

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
ННІ Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту

«Будівництво, архітектура та інфраструктура»

(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

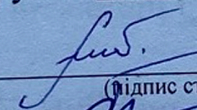
на тему: Напружено-деформований стан виробки подвійного призначення,
що споруджується способом пілот-тунелю
за освітньою програмою «Будівництво та експлуатація
транспортної інфраструктури»

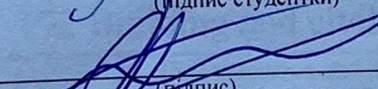
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

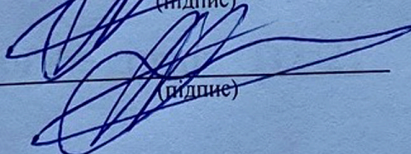
Виконав: студентка групи: ТІ2421

Керівник:

Нормоконтролер:


(підпис студентки)


(підпис)


(підпис)

/ Поліна КИРИЧЕНКО /

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

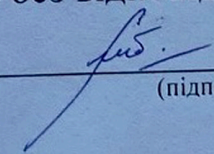
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка


(підпис)

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies
Dnipro Institute of Infrastructure and Transport

Building, architecture and infrastructure
(faculty)

Transport infrastructure
(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis
Master
(higher education degree)

on the topic: Stress-strain state of a dual-purpose working
constructed using the pilot tunnel method

according to educational curriculum Construction and operation
of transport infrastructure

in the Specialization: 192 Building and civil engineering
(Specialization and its code)

Done by the student of the group: TI2421 / Polina KYRYCHENKO /
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /
(position, name, surname)

Normative controller : / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
ННІ Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Будівництво та експлуатація транспортної інфраструктури»

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студентці Кириченко Поліні Олександрівні

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Напружено-деформований стан виробки подвійного призначення, що споруджується способом пілот-тунелю»

Керівник роботи: Тютюкін Олексій Леонідович, д.т.н., професор

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від «02» жовтня 2025 р. № 1401ст

2. Строк подання студенткою роботи: «12» січня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу умов закладення виробки подвійного призначення, технології спорудження способом пілот-тунелю та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ. Розділ 1. Аналіз стану питання спорудження виробок подвійного призначення. Розділ 2. Розробка скінченно-елементної моделі виробки, що споруджується способом пілот-тунелю. Розділ 3. Результати визначення напружено-деформованого стану виробки подвійного призначення. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 10...12 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Розділ 1. Аналіз стану питання спорудження виробок подвійного призначення.	10.11.2025	
2	Розділ 2. Розробка скінченно-елементної моделі виробки, що споруджується способом пілот-тунелю. Розділ 3. Результати визначення напружено-деформованого стану виробки подвійного призначення.	08.12.2025	
3	Висновки. Оформлення ВКР.	05.01.2026	
4	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	11.01.2026	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	12.01.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.01.2026	

Студент

_____ (підпис)

Поліна КИРИЧЕНКО

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Олексій ТЮТЬКІН

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

62 стор., 21 рис., 6 табл., 17 літературних джерел.

Об'єкт розробки – виробка подвійного призначення.

Мета роботи – визначення параметрів напружено-деформованого стану виробки подвійного призначення, що споруджується способом пілот-тунелю.

Метод дослідження – метод скінченних елементів.

В магістерській роботі виконано аналіз літературних джерел, присвячених науково-технічній задачі спорудження виробок подвійного призначення із врахуванням технології та з'ясуванням його впливу на формування напружено-деформованого стану. Розглянуто особливості технології спорудження способом пілот-тунелю.

Розроблена скінченно-елементна модель виробки подвійного призначення, що споруджується способом пілот-тунелю (плоска і просторова постановки). Проведений чисельний аналіз оправи виробки подвійного призначення, що споруджується способом пілот-тунелю.

Визначено параметри напружено-деформованого стану виробки подвійного призначення з урахуванням поетапності розкриття.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, ПЕРЕГІННИЙ ТУНЕЛЬ, ВИРОБКА ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, СПОСІБ ПІЛОТ-ТУНЕЛЮ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ СПОРУДЖЕННЯ ВИРОБОК ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	9
1.1 Аналіз задачі спорудження виробок подвійного призначення.....	9
1.2 Аналіз особливостей технології спорудження способом пілот-тунелю	13
1.3 Аналіз вихідних даних спорудження виробки подвійного призначення.....	21
2 РОЗРОБКА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ВИРОБКИ, ЩО СПОРУДЖУЄТЬСЯ СПОСОБОМ ПІЛОТ-ТУНЕЛЮ	23
2.1 Алгоритм розробки скінченно-елементної моделі (схема заданих навантажень).....	23
2.2 Алгоритм розробки скінченно-елементної моделі (схема деформацій, що взаємно впливають).....	30
3 РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВИРОБКИ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	39
3.1 НДС скінченно-елементної моделі (схема заданих навантажень).....	39
3.2 НДС скінченно-елементної моделі (схема деформацій, що взаємно впливають)	54
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	61

ВСТУП

Сучасний розвиток мегаполісів супроводжується зростанням вимог до підземної транспортної інфраструктури, насамперед до метрополітену, який забезпечує основний пасажиропотік у великих містах. На сьогодні, під час російсько-української війни, метрополітени Києва, Харкова й Дніпра, окрім своєї транспортної ролі, відіграють роль укриттів.

Метрополітен як транспортна система, що закладена в породному масиві, має значний потенціал застосування не тільки як укриттів, але й об'єктів подвійного призначення. Метрополітен, що складається більшою мірою із станцій та перегінних тунелів, що їх еднають, має змогу розширюватися й змінюватися, вивільнюючи вказаний потенціал.

Перегінні тунелі метрополітену належать до об'єктів, для яких визначальними є вимоги міцності, тріщиностійкості, водонепроникності, довговічності конструкцій. Також все більшого значення набувають виробки подвійного призначення, що поєднують в транспортну функцію з евакуаційними, інженерними та службовими просторами.

Перегінний тунель, що є виробкою невеликого діаметру (до 6 м), може стати основою для виробки подвійного призначення, яка може відігравати роль укриття. Технологією, яка дозволить розкрити потенціал перегінного тунелю в цьому напрямі, в загальному вигляді є технологія спорудження виробок великого перерізу (більше 6 м) по частинам. Найбільш оптимальною технологією для реалізації потенціалу є спосіб пілот-тунелю.

Відомо, що спорудження тунелів у складних інженерно-геологічних та гідрогеологічних умовах потребує застосування технологій, що забезпечують поетапне розкриття перерізу й керований перерозподіл напружень у масиві. Одним із таких підходів є спорудження способом пілот-тунелю, коли спочатку проходиться виробка меншого перерізу (пілотна), а потім виконується розширення до проектного контуру з улаштуванням постійної оправи.

Така технологія істотно впливає на схему роботи системи «масив – оправа» та формування напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій. Ігнорування поетапності розкриття при розрахунках може призводити до істотних похибок у визначенні напружено-деформованого стану, що негативно впливає на надійність та довговічність підземних споруд.

Важливим аспектом визначення НДС є врахування поетапності, що тягне за собою створення декількох моделей, які відображають особливості розкриття виробок способом пілот-тунелю. Для аналізу роботи підземних споруд широко застосовуються чисельні методи. Метод скінченних елементів дає змогу враховувати геометричні особливості виробок, фізико-механічні властивості масиву порід, взаємодію з оправою та послідовність будівельних етапів.

Практичні умови, що лежать в основі даної магістерської роботи, відповідають характерним умовам спорудження та експлуатації підземних об'єктів метрополітенів, де чисельні методи розрахунку використовуються для оцінки напружено-деформованого стану та обґрунтування проектних рішень. Таким чином, метою магістерської роботи є визначення параметрів напружено-деформованого стану виробки подвійного призначення, що споруджується способом пілот-тунелю.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ СПОРУДЖЕННЯ ВИРОБОК ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1 Аналіз задачі спорудження виробок подвійного призначення

У сучасному підземному будівництві дедалі ширше застосовуються виробки подвійного призначення, у межах яких поєднуються декілька функцій в одному підземному просторі [6, 13]. Найчастіше такі споруди реалізуються у складі транспортних тунелів метрополітену або автомобільних магістралей і використовуються одночасно для забезпечення руху транспорту, аварійної евакуації та розміщення інженерно-технологічних систем. В умовах цивільного захисту подібні тунелі також можуть виконувати функції захисних споруд, що висуває підвищені вимоги до їх надійності та безпеки.

Під «виробкою (підземною спорудою) подвійного призначення» у роботі доцільно розуміти підземний об'єкт, який у штатних умовах експлуатується за основною функцією (наприклад, транспортною – тунель / станція метрополітену), а в умовах надзвичайних ситуацій використовується для укриття населення та має забезпечувати мінімально необхідні умови перебування людей протягом визначеного часу. Такий підхід узгоджується з чинними будівельними нормами щодо захисних споруд і споруд подвійного призначення [5, 6]. Організаційно-правовий контекст використання та обліку таких об'єктів у системі цивільного захисту визначається Порядком, затвердженим постановою КМУ № 138, який охоплює фонд захисних споруд, у тому числі споруди подвійного призначення.

Зазначений порядок охоплює питання включення об'єктів до фонду, їх утримання та ведення обліку, що на практиці означає необхідність забезпечення готовності споруди та відповідальної експлуатації в частині доступності, справності огорожувальних конструкцій і ключових інженерних систем [5, 6, 10].

Це важливо враховувати на стадії проектування, оскільки вимоги до укриття

населення безпосередньо трансформуються у планувальні та конструктивні рішення (входи/виходи, зонування, герметизація, вентиляція та ін.).

Для перегінних тунелів подвійного призначення, окрім забезпечення пропускної спроможності та зручності експлуатації, визначальними є умови безпечного перебування людей, надійність огорожувальних конструкцій і стійкість до дії екстремальних навантажень [7, 16]. Це відображається у вимогах до несучої здатності, тріщиностійкості, водонепроникності та довговічності оправи, а також до здатності конструкції зберігати працездатність упродовж усього строку експлуатації.

Поєднання транспортної та допоміжних функцій у межах однієї виробки зумовлює додаткову інженерну складність таких споруд. Наявність внутрішніх перегородок, службових або евакуаційних проходів і зон з різною функціональною роллю призводить до ускладнення роботи поперечного перерізу та нерівномірного розподілу зусиль в оправі.

Порівняно з традиційними одноколійними тунелями виробки подвійного призначення є більш чутливими до стадійності будівництва та умов взаємодії з ґрунтовим масивом [6, 8]. Це зумовлює необхідність детального аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням поетапного формування конструкції та контактних параметрів системи «масив – оправа».

Додаткові вимоги до споруд подвійного призначення, зокрема забезпечення безпечного перебування людей та збереження працездатності огорожувальних конструкцій, підвищують чутливість системи «масив – кріплення – оправа» до деформацій і локальних пошкоджень.

Відповідно, інженерна задача включає не лише перевірку несучої здатності, але й контроль деформативності, тріщиностійкості та водонепроникності на різних стадіях спорудження і експлуатації.

Навантаження, що діють на перегінний тунель, мають багатокomпонентний характер і формуються внаслідок взаємодії природних і техногенних факторів [4, 14]. Для умов глибокого закладання основну роль відіграє геостатичний

тиск ґрунтового масиву, який у поєднанні з гідростатичним напором зумовлює підвищений рівень стискальних напружень у контурі кільцевої оправи. Реальний розподіл тиску по периметру, як правило, відхиляється від осесиметричного, що призводить до овального деформування перерізу та виникнення значних згинальних моментів.

У задачах оцінювання напружено-деформованого стану кільцевої оправи першочергове значення має коректне задання закону розподілу тиску по контуру. Симетричний варіант у вигляді радіального тиску сталого значення доцільно використовувати як контрольний випадок для перевірки коректності чисельної моделі. Водночас для інженерно обґрунтованого аналізу необхідно враховувати кутову залежність тиску $p(\theta)$, яка відображає різницю між вертикальною та горизонтальною складовими напруженого стану, а також додатковий вплив гідростатичного напору [12, 16].

Оцінювання працездатності перегінного тунелю як споруди подвійного призначення здійснюється відповідно до системи граничних станів із урахуванням вимог до несучої здатності та експлуатаційної придатності конструкції. До основних показників належать переміщення і деформації контуру, внутрішні зусилля в оправі, показники тріщиностійкості та водонепроникності, а також характеристики довготривалої роботи й живучості споруди [2, 16].

Аналіз деформативності передбачає оцінювання переміщень, овальності перерізу та радіальних переміщень у характерних зонах кільця, зокрема у склепінні, лотку та пружних лініях. Внутрішній силовий стан оправи описується поздовжніми силами N , згинальними моментами M і поперечними силами V . Для залізобетонних конструкцій визначальними є згинальні дії, оскільки саме вони формують зони розтягу, у яких можливе тріщиноутворення. Забезпечення тріщиностійкості та водонепроникності є критичним для підземних споруд, оскільки проникнення води істотно впливає на довговічність конструкції та стабільність приконтурного масиву [9, 12].

Взаємодія системи «грунт – оправа» визначає частку початкових геостатичних напружень, що передається на конструкцію, і частку, яка залишається в масиві. Для опису цієї взаємодії в інженерній практиці широко застосовують спрощені контактні моделі, зокрема модель пружної основи Вінклера, у межах якої реакція ґрунту лінійно пов'язується з локальними переміщеннями оправи. Ефективна контактна жорсткість при цьому формується під впливом стану ґрунту в приконтурній зоні, наявності технологічного зазору, якості ін'єкційного заповнення, а також часових і стадійних особливостей виконання робіт [1, 12].

Для тунелів великого діаметра навіть незначні порушення однорідності контакту можуть призводити до асиметричного характеру деформування, зростання згинальних моментів і формування локальних зон концентрації напружень. У зв'язку з цим на стадії проєктування доцільно виконувати параметричні оцінки та визначати допустимі межі варіювання контактних характеристик, які можуть реалізовуватися в реальних умовах будівництва.

Стадійний характер спорудження підземних виробок зумовлює послідовну зміну граничних умов роботи системи «масив – кріплення – оправа». Для перегінного тунелю, що споруджується способом пілот-тунелю [13], цей процес включає два основні етапи: проходку пілотної виробки малого перерізу та подальше розширення до проєктного контуру з улаштуванням постійної оправи. У результаті ґрунтовий масив зазнає двох циклів перерозподілу напружень, а формування приконтурної зони відбувається поступово в часі.

Найвища чутливість напружено-деформованого стану спостерігається у перехідних інтервалах типу «розкриття – закріплення», коли ще не сформована замкнена жорстка схема роботи кріплення або оправи. На стадії розширення визначальним чинником стає порушення суцільності контакту між масивом і оправою, пов'язане з наявністю технологічних зазорів або порожнин, що зумовлює локальне зростання згинальних моментів і деформацій.

В умовах міської забудови підвищеної відповідальності розрахунковий

прогноз розглядається як складова керованого процесу спорудження, що передбачає обов'язкове застосування інструментальних спостережень. Моніторингові заходи дозволяють перевіряти прийняті розрахункові припущення та своєчасно коригувати технологічні рішення. Раціональна система спостережень охоплює вимірювання деформацій оправи, геодезичний контроль осідань і горизонтальних переміщень, фіксацію параметрів ін'єкційного нагнітання, а також спостереження за рівнем ґрунтових вод і режимами водовідведення. Для технології пілот-тунелю особливе значення має моніторинг у фазі розширення, коли напружений стан масиву зазнає повторного переформування.

Таким чином, розрахунок напружено-деформованого стану перегінного тунелю не зводиться до визначення окремих максимальних значень напружень. Необхідним є комплексний аналіз розподілу зусиль по контуру, локалізації екстремальних зон і чутливості результатів до стадійності спорудження та параметрів взаємодії системи «масив – оправа».

1.2 Аналіз особливостей технології спорудження способом пілот-тунелю

Спорудження перегінних тунелів великого поперечного перерізу в умовах міської забудови потребує технологій, що забезпечують керованість деформацій та прогнозований розвиток напружено-деформованого стану на проміжних стадіях будівництва [3, 13, 16]. Особливої складності задача набуває за водонасичення ґрунтів, їх неоднорідності та підвищених вимог до стабільності й водонепроникності огорожувальних конструкцій.

У таких умовах доцільним є застосування способу пілот-тунелю – різновиду поетапного розкриття перерізу, за якого спочатку споруджується пілотна виробка меншого розміру, а формування остаточного контуру виконується шляхом послідовного розширення. Пілотна стадія виконує роль керованого початкового розкриття та створює базу для стабілізації приконтурної зони й подальшого улаштування постійної оправи [1, 13].

Застосування пілот-тунельного способу є найбільш обґрунтованим у випадках підвищеної деформативності або неоднорідності ґрунтів, наявності водонасичених прошарків, а також під час спорудження в щільній міській забудові, де критичним є обмеження осідань поверхні та деформацій основ існуючих споруд і інженерних мереж. Додатковою підставою для вибору методу є необхідність прогнозованого контролю проміжних станів, коли до моменту замикання контуру система працює у більш деформативному режимі.

Вибір технології та, зокрема, послідовності розкриття перерізу та інтервалів між технологічними операціями виконання робіт є визначальним для керування осіданнями поверхні та запобігання небезпечним проявам під час будівництва [11]. Практика проектування й аналіз результатів натурних спостережень свідчать, що навіть за однакових геологічних умов зміна сценарію проходки (кроку заходки, відставання між фронтами робіт, моменту замикання контуру) може суттєво впливати на величини переміщень. Саме тому пілот-тунельний підхід доцільно розглядати не лише як конструктивне рішення, а як керований технологічний сценарій, параметри якого мають бути узгоджені з вимогами щодо допустимих деформацій.

Для спорудження підземних споруд великого перерізу (зокрема, станційних тунелів та об'єктів із розвиненим підсклепінним простором) характерною є підвищена чутливість до проміжних стадій розкриття, коли контур ще не замкнений, а робота системи «масив – кріплення» є найбільш деформативною. У таких задачах пілот-тунель застосовують як технологічний інструмент, що дозволяє керовано підготувати масив і створити опорну основу для подальшого формування великого перерізу. Практично це особливо важливо у нестійких або неоднорідних ґрунтах, де розкриття забою на повний переріз ускладнює утримання покрівлі та лоба забою, а також обмежує можливості оперативного монтажу тимчасового кріплення.

Поетапність робіт дозволяє знизити ризик втрати стійкості покрівлі та бортів, локалізувати зону пластичних деформацій, забезпечити технологічний

доступ для дренажу, ін'єкцій і геодезичного контролю, а також підвищити керованість деформацій у разі обводнення. Пілотна виробка на початковому етапі забезпечує закріплення покрівлі та стінок і сприяє первинній стабілізації приконтурної зони, тоді як під час розширення її елементи можуть використовуватися як опорна база для виконання робіт і формування постійної оправи великого перерізу.

Технологічна схема пілот-тунельного способу включає дві основні стадії (рис. 1.1). На першій стадії виконують проходку пілотної виробки меншого діаметра D_0 з улаштуванням тимчасового (пілотного) кріплення. На другій стадії здійснюють розширення перерізу до остаточного діаметра D із монтажем постійної залізобетонної оправи та обов'язковим формуванням контактної зони шляхом ін'єкційного заповнення кільцевого зазору за оправою.

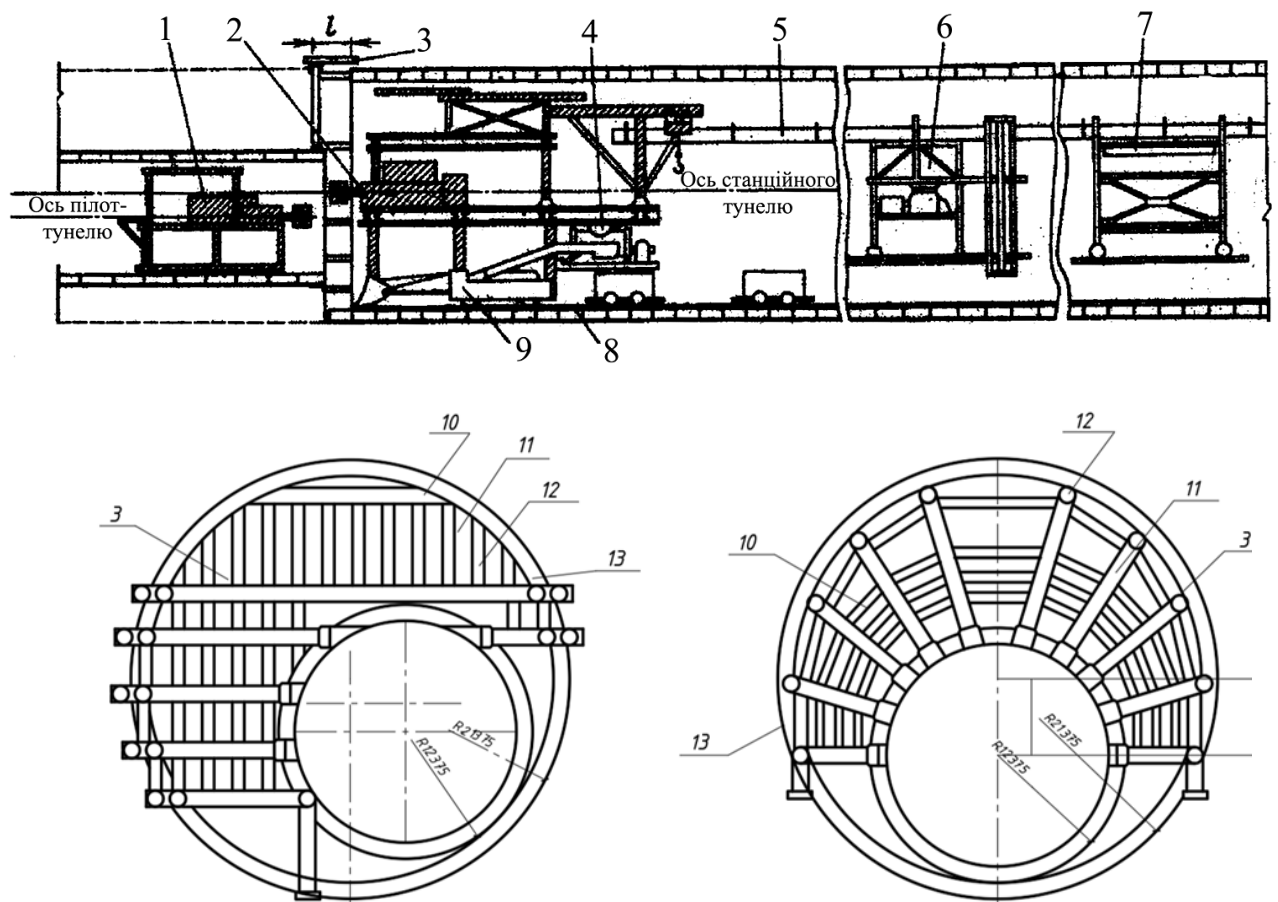


Рисунок 1.1 – Принципова схема розширення пілотної виробки до проектного перерізу (схематично)

Розширення перерізу від пілотної виробки до проектного контуру може виконуватися за різними схемами залежно від стійкості масиву та організації робіт. Практично доцільними є схеми «зверху вниз» (спочатку склепіння, потім бокові частини і лоток), поетапне бокове розкриття з тимчасовою підтримкою, а також комбіновані варіанти із збереженням частини елементів пілотного кріплення.

Спочатку для проходження тунелю діаметром 5,5 м, використовують тунельний укладальник 1 або перегінний щит, у цьому тунелі зводять тимчасову оправу. Ось пілот-тунелю розташовують так, щоб забезпечити найкращі умови для розробки і кріплення обох забоїв відповідно до геологічних умов. При спорудженні бокових тунелів станції вертикальну ось пілот-тунелю суміщають з віссю станційної колії, а при спорудженні середнього тунелю – з його віссю, здійснюють зсув центр виробок по висоті.

Ґрунт розробляють зверху вниз за допомогою відбійних молотків. Глибину заходки 1 вибирають так, щоб можна було розібрати кільце оправи пілот-тунелю і змонтувати одне-два кільця оправи станційного тунелю. Кривлю виробки закріплюють марчеванами 3, один кінець яких заводять за кільце оправи станційного тунелю, а інший – в штрабу по периметру виробки. Кінці марчеван в забої підхоплюють кружальною аркою, яка спирається на вертикальні або похилі стійки 11.

Лоб забою утримують дошками 10, розпираючи їх на горизонтальні балки або труби 12, які розташовані по висоті з певним кроком, або на радіальні стійки, що оперті на кільце оправи пілот-тунелю. Балки і стійки у місцях їх опори на оправу пілот-тунелю притискають до забою горизонтальними розпірками – рошпанами 13, упираючи їх в сталеві пластини 14. Ці пластини встановлюють по периметру кільця і кріплять болтами до ребер тьюбінгів із пересувної платформи 8 [1, 3, 4].

Кільце оправи пілот-тунелю, звільнене від ґрунту за допомогою

породонавантажувальної машини 9, розбирають укладальником 1 і монтують нове кільце постійної оправи за допомогою станційного укладальника 2. В змонтоване кільце постійної оправи із відставанням в 1...2 кільця проводять первинне нагнітання за допомогою розчинонагнітача 4, а потім – здійснюють контрольне нагнітання 6, чеканку швів 7 та нарощують труби вентиляції 5. Розстановка робочої сили, устаткування та механізмів в станційному тунелі здійснюється за звичайними методами проходки.

Найвідповідальнішим елементом є зона склепіння, де втрата стійкості проявляється швидше і може мати найбільші наслідки. Тому технологічно важливо мінімізувати довжину відкритого контуру, обмежувати крок заходки та забезпечити швидке встановлення елементів тимчасового кріплення з наступним замиканням постійної оправи.

Приклад розширення попередньо спорудженого пілот-тунелю до повного перерізу наведено на рис. 1.2 і 1.3.



Рисунок 1.2 – Приклад розширення спорудженого пілот-тунелю на об'єкті Crossrail із центральним розміщенням [15]



Рисунок 1.3 – Приклад розширення спорудженого пілот-тунелю на об'єкті Crossrail із боковим розміщенням [15]

Найбільш чутливими є проміжні стани до моменту замикання контуру (улаштування нижньої частини перерізу та формування кільця). До завершення цього етапу система «масив – кріплення» характеризується підвищеною деформативністю, тому критичним є забезпечення тимчасової просторової жорсткості та обмеження довжини відкритого контуру, особливо в зоні склепіння.

Після монтажу постійної оправи необхідно відновити суцільний контакт між конструкцією та масивом. Технологічний зазор, який неминуче виникає у процесі спорудження, підлягає заповненню ін'єкційними складами. Саме якість заповнення визначає ефективну контактну жорсткість та рівномірність передачі тиску на оправу.

Як правило, виділяють первинне нагнітання (одразу після монтажу конструкції) та контрольне нагнітання (для компенсації усадки або ліквідації

виявлених порожнин). Недостатнє заповнення може призводити до локального «провисання» ділянок оправи і зростання згинальних моментів, тоді як надмірне нагнітання здатне викликати локальні підйоми ґрунту або порушення приконтурної зони. Отже, режим ін'єкцій є ключовим технологічним параметром, який має враховуватися у проєктних оцінках напружено-деформованого стану та в системі моніторингу [11, 16].

Ін'єкційне заповнення кільцевого зазору слід розглядати як елемент формування граничних умов роботи системи «масив – оправа». Саме якість контакту визначає фактичну жорсткість взаємодії та характер передачі тиску на конструкцію; у розрахункових оцінках це доцільно враховувати варіюванням контактної жорсткості k у межах, що відповідають неповному заповненню (наявності порожнин) та якісному контакту.

Організація робіт може здійснюватися за паралельною або послідовною схемою [13]. Паралельна схема передбачає відставання фронту розширення від забою пілотної виробки та дає змогу скорочувати строки будівництва, проте ускладнює транспортні потоки і потребує узгодження операцій у зоні розширення та у пілотній виробці. Послідовна схема передбачає завершення проходки пілотної виробки з подальшим розширенням і є більш зручною для керування деформаціями та організації інструментального контролю.

Під час розширення перерізу до проєктного контуру особливу увагу приділяють кріпленню покрівлі, утриманню лоба забою та організації монтажу постійної оправи. Глибину заходки обирають так, щоб забезпечити можливість розібрати частину кільця пілотної оправи і змонтувати одне-два кільця постійної. Покрівлю підтримують марчеванами, лоб забою – дошками і розпірними елементами, опертими на існуючу оправа.

Після монтажу кільця постійної оправи кільцевий зазор між нею та масивом заповнюють ін'єкційним розчином. Первинне та контрольне нагнітання забезпечують формування контактної зони, від якої залежить фактична контактна жорсткість. У розрахунковій моделі це відображається параметром k :

зменшення k відповідає наявності порожнин і неповного заповнення, збільшення – якісному контакту та більш рівномірній передачі навантаження.

Оскільки напружено-деформований стан при пілот-тунельному способі формується ланцюжком проміжних станів, розрахункове обґрунтування повинно відтворювати стадійність робіт: поетапну виїмку ґрунту, введення елементів тимчасового кріплення та постійної оправи, зміну контактних умов і момент замикання контуру. Це дає змогу оцінити не лише кінцевий стан конструкції, а й найбільш небезпечні тимчасові стани, що виникають під час розширення.

Окрім класичного варіанта з центральним пілот-тунелем, у практиці застосовують схеми з боковими пілотними виробками (дрифтами), які використовують для поетапного формування великого перерізу при обмежених умовах розкриття. Сутність схеми полягає в тому, що пілотна виробка зміщується відносно осі майбутнього тунелю. Це дає змогу першочергово сформувати та підкріпити ту частину контуру, яка є найбільш уразливою в конкретних геологічних умовах (наприклад, покрівля з боку слабшого прошарку або зона під впливом зовнішнього навантаження від забудови). Під час подальшого розширення пілотна оправа використовується як надійна опора для тимчасових елементів кріплення, а також як «жорсткий контур», від якого зручно вести поетапне розкриття суміжних ділянок перерізу.

Схеми з боковими пілотними виробками доцільні у випадках, коли потрібно технологічно розділити великий переріз на декілька відносно незалежних зон розкриття. Це зменшує довжину відкритого фронту, дає можливість швидше локалізувати пластичні деформації та спростити організацію тимчасових підпор у зоні покрівлі. Разом із тим, асиметричне розташування піотної виробки вимагає контролю геометрії при розширенні та підвищує вимоги до коректності монтажу елементів постійної оправи, оскільки нерівномірність проміжних напружених станів може проявлятися у вигляді різниці переміщень по контуру.

1.3 Аналіз вихідних даних спорудження виробки подвійного призначення

Вихідні дані для чисельного аналізу напружено-деформованого стану виробки подвійного призначення охоплюють: геометричні параметри поперечного перерізу на стадіях пілотної та остаточної виробок, конструктивні характеристики оправи, інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови, а також прийняті розрахункові схеми навантаження і взаємодії «масив – оправа» [1, 3, 16]. Вихідні параметри підбрано так, щоб забезпечити порівнянність результатів для двох стадій формування перерізу та можливість оцінити вплив стадійності і контактних умов на НДС.

Розглядається перегінний тунель глибокого закладання з відміткою залягання близько $H=40$ м у глинистих ґрунтах. Ураховується наявність ґрунтових вод: рівень ґрунтових вод прийнято на глибині 10 м від поверхні, тобто вище рівня склепіння, що зумовлює дію гідростатичного тиску на контур оправи. Для спрощення задачі масив у розрахунковій постановці розглядається як однорідний із заданими міцнісними характеристиками; тип ґрунту – глина тверда, показник міцності за проф. М. М. Протод'яконовим $f = 1,2$.

Наведені геологічні й гідрогеологічні дані демонструють, що для цього розрахункового випадку обов'язково слід враховувати складну ситуацію ґрунтів, наявність слабких і потенційно зсувонебезпечних зон, змінну тріщинуватість і розподіл фільтраційних потоків. У таких умовах напружено-деформований стан виробки подвійного призначення виявляється чутливим до вибору моделі ґрунту, до прийнятих параметрів геотехнічних типів і до побудови розрахункової схеми взаємодії «оправа – масив».

Геометрія тунелю задається двома характерними діаметрами: для пілотної виробки $D_0=5,5$ м, для остаточної контуру $D=9,5$ м. Постійна оправа прийнята залізобетонною; для розрахунків використано товщину $h = 0,5$ м і розрахункову ширину кільця $b = 1,0$ м (на 1 м довжини тунелю), що відповідає плоскій схемі роботи поперечного перерізу. Таке припущення є типовим для оцінювання

НДС кільцевих оправ на початкових етапах чисельного аналізу та дозволяє зосередитися на впливі навантаження, стабільності та параметрів контакту.

Особливу увагу приділяють визначенню модулів деформації, коефіцієнтів Пуассона та міцнісних параметрів ґрунтів, які рекомендується встановлювати за результатами лабораторних та польових випробувань.

Для реалізації розрахунків у програмному комплексі SCAD у практиці широко застосовуються пружно-пластичні моделі матеріалів, що дозволяють врахувати нелінійну роботу ґрунтового масиву. Як зазначено у монографії [16], такий підхід є достатньо обґрунтованим для інженерних розрахунків підземних споруд.

2 РОЗРОБКА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ВИРОБКИ, ЩО СПОРУДЖУЄТЬСЯ СПОСОБОМ ПІЛОТ-ТУНЕЛЮ

2.1 Алгоритм розробки скінченно-елементної моделі (схема заданих навантажень)

Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) оправи перегінного тунелю застосовано плоску скінченно-елементну рамну модель замкненого кільця на пружній основі типу Вінклера [16]. Оправу подано системою стрижневих елементів із жорсткісними характеристиками, що відповідають прийнятому залізобетонному перерізу.

У роботі розглядаються дві геометричні стадії формування перерізу пілотна виробка діаметра $D_0=5,5$ м та остаточна виробка діаметра $D=9,5$ м (рис. 2.1).

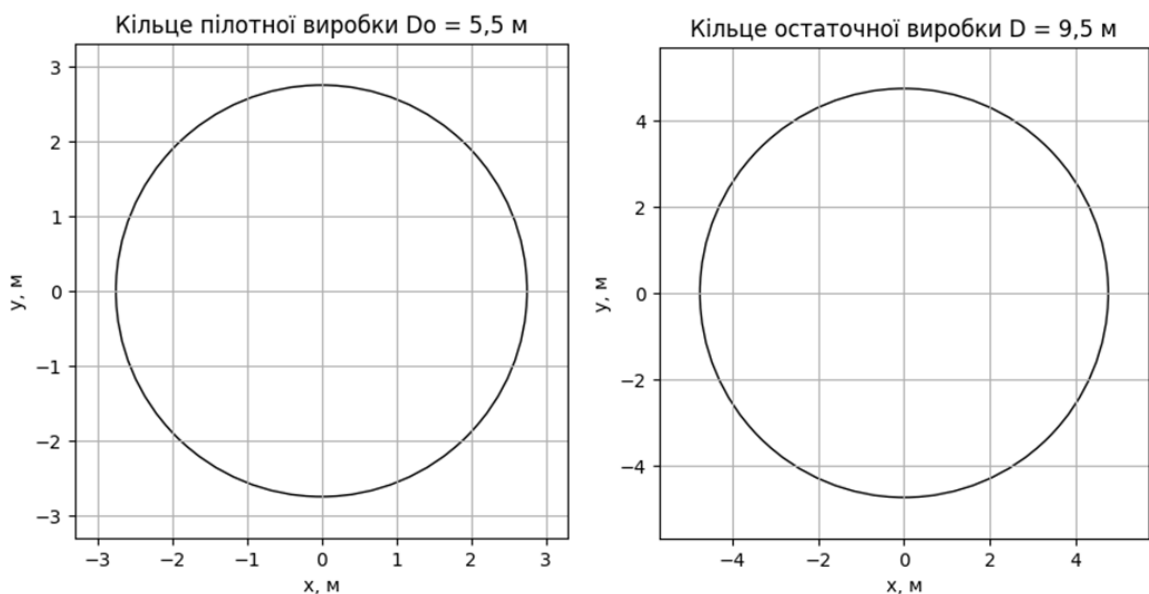


Рисунок 2.1 – Схема кільцевої оправи пілотної виробки ($D_0=5,5$ м);
розрахункова схема кільцевої оправи остаточної виробки ($D=9,5$ м)

Зіставлення результатів для цих стадій виконують за однакових вихідних умов (тип ґрунту, глибина закладання, рівень ґрунтових вод, принцип дискретизації та схеми навантаження). Глибина закладання приймається $H=40$ м до осі тунелю, рівень ґрунтових вод – 10 м від поверхні, що відповідає водонапірним умовам і зумовлює гідростатичну складову тиску на контур

оправи.

Взаємодію «грунт – оправа» подано у вигляді моделі пружної основи Вінклера з базовим значенням коефіцієнта постелі $k=30 \text{ МН/м}^3$. Зазначений параметр у подальших розрахунках інтерпретується як узагальнена контактна жорсткість, що відображає якість заповнення кільцевого зазору, стан приконтурної зони та реальні умови передачі тиску від масиву до конструкції.

Для задачі оцінювання НДС використано дві розрахункові схеми навантаження. Перша – контрольна, у вигляді симетричного рівномірного радіального тиску, призначена для перевірки коректності моделі та інтерпретації базової роботи кільця. Друга – несиметрична схема $p(\theta)$, яка враховує відмінність вертикальної та горизонтальної складових тиску, а також додатковий вплив гідростатичного напору за умов водонасичення. Застосування двох схем дає змогу порівняти «ідеалізований» та інженерно наближений режими навантаження і оцінити їх вплив на розподіл внутрішніх зусиль у кільці.

Основні геометричні параметри пілотної та остаточної виробок, а також прийняті характеристики матеріалів доцільно узагальнити в табл. 2.1 (геометрія, товщина оправи, параметри дискретизації, k , глибина, рівень вод). Це забезпечує однозначність подальших розрахункових постановок і полегшує порівняльний аналіз результатів.

Для забезпечення порівнянності результатів на стадіях пілотної та остаточної виробок дискретизацію кільця прийнято однаковою: $n=36$ елементів по контуру з кутовим кроком 10° . Радіус пілотної виробки становить $R_0=2,75 \text{ м}$ ($D_0=5,5 \text{ м}$), остаточної – $R=4,75 \text{ м}$ ($D=9,5 \text{ м}$). Товщина залізобетонної оправи $h=0,5 \text{ м}$, ширина кільця в розрахунку на 1 м довжини тунелю – $b=1,0 \text{ м}$.

Прийнята дискретизація забезпечує достатню деталізацію для визначення розподілу поздовжніх сил, згинальних моментів і поперечних сил уздовж контуру та дозволяє коректно зіставляти результати для двох стадій формування перерізу за однакової розрахункової «сітки» по куту θ .

Таблиця 2.1 – Вихідні дані скінченно-елементних моделей (пілотна та остаточна виробки)

Параметр	Позначення	Одиниці	Пілотна виробка (D ₀ =5,5 м)	Остаточна виробка (D=9,5 м)
Діаметр виробки	D / D ₀	м	5,5	9,5
Радіус кільця	R	м	2,75	4,75
Товщина оправи	h	м	0,5	0,5
Ширина (на 1 м довжини)	b	м	1,0	1,0
Модуль пружності бетону	E	МПа	30 000	30 000
Кількість елементів по контуру	n	–	36	36
Крок дискретизації	Δθ	град	10	10
Коефіцієнт постелі (база)	k	МН/м ³	30	30
Глибина закладання	H	м	40	40
Knode для k=15	Knode	кН/м	7 199	12 435
Knode для k=45	Knode	кН/м	21598	37306
Еквівалентна вузлова жорсткість (для k=30)	Knode	кН/м	14 399	24 871

Плоска кільцева модель відтворює роботу оправи за дії тиску ґрунту і води та взаємодії з масивом через контактну жорсткість. У межах цієї постановки не враховуються поздовжні ефекти вздовж траси, просторові неоднорідності, деталізована робота стиків сегментної оправи (у разі тубінгів), а також

нелінійна поведінка ґрунту й бетону. Водночас для задач порівняння стадій, аналізу чутливості до контактних умов і нерівномірного навантаження прийнята схема забезпечує достатній рівень інженерної точності та зручна для параметричних оцінок.

Скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану тунельних опор передбачає послідовне виконання таких кроків:

- задання геометрії поперечного перерізу та дискретизації кільця на стрижневі елементи;
- вибір типу елементів, матеріалу та перерізу, розрахунок жорсткісних характеристик;
- урахування взаємодії «масив – оправа» через еквівалентні пружні опори;
- формування схем навантаження та комбінацій навантажень;
- виконання розрахунків і аналіз результатів і внутрішніх зусиль N , M , V .

Оправу подано у вигляді кола радіуса:

$$R=D/2,$$

де D – діаметр відповідної стадії.

Контур кільця дискретизовано на $n=36$ стрижневих елементів із кутовим кроком:

$$\Delta\theta=2\pi/n.$$

У градусній мірі $\Delta\theta=10$, що забезпечує достатню деталізацію розподілу навантаження та дозволяє задавати нерівномірний тиск $p(\theta)$ по периметру.

Вузлі визначаються параметричними рівняннями:

$$x_i=R\cos\theta_i, y_i=R\sin\theta_i$$

де $\theta_i=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 350^\circ$.

Елементи кільця формуються послідовним з'єднанням вузлів $i \rightarrow i+1$ із замиканням контуру останнім елементом $36 \rightarrow 1$. Замкненість контуру є критичною для коректного формування мембранних зусиль і овальності при несиметричному навантаженні.

Матеріал оправи – залізобетон із модулем пружності: $E=30000$ МПа.

У межах даної постановки важливими є параметри E_A (поздовжня жорсткість) та E_I (згинальна жорсткість), що визначають рівні поздовжніх зусиль та згинальних моментів у кільці.

Взаємодію «масив – оправа» подано через систему пружних опор у вузлах кільця (модель Вінклера), за якою реакція основи пропорційна локальному переміщенню.

Базовий параметр – коефіцієнт постелі: $k=30$ МН/м³.

Для переходу до вузлового задання у рамній моделі визначають еквівалентну вузлову жорсткість (на 1 м довжини тунелю): $K_{node}=k \cdot b \cdot R \cdot \Delta\theta$, де $R \cdot \Delta\theta$ – довжина дуги, яка «припадає» на вузол при дискретизації.

Параметр k інтерпретується як узагальнена контактна жорсткість, що відображає якість заповнення кільцевого зазору ін'єкційними складами, стан приконтурної зони та реальні умови передачі тиску від масиву до оправи. Для аналізу чутливості передбачено варіювання k у діапазоні 15...45 МН/м³.

Для розрахунків застосовано дві схеми навантаження:

- контрольна – симетричний рівномірний радіальний тиск $p_0=\text{const}$ (призначений для перевірки коректності постановки задачі);
- основна – несиметричний тиск $p(\theta)$, що узагальнено враховує відмінність між вертикальною та горизонтальною складовими напруженого стану масиву та додаткову дію гідростатичного напору.

Для прийнятих умов контрольний тиск становить $p_0=560$ кН/м². Для несиметричного випадку характерні значення: $p_{\min} \approx 994$ кН/м², $p_{\max} \approx 1294$ кН/м², $p_{\text{сер}} \approx 1129$ кН/м².

Щоб задати тиск у рамній моделі, його перетворюють у еквівалентні вузлові

сили, що прикладені радіально до кільця. Для вузла з кутом θ_i визначають:

$$F_{\text{node}}(\theta_i) = p(\theta_i) \cdot R \cdot \Delta\theta.$$

а далі сила розкладається на компоненти:

$$F_{x,i} = -F_{\text{node}}(\theta_i) \cos\theta_i, \quad F_{y,i} = -F_{\text{node}}(\theta_i) \sin\theta_i$$

Знак « \rightarrow » відповідає напрямку дії тиску у бік центра кільця. Таке задання навантаження дозволяє відтворити несиметричний тиск по периметру та отримати овальність перерізу з відповідними епюрами N , M , V .

Саме таке задання навантаження дозволяє коректно відтворити несиметричний тиск по периметру та отримати овальність перерізу з відповідними епюрами N , M , V .

Для відтворення моделі у SCAD++ доцільно дотримуватися послідовності рис. 2.2.

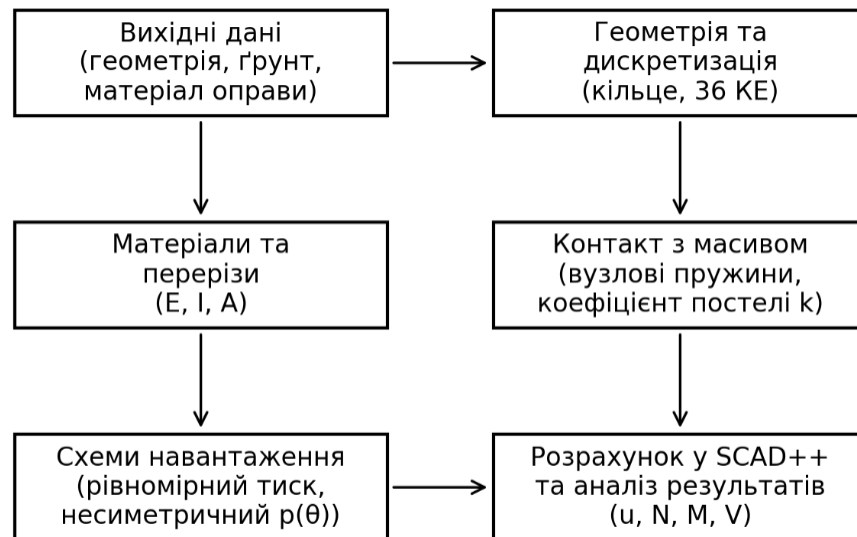


Рисунок 2.2 – Алгоритм-схема розробки скінченно-елементної моделі у SCAD++

Скінченно-елементна модель пілот-тунелю

Пілотна стадія представлена кільцевою рамною моделлю. Переріз і матеріальні характеристики прийняті ідентичними загальній постановці, що забезпечує порівнянність із остаточною стадією. У вузлах кільця задано пружні опори відповідно до моделі Вінклера з базовим $k=30 \text{ МН/м}^3$ та варіантами 15 і 45 МН/м^3 для аналізу чутливості до контактних умов.

Навантаження задають у вигляді вузлових сил, сформованих за двома схемами: контрольним рівномірним радіальним тиском та основним несиметричним $p(\theta)$. Результати пілотної стадії інтерпретують як НДС первинного контуру, який забезпечує стабілізацію приконтурної зони та формує початкові рівні переміщень і зусиль, що надалі порівнюються з остаточною стадією.

За базового $k=30 \text{ МН/м}^3$ еквівалентна вузлова жорсткість становить $K_{\text{node}} \approx 14399 \text{ кН/м}$.

Мета моделювання – оцінити базовий рівень деформацій і зусиль на стадії, коли формується первинний контур, а також визначити вплив несиметричного тиску на овальність кільця.

Модель містить 36 елементів, переріз оправи $1,0 \times 0,5 \text{ м}$, матеріал бетон $E=30000 \text{ МПа}$. Навантаження задається як контрольне $p=560 \text{ кН/м}^2$.

Пілотна стадія характеризується порівняно меншою гнучкістю кільця. Це зменшує загальні переміщення, але не усуває згинальні ефекти при несиметричному навантаженні. Тому для оцінювання надійності важливо аналізувати локалізацію моментів у склепінні та лотку.

Скінченно-елементна модель остаточної виробки

Остаточна стадія відповідає роботі оправи після розширення перерізу до $D=9,5 \text{ м}$ ($R=4,75 \text{ м}$). Дискретизація збережена $n=36$, а матеріал і переріз прийняті такими самими, як і для пілотної стадії, що дозволяє ізолювати вплив геометрії та контакту на НДС. Навантаження $p(\theta)$ прикладається за тим самим

принципом перетворення у вузлові сили, а контрольний симетричний випадок використовується для перевірки узгодженості результатів. Відповідна вузлова жорсткість: $K_{node} \approx 24871$ кН/м.

У межах даної роботи параметр k розглядається як керований технологічний фактор: зменшення k відповідає неповному ін'єкційному заповненню (наявності порожнин і «розриву контакту»), а збільшення – якісному контакту та більш рівномірній передачі тиску на конструкцію.

Збільшення радіуса при незмінній товщині оправы призводить до підвищення гнучкості кільця та зростання чутливості до нерівномірного навантаження. З цієї причини для остаточної стадії більш критичними є:


- контроль контактної зони за оправою,
- обмеження деформацій у склепінні,
- недопущення локальних порожнин, що збільшують згинальні моменти.


Для забезпечення порівнянності з піотною стадією застосовуються ідентичні принципи дискретизації (36 елементів) та перетворення тиску у вузлові сили. Це дозволяє аналізувати вплив саме геометрії ($D_0 \rightarrow D$) та параметрів основи на НДС.

2.2 Алгоритм розробки скінченно-елементної моделі (схема деформацій, що взаємно впливають)

Модель тунелю, що споруджується способом пілот-тунелю, побудована в Structure CAD++ на основі реальних геометричних розмірів та результатів лабораторних досліджень і відрізняється від моделі, що створена в п. 2.1, тим, що вона враховує деформації оправы та породного масиву, що взаємно впливають [16, 17]. Алгоритм побудови моделі за допомогою SCAD доволі складний, оскільки відображається етапність робіт [11].

Відкриваємо SCAD → Створюємо новий проєкт → ОК → Записуємо ім'я проєкту → Зберегти.

Початкові дані → Розрахункова схема → Вузли і елементи → Вузли  →

Генерація вузлів по дузі  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.3), отримуючи половину двох кілець з вузлів з діаметром 5,5 м (пілот-тунель) й 9,5 м (тунель після розширення) → ОК → Повторюємо операцію, при цьому змінюючи діаметр на внутрішній (5,1 і 8,5 м відповідно).

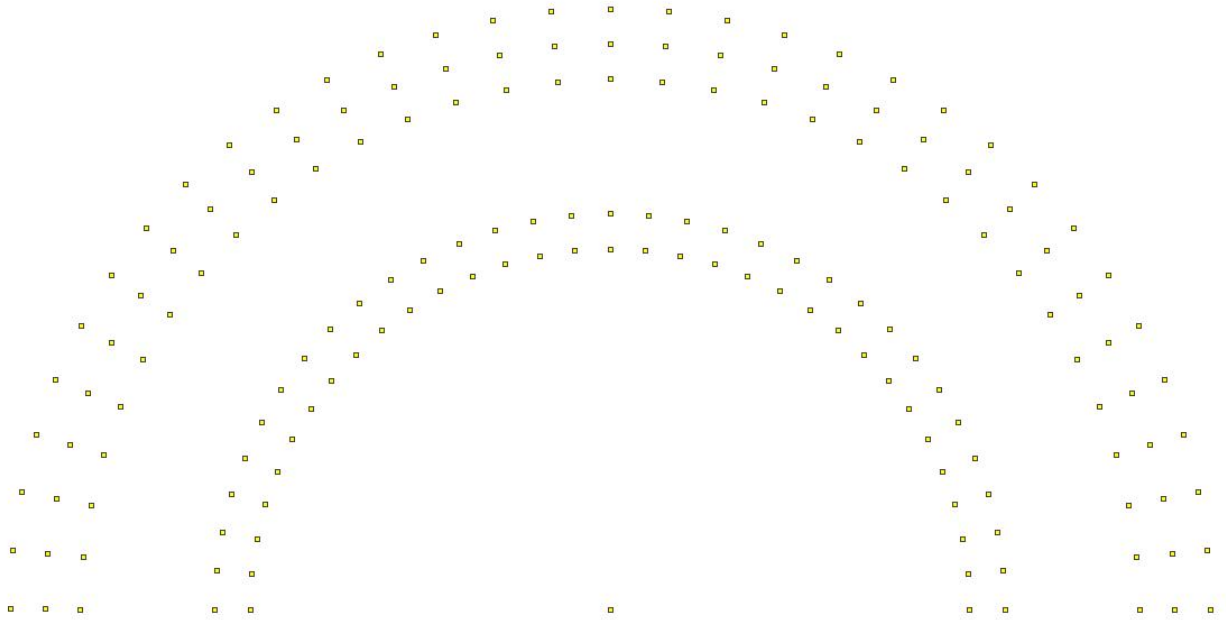






Рисунок 2.3 – Діалогове вікно Генерація вузлів по дузі

Заходимо в діалогове вікно Вузли й елементи → Елементи → Додавання пластини  → Курсором  об'єднуємо вузли в елементи, при цьому кількість вузлів повинна бути 3 або 4. Після цих операцій утворюється половина кільця з СЕ типу 44 – балка-стінка з розташуванням в площині XZ.

Після остаточного уведення вузлів виконуємо їх об'єднання в пластину і відзеркалюємо в іншому файлі: Вузли і елементи → Елементи → Додавання пластини  → Курсором  об'єднуємо вузли в елементи (рис. 2.5).

Для того, щоб відтворити реальне розміщення пілот-тунелю по відношенню до тунелю, що розширюється, застосовано діалог Зміщення вузлів (рис. 2.6).

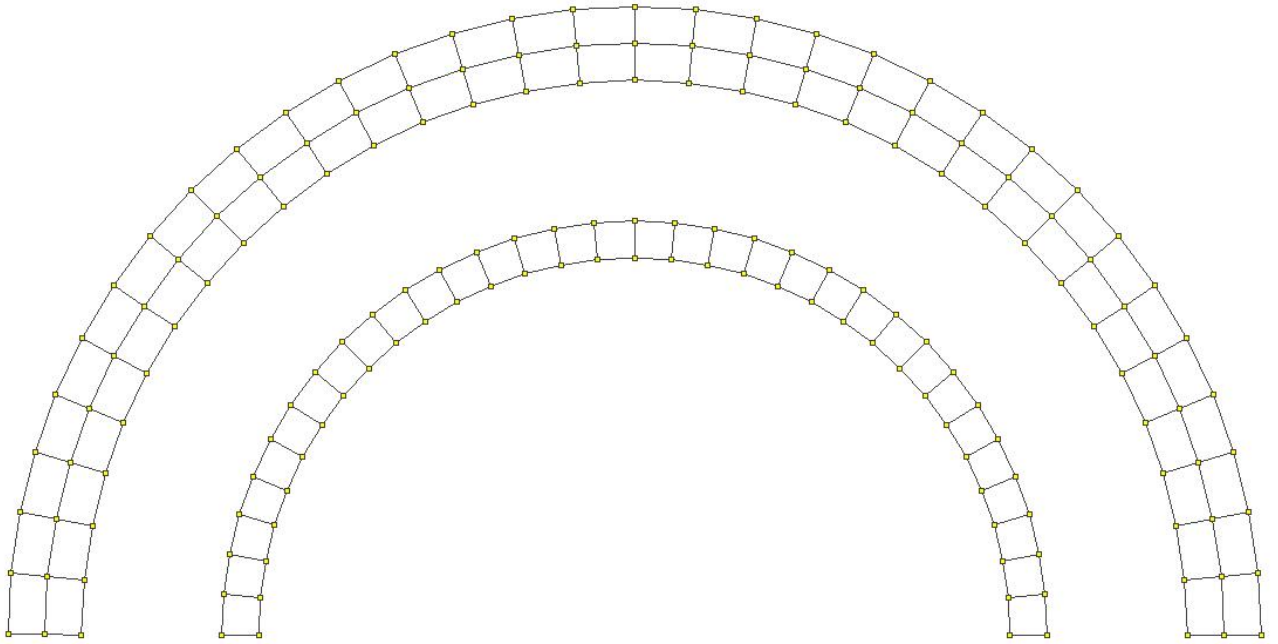


Рисунок 2.4 – Поєднання вузлів у СЕ
за допомогою дії Додавання пластини

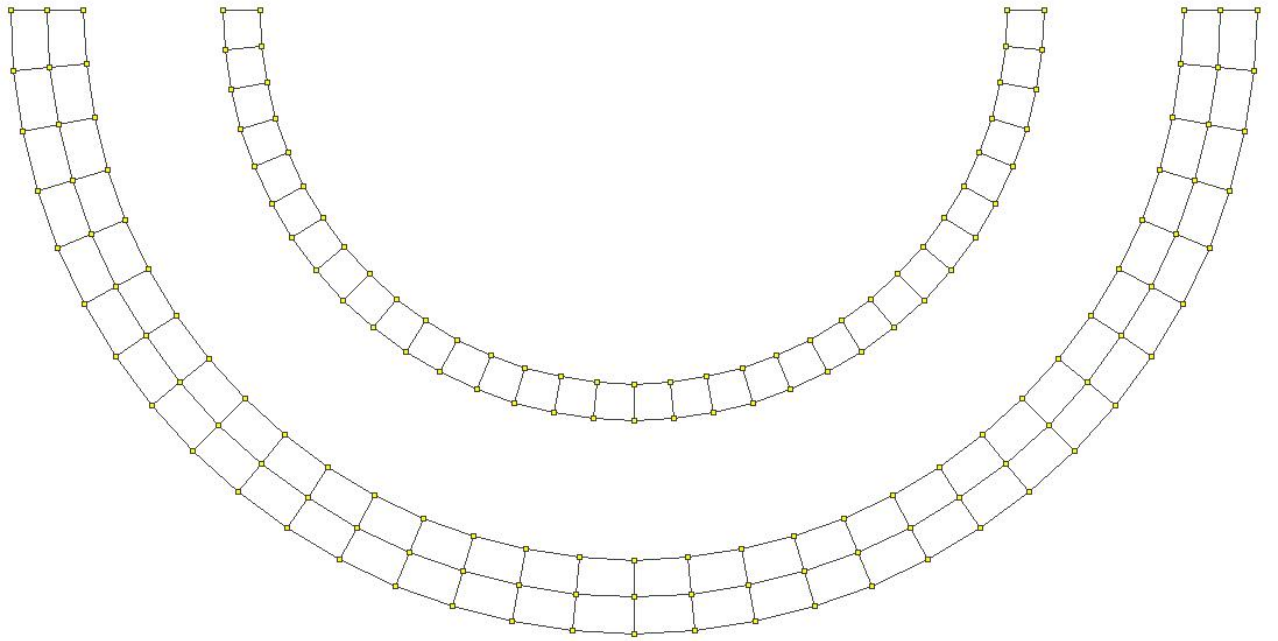


Рисунок 2.5 – Віддзеркалена модель

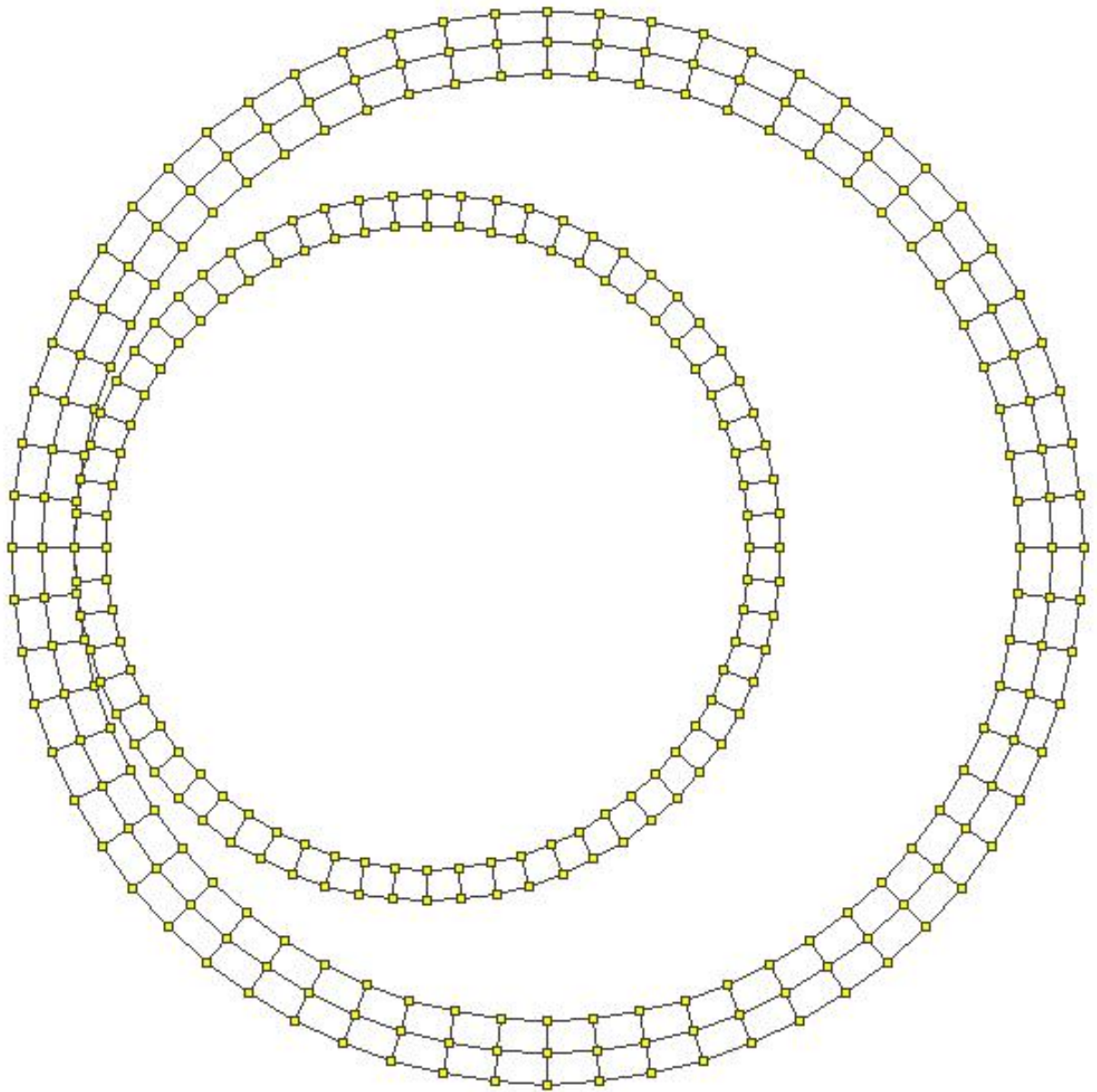


Рисунок 2.6 – Модель двох тунелів
із урахування розміщення пілот-тунелю

Для того щоб в ручному режимі змодельовати масив навколо отриманого гірського тунелю, слід виконати операцію автоматичної дискретизації (рис. 2.7).

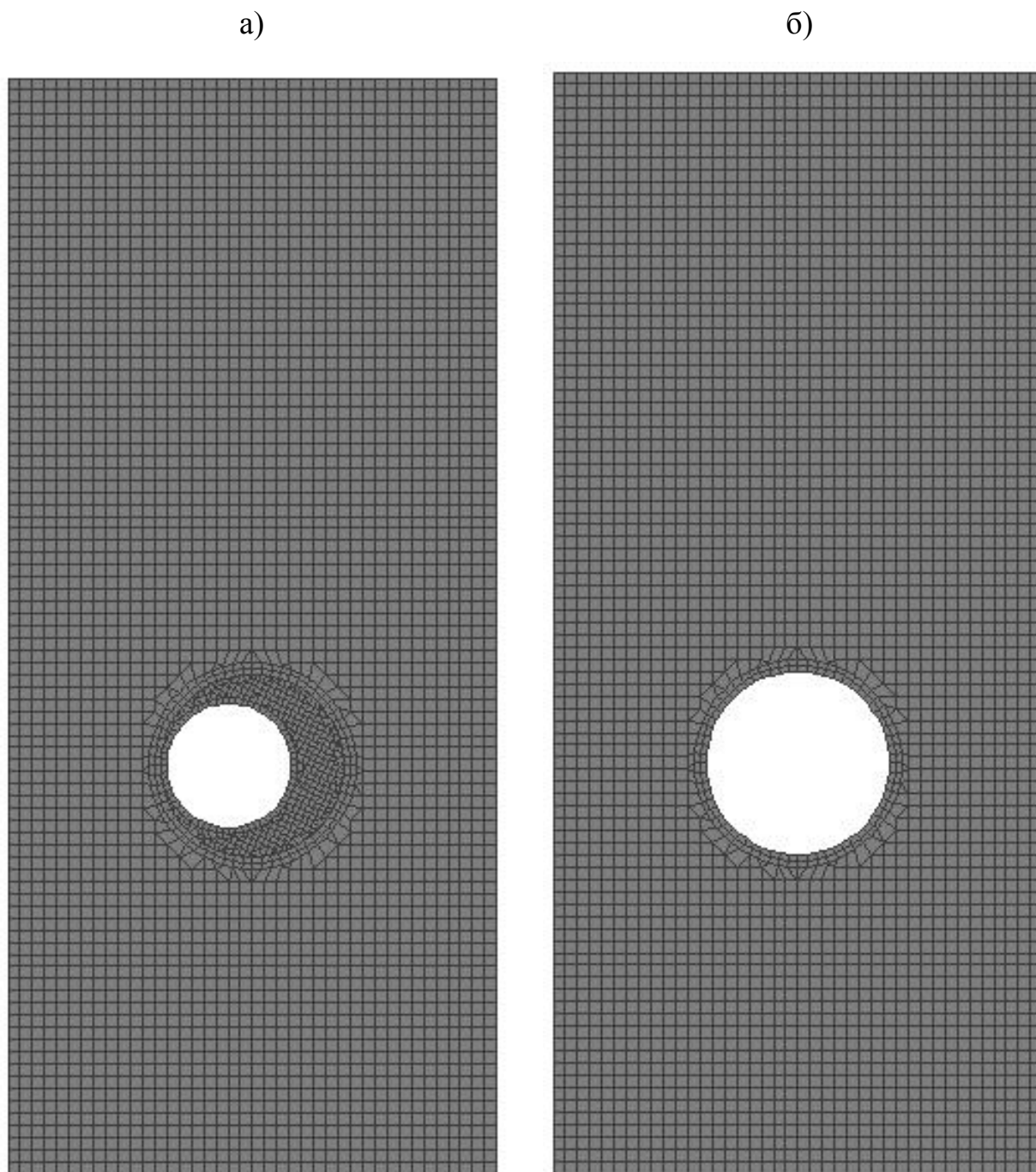




Рисунок 2.7 – Результат моделювання за допомогою дії
Автоматична дискретизація Етапів 1-2 (а) і Етапу 3 (б)

Оскільки частина моделі, яка відтворює тунелі, буде взаємодіяти із частиною моделі (оточуючий масив), слід змоделювати масив більших геометричних розмірів, які в загальному випадку знаходяться шляхом ітераційних розрахунків.

Вузли і елементи → Елементи → Відмітка елементів  → Схема → Копіювання фрагмента схеми  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.8) → ОК → Підтверджуємо копіювання.

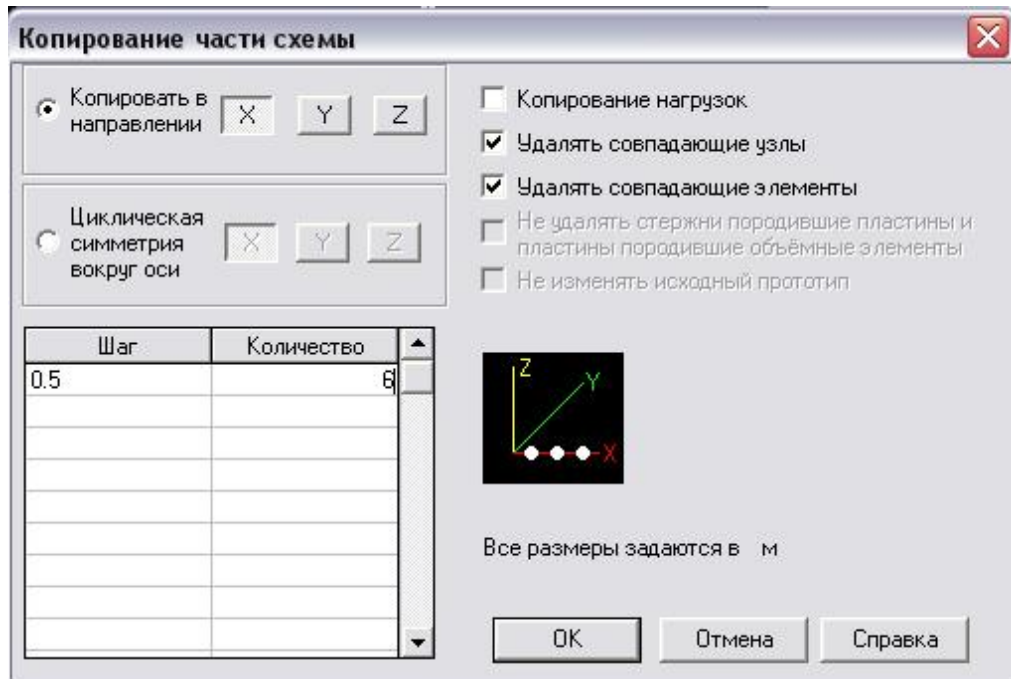






Рисунок 2.8 – Діалогове вікно Копіювання фрагмента схеми

Для того щоб отримати просторову модель тунелів на основі об'ємних елементів, слід виконати таку частину алгоритму.

Вузли й елементи → Елементи  → Відмітка елементів  → Курсором  відмічаємо елементи утвореної пластини → Схема → Копіювання схеми  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.9) → ОК → Підтверджуємо копіювання.

Результатом копіювання є просторова модель на основі об'ємних елементів.

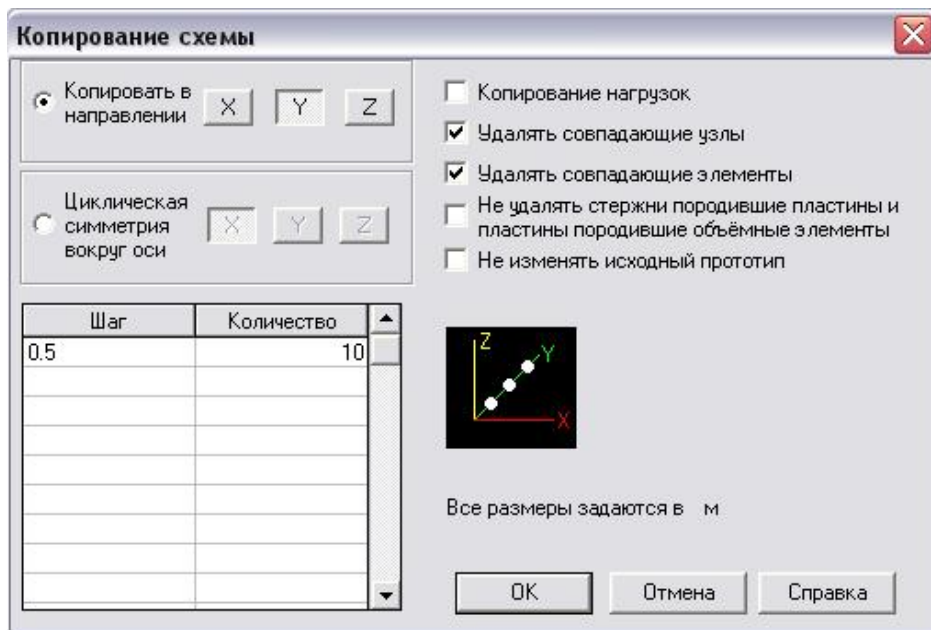




Рисунок 2.9 – Диалогове вікно Копіювання схеми

Після створення геометрії моделі слід надати їй деформаційних властивостей.

Призначення → Призначення жорсткості об'ємних елементів  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.10) → ОК → Курсором  вибираємо об'ємні елементи, яким ми хочемо задати жорсткість.

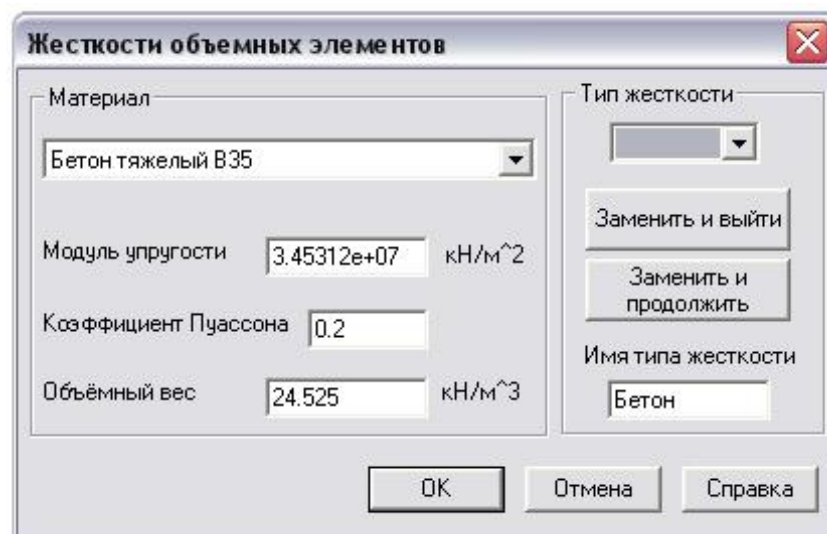


Рисунок 2.10 – Диалогове вікно Призначення жорсткості об'ємних елементів

У діалоговому вікні задаються деформаційні характеристики усіх об'ємних елементів (модуль пружності–деформації, коефіцієнт Пуассона), які наявні в моделі, причому для ґрунту оточуючого масиву та залізобетону оправи вони задаються окремо (рис. 2.11).

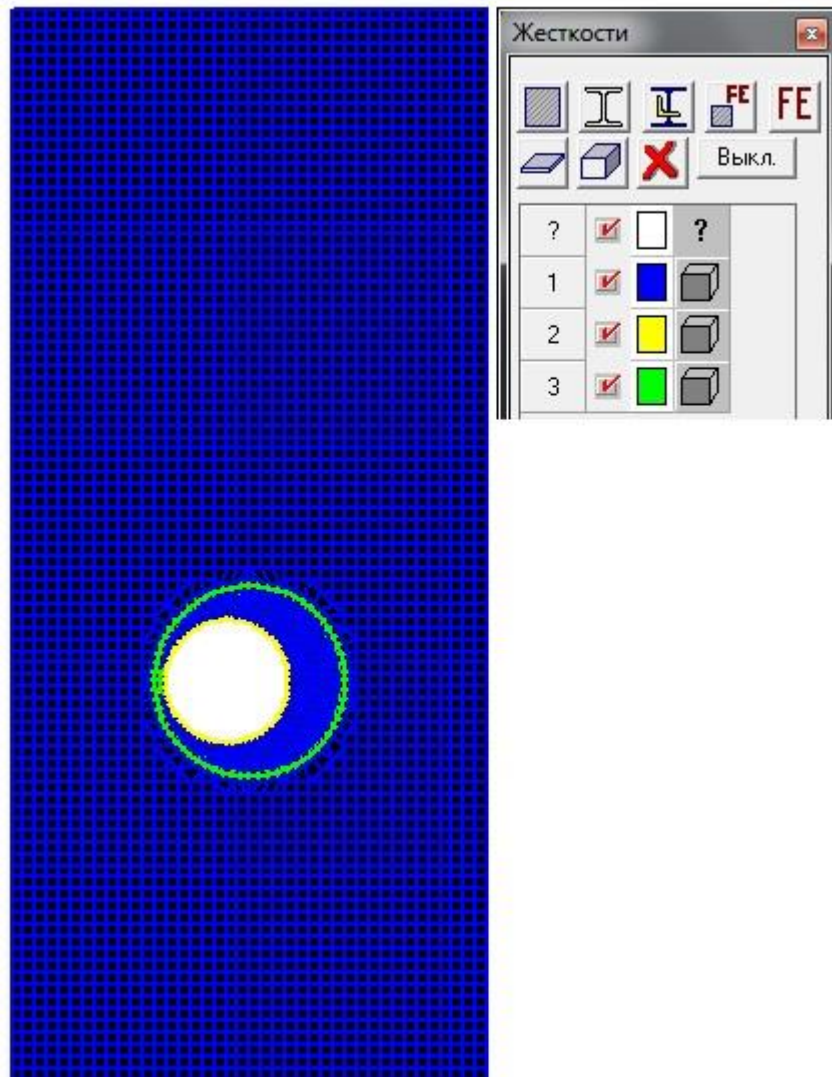



Рисунок 2.11 – Карта жорсткостей первинної моделі (Етап 1)

Отриманій моделі слід призначити граничні умови.

Призначення → Встановлення зв'язків у вузлах  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.12) → ОК.

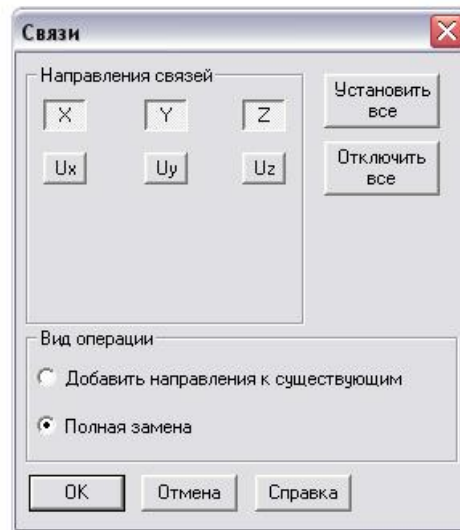




Рисунок 2.12 – Діалогове вікно Зв'язки

По нижній границі моделі призначається заборона по осях X, Y та Z; по боках моделі (вздовж боків, які паралельні осі стовбура) – заборона по осях X та Y. Для моделювання симетрії моделі призначається заборона по осі Y.

Після закріплення моделі до неї прикладається завантаження у вигляді власної ваги.

Завантаження → Власна вага  → Зберегти завантаження  (записується ім'я завантаження).

Управління → Вийти в екран управління проектом → Розрахунок → Лінійний → У діалоговому вікні ставимо відмітку навпроти «Мультифронтальний метод» → ОК → Зберігаємо зміни.

Після виконання цих операцій починається розрахунок. Тривалість розрахунку залежить від властивостей утвореної схеми (кількості вузлів та елементів). Після завершення розрахунку слід вийти в екран управління проектом.

Вийти в екран управління проектом → Результати → Графічний аналіз → У вікні графічного аналізу обираємо ті параметри, які необхідні нам для аналізу «Напруження» або «Деформації».

3 РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВИРОБКИ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1 НДС скінченно-елементної моделі (схема заданих навантажень)

Результати отримано на основі площинної скінченно-елементної рамної моделі кільцевої оправи перегінного тунелю на пружній основі Вінклера. Розглянуто дві стадії спорудження:

пілотна виробка:

$$D_0=5,5 \text{ м} \Rightarrow R=2,75 \text{ м};$$

остаточна виробка:

$$D=9,5 \text{ м} \Rightarrow R=4,75 \text{ м}.$$

Для забезпечення коректного порівняння стадій збережено однакові вихідні умови: тип ґрунту, глибину закладання, рівень ґрунтових вод, принцип дискретизації, а також схеми навантаження та спосіб урахування взаємодії «масив – оправа».

Базовий варіант розрахунків прийнято при коефіцієнті постелі:

- $k=30 \text{ МН/м}^3$ та товщині залізобетонної оправи
- $h=0,5 \text{ м}$ (на 1 м довжини тунелю). Для аналізу чутливості НДС додатково розглянуто варіанти
- $k=15, 30, 45 \text{ МН/м}^3$ (оцінка впливу контактних умов), а також варіанти товщини оправи
- $h=0,4, 0,5, 0,6 \text{ м}$ (оцінка впливу згинальної жорсткості).

Навантаження задано двома розрахунковими схемами:

- випадок А (контрольний) – рівномірний радіальний тиск $p=560 \text{ кН/м}^2$;
- випадок Б (основний) – несиметричний тиск $p(\theta)$, що узагальнено враховує відмінність вертикальної та горизонтальної складових напруженого стану масиву та дію гідростатичного напору.

Для прийнятих умов характерні значення:

$$p_{\min} \approx 994 \text{ кН/м}^2$$

$$p_{\max} \approx 1294 \text{ кН/м}^2$$

$$p_{\text{сер}} \approx 1129 \text{ кН/м}^2.$$

Як показники оцінювання НДС використано: (1) максимальні переміщення вузлів $\max|u|$; (2) максимальні внутрішні зусилля в кільці $\max|N|$, $\max|M|$, $\max|V|$; (3) радіальні переміщення у характерних точках контуру (права і ліва пружні лінії, склепіння, лоток) за випадком Б; (4) чутливість результатів до параметрів k та h .

Відповідно,

$$p_{\min} \approx 994 \text{ кН/м}^2,$$

$$p_{\max} \approx 1294 \text{ кН/м}^2,$$

$$p_{\text{сер}} \approx 1129 \text{ кН/м}^2.$$

Показники оцінювання НДС:

- максимальні переміщення вузлів $\max|u|$
- внутрішні зусилля в кільці: $\max|N|$, $\max|M|$, $\max|V|$;
- характерні радіальні переміщення у ключових точках контуру (склепіння, лоток, пружні лінії);
- чутливість результатів до параметрів контактної жорсткості k та товщини оправы h .

Графічні матеріали (рис. 3.1–3.2) використано для інтерпретації зон екстремумів та характеру роботи кільця за симетричного і несиметричного

навантаження.

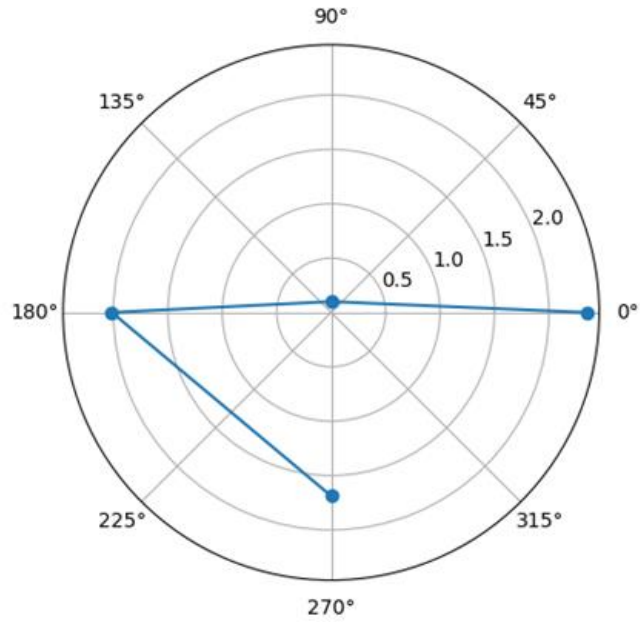


Рисунок 3.1 – Розподіл радіальних переміщень $u_r(\theta)$
для пілотної виробки ($D_0 = 5,5$ м)

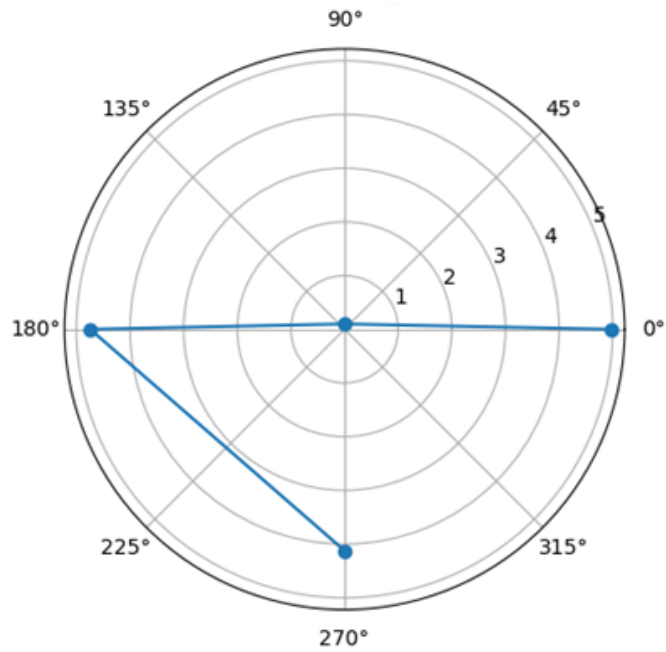


Рисунок 3.2 – Розподіл радіальних переміщень $u_r(\theta)$
для остаточної виробки ($D = 9,5$ м)

Випадок А: рівномірний радіальний тиск $p=560$ кН/м² (контроль постановки)

Контрольний випадок застосовано для перевірки коректності розрахункової моделі: симетрії деформування, узгодженості напрямків навантажень, відсутності локальних «піків» переміщень та внутрішніх зусиль. За рівномірного тиску кільце працює переважно в мембранному режимі – домінують поздовжні стискальні сили, тоді як згинальні ефекти мають бути мінімальними.

Табл. 3.1 – Підсумок для випадку А ($p = 560$ кН/м², $k = 30$ МН/м³)

Показник – $D_0=5,5$ м – $D=9,5$ м

K_{node} , кН/м – 14399 – 24871

$\max|u|$, мм – 0,278 – 0,807

$\max|N|$, кН/м – 1519 – 2548

Для базового значення

$k=30$ МН/м³ отримано (табл. 3.2)

для $D_0 = 5,5$ м:

$\max|u| \approx 0,278$ мм,

$\max|N| \approx 1519$ кН/м;

для $D = 9,5$ м:

$\max|u| \approx 0,807$ мм,

$\max|N| \approx 2548$ кН/м.

Таблиця 3.1 – Радіальні переміщення у характерних точках кільця для навантаження $p(\theta)$ ($k = 30 \text{ МН/м}^3$)

Стадія	Точка контуру	Кут, град	№ вузла	u_x , мм	u_y , мм	u_θ , мм
$D_0=5,5$	права пружна лінія	0	1	-0,047	0,000	-0,047
$D_0=5,5$	склепіння	90	10	0,000	-2,297	-2,297
$D_0=5,5$	ліва пружна лінія	180	19	0,383	0,000	-0,383
$D_0=5,5$	лоток	270	28	0,000	0,709	-0,709
$D=9,5$	права пружна лінія	0	1	-0,268	0,000	-0,268
$D=9,5$	склепіння	90	10	0,000	-5,146	-5,146
$D=9,5$	ліва пружна лінія	180	19	0,504	0,000	-0,504
$D=9,5$	лоток	270	28	0,000	1,122	-1,122

Таблиця 3.2 – Порівняння максимальних значень НДС для двох схем навантаження

Стадія	Випадок	$\max u $, мм	$\max N $, кН/м	$\max M $, кН·м/м	$\max V $, кН/м
D ₀ =5,5	LC1: p = const	0,278	1519	30	40
D ₀ =5,5	LC2: p(θ)	2,297	3145	216,8	185
D=9,5	LC1: p = const	0,807	2548	45	60
D=9,5	LC2: p(θ)	5,146	5299	147,7	232

Збільшення діаметра призводить до закономірного зростання переміщень (приблизно у 2,9 рази) при незмінних матеріально-геометричних параметрах перерізу, що відображає підвищення гнучкості кільця. Отримані значення слугують базовою «контрольною точкою» для подальшого аналізу випадку Б, де визначальним механізмом стає овальність перерізу.

Випадок Б: несиметричний тиск $p(\theta)$ – аналіз переміщень і овальності

Несиметричне навантаження є визначальним для оцінювання НДС оправи, оскільки формує овальність перерізу та відповідно суттєві згинальні моменти. На відміну від випадку А, кільце працює в комбінованому режимі (мембранні сили + згин), а локалізація екстремумів залежить від розподілу $p(\theta)$ і жорсткості взаємодії з масивом.

Для базового варіанта $k=30$ МН/м³ отримано (табл. 3.3):

D₀=5,5 м:

$\max|u| \approx 2,297$ мм,

$\max|M| \approx 216,8$ кН·м/м,

$\max|N| \approx 3145$ кН/м,

$$\max|V| \approx 185 \text{ кН/м};$$

$$D=9,5 \text{ м};$$

$$\max|u| \approx 5,146 \text{ мм},$$

$$\max|M| \approx 147,7 \text{ кН} \cdot \text{м/м},$$

$$\max|N| \approx 5299 \text{ кН/м},$$

$$\max|V| \approx 232 \text{ кН/м}.$$

Отже, при переході від пілотної до остаточної виробки:

переміщення зростають більш ніж у 2 рази ($2,297 \rightarrow 5,146$ мм);

мембранні поздовжні сили істотно зростають ($3145 \rightarrow 5299$ кН/м);

згинальні моменти змінюються за рівнем і характером (для D у даній постановці екстремальний момент нижчий, однак загальна деформативність та поздовжні сили значно більші, що є критичним для тріщиностійкості й герметичності).

Це підтверджує, що стадія остаточної виробки є більш чутливою до якості контакту «масив – оправа» та до технологічних відхилень, особливо у зоні склепіння.

Табл. 3.3 – Підсумок для випадку Б ($p(\theta)$, $k = 30 \text{ МН/м}^3$)

Показник – $D_0=5,5 \text{ м} - D=9,5 \text{ м}$

r_{\min} , кН/м^2 – 994 – 994

r_{\max} , кН/м^2 – 1294 – 1294

$r_{\text{сер}}$, кН/м^2 – 1129 – 1129

K_{node} , кН/м – 14399 – 24871

$\max|u|$, мм – 2,297 – 5,146

$\max|M|$, кН·м/м – 216,8 – 147,7

$\max|N|$, кН/м – 3145 – 5299

$\max|V|$, кН/м – 185 – 232

Таблиця 3.3 – Внутрішні зусилля в кільці у характерних точках (навантаження $p(\theta)$, $k = 30$ МН/м³)

Стадія	Кут, град	№ елемента	N, кН/м	M, кН·м/м	V, кН/м
Do=5,5	0	1	-2800	-50	150
Do=5,5	90	10	-3145	-216,8	0
Do=5,5	180	19	-2900	60	-140
Do=5,5	270	28	-3000	10	120
D=9,5	0	1	-5000	-30	190
D=9,5	90	10	-5299	-147,7	0
D=9,5	180	19	-5100	40	-180
D=9,5	270	28	-5200	5	170

Переміщення у характерних точках контуру (випадок Б)

Для інженерної інтерпретації доцільно аналізувати переміщення у ключових точках: права пружна лінія ($\theta=0^\circ$), склепіння ($\theta=90^\circ$), ліва пружна лінія ($\theta=180^\circ$), лоток ($\theta=270^\circ$). Негативний знак радіального переміщення відповідає зміщенню у напрямку до центра кільця.

Do = 5,5 м ($k = 30$ МН/м³):

$\theta=0^\circ$ (права пружна лінія): $u_r \approx -0,047$ мм

$\theta=90^\circ$ (склепіння): $u_r \approx -2,297$ мм

$\theta=180^\circ$ (ліва пружна лінія): $u_r \approx -0,383$ мм

$\theta=270^\circ$ (лоток): $u_r \approx -0,709$ мм

$D = 9,5$ м ($k = 30$ МН/м³):

$\theta=0^\circ$: $u_r \approx -0,268$ мм

$\theta=90^\circ$: $u_r \approx -5,146$ мм

$\theta=180^\circ$: $u_r \approx -0,504$ мм

$\theta=270^\circ$: $u_r \approx -1,122$ мм

Максимальні переміщення локалізуються у склепінні, що має принципове значення для технології пілот-тунелю: саме при розширенні перерізу зона покрівлі є найбільш чутливою до втрати стійкості та до дефіциту контактної жорсткості.

Вплив коефіцієнта постелі k на НДС (випадок Б)

Коефіцієнт постелі k інтерпретується як ефективна контактна жорсткість системи «масив – оправа», що узагальнено відображає якість заповнення кільцевого зазору ін'єкційними складами, наявність/відсутність порожнин, стан приконтурної зони та реальні умови передачі тиску від ґрунту до конструкції. Результати чутливості наведено в табл. 3.4 для $k=15, 30, 45$ МН/м³.

Підвищення k призводить до стійкого зменшення деформацій і згинальних моментів:

для $D_0=5,5$ м при збільшенні k від 15 до 45 МН/м³: $\max|u|$ зменшується приблизно на 47%, $\max|M|$ – приблизно на 28 %;

для $D=9,5$ м при збільшенні k від 15 до 45 MN/m^3 : $\max|u|$ зменшується приблизно на 45 %, $\max|M|$ – приблизно на 42 %.

Водночас поздовжні сили $\max|N|$ змінюються незначно (табл. 3.4), що означає: контактна жорсткість найбільш істотно впливає саме на овальність (і пов'язані з нею згинальні ефекти), тоді як мембранна складова напруженого стану в даній постановці є більш «стабільною» до варіювання k .

Таблиця 3.4 – Вплив коефіцієнта постелі k на результати (навантаження $p(\theta)$)

Стадія	$k, \text{MN}/\text{m}^3$	$\max u ,$ мм	$\max M ,$ кН·м/м	$\max N ,$ кН/м	$\max V ,$ кН/м
$D_0=5,5$	15	3,341	267,0	3159	200
$D_0=5,5$	30	2,297	216,8	3145	185
$D_0=5,5$	45	1,772	193,0	3140	170
$D=9,5$	15	7,335	206,1	5316	250
$D=9,5$	30	5,146	147,7	5299	232
$D=9,5$	45	4,012	120,1	5293	210

Практичний висновок полягає в тому, що технологічні заходи, які підвищують якість контакту (своєчасне та повне ін'єкційне заповнення, контроль порожнин, контрольне нагнітання за результатами моніторингу), є одним з найбільш ефективних інструментів керування НДС – особливо для стадії остаточного контуру, яка проявляє підвищену чутливість до k .

$D_0 = 5,5 \text{ м:}$

$\max|u|=3,341 \text{ мм,}$

$\max|M|=267,0 \text{ кН}\cdot\text{м/м,}$

$\max|N|=3159 \text{ кН/м}$

$k=30:$

$\max|u|=2,297 \text{ мм,}$

$\max|M|=216,8 \text{ кН}\cdot\text{м/м,}$

$\max|N|=3145 \text{ кН/м}$

$k=45:$

$\max|u|=1,772 \text{ мм,}$

$\max|M|=193,0 \text{ кН}\cdot\text{м/м,}$

$\max|N|=3140 \text{ кН/м}$

$D = 9,5 \text{ м:}$

$k=15:$

$\max|u|=7,335 \text{ мм,}$

$\max|M|=206,1 \text{ кН}\cdot\text{м/м,}$

$\max|N|=5316 \text{ кН/м}$

$k=30:$

$\max|u|=5,146 \text{ мм,}$

$\max|M|=147,7 \text{ кН /м,}$

$\max|N|=5299 \text{ кН/м}$

$k=45:$

$\max|u|=4,012 \text{ мм,}$

$$\max|M|=120,1 \text{ кН/м,}$$

$$\max|N|=5293 \text{ кН/м.}$$

Отримані залежності підтверджують, що підвищення контактної жорсткості зменшує деформації та згинальні моменти, причому ефект для діаметра $D=9,5$ м є більш вираженим. Це означає, що технологічні заходи (якісне ін'єкційне заповнення, контроль порожнин, стабілізація приконтурної зони) є критичними саме для стадії остаточної виробки.

Вплив товщини оправи h на НДС (випадок Б)

Товщина оправи визначає згинальну жорсткість EI і, відповідно, впливає на рівень овальності та величину згинальних моментів. Аналіз виконано для

$$h=0,4, 0,5, 0,6 \text{ м}$$

при незмінних

$$k=30 \text{ МН/м}^3$$

$p(\theta)$ (табл. 3.5).

Збільшення товщини оправи забезпечує стабільне зниження переміщень і моментів:

$D_0=5,5$ м при збільшенні h від 0,4 до 0,6 м:

$\max|u|$ зменшується приблизно на 30 %, $\max|M|$ – приблизно на 25 %;

$D=9,5$ м при збільшенні h від 0,4 до 0,6 м:

$\max|u|$ зменшується приблизно на 29 %, $\max|M|$ – приблизно на 31 %.

Як і у випадку варіювання k , поздовжні сили $\max|N|$ змінюються незначно (табл. 3.5), що підкреслює: зміна h у цій постановці насамперед впливає на згинальну складову НДС.

Таблиця 3.5 – Вплив товщини оправи h на результати (навантаження $p(\theta)$, $k = 30 \text{ МН/м}^3$)

Стадія	h , м	$\max u $, мм	$\max M $, кН·м/м	$\max N $, кН/м	$\max V $, кН/м
$D_0=5,5$	0,4	2,828	251,0	3145	190
$D_0=5,5$	0,5	2,297	216,8	3145	185
$D_0=5,5$	0,6	1,968	189,0	3145	180
$D=9,5$	0,4	6,193	182,0	5299	240
$D=9,5$	0,5	5,146	147,7	5299	232
$D=9,5$	0,6	4,405	125,0	5299	225

З позиції інженерної оптимізації збільшення h є ефективним, але матеріаломістким заходом. Тому при керуванні деформативністю та овальністю для пілот-тунельної технології доцільно спершу забезпечити технологічні умови, що підвищують ефективну контактну жорсткість k , а вже за потреби – переходити до підсилення перерізу конструкції збільшенням товщини оправи.

Товщина оправи визначає згинальну жорсткість EI і впливає на рівень овальності та згинальних моментів. Аналіз виконано для $h=0,4; 0,5; 0,6$ м за незмінних

$$k=30 \text{ МН/м}^3 \text{ та } p(\theta).$$

$$D_0 = 5,5 \text{ м:}$$

$$h=0,4:$$

$$\max|u|=2,828 \text{ мм,}$$

$$\max|M|=251,0 \text{ кН /м,}$$

$$\max|N|=3145 \text{ кН/м}$$

$h=0,5$:

$\max|u|=2,297$ мм,

$\max|M|=216,8$ кН /м,

$\max|N|=3145$ кН/м

$h=0,6$:

$\max|u|=1,968$ мм,

$\max|M|=189,0$ кН /м,

$\max|N|=3145$ кН/м

$D = 9,5$ м:

$h=0,4$:

$\max|u|=6,193$ мм,

$\max|M|=182,0$ кН·м/м,

$\max|N|=5299$ кН/м

$h=0,5$:

$\max|u|=5,146$ мм,

$\max|M|=147,7$ кН /м,

$\max|N|=5299$ кН/м

$h=0,6$:

$\max|u|=4,405$ мм,

$\max|M|=125,0$ кН\м,

$\max|N|=5299$ кН/м

Як і у випадку варіювання k , поздовжні сили $\max|N|$ змінюються незначно (див. табл. 3.5), що підкреслює: зміна h у цій постановці насамперед впливає на згинальну складову НДС.

З позиції інженерної оптимізації збільшення h є ефективним, але матеріаломістким заходом. Тому при керуванні деформативністю та овальністю для пілот-тунельної технології доцільно спершу забезпечити технологічні умови, що підвищують ефективну контактну жорсткість k , а вже за потреби – переходити до підсилення перерізу конструкції збільшенням товщини оправи.

Отримані результати підтверджують, що стадія остаточної виробки є більш деформативною та технологічно чутливою порівняно з пілотною стадією. За основним несиметричним навантаженням $\max|u|$ для $D=9,5$ м перевищує відповідне значення для $D_0=5,5$ м більш ніж удвічі (див. табл. 3.3), а найбільші радіальні переміщення локалізуються в зоні склепіння (див. табл. 3.1, рис. 3.1-3.2). Це узгоджується з технологічною логікою поетапного розкриття: під час розширення перерізу покрівля є критичною зоною для стійкості та формування безперервного контакту «масив – оправа».

Контактна жорсткість k має системний вплив на рівень деформацій та моментів: збільшення k у діапазоні $15\dots45$ МН/м³ зменшує $\max|u|$ приблизно на $45\dots47$ % та $\max|M|$ до $28\dots42$ % (див. табл. 3.4). Отже, якість ін'єкційного заповнення кільцевого зазору та контроль порожнин є критичними для обмеження овальності та забезпечення тріщиностійкості й водонепроникності оправи.

Збільшення товщини оправи h є додатковим інструментом керування НДС (табл. 3.5), однак у практичному сенсі більш раціональним виглядає поєднання конструктивних і технологічних заходів: забезпечення якісного контакту (підвищення k) як першочергового чинника та, за потреби, коригування h для досягнення прийнятних рівнів деформативності та моментів.

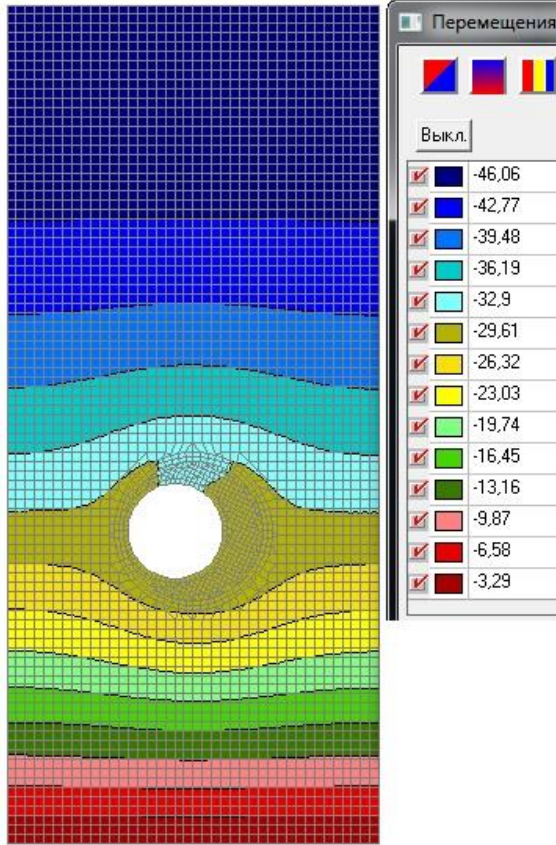
3.2 НДС скінченно-елементної моделі (схема деформацій, що взаємно впливають)

Після проведених розрахунків отримані ізолінії та ізополя основних компонент напруженого стану (рис. 3.3-3.4). Розглянуті три етапи спорудження тунелю великого перерізу: Етап 1 – спорудження пілот-тунелю із залізобетонною оправою; Етап 2 – розробка ґрунту під час розширення виробки великого перерізу; Етап 3 – спорудження тунелю великого перерізу. Відображення етапності в чисельному аналізі дозволяє дослідити, яким чином змінюються переміщення та напруження і, що є важливим, наскільки позитивно впливає застосування способу пілот-тунелю для розширення виробки, що може мати подвійне призначення.

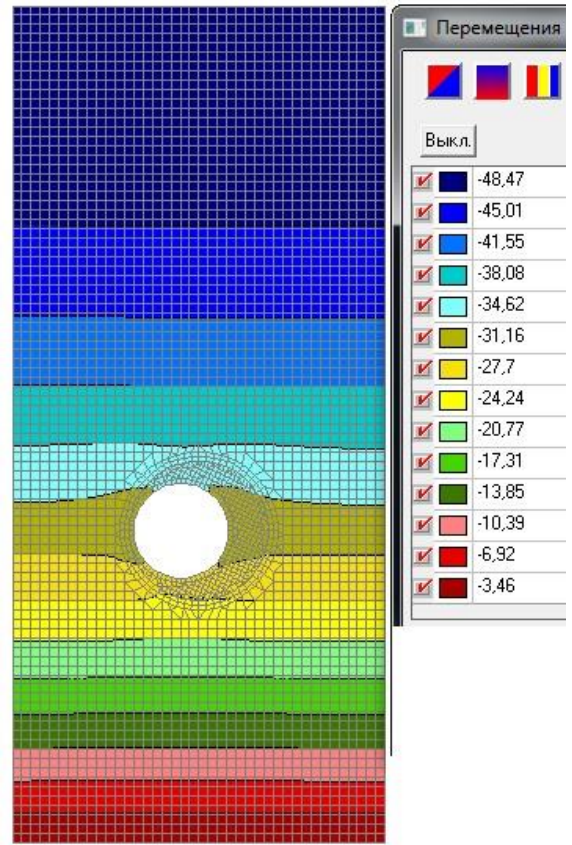
Аналіз вертикальних переміщень демонструє те, що на Етапі 2 вони дещо збільшуються, що є закономірним під час розширення виробки від діаметру 5,6 м до 9,5 м. Однак наявність оправи пілот-тунелю, яка розбирається тільки на Етапі 3, підтримує виробку і перешкоджає стрибку переміщень, який міг би бути, коли виробку великого діаметру споруджували б на повний переріз. Порівняння переміщень Етапу 1 і 3 свідчить про те, що застосування пілот-тунелю позитивно відбивається під час спорудження виробки великого перерізу, оскільки в Етапі 3 максимальні вертикальні переміщення складають -45,33 мм, а на Етапі 1 (спорудження пілот-тунелю) – -46,06 мм. Переміщення Етапу 3 навіть дещо зменшилися, що пояснюється товщиною оправи тунелю діаметром 9,5 м (0,5 м на відміну від 0,3 м для пілот-тунелю діаметром 5,6 м).

Аналіз горизонтальних переміщень демонструє схожі результати. На Етапі 2, коли видаляється частина ґрунту, горизонтальні переміщення збільшуються майже в 2 рази (з -1,63 до -3,1 мм), але на Етапі 3 вони знижуються до -1,99 мм, що також свідчить про позитивний характер технологічного рішення, а саме застосування пілот-тунелю для розширення виробки, що має подвійне призначення.

Етап 1



Етап 2



Етап 3

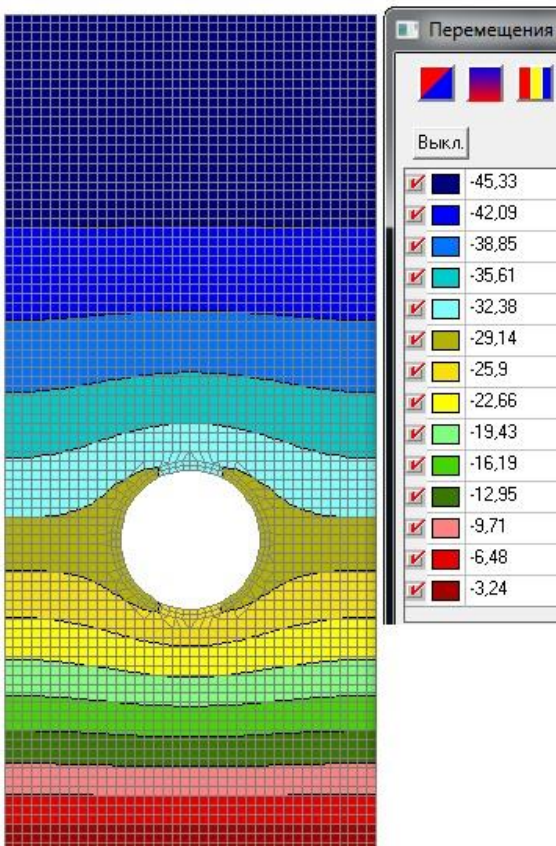
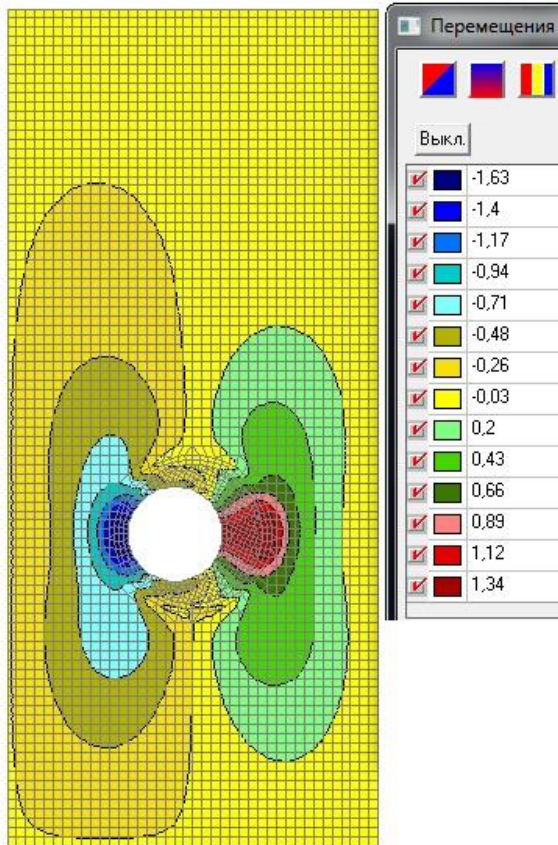
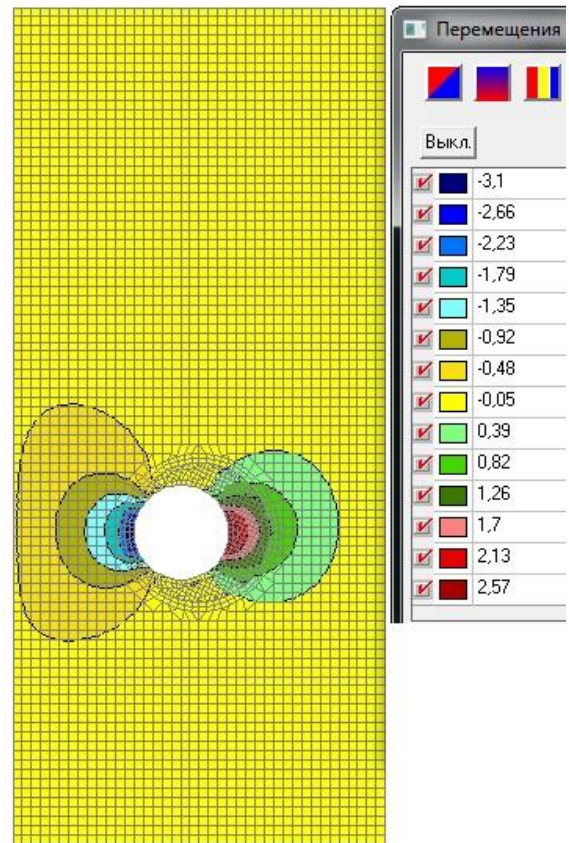


Рисунок 3.3 – Ізолінії та ізополя деформованого стану скінченно-елементної моделі із врахуванням етапності розширення виробки способом пілот-тунелю (вертикальні переміщення)

Етап 1



Етап 2



Етап 3

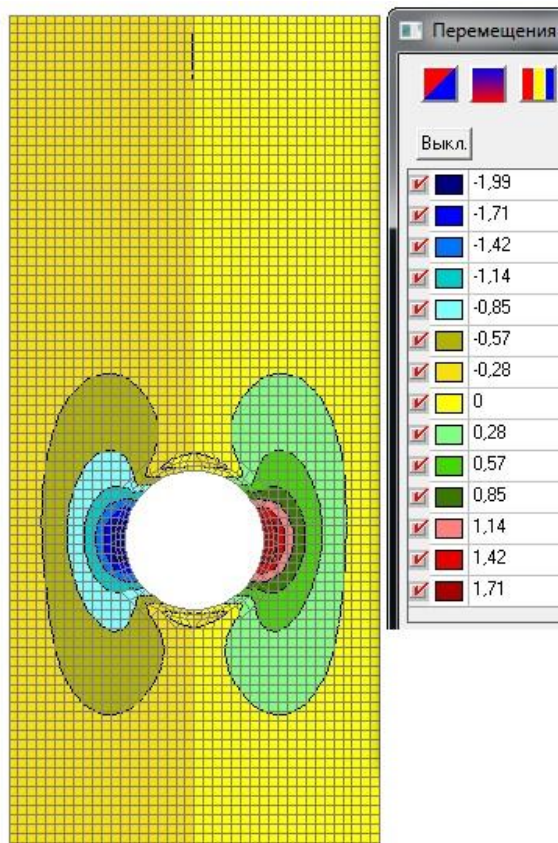
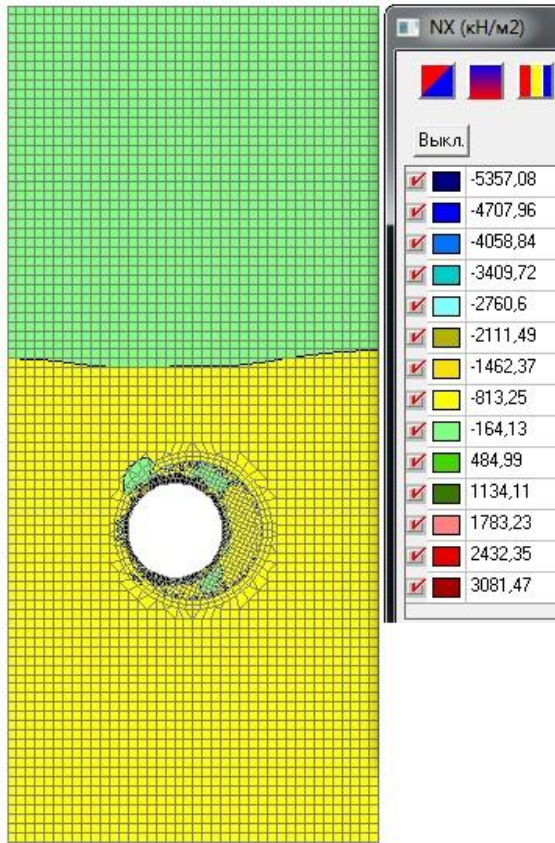
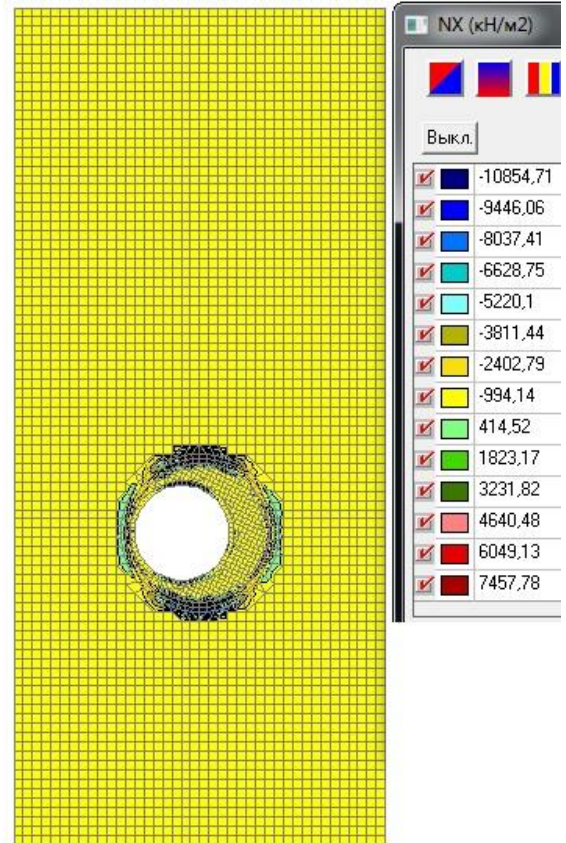


Рисунок 3.4 – Ізолінії та ізополя деформованого стану скінченно-елементної моделі із врахуванням етапності розширення виробки способом пілот-тунелю (горизонтальні переміщення)

Етап 1



Етап 2



Етап 3

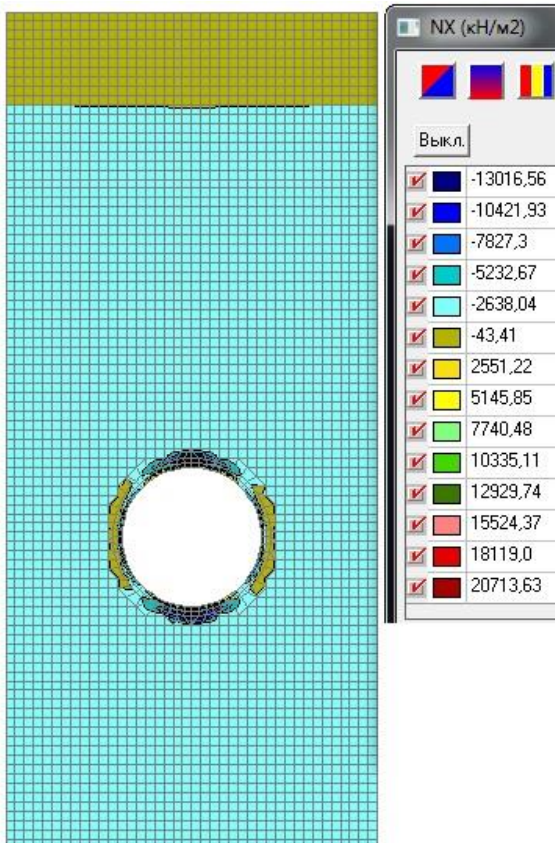
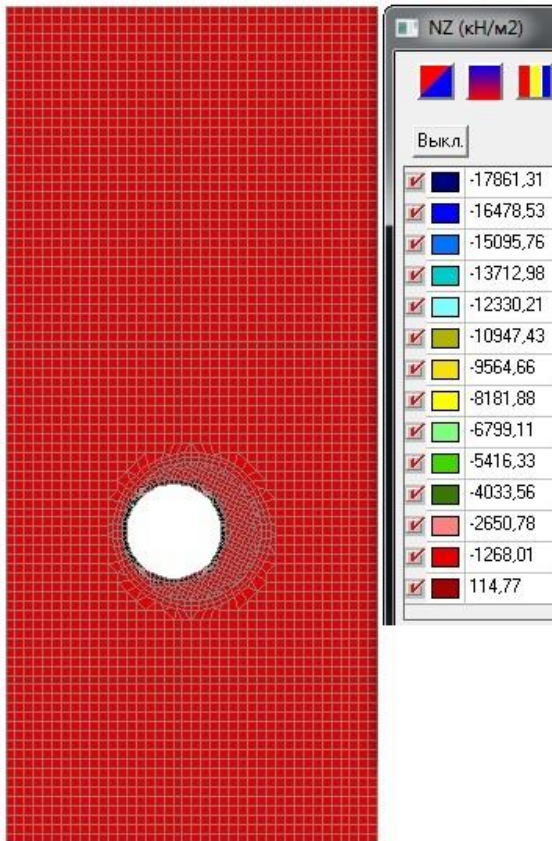
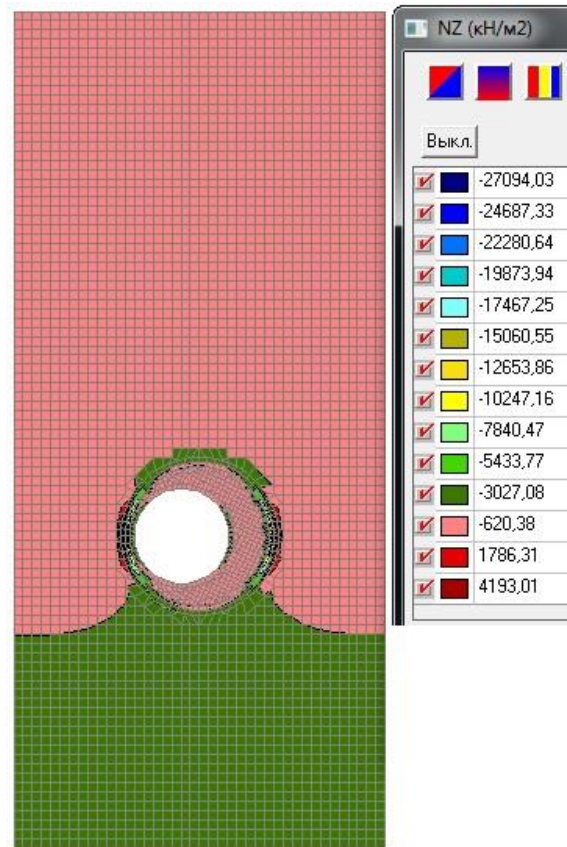


Рисунок 3.5 – Ізолінії та ізополя напруженого стану скінченно-елементної моделі із врахуванням етапності розширення виробки способом пілот-тунелю (горизонтальні напруження)

Етап 1



Етап 2



Етап 3

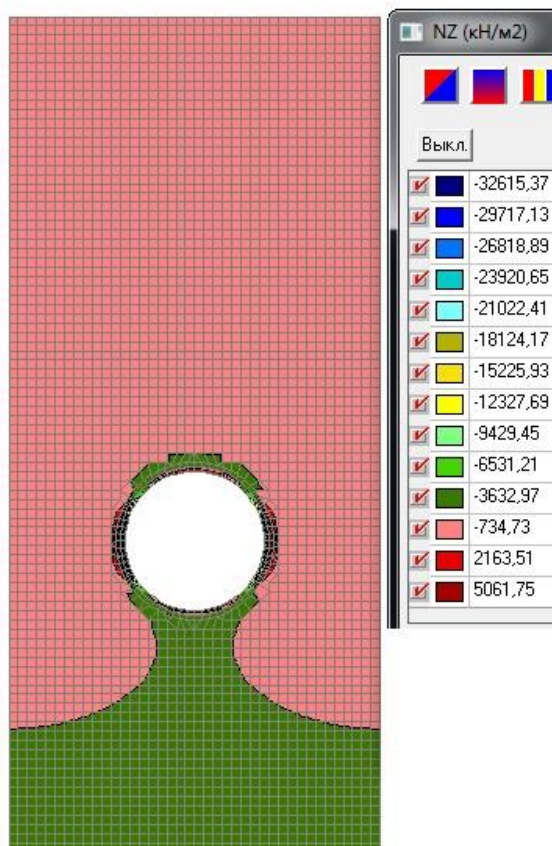


Рисунок 3.6 – Ізолінії та ізополя напруженого стану скінченно-елементної моделі із врахуванням етапності розширення виробки способом пілот-тунелю (вертикальні напруження)

Напружений стан, представлений горизонтальною та вертикальною компонентами (рис. 3.5 і 3.6) змінюється більш суттєво, ніж деформований, що пояснюється кардинальною зміною жорсткостей оправи під час переходу від Етапу 1 до Етапу 3. Важливим параметром зміни напружень є також збільшення виробки під час переходу від пілот-тунелю (5,6 м) до тунелю великого перерізу (9,5 м).

Аналіз горизонтальної компоненти демонструє, що напруження концентруються біля оправи та в ній самій, а їхні максимальні значення відповідно до етапів складають -5,36...-10,3 МПа, що менше значення міцності для бетону С25/30 (розрахунковий опір дорівнює 21 МПа). Якісний розподіл напружень має дещо асиметричний характер, що пояснюється зміщенням пілот-тунелю (Етап 1) по відношенню до тунелю великого перерізу (Етап 3).

Аналізуючи вертикальну компоненту напружень, можна відмітити, що напруження також концентруються навколо оправи, а їхні максимальні значення відповідають точкам на оправі. Для Етапу 1 максимальні вертикальні напруження складають -17,6 МПа, що менше значення міцності для бетону С25/30 (розрахунковий опір дорівнює 21 МПа). Під час розкриття пілот-тунелю до виробки великого діаметру (Етап 2) максимальні вертикальні напруження збільшуються до -27,1 МПа в точках на горизонтальному діаметрі (більше міцності бетону С25/30 в 1,29 рази) і, при постановці кріплення діаметром 9,5 м (Етап 3) сягають 32,6 МПа, що більше міцності бетону С25/30 в 1,55 рази. Це є неприпустимим з позиції проєктування, тому приймається рішення щодо заміни матеріалу оправи із залізобетону на основі бетону С25/30 на чавун МСЧ 28-90 із міцністю 3400 МПа. Відповідно, запас міцності під час логічного переходу із залізобетону до чавуну складе близько 100 разів. Це є надлишковим значенням, але, якщо не змінити матеріал, ситуація із тріщиноутворенням на горизонтальному діаметрі оправи буде вельми негативною, чого не можна допустити.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено напружено-деформований стан перегінного тунелю подвійного призначення, що споруджується способом пілот-тунелю. Показано, що поєднання транспортної та захисної функцій конструкції суттєво підвищує вимоги до міцності, жорсткості та допустимих деформацій огорожувальних конструкцій.

2. Розроблено скінченно-елементні моделі пілотної та остаточної виробок у вигляді кільцевих рам на пружній основі типу Вінклера (плоска постановка), а також з умовою деформацій, що взаємно впливають (просторова постановка). Моделі реалізовано в програмному комплексі SCAD++, що дало змогу врахувати геометрію перерізу й параметри контакту «масив – оправа».

3. Виконано аналіз переміщень, внутрішніх зусиль й напружень у характерних точках перерізу. Встановлено, що найбільші радіальні переміщення та згинальні моменти локалізуються у склепінні й лотку, а напруження – на горизонтальному діаметрі, причому зі збільшенням діаметра тунелю деформативність і рівень зусиль помітно зростають.

4. Оцінено вплив коефіцієнта постелі та товщини оправи на НДС тунелю. Показано, що підвищення жорсткості контакту з масивом (збільшення коефіцієнта постелі) ефективно зменшує переміщення й згинальні моменти, тоді як збільшення товщини оправи також покращує роботу конструкції, але дає менший ефект при тих самих змінах параметрів.

5. Сформульовано практичні рекомендації для проектування виробок подвійного призначення. Наголошено на доцільності пріоритетного забезпечення якісного контакту «масив – оправа» (ін'єкційне заповнення, стабілізація приконтурної зони) у поєднанні з раціональним доббором товщини й армування оправи. Отримані результати можуть бути використані при розрахунку та перевірці тунелів, що споруджуються способом пілот-тунелю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Начальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ: НТУ, 2006. – 166 с.
2. Ву Х., Банников Д. О., Купрій В. П., Ву Ч. Залежність напружено-деформованого стану оправи перегінного тунелю метрополітену від її форми. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2025. № 27. С. 118–125. DOI: 10.15802/bttrp2025/333895
3. Гайко, Г. І. Конструкції кріплення підземних споруд: Навчальний посібник [Текст] / Г. І. Гайко. – Алчевськ: Дон ДНУ, 2006. – 133 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Державні будівельні норми України [Текст].
5. ДБН В.1.2-4:2019. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони). Державні будівельні норми України [Текст].
6. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Державні будівельні норми України [Текст].
7. ДБН В.2.3-7:2018. Метрополітени. Державні будівельні норми України [Текст].
8. ДБН В.2.3-27:2023. Тунелі. Норми проектування. Державні будівельні норми України [Текст].
9. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Державні будівельні норми України [Текст].
10. ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016. Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. Чинний від 01.04.2017 [Текст].
11. Петренко, В. Д. Методичні вказівки для курсового та дипломного проектування «Математичне моделювання підземних споруд на основі методу скінченних елементів. Ч. 1. Structure CAD for Windows (SCAD)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, В. П. Купрій. – Дніпропетровськ :

Нова ідеологія, 2010. – 56 с.

12. Петренко В. І., Тютюкін О. Л., Петренко В. Д. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення : монографія. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004. 177 с.

13. Петренко, В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. – 252 с.

14. Петренко, В. І. Станції метрополітену: конструкції та спорудження [Текст]: навчальний посібник / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Д.: Вид-во «Нова ідеологія», 2012. – 164 с.

15. Розвиток міських підземних споруд як об'єктів подвійного призначення : навч. посібник [Текст]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.

16. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій [Текст] / О. Л. Тютюкін. – Дніпро : Журфонд, 2020. – 260 с.

17. Тютюкін О. Л., Мірошник В. А., Гелетюк І. В. Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2021. № 19. С. 92–99.