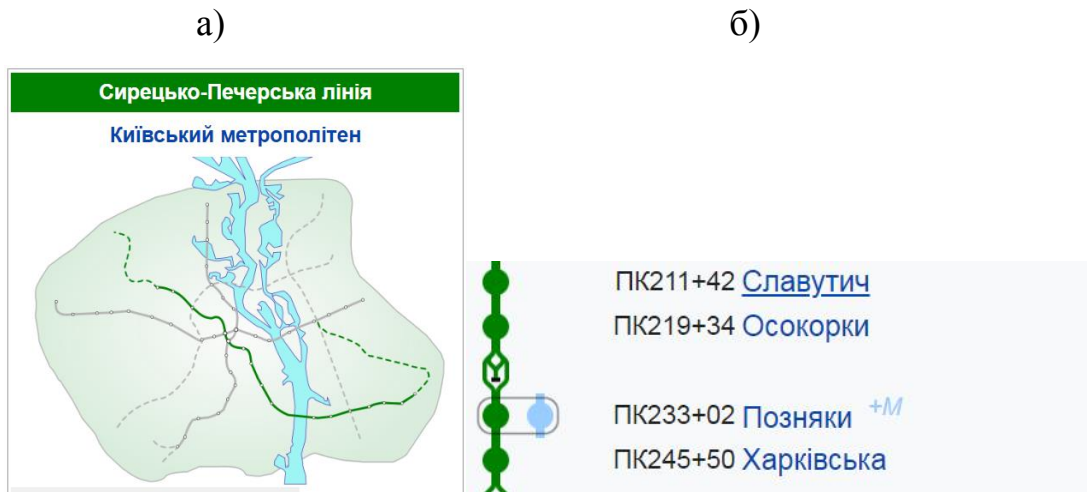


Рисунок 4.1 – Схема Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену (а) та ділянки на лівому березі м. Києва (б) (джерело – Wikipedia)

Авторкою проаналізовані три перегінні ділянки (ліві тунелі) між станціями «Славутич» (відкрита 30 грудня 1992 р.), «Осокорки» (відкрита 30 грудня 1992 р.), «Позняки» (відкрита 28 грудня 1994 р.) та «Харківська» (28 грудня 1994 р.). Переміщення оправи отримані спеціалістами АТ «Київметробуд» та ДП «Укргеодезмарк» в ході маркшейдерських досліджень протягом 1995-2001 рр. Цей проміжок часу для аналізу обрано тому, що будівництво саме перегінних тунелів між вказаними станціями проводилося в швидкому темпі, який характеризує щитову проходку. Перегінний тунель між станціями «Славутич» – «Осокорки» був збудований в 1992 році, при цьому початок спорудження перегінного тунелю між станціями «Осокорки» – «Позняки» також було розпочато в цьому році і тривало протягом 1993 року, як і спорудження перегінного тунелю між станціями «Позняки» – «Харківська». Тобто після одночасного відкриття станцій «Позняки» та «Харківська» в 1994 році всі три перегінні тунелі перебували в експлуатації приблизно два роки. Після цього, починаючи з березня 1995 року (перші виміри), коли навантаження на перегінні тунелі та вказані станції остаточно сформувалося, вплив шаруватого масиву, складеного слабкими та водонасиченими ґрунтами, став відчутним і до останнього виміру (березень 2001 року) лише посилювався (рис. 4.2-4.4).

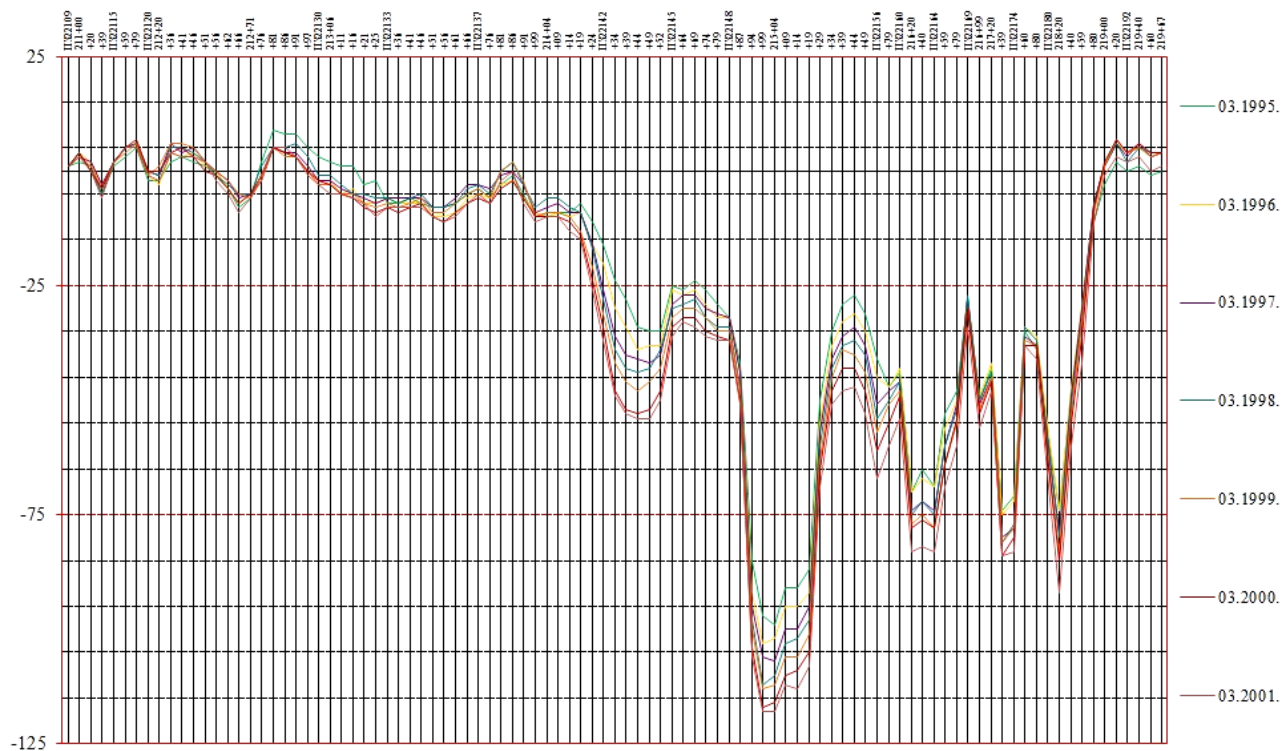


Рисунок 4.2 – Діаграма вертикальних переміщень перегінного тунелю між станціями «Славутич» – «Осокорки»

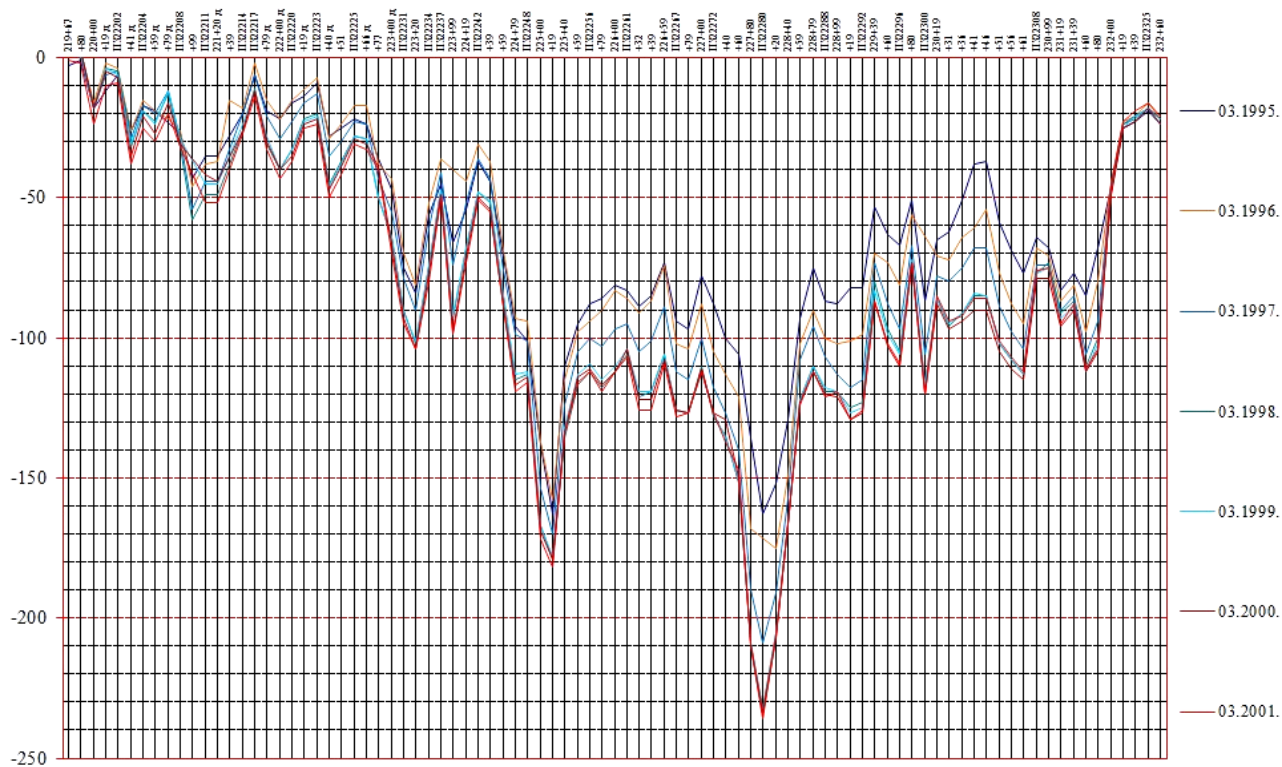


Рисунок 4.3 – Діаграма вертикальних переміщень перегінного тунелю між станціями «Осокорки» – «Позняки»

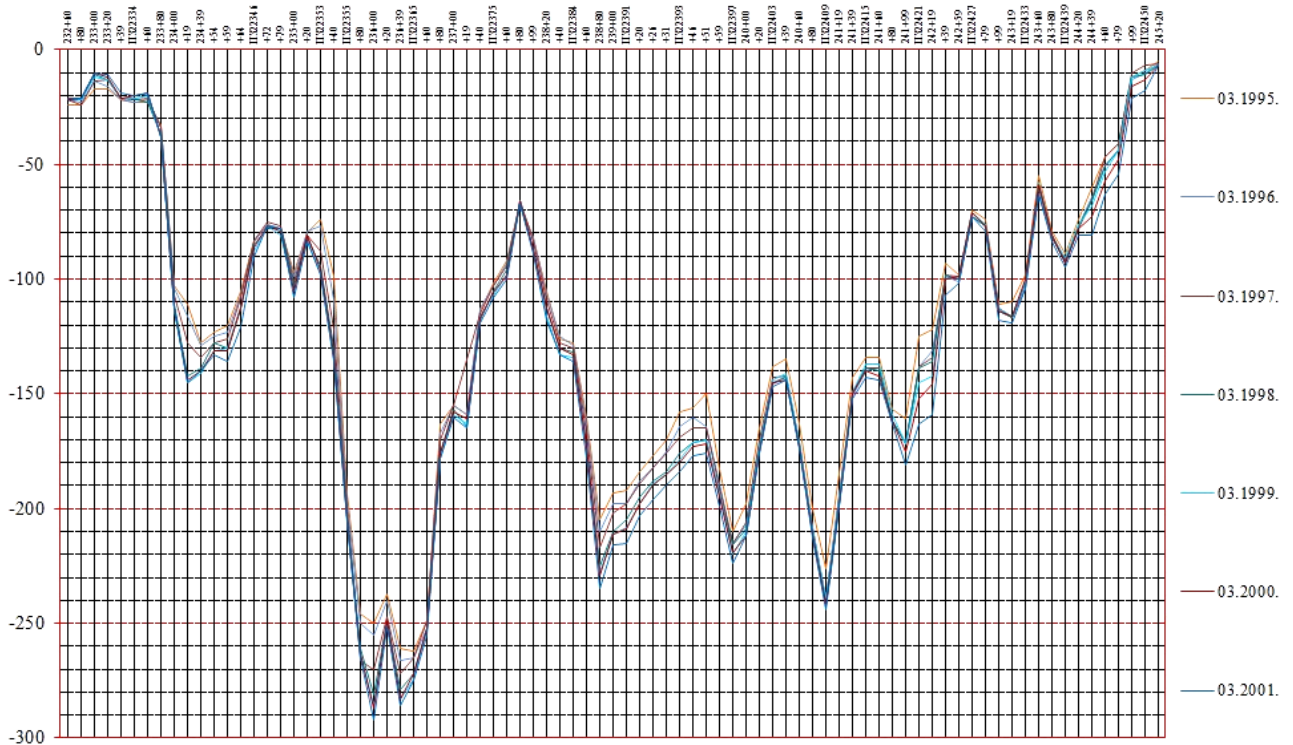


Рисунок 4.4 – Діаграма вертикальних переміщень перегінного тунелю між станціями «Позняки» – «Харківська»

Сирецько-Печерська лінія метрополітену на лівому березі є лінією мілкового закладення. Під час спорудження перегінних тунелів за допомогою тунелепрохідницького щита відмічався негативний вплив породного масиву (щит «пірнав», тобто ножове кільце врізалось в ґрунтовий масив нижче або вище проєктної відмітки), а саме поява значних вертикальних переміщень. Значення діапазонів максимальних переміщень наступні: тунель між станціями «Славутич» – «Осокорки» -95 мм (1995 рік) та -118 мм (2001 рік); тунель між станціями «Осокорки» – «Позняки» -158...-163 мм (1995 рік) та -182...-238 мм (2001 рік); тунель між станціями «Позняки» – «Харківська» -149...-250 мм (1995 рік) та -244...-292 мм (2001 рік).

Першим кроком для проведення порівняння вертикальних переміщень, отриманих на основі авторського параметричного аналізу, та маркшейдерських вимірювань є відокремлення переміщень, що накопичилися за шість років експлуатації (рис. 4.5-4.7), оскільки причина їхнього виникнення не пов'язана саме з щитовою проходкою та особливостями інженерно-геологічної будови.

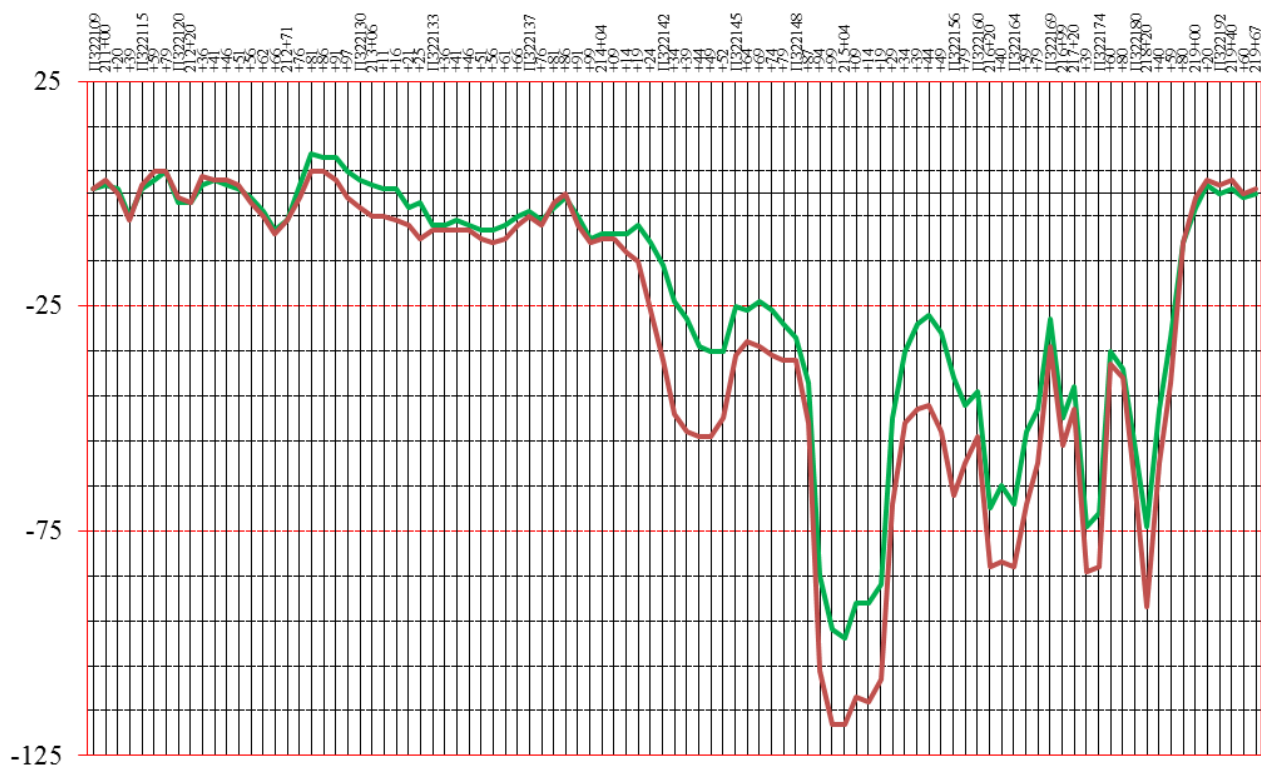


Рисунок 4.5 – Діаграма вертикальних переміщень перегінного тунелю між станціями «Славутич» – «Осокорки» (1995 та 2001 роки; ПК211-215)

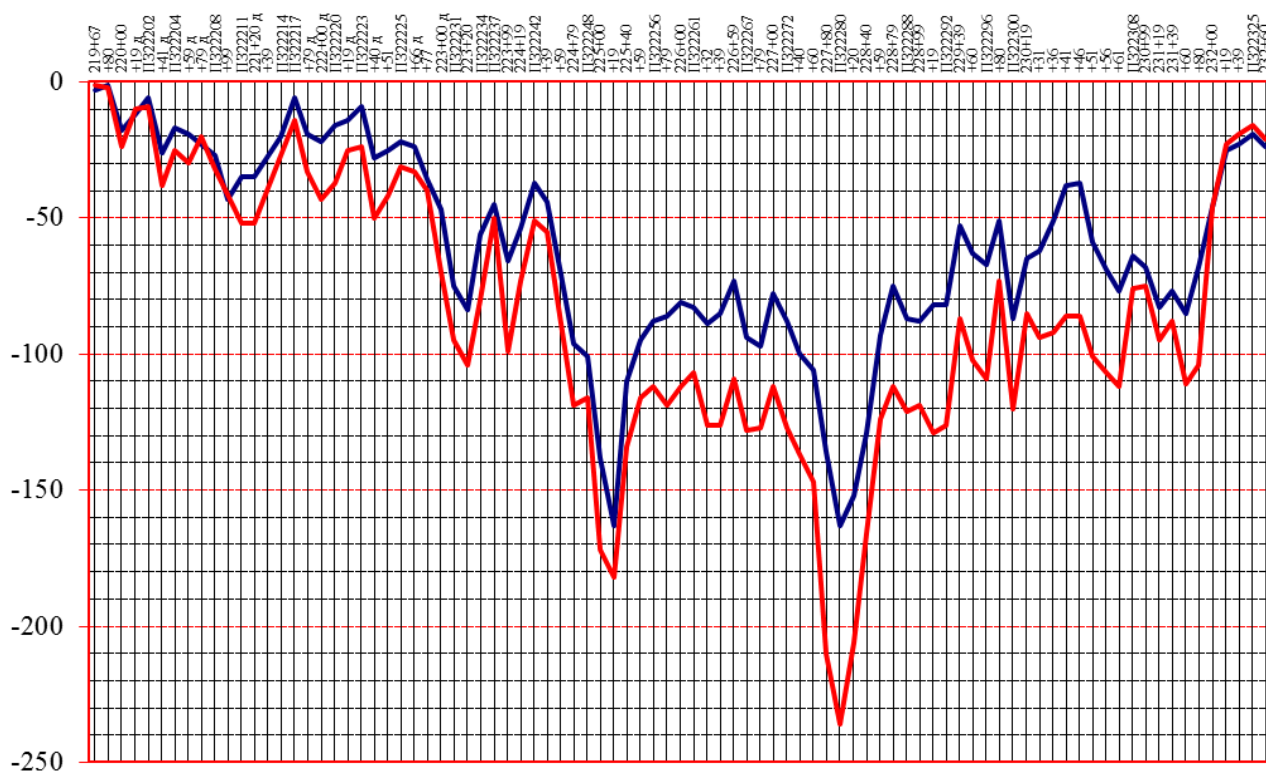


Рисунок 4.6 – Діаграма вертикальних переміщень перегінного тунелю між станціями «Осокорки» – «Позняки» (1995 та 2001 роки; ПК220-224)

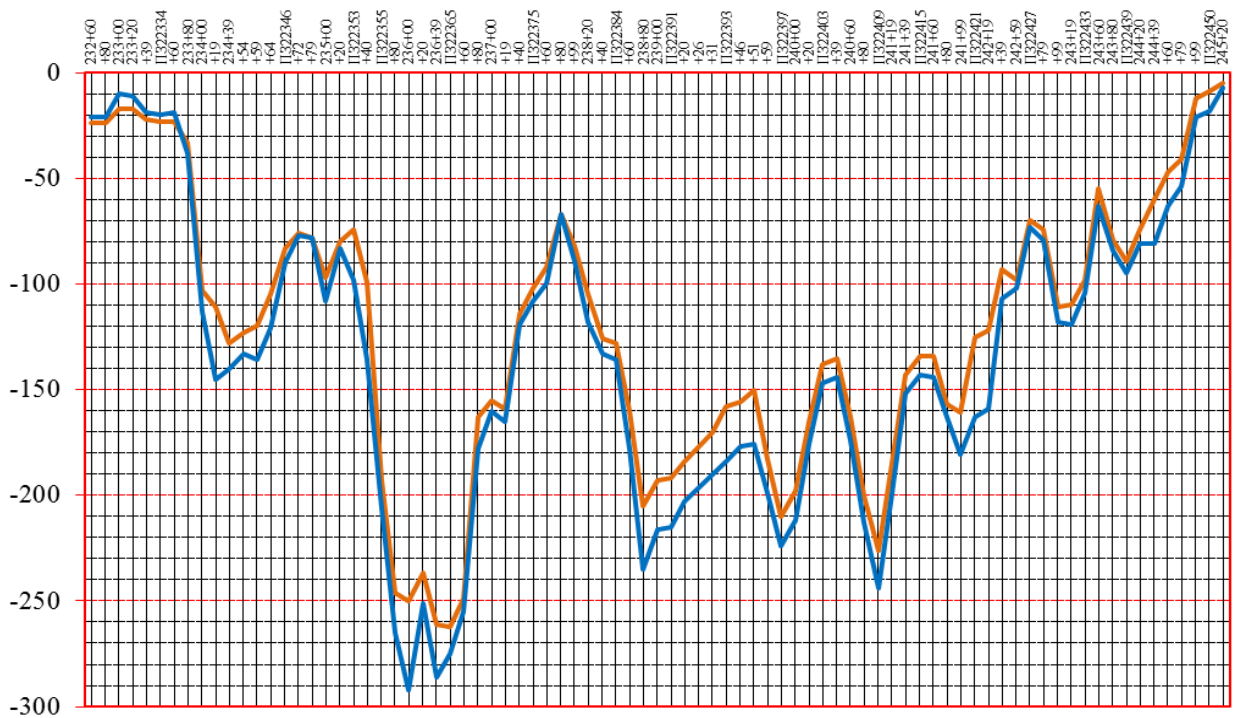


Рисунок 4.7 – Діаграма вертикальних переміщень перегінного тунелю між станціями «Позняки» – «Харківська» (1995 та 2001 роки; ПК233-237)

Поява таких надмірних переміщень пояснюється об'єктивними чинниками. Інженерно-геологічна ситуація лівобережжя м. Києва, проаналізована для ділянок Сирецько-Печерської лінії в п. 3.3, склалася під час формування сьогоdnішнього русла р. Дніпро та його постійної міграції. На сьогодні більша частина Сирецько-Печерської лінії на лівому березі знаходиться в межах старого русла р. Дніпро і характеризується складним шаруватим масивом, що складений водонасиченими (піски різної крупності та щільності) та слабкими (супіски, легкі суглинки та глини) ґрунтами. Не викликає сумнівів, що навіть однорідний масив з таких ґрунтів викликав би значні (десятки міліметрів) переміщення оправи перегінного тунелю. Наявність шаруватості, яка на деяких ділянках ускладнюється наявністю вклинювань та ґрунтових лінз, утруднює цю ситуацію, значно збільшуючи рівень переміщень. Аналізуючи їхній розподіл (рис. 4.5-4.7) і характеризуючи його як якісно складний, слід нормувати деякі характерні рівні вертикальних переміщень, щоб відокремити ту частину, причиною виникнення якої є саме вплив шаруватості (рис. 4.8).

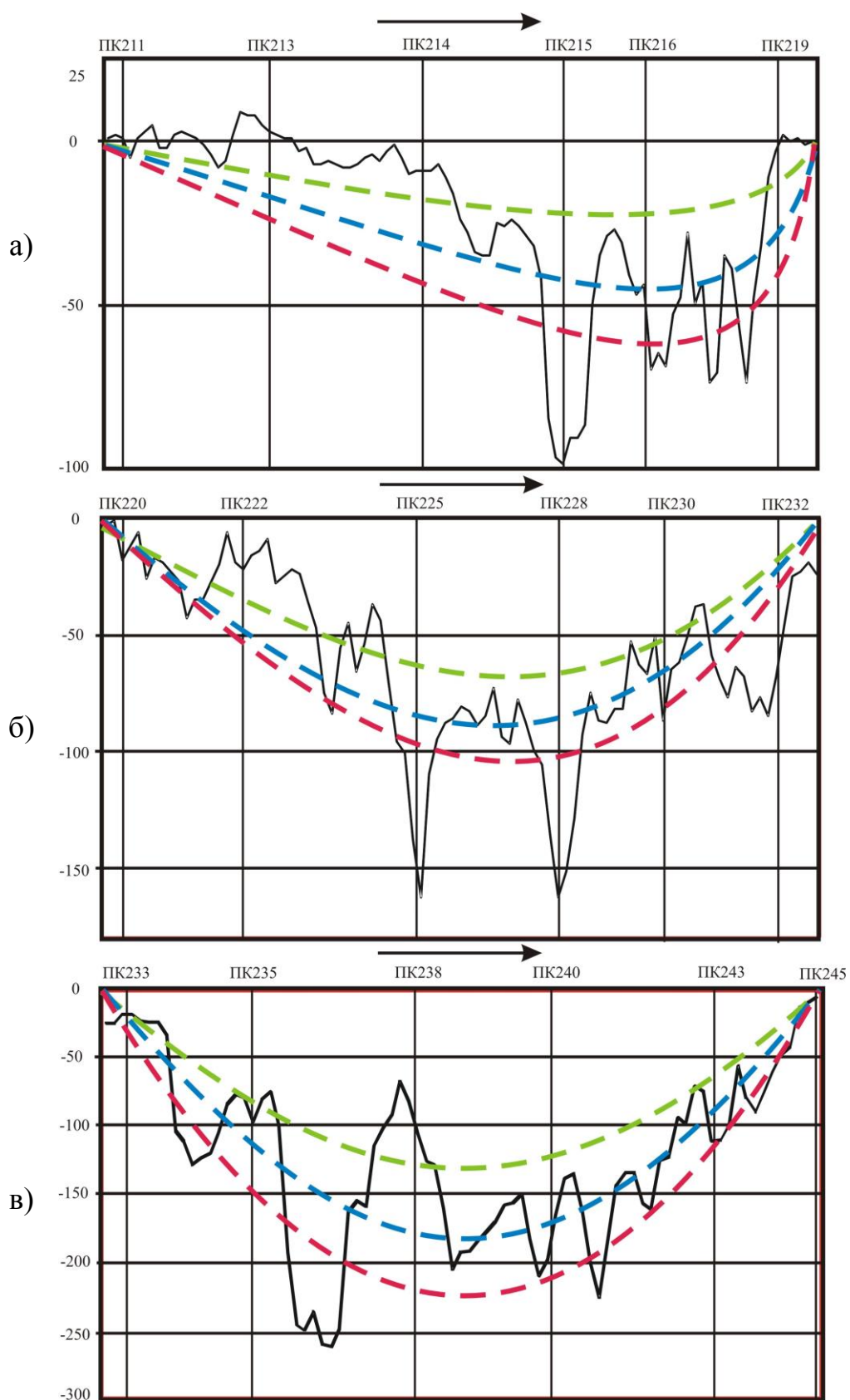


Рисунок 4.8 – Нормовані діаграми вертикальних переміщень перегінних тунелів між станціями: а) «Слаутич» – «Осокорки»; б) «Осокорки» – «Позняки»; в) «Позняки» – «Харківська»

Перед тим, як перейти до аналізу вертикальних переміщень трьох перегінних тунелів, слід загострити увагу, що на плані частини лінії метрополітену, що досліджується, окрім звичайних, застосовувалися так звані «короткі» пікети (50 та 75 метрів), тому на графіках переміщень по осі абсцис сітка не є рівномірною. На них визначено чотири рівня переміщень: чорна суцільна лінія – вертикальні переміщення, що виміряні маркшейдерами АТ «Київметробуд» та ДП «Укргеодезмарк» в 1995 році; зелена пунктирна лінія – вертикальні переміщення, що прогнозувалися під час проєктування; синя пунктирна лінія – вертикальні переміщення, що притаманні інженерно-геологічним умовам Сирецько-Печерської лінії на лівому березі (приблизний діапазон -35...-90 мм); червона пунктирна лінія – максимальні вертикальні переміщення (чорною стрілкою зверху графіка показано напрямок руху метропоїзду по перегінному тунелю).

При цьому слід відмітити, що навіть на «червоному» рівні переміщень, які мали незначний відсоток вірогідності появи, в реальній ситуації будівництва та експлуатації цієї частини Сирецько-Печерської лінії спостерігаються зони надмірних переміщень. Так, пікові вертикальні переміщення між станціями «Славутич» – «Осокорки» відмічаються на ПК215+04 (-99 мм), ПК216+20 (-70 мм), ПК217+39 (-74 мм), ПК218+20 (-74 мм); між станціями «Осокорки» – «Позняки» – два явних піки на ПК225+19 (-163 мм) й ПК228+00 (-163 мм), два піки на ПК223+20 (-84 мм) й ПК230+00 (-87 мм) та протяжна зона значного деформування між ПК230+61 (-77 мм) й ПК231+60 (-85 мм); між станціями «Позняки» – «Харківська» – на ПК236+39 (-263 мм), ПК238+80 (-205 мм), ПК239+70 (-210 мм) та ПК241+00 (-226 мм).

Слід також підкреслити, що були проаналізовані вертикальні переміщення, що виміряні в 1995 році, оскільки в 2001 році вони збільшилися, причому діапазони значень приросту переміщень за шість років наступні: тунель між станціями «Славутич» – «Осокорки» складає 13...19 мм; тунель між станціями «Осокорки» – «Позняки» – 48...73 мм; тунель між станціями «Позняки» – «Харківська» – 17...30 мм. Ці переміщення викликані динамічним

впливом метропоїзду (цикл «розгін – гальмування») і є такими, що характеризують спектр явищ додаткового деформування (реологічні явища у випадку глинистих порід, віброущільнення, віброповзучість та вібророзрідження пісків різного ступеня водонасиченості), тому вони виключені з аналізу і до порівняння прийняті переміщення 1995 року.

Відділення долі переміщень, викликаних динамікою метропоїзду, можна було реалізувати, скориставшись методикою аналізу переміщень, викладеною в монографії (Тютюкін, 2020), проте такої задачі в рамках дисертаційної роботи не ставилося. Тому для доказу достовірності положень параметричного аналізу, розроблених авторкою, проведено порівняння вертикальних переміщень трьох кілець, отримані в ході математичного моделювання МСЕ та маркшейдерських вимірювань 1995 року реальних кілець перегінного тунелю частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі р. Дніпро (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Порівняння вертикальних переміщень

| Вертикальні переміщення z , мм | Кільце № 1 (ПК 215+04) | Кільце № 2 (ПК228+00) | Кільце № 3 (ПК236+39) |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Отримані в ході чисельного аналізу | -114,5 | -190,6 | -255,1 |
| Отримані під час маркшейдерських вимірювань | -99,0 | -163,0 | -263,0 |
| Похибка Δ , % | 13,5 | 14,5 | 3,0 |

Діапазон похибки (3,0...14,5 %) свідчить про високий ступінь адекватності розроблених авторкою теоретико-практичних положень параметричного аналізу (Бондаренко, & Тютюкін, 2022a), який дозволяє з достатньою мірою точності прогнозувати НДС закріпленої горизонтальної виробки, що залягає в шаруватому масиві.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз стану питання визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив», зокрема методологічних підходів до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою, який свідчить про те, що задача визначення напружено-деформованого стану системи «виробка – масив» потребує нового підходу до її вирішення, уточнюючи власні можливості та окреслюючи потенціал вже отриманих результатів.

2. Створено скінченно-елементні моделі системи «горизонтальна виробка – породний масив», які дозволяють варіацію радіусу виробки та деформаційних властивостей шаруватого масиву, зокрема моделі з одиничними параметрами. На основі цих моделей доведено, що для отримання реальних переміщень виробки слід переміщення в моделі з одиничними параметрами перемножити зі значенням реальної питомої ваги та розділити їх на реальне значення модуля пружності, а для отримання реального напруження слід напруження в моделі з одиничними параметрами перемножити зі значенням реальної питомої ваги.

3. Визначено параметр масштабування напружено-деформованого стану незакріпленої виробки в однорідному та шаруватому породних масивах, а саме χ -параметр, який характеризує відношення модулів пружності матриці і шару, що дозволяє узагальнити ряд випадків шаруватості. На основі результатів чисельного аналізу доведено, що достатньо визначити напружено-деформований стан моделі із конкретним χ -параметром та застосувати отримані авторські закономірності для характерних точок виробки, щоб визначити напружено-деформований стан на обрисі виробки при інших значеннях χ -параметру.

4. Розроблено основи параметричного аналізу визначення напружено-деформованого стану горизонтальної незакріпленої або закріпленої виробок. Визначено, що під час скейлінгу (масштабування) системи «незакріплена виробка – однорідний масив» або «незакріплена виробка – шаруватий масив» з

одиничним геометричним параметром (радіус виробки $R=1$) слід збільшити напруження в n разів (*scaling*-параметр для напружень), а переміщення в n^2 (*scaling*-параметр для переміщень), де n – відношення радіусів реальної системи та системи з одиничним геометричним параметром.

5. Виконано параметричний аналіз деформованого стану закріпленої виробки, в ході якого уведено поняття еквівалентної жорсткості оправи і авторський k -параметр, що пов'язує деформаційну характеристику конструкції та масиву. Визначено закономірності зміни напружень і переміщень закріплених виробок в шаруватому масиві, що дозволили отримати матрицю параметрів, яка екстраполює рішення для залізобетонної оправи для випадку оправи із чавуну. Розроблено алгоритм параметричного аналізу з двох кроків, що надає можливості розраховувати закріплені виробки різних радіусів, застосовуючи систему з одиничним параметром та процес скейлінгу.

6. Проведене порівняння результатів параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену з інструментальними вимірюваннями, причому отримана похибка між вертикальними переміщеннями кілець, отриманих в ході математичного моделювання та маркшейдерських вимірювань кілець перегінного тунелю частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі р. Дніпро (3,0...14,5 %) доводить високий ступінь адекватності розроблених авторкою теоретико-практичних положень параметричного аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Alkhdour, A., Radkevych, A., Tiutkin, O., & Bondarenko, N. (2020). Prediction of the stress-strain state of circular workings in a layered massif by scaling. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, E3S Web of Conferences, 168, 00020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800020>

Alkhdour, A., Radkevych, A., Tiutkin, O., & Bondarenko, N. (2022). The parametric analysis of the supported circular working interacting with the layered massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012033>

Alkhdour, A., Tiutkin, O., Bannikov, D., & Heletiuk, I. (2022). Substantiating the parameters for a non-circular structure of the mine shaft under construction in a heterogeneous rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012008>

Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (1977). Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Geotéchnique*, 27(2), 203-215. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.2.203>

Attewell, P. B. & Hurrell, M. R. (1985). Settlement development caused by tunnelling in soil. *Ground Engineering*, 18(8), 17-20.

Bahar, L. Y. (1972). Transfer matrix approach to layered systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 98(5), 1159-1172. DOI: <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001660>

Bannikov, D. O., & Tiutkin, O. L. (2020). Prospective Directions of the Development of Loose Medium Mechanics. *Academic and Research journal of the NAS of Ukraine*, 16(2), 45-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin16.02.045>

Bobyleva, T. N. (2016). Approximate method of calculating stresses in layered array. *Procedia Engineering*, 153, 103-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.087>

Bobyleva, T. N., & Shamaev, A. S. (2017). An efficient algorithm for

calculating rheological parameters of layered soil media composed from elastic-creeping materials. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54, 224-230. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9462-4>

Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics: for underground mining*. New York: Springer science & business media.

Bulytchev, N. S. (1994). Towards a methodology for mechanics of underground structures. In *Geomechanics 93 - Strata Mechanics / Numerical Methods / Water Jet Cutting*, 3-8. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203753569>

Burminster, D. M. (1945a). The General theory of stresses and displacements in layered systems. I. *Journal of Applied Physics*, 16, 89-93. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1707558>

Burminster, D. M. (1945b). The General theory of stresses and displacements in layered systems. II. *Journal of Applied Physics*, 16, 126-127. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1707562>

Burminster, D. M. (1945c). The General theory of stresses and displacements in layered systems. III. *Journal of Applied Physics*, 16, 296-302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1707590>

Chakeri, H., Ozcelik, Y., & Unver, B. (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 36, 14-23, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.02.002>

Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2010). *Introduction to Tunnel Construction*. London: Spon Press.

Chen, G. H., Zou, J. F., Wei, X. X., & Guo, F. Q. (2023). Three-dimensional blow-out stability analysis of shield tunnel face in anisotropic and heterogeneous soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104851>

Chou, W.-I., & Bobet, A. (2002). Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(1), 3-19, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00068-2)

Deb, D. (2012). *Finite element methods: concepts and applications in geomechanics. 2nd edition.* Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.

Deev, P. V., Sammal', A. S., & Baryshnikov, V. D. (2012). Estimating remaining life of underground tunnel concrete lining by convergence measurements. *Journal of mining science*, 48, 440-444. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739148030069>

De Oliveira, D. G. G., Thewes, M., Diederichs, M. S., & Langmaack, L. (2018). EPB tunnelling through clay-sand mixed soils: Proposed methodology for clogging evaluation. *Geomechanics and Tunnelling*, 11(4), 375-387. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800009>

Ding, J. S., Xian, Y. Q., & Liu, T. J. (2011). Numerical Modeling of Affection of Foundation Pit Excavation on Metro Tunnel. *Advanced Materials Research*, 368-373, 2562-2566. DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.2562>

Do, N., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z>

Do, N., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2014a). 2D Tunnel Numerical Investigation: The Influence of the Simplified Excavation Method on Tunnel Behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 43-58. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9690-y>

Do, N., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2014b). Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*, 9(4), 673-694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0279-7>

Dubinya, N. V., & Galybin, A. N. (2018). On Stress Distribution in Layered Rock Masses. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54, 904-913. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351318060046>

Fang, Y., He, C., Nazem, A., Yao, Z., & Grasmick, J. (2017). Surface settlement prediction for EPB shield tunneling in sandy ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 2908-2918. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0989-8>

Finno, R. J., & Clough, G. W. (1985). Evaluation of soil response to EPB shield tunneling. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2), 155-173. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:2\(155\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:2(155))

Fotieva, N. N., Bulychev, N. S., & Sammal, A. S. (1996). Design of shallow tunnel linings. In *ISRM International Symposium-EUROCK 96*. OnePetro.

Franzius, J. N., Potts, D. M., & Burland, J. B. (2005). The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation. *Géotechnique*, 55(3), 189-199, DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.3.189>

Fumagalli, E. (2013). *Statical and geomechanical models*. New York: Springer Science & Business Media.

Hefny, A., & Chua, H. (2006). An investigation into the behavior of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070>

Hemphill, G. B. (2012). *Practical tunnel construction*. New York: John Wiley & Sons.

Huang, Z., Zhu, W., Liang, J., Lin, J., & Jia, R. (2006). Three-dimensional numerical modelling of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.076>

Jones, S., & Hunt, H. (2011). Effect of inclined soil layers on surface vibration from underground railways using the thin-layer method. *Journal of engineering mechanics*, 137(12), 887-900. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000292](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000292)

Karakus, M. (2007). Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 47-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.01.004>

Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kovalevska, I., Samusia, V., Kolosov, D., et al. (2020). Stability of the overworked slightly metamorphosed massif around mine working. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 43-52. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.02.043>

Kuesel, T. R., King, E. H., & Bickel, J. O. (2012). *Tunnel engineering handbook*. New York: Springer Science & Business Media.

Lee, K. M., & Rowe, R. K. (1989). Deformations caused by surface loading and tunnelling: the role of elastic anisotropy. *Géotechnique*, 39(1), 125-140. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1989.39.1.125>

Linkov, A. M., Filippov, N. A., Milova, L. A. & Zoubkov, V. V. (1998). A method to calculate stresses and deformations in 3d layered strata. *Advances in Rock Mechanics*, 135-144. DOI: https://doi.org/10.1142/9789812839640_0013

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised shield tunneling*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Meguid, M. A., Saada, O., Nunes, M. A., & Mattar, J. (2008). Physical modeling of tunnels in soft ground: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 185-198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.02.003>

Migliazza, M. R., Chiorboli, M., & Giani, G. P. (2009). Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2), 113-124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.005>

Mozhevitinov, A. L. (1967). Calculation of the internal pressure of a tunnel lining in anisotropic rock. *Hydrotechnical Construction*, 1, 230-234. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02376653>

Nemirovskiy, Yu. V., & Tyrymov, A. A. (2021). Mathematical modeling in problems of geomechanics of layered rock massifs. *AIP Conference Proceedings* 2448, 020025. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0073309>

Pan, Q., & Dias, D. (2016). Face stability analysis for a shield-driven tunnel in anisotropic and nonhomogeneous soils by the kinematical approach. *International Journal of Geomechanics*, 16(3), 04015076. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000569](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000569)

Pande, G. N., Beer, G., & Williams, J. K. (1990). *Numerical methods in rock mechanics*. New York: John Wiley & Sons Ltd.

Pang, C. H., Yong, K. Y., & Dasari, G. R. (2005). Some considerations in

finite element analysis of tunneling. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Erdem & Solak, 2005, 1149-1154.

Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V. (2014). Analysis of deformed state structures of the Kyiv metro running tunnels on a transition zone from spondylov's clay to buchatskiy sands. *Science and Transport Progress*, 4(52), 127-138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27321>

Pimenov, A. A., & Pushkarev, V. I. (1991). The use of quaternions to generalize the Kolosov-Muskhelishvili method to three-dimensional problems of the theory of elasticity. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 55(3), 343-347. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(91\)90036-T](https://doi.org/10.1016/0021-8928(91)90036-T)

Plewman, R. P., Deist, F. H., & Ortlepp, W. D. (1969). The development and application of a digital computer method for the solution of strata control problems. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 70, 33-44. DOI: https://doi.org/10520/AJA0038223X_12

Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008>

Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Bielikova, S. (2022). The comparative analysis of the stress-strain state of the support of the escalator tunnel constructed in weak soils by the NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012002>

Selby, A. R. (1988). Surface Movements Caused by Tunnelling in Two-layer Soil. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 5, 71-77. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1988.005.01.05>

Shashenko, O. M., Hapieiev, S. M., Shapoval, V. G., & Khalymendyk, O. V. (2019). Analysis of calculation models while solving geomechanical problems in elastic approach. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1(169), 28-36. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/21>

Sheinin, V. I. (1968). Interaction between the lining of a pressure tunnel and a

non-homogeneous mountainous mass. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5, 186-191. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01703773>

Singh, S. J. (1970). Static deformation of a multilayered half-space by internal sources. *Journal of Geophysical Research*, 75, 3257-3263. DOI: <https://doi.org/10.1029/JB075i017p03257>

Svoboda, T., & Mašín, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2). DOI: <https://doi.org/10.1002/gete.201000009>

Tiutkin, O., & Bondarenko, N. (2022). Parametric analysis of the stress-strain state for the unsupported and supported horizontal underground workings. *Acta Technica Jaurinensis*, 15(4), 199-206. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00681>

Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.028>

Tiutkin, O., Petrosian, N., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Regularities of stress state of unsupported working occurring in a layered massif. *International Conference Essays Of Mining Science And Practice*, E3S Web of Conferences 109, 00100. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100>

Turymbetov, T., Azhikhanov, N., Zhunisov, N., & Aimeshov, Z. (2015). Stress-Strain State of Two Diagonal Cavities Weighty Inclining Layered Massif System with Slots in Terms of Elastic-Creep Deformations. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2263-2271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.313>

Turymbetov, T., Kuatbekov, B., Maulenov, S., & Aimeshov, Z. (2019). The Stress-Strain State of the Two Shtreks a Weighty Obliquely Layered Massif System With Slits in Terms of Elastic Deformation of Rocks. *Procedia Computer Science*, 158, 355-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.062>

Yang, X. L., & Wang, J. M. (2011). Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 462-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.01.002>

Yue, Z. Q. (1995). On generalized Kelvin solution in a multilayered elastic media. *Journal of Elasticity*, 40, 1-43. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00042082>

Zhang, J., Liang, Y., & Feng, T. (2020). Investigation of the cause of shield-driven tunnel instability in soil with a soft upper layer and hard lower layer. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104832. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104832>

Zhao, K., Janutolo, M., & Barla, G. (2012). A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation. *Rock mechanics and rock engineering*, 45, 475-497. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0224-3>

Банніков, Д. О., Купрій, В. П., & Вотченко, Д. Ю. (2021). Закономірності напружено-деформованого стану оправ під час будівництва пілонної станції метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 19-27. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233871>

Бондаренко, В. І., Ільяшов, М. А., Ковалевська, І. А. et al. (2008). *Прогноз переміщень контуру пластової виробки в шаруватому масиві слабких порід*. Дніпропетровськ: Системні технології.

Бондаренко, В. І., Ковалевська, І. А., Сіманович, Г. А., & Фомічов, В. В. (2006). *Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану дрібношаруватого породного масиву навколо пластової виробки. Книга 1. Domeжова стадія деформування системи «порода-кріплення»*. Дніпропетровськ: Системні технології.

Бондаренко, В. І., Ковалевська, І. А., Сіманович, Г. А., & Фомічов, В. В. (2007). *Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану дрібношаруватого породного масиву навколо пластової виробки. Книга 2. Межовий й замежовий стан системи «порода-кріплення»*. Дніпропетровськ: Системні технології.

Бондаренко, В. І., Ковалевська, І. А., Сіманович, Г. А. et al. (2008). *Методика прогнозу переміщень контуру кріплення виїмочної виробки, що розташована в шаруватому масиві слабких порід*. Дніпропетровськ: НГУ.

Бондаренко, Н. К., & Тют'їн, О. Л. (2019). Закономірності напружено-

деформованого стану незакріпленої виробки як функції scaling-параметрів. *Тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції «Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт»*, 48-50.

Бондаренко, Н. К., & Тютюкін, О. Л. (2022а). Порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену. *Наука та прогрес транспорту*, 2(98), 78-85. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267934>

Бондаренко, Н. К., & Тютюкін, О. Л. (2022b). Критичний аналіз підходів до визначення напружено-деформованого стану системи «горизонтальна виробка – шаруватий масив». *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 22, 5-11. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268182>

ДБН В.2.3-7:2018 (2018). *Метрополітени. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Заворицький, В. Й. (1975). *Проектування підземних транспортних споруд*. Київ: Будівельник.

Карпіловський, В. С., Криксунов, Е. З., Перельмутер, А. В., et al. (2000). *SCAD для користувача*. Київ: ВВП «Компас».

Перельмутер, А. В., & Слівкер, В. І. (2002). *Розрахункові моделі споруд и можливість їхнього аналізу*. Київ: Сталь.

Петренко, В. Д., Банніков, Д. О., & Нетеса, М. І. (2020). Геофізичні дослідження та укріплення шаруватого та водонасиченого ґрунтового масиву в умовах Київського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 62-72. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205013>

Петренко, В. Д., & Тютюкін, О. Л. (2003). Оцінка впливу порожнин та шарів на напружено-деформований стан системи «кріплення-масив». *Геотехнічна механіка*, 42, 198-204.

Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Кулаженко, Є. Ю., & Петренко, В. І. (2017). Моніторинг деформацій оправи Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену та заходи щодо їх зменшення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 11, 42-51. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2017/158553>

Петренко, В. Д., Тютькін, О. Л., & Петренко, В. І. (2012). Огляд аналітичних і експериментальних методів дослідження взаємодії масиву і кріплення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 1, 75-81. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2012/25968>

Петренко, В. І., & Петренко, В. Д. (2014). Обґрунтування параметрів хімічного закріплення ґрунтів при будівництві Київського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2013/26642>

Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, О. Л. (2005). *Сучасні технології будівництва метрополітенів в Україні*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Петросян, Н. К., & Тютькін, О. Л. (2017). Експрес-аналіз напружено-деформованого стану незакріпленої виробки на основі моделі з одиничними параметрами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 11, 59-66. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2017/158791>

Савін, Г. М. (1968). *Розподіл напружень навколо отворів*. Київ: Наукова думка.

Тютькін, О. Л. (2008). Теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 21, 201-206. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2008/16510>

Тютькін, О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.

Тютькін, О. Л., Банніков, Д. О., Мірошник, В. А., & Гелетюк, І. В. (2021). Аналіз комбінованої конструкції ствола Дніпровського метрополітену методом скінченних елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 20, 79-85. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/245363>

Тютькін, О. Л., Бондаренко, Н. К., & Ларіонова, І. А. (2020). Процес скейлінгу для визначення напружено-деформованого стану закріпленої

виробки. *Матеріали 80 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 163-166.

Тютюкін, О. Л., Бондаренко, Н. К., & Ларіонова, І. А. (2021). Особливості напружено-деформованого стану перегінних тунелів, пройдених в слабких шаруватих ґрунтах. *Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 193-195.

Тютюкін, О. Л., Петросян, Н. К., & Шибасєва, А. В. (2019). Основи параметричного аналізу напружено-деформованого стану незакріплених виробок в шаруватому масиві. *Матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 272-274.

Тютюкін, О. Л., Решетняк, Т. П., & Петросян, Н. К. (2018). Числовий аналіз варіантів закладення шаруватого масиву при взаємодії із виробкою кругового окреслення. *Матеріали 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 237-238.

Фомічов, В., Почепов, В., Лапко, В., & Фомічова, Л. (2016). Розробка і аналіз розрахункової моделі геомеханічної системи «шаруватий масив – кріплення виробки». *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 25-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.02.025>

Шашенко, А. Н., Майхерчик, Т., & Сдвижкова, Е. А. (2005). *Геомеханічні процеси в породних масивах*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.

Шашенко, А. Н., Сдвижкова, Е. А., & Гапєєв, С. М. (2008). *Деформуємість й міцність масивів гірських порід*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.

Швець, В. Б., Шаповал, В. Г., Петренко, В. Д., et al. (2008). *Фундаменти промислових, цивільних і транспортних споруд на шаруватих ґрунтових основах*. Дніпропетровськ: Нова ідеологія.