

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

ОС «бакалавр»

(ступінь вищої освіти)

на тему: Обґрунтування вибору параметрів оправи при спорудженні тунелю у скельних ґрунтах

за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»

зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: МТ2111

(підпис студента)

/ /Тимур ГУРКОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

(підпис)

/ /доц. Володимир КУПРІЙ

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультант:

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

(назва розділу)

(підпис)

/ проф. каф. Олег САБЛІН /

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент

(підпис)

Дніпро – 2025 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Building, architecture and infrastructure

(faculty)

Transport infrastructure

(department)

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

on the topic; Justification of the lining parameters choice during the construction of a tunnel in rock soils

according to educational curriculum Bridges and vehicular traffic tunnels

in the Specialization: 192 Building and civil engineering

(Specialization and its code)

Done by the student of the group: MT2111 / /Tymur GURKOV/

(name, surname)

Scientific Supervisor: / Associate Prof. Volodymyr KUPRII /

(position, name, surname)

Normative controller : / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /

(position, name, surname)

Supervisor
Occupational health
and safety in emergencies

(Chapter title heading)

/ Prof. of Dept. Oleh SABLIN /

(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Бакалавр»

Освітня програма: «Мости і транспортні тунелі»

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

_____ **Олексій ТЮТЬКІН**

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ОС «бакалавр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Гурков Тимур Єгорович

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування вибору параметрів оправи при спорудженні тунелю у скельних ґрунтах»

Керівник роботи: Купрій Володимир Павлович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом від _____ «03» березня 2023 р. № 328ст

2. Строк подання студентом роботи: «16» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов Дніпровського метрополітену, конструкцій оправ перегінного тунелю різної форми та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

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

Вступ. Розділ 1. Аналіз стану питання визначення параметрів оправи перегінного тунелю метрополітену. Розділ 2. Розробка розрахункової моделі для визначення параметрів оправи перегінного тунелю. Розділ 3. Визначення параметрів напружено-деформованого стану оправи перегінного тунелю. Розділ 4. Спорудження перегінного тунелю в умовах Дніпровського метрополітену. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Лист 1. Оправа перегінного тунелю. Лист 2. Розрахункова модель оправи тунелю. Лист 3. Параметри напружено-деформованого стану оправи тунелю. Лист 4. Спорудження перегінного тунелю.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Проф. каф. О. І. Саблін		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Розділ 1. Аналіз стану питання визначення параметрів оправи перегінного тунелю.	28.04.2025 – 04.05.2025	
2	Розділ 2. Розробка розрахункової моделі для визначення параметрів оправи перегінного тунелю метрополітену.	19.05.2025 – 25.05.2025	
3	Розділ 3. Визначення параметрів напружено-деформованого стану оправи. Розділ 4. Спорудження перегінного тунелю. Висновки. Оформлення ВКР.	09.06.2025 – 15.06.2025	
4	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	16.06.2025 – 22.06.2025	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	23.06.2025	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	24.06.2025 – 29.06.2025	

Студент

(підпис)

Тимур ГУРКОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Володимир КУПРІЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:

56 стор., 14 рис., 1 табл., 12 літературних джерел.

Об'єкт розробки – оправа перегінного тунелю метрополітену, що залягає в скельних породах, та споруджується за новоавстрійським методом NATM.

Мета роботи – визначення параметрів оправи перегінного тунелю, що споруджується в скельних породах.

Метод дослідження – аналітичний метод визначення параметрів оправи.

В бакалаврській роботі проведено аналіз інженерно-геологічних умов будівництва. Розроблена розрахункова модель оправи перегінного тунелю в скельних породах та виконано її розрахунок.

Визначено вплив напружено – деформованого стану на параметри оправи перегінного тунелю метрополітену, що залягає в скельних породах.

Обґрунтовано параметри міцності оправи перегінного тунелю еліпсоїдної форми.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, ПЕРЕГІННИЙ ТУНЕЛЬ, НОВОАВСТРІЙСЬКИЙ МЕТОД (NATM), СКЕЛЬНІ ПОРОДИ, ПРОЄКТ СПОРУДЖЕННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ МЕТРОПОЛІТЕНУ	9
1.1 Геологічні умови спорудження перегінного тунелю	9
1.2 Аналіз питання визначення параметрів оправи перегінного тунелю	15
2 РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ	23
2.1 Програмний комплекс SCAD.....	23
2.2 Розробка моделі оправи тунелю	29
3 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ	36
3.1 Напружено-деформований стан оправи	36
3.2 Перевірка на міцність небезпечного перерізу.....	37
4 СПОРУДЖЕННЯ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ МЕТРОПОЛІТЕНУ	43
4.1 Проходка перегінного тунелю	43
4.2 Спорудження оправи тунелю.....	47
4.3 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	51
ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	55

ВСТУП

Метрополітен є ключовим елементом транспортної інфраструктури великих міст і мегаполісів, які постійно розширюються за рахунок передмість і міст-спутників. Як швидкісний позавуличний залізничний транспорт, лінії якого прокладаються в підземних тунелях, на поверхні землі чи на естакадах, метрополітен ідеально вписується в сучасну тенденцію розвитку підземного простору.

Він дозволяє розвантажити наземну інфраструктуру, інтегруючись із нею, і виконує не лише транспортну функцію, а в умовах сьогодення, зокрема під час вторгнення РФ в Україну, станції метрополітену також слугують укриттями для населення.

Перегінні тунелі, що з'єднують станції, є основною частиною підземних ліній метрополітену за довжиною. При глибокому або мілкому закладенні із закритим способом робіт зазвичай споруджують два паралельних одноколійних тунелі кругового поперечного перерізу. Ці тунелі розрізняються за кількістю колій, конструктивною формою та матеріалами оправы. У скельних породах, які потребують значної енергії для руйнування, переважно застосовують буровибухові роботи (БВР). Частка БВР у підземній розробці становить 85...90% завдяки універсальності методу та високій продуктивності руйнування порід за допомогою енергії вибухових речовин (ВР). Під час БВР буряться шпури в які закладаються заряди ВР, що забезпечують дроблення ґрунту.

Особливо ефективним у скельних, тріщинуватих і порушених породах є новоавстрійський метод тунелебудування (NATM). Його ключова перевага полягає у максимальному використанні природної несучої здатності навколишнього скельного масиву, який залучається до роботи як частина захисної конструкції, що запобігає обвалам.

NATM вирізняється економічністю, низькою матеріаломісткістю та швидкістю виконання робіт, що робить його найпоширенішим серед гірських методів тунелебудування. Наприклад, у будівництві Дніпровського метрополітену, яке виконує турецька компанія «ЛІМАК», застосовується NATM.

Незважаючи на високу розробленість технології NATM, низка питань потребує додаткових досліджень. Зокрема, це чисельний аналіз конструкції оправи перегінного тунелю з використанням методу скінченних елементів, а також удосконалення технології БВР для підвищення ефективності проходки.

У рамках кваліфікаційної роботи мета полягає в обґрунтуванні технології спорудження перегінних тунелів за методом NATM для альтернативної лінії Дніпровського метрополітену. Дослідження включає аналіз інженерно-геологічних умов, зокрема тріщинуватих плагіогранітів із міцністю за М. М. Протодьяконовим $f=7,0$, та розробку рекомендацій для оптимізації будівельного процесу, що сприятиме підвищенню безпеки, довговічності та економічної ефективності підземних споруд.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ МЕТРОПОЛІТЕНУ

1.1 Геологічні умови спорудження перегінного тунелю

Геологічна будова ділянки спорудження перегінного тунелю характеризується складною багатоярусною структурою, яка сформувалася в результаті тривалих геологічних процесів протягом різних геологічних епох. Поверхневі шари представлені четвертинними відкладами різного генезису, які залягають на потужному кристалічному фундаменті архей-протерозойського віку. Така геологічна будова є типовою для Українського кристалічного щита та створює специфічні умови для підземного будівництва, особливо при спорудженні транспортних тунелів великої довжини.

На поверхні землі за поздовжнім перерізом ділянки, що проектується для перегінного тунелю, залягають насипні ґрунти антропогенного походження, представлені асфальтовим покриттям із дресвяно-щебеневою підсипкою, пісками та суглинками з включенням будівельного сміття у вигляді уламків червоної цегли, доменного шлаку, щебеню та інших техногенних матеріалів у кількості 10...20% від загального об'єму. Дресва представляє собою пухкі осадові породи, що складаються з незграбних уламків розміром 200...20 мм (щебінь) та 20...2 мм (дресва), утворених у результаті механічного руйнування первинних гірських порід під впливом фізичного та хімічного вивітрювання. При вмісті таких уламків понад 50% ґрунт класифікується як щебенивий або дресвяний відповідно до державних будівельних норм. Піски в цьому шарі являють собою дрібноуламкові пухкі породи з частинок розміром 0,05...2(3) мм (за іншими класифікаціями 0,1...1 мм), складені переважно з кварцу з домішками польового шпату та слюди. Потужність насипних ґрунтів варіює в межах 2,2...4,8 м, що створює відносно однорідний поверхневий шар з помірними несучими властивостями.

Нижче цих техногенних утворень залягає товща природних четвертинних відкладів, представлена суглинками сірувато-жовтого кольору, твердої

консистенції, середньої стійкості. Ці суглинки складаються з 30...50% тонкодисперсних частинок розміром ($<0,01$ мм) та уламкового матеріалу ($>0,01$ мм), з вмістом глинистих часток діаметром менше (діаметром $<0,005$ мм) в межах 10...30%. Число пластичності цих суглинків коливається від 7...17, що характеризує їх як помірно пластичні ґрунти з задовільними будівельними властивостями. Потужність шару суглинків змінюється 2,5...6 м, по простяганню ділянки, що відображає нерівномірність умов їх накопичення в четвертинний період.

Під шаром суглинків розташовуються супіски сірувато-жовтого забарвлення, пластичної консистенції, різного ступеня запісоченості, які характеризуються як абсолютно нестійкі в природному стані. Ці супіски складаються на 70...90% з алеврито-піщаного матеріалу та містять 10...30% частинок розміром $<0,01$ мм, з числом пластичності в межах 0,01-0,07, що відносить їх до категорії слабопластичних ґрунтів. Максимальна потужність шару супісків досягає 5 метрів, але по площі ділянки цей показник варіює досить значно, що обумовлено палеорельєфом підстилаючих порід та умовами седиментації.

Особливе значення для інженерно-геологічної оцінки ділянки мають флювіогляціальні відклади середньочвертинного віку, які представлені піщано-гравелистою товщею з включенням гальки, щебеню та валунів кристалічних порід. Ці відклади є продуктом діяльності талих льодовикових вод дніпровського зледеніння та характеризуються слабкою сортованістю, різноманітним мінералогічним складом та значною неоднорідністю гранулометричного складу. Флювіогляціальні утворення знаходяться в водонасиченому стані та класифікуються як абсолютно нестійкі, що створює значні ускладнення при проведенні будівельних робіт. Потужність цього шару досягає 6 метрів, а його розповсюдження має лінзоподібний характер з чергуванням ділянок різної потужності.

Безпосередньо над скельним фундаментом залягає елювій кристалічних порід, представлений дресвяно-щебенивими ґрунтами з піщано-глинистим заповнювачем, вміст якого становить (30...40%) від загального об'єму. Ці

утворення характеризуються значною неоднорідністю як за гранулометричним складом, так і за фізико-механічними властивостями, знаходяться в водонасиченому стані через близькість до рівня підземних вод. Потужність елювіальних відкладів варіює до 4 метрів, а їх формування відбувалося на горизонтальних або слабопохилих поверхнях у результаті тривалого процесу вивітрювання підстилаючих кристалічних порід під впливом атмосферних агентів та біогенних факторів.

Фундаментом для всіх молодших геологічних утворень служить потужна товща архей-протерозойських кристалічних порід, представлених плагіогранітами різноманітного мінералогічного складу та структурно-текстурних особливостей. Плагіограніти характеризуються сірим, світло-сірим, іноді рожево-сірим забарвленням та мають дрібно- і середньозернисту структуру, при цьому в покривельній частині масиву спостерігається перехід до крупнозернистої структури, що свідчить про зміну умов кристалізації магматичного розплаву. Ці породи мають масивну текстуру з локальними зонами гнейсуватості та смугастості, обумовленими процесами регіонального метаморфізму.

Мінералогічний склад плагіогранітів включає польовий шпат у кількості (35...40%), представлений переважно плагіоклазом кислого складу, та кварц у кількості (25...35%), з підпорядкованою роллю темнокольорових мінералів біотиту та амфіболу. Породи пронизані численними зонами дроблення та мілонітизації, що є результатом тектонічних процесів різних етапів геологічної історії регіону. Характерною особливістю плагіогранітів є сильна та інтенсивна тріщинуватість, яка відіграє ключову роль в їх інженерно-геологічній оцінці, визначаючи ступінь механічного руйнування масиву та можливості проникнення поверхневих вод.

Тріщинуватість скельних порід є найбільш важливим фактором їхньої інженерно-геологічної характеристики, оскільки визначає не тільки ступінь порушеності масиву, але й умови фільтрації підземних вод, стійкість гірничих виробок та вибір оптимальних способів кріплення тунелю.

Фізичні властивості плагіогранітів характеризуються наступними показниками: питома вага коливається в межах від 2,67...2,72 г/см³, щільність породи складає 2,55...2,65 г/см³, пористість варіює від 0,06...2,0%, що свідчить про щільну кристалічну структуру породи з мінімальною кількістю пустот. Ступінь вивітрювання суттєво впливає на міцнісні характеристики плагіогранітів, які за класифікацією М.М. Протодьяконова характеризуються коефіцієнтом міцності від 1,5 до 7, при цьому зони зруйнованого та інтенсивно тріщинуватого плагіограніту приймаються з коефіцієнтом міцності $f=3$, що відповідає породам середньої міцності.

Дніпропетровська гранітна товща зазнала складної багатоетапної геологічної історії з періодами інтенсивної тектонічної активності, що призвело до багаторазових деформацій, складкоутворення та ендегенних процесів, пов'язаних з надходженням речовини з мантійних джерел. Граніт як інтрузивна магматична порода характеризується повнокристалічною структурою, щільною текстурою та специфічним мінеральним складом, включаючи ортоклаз та кварц, що мінімізує проникнення ґрунтових вод у масив та створює сприятливі умови для спорудження підземних виробок.

Гідрогеологічні умови ділянки характеризуються наявністю єдиного безнапірного водоносного комплексу, приуроченого до четвертинних відкладів та зони вивітрювання кристалічних порід. Рівень підземних вод встановлюється на глибині 1,6...2,4 м від донної поверхні, що обумовлено близькістю до річки Дніпро та особливостями рельєфу місцевості. Занурення проектного тунелю під статичний рівень підземних вод становить 43,0...44,0 м, що створює значний гідростатичний тиск на конструкції тунелю та вимагає спеціальних заходів з гідроізоляції та водовідведення.

Водоносний горизонт характеризується неоднорідними фільтраційними властивостями через різноманітність літологічного складу водовмісних порід. Найбільшою водопроникністю характеризуються флювіогляціальні відклади та елювіальні утворення, тоді як суглинки виконують роль слабопроникних або відносно водотривких шарів. Особливу роль у формуванні гідрогеологічних

умов відіграє тріщинуватість скельного масиву, яка створює шляхи для циркуляції підземних вод та може призводити до локальних водопроявів при проходці тунелю.

Хімічний склад підземних вод формується під впливом взаємодії з різними типами порід та характеризується помірною мінералізацією з переважанням гідрокарбонатно-кальцієвого типу. Агресивність підземних вод по відношенню до бетону та металевих конструкцій оцінюється як слабка, що сприятливо для довговічності тунельних конструкцій, але потребує періодичного контролю в процесі експлуатації споруди.

У геоморфологічному відношенні ділянка проектування приурочена до першої правобережної тераси річки Дніпро, яка характеризується відносно рівним рельєфом з незначним ухилом у бік річкової долини. Така геоморфологічна позиція обумовлює особливості дренажу території та режим підземних вод, а також створює сприятливі умови для розміщення наземних споруд тунельного комплексу.

Інженерно-геологічні умови ділянки слід оцінювати як складні через комбінацію декількох несприятливих факторів: інтенсивну тріщинуватість плагіогранітів, водонасиченість покривних відкладів, значну різноманітність ґрунтів за фізико-механічними властивостями та високе стояння рівня підземних вод. Разом з тим, наявність потужного скельного масиву з достатніми міцнісними характеристиками створює принципову можливість для спорудження тунелю за умови застосування сучасних технологій підземного будівництва та адекватних заходів з інженерного захисту від підземних вод.

Скельний масив плагіогранітів, незважаючи на тріщинуватість, зберігає достатню несучу здатність для сприйняття навантажень від тунельних конструкцій та наземних споруд. Зони інтенсивної тріщинуватості та дроблення потребують особливої уваги при проектуванні кріплення тунелю та можуть вимагати застосування спеціальних методів укріплення породного масиву, таких як анкерування, ін'єктування цементних розчинів або застосування нових композитних матеріалів для підсилення породи.

Масив граніту в якому прокладається перегінний тунель має місця з великою тріщинуватістю, тому у розрахунках оправ приймається коефіцієнт тріщинуватості $\alpha=0.5$ і в розрахунках приймається міцність граніту $f = 7 \times 0.5 = 3.5$.

1.2 Аналіз питання визначення параметрів оправи перегінного тунелю

Проектування конструкції оправи перегінного тунелю метрополітену, технологія спорудження оправи, її вартість і терміни виконання робіт визначаються в основному геологічними й гідрогеологічними умовами і способами ведення робіт.

При спорудженні перегінних тунелів першої черги Дніпровського метрополітену використовувався еректорний спосіб будівництва, при якому порода розробляється буровибуховим способом і після її відкатки виконується монтаж оправи із залізобетонних блоків або чавунних тюбінгів в залежності від геологічних умов ділянки.

Відповідно до ДБН Метрополітени [8] стійкість гірських порід під час будівництва виробок оцінюється коефіцієнтом міцності f за шкалою проф. Протодяконова. При проходці виробок у тріщинуватих скельних породах треба враховувати коефіцієнт α , що враховує вплив тріщинуватості масиву в залежності від категорії масиву за ступенем тріщинуватості.

Існуючі методи розрахунку можна розділити на чотири групи: методи розрахунку засновані на теорії склепіння обвалення, емпіричні методи, аналітичні та чисельні методи механіки суцільного середовища. Схеми ж заданих навантажень, відрізняючись наочністю та доступністю, водночас не повним діапазоном відповідають зобов'язанням, які сьогодні вимагаються для розрахунку підземних споруд. Принциповий недолік полягає в тому, що не повною мірою враховується технологія спорудження виробки, яка істотно впливає на величину навантажень конструкції тунелю, а також фізико-механічні властивості оточуючого масиву.

Оправи першої черги перегінних тунелів Дніпровського метрополітену мала кругову форму і складалась із елементів рис. 1.1. При розрахунку зусиль в оправі, вона розглядалась як кільце з постійної жорсткості.

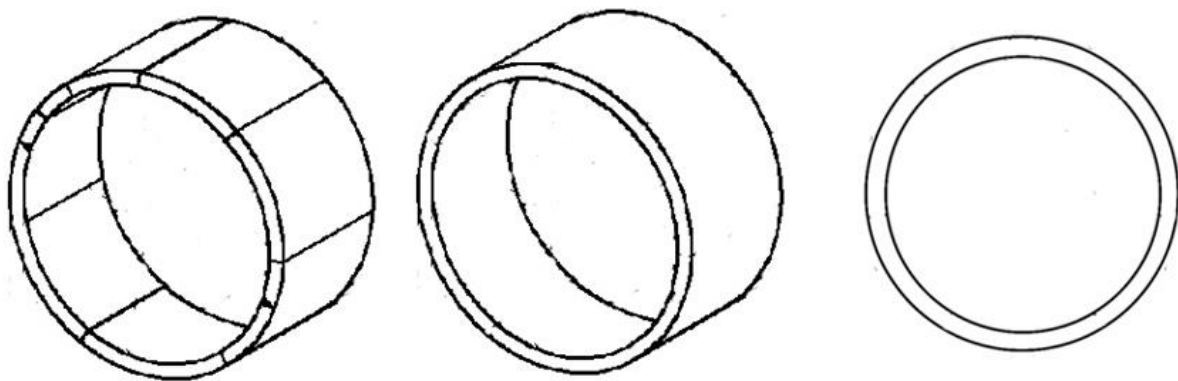


Рисунок 1. 1. Оправа перегінного тунелю метрополітену.

Оправа для перегінного тунелю метрополітену, при будівництві другої черги Дніпровського метрополітену, проектувалася у вигляді замкнутої збірної конструкції з еліптичним обрисом рис.1.2. Внутрішній діаметр оправи тунелю визначається габаритами наближення будівель або конструкцій.

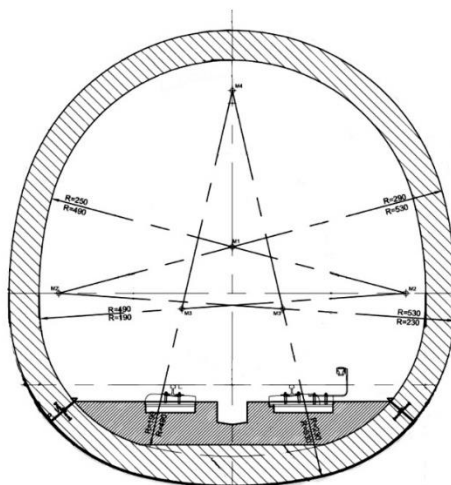


Рисунок 1.2. Оправа перегінного тунелю метрополітену з еліптичним обрисом

Новоавстрійський тунельний метод (NATM - New Austrian Tunnelling Method) є сучасною технологією проходження гірничих виробок і тунелів, яка базується на принципі максимального використання несучої здатності оточуючого масиву порід. Особливо актуальним є застосування цього методу в умовах тріщинуватих скельних ґрунтів, де традиційні методи кріплення часто виявляються неефективними або економічно недоцільними.

Згідно з ДБН В.2.3-7:2010 "Споруди транспорту. Підземні споруди", проектування підземних споруд повинно забезпечувати їх надійність, довговічність та економічну ефективність. При цьому особлива увага

приділяється взаємодії споруди з оточуючим масивом порід, що є основним принципом методу NATM.

Новий австрійський тунельний метод ґрунтується на концепції, що оточуючий породний масив є основним несучим елементом підземної споруди.

Головними принципами NATM є:

1. Швидке закриття контуру виробки після розкриття
2. Використання деформаційних властивостей породного масиву
3. Постійний моніторинг напружено-деформованого стану
4. Поетапне нарощування жорсткості кріплення

У тріщинуватих скельних ґрунтах застосування NATM має свої особливості, пов'язані з анізотропією механічних властивостей масиву, наявністю системи тріщин різного походження та можливістю утворення структурних блоків.

Відповідно до ДБН В.2.1-10:2018 "Основи та фундаменти споруд", тріщинуваті скельні ґрунти класифікуються за ступенем тріщинуватості, міцністю породи в зразку та станом тріщин. Для проектування параметрів оправи NATM використовується класифікація RMR (Rock Mass Rating), адаптована до вітчизняних нормативних документів. Основними параметрами, що впливають на вибір параметрів оправи, є: міцність породи в зразку на одноосьове стиснення (σ_c), якість кернового виходу (RQD), відстань між тріщинами, стан поверхонь тріщин, обводненість масиву та орієнтування тріщин відносно осі виробки.

Розрахунок основних параметрів тунелю, побудованого за NATM починається з визначення товщини торкет бетону. Товщина первинного шару торкрет-бетону визначається за формулою:

$$t_1 = k_1 \cdot R \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{H}{\sigma_t}}$$

де:

t_1 - товщина первинного шару торкрет-бетону, м

k_1 - коефіцієнт, що враховує форму перерізу (1,2-1,5)

R - радіус виробки, м

γ - об'ємна вага породи, кН/м³

H - глибина розташування виробки, м

σ_t - межа міцності торкрет-бетону на розтяг, МПа

Для тріщинуватих скельних ґрунтів середньої міцності при глибині 50 м та радіусі виробки 3 м:

$$t_1 = 1,3 \cdot 3 \cdot \sqrt{25 \cdot \frac{50}{2,5}} = 1,3 \cdot 3 \cdot \sqrt{500} = 1,3 \cdot 3 \cdot 22,4 = 87,36 \approx 90 \text{ мм}$$

Далі розраховуються параметри анкерного кріплення. Довжина анкерів визначається з умови забезпечення стійкості контуру виробки:

$$L = k_2 \cdot (R + t_1) \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

де:

L - довжина анкера, м

k_2 - коефіцієнт запасу (1,5-2,0)

φ - кут внутрішнього тертя породи, град

Для розглянутих умов при $\varphi = 75^\circ$:

$$L = 1,8 \cdot (3 + 0,09) \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{75}{2}\right) = 1,8 \cdot 3,09 \cdot \operatorname{tg}(7,5^\circ) = 1,8 \cdot 3,09 \cdot 0,13165 = 0,73 \approx 1,0 \text{ м}$$

L – приймаємо, відповідно до мінімального значення довжини анкера, рівною 3 м.

Крок встановлення анкерів у склепінні дорівнює 1,0-1,5 м, а у стінах: 1,5-2,0 м.

Розраховується товщина вторинного кріплення (остаточної оправи) визначається з розрахунку на довготривалі навантаження:

$$t_2 = \frac{M}{W \cdot \sigma_{adm}}$$

де:

t_2 - товщина вторинного кріплення, м

M - максимальний згинаючий момент в оправі, $\frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$

W - момент опору перерізу оправи, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}}$

σ_{adm} - допустимі напруження в бетоні, МПа

Згинаючий момент для кільцевої оправи:

$$M = q \cdot R^2 \cdot \beta$$

де:

q - навантаження на оправу, кН/м²

β - коефіцієнт, що залежить від схеми навантаження (0,125 для рівномірного навантаження) Для розрахункового навантаження $q = 18,1$ кН/м²:

$$M = 18,1 \cdot 3^2 \cdot 0,125 = 18,1 \cdot 9 \cdot 0,125 = 20,36 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$$

При допустимих напруженнях $\sigma_{adm} = 10$ МПа та моменті опору $W = \frac{t^2}{6}$:

$$t^2 = \sqrt{6 \cdot \frac{M}{\sigma_{adm}}} = \sqrt{6 \cdot \frac{20,36}{10000}} = \sqrt{0,0961} = 0,31 \text{ м}$$

Загальні габаритні розміри тунелю з урахуванням оправи NATM:

Внутрішній діаметр тунелю: $D_0 = 5,16$ м

Товщина первинного кріплення: $t_1 = 0,09$ м

Товщина вторинного кріплення: $t_2 = 0,31$ м

Зовнішній діаметр: $D = D_0 + 2 \cdot (t_1 + t_2) = 5,16 + 2 \cdot (0,09 + 0,31) = 5,98 \approx 6,0$ м

Згідно з ДБН В.2.3-7:2010, поздовжній профіль тунелю повинен забезпечувати: мінімальний ухил для водовідведення 0,3%, радіуси вертикальних кривих не менше 2000 м та висоту від рівня проїжджої частини до склепіння не менше 5,0 м.

Також важливим елементом оправи NATM є дренажна система, яка включає в себе: дренажні труби діаметром 100-150 мм з кроком 3-5 м, гідроізоляційну мембрану між первинним та вторинним кріпленням та збірні дренажні лотки в нижній частині тунелю.

Послідовність робіт

1. **Розкриття виробки** - виконується поетапно з максимальним переріз до 30-50 м² за проходку
2. **Нанесення первинного торкрет-бетону** - протягом 2-4 годин після розкриття
3. **Установка анкерів** - одночасно з нанесенням торкрет-бетону

4. **Моніторинг деформацій** - протягом усього періоду стабілізації
5. **Влаштування вторинного кріплення** - після стабілізації деформацій, та твердіння шару первинного кріплення.

Відповідно до ДБН В.2.6-22:2001 "Земляні роботи", контроль якості виконання робіт включає: контроль міцності торкрет-бетону (не менше В20), перевірку несучої здатності анкерів (випробування 5% від загальної кількості), геодезичний контроль деформацій (точність ± 2 мм).

Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 "Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки", навантаження на підземну оправу включають:

Постійні навантаження:

$$\text{Власна вага породи: } \gamma \cdot H = 25 \cdot 50 = 1250 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

$$\text{Власна вага кріплення: } \gamma b \cdot H = 25 \cdot 0,41 = 10,25 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Змінні навантаження:

Транспортні навантаження (для транспортних тунелів)

Технологічні навантаження

Особливі навантаження:

Сейсмічні впливи

Температурні деформації

Коефіцієнт бокового тиску

Для тріщинуватих скельних ґрунтів коефіцієнт бокового тиску визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot Kr$$

де:

ν - коефіцієнт Пуассона породи (0,2-0,3)

Kr - коефіцієнт розслаблення масиву (0,6-0,8)

$$\lambda = \frac{0,25}{1-0,25} \cdot 0,7 = \frac{0,25}{0,75} \cdot 0,7 = 0,233$$

Розраховуються максимальні напруження в оправі для кільцевого тунелю:

$$\sigma_{\max} = \frac{q \cdot R}{t} \cdot \frac{1+\lambda}{2}$$

де:

q - вертикальне навантаження

λ - коефіцієнт бокового тиску

$$\sigma_{\max} = \frac{300 \cdot 3}{0,32} \cdot \frac{1+0,233}{2} = 2812,5 \cdot 0,671 = 1735,1 \text{ кПа} = 1,74 \text{ МПа}$$

Отримані напруження не перевищують допустимих для бетону класу С30/35 (В35) (11,5 МПа).

Далі проводиться адаптація до геологічних умов. У залежності від конкретних геологічних умов рекомендується:

1. При високій тріщинуватості (RQD < 50%):

Збільшення товщини первинного торкрет-бетону до 120-150 мм

Зменшення кроку анкерів до 0,8-1,0 м

Застосування фібро-торкрет-бетону

2. При обводненості масиву:

Влаштування попереднього дренажу

Використання швидкотужавіючих добавок

Підвищення водонепроникності бетону

3. При наявності активних тектонічних порушень:

Збільшення деформативності первинного кріплення

Влаштування компенсаційних швів у вторинному кріпленні

Посилений моніторинг деформацій

Застосування методу NATM у тріщинуватих скельних ґрунтах забезпечує:

Зниження витрат матеріалів на 20-30% порівняно з традиційним кріпленням

Скорочення термінів будівництва на 15-25%

Підвищення довговічності споруди

Можливість автоматизації процесів

Визначення параметрів оправи NATM у тріщинуватих скельних ґрунтах є комплексною задачею, що потребує врахування геологічних, геомеханічних та технологічних факторів. Розроблена методика розрахунку, що базується на

вимогах ДБН, дозволяє забезпечити надійність та економічну ефективність підземних споруд. Ключовими факторами успішного застосування методу є детальне вивчення геологічних умов, правильний вибір параметрів кріплення, якісне виконання технологічних операцій, а також постійний моніторинг стану споруди

Рекомендовані параметри оправи для типових умов тріщинуватих скельних ґрунтів:

Товщина первинного торкрет-бетону: 80-120 мм

Довжина анкерів: 2,5-4,0 м

Крок анкерів: 1,0-1,5 м

Товщина вторинного кріплення: 250-400 мм

Подальший розвиток методу NATM передбачає впровадження новітніх матеріалів, удосконалення технологій моніторингу та розробку автоматизованих систем управління процесом будівництва підземних споруд.

2 РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ

2.1 Програмний комплекс SCAD

Для розрахунку напружено-деформованого стану і зусиль в оправі тунелю використовуємо програмний комплекс SCAD Office.

SCAD Office являє собою потужний інтегрований програмний комплекс, призначений для автоматизованого проектування будівельних конструкцій і споруд різного призначення. Програма розроблена компанією SCAD Soft і протягом багатьох років зарекомендувала себе як надійний інструмент для інженерів-проектувальників, конструкторів та науковців у галузі будівництва та геотехніки. Особливістю даного програмного продукту є його комплексний підхід до вирішення завдань статичного та динамічного аналізу конструкцій, що робить його ідеальним вибором для моделювання складних інженерних систем, включаючи підземні споруди та тунельні конструкції.

Архітектура SCAD Office побудована за модульним принципом, що дозволяє користувачам працювати з різними типами конструкцій та матеріалів у рамках єдиного програмного середовища. Система підтримує широкий спектр типів скінченних елементів, включаючи стержневі, пластинчасті, оболонкові та об'ємні елементи, що забезпечує можливість моделювання практично будь-яких інженерних конструкцій. Особливістю програми є її здатність ефективно обробляти великі масиви даних та виконувати складні розрахунки з високою точністю, що критично важливо при аналізі таких складних систем, як підземні споруди.

Графічний інтерфейс SCAD Office розроблений з урахуванням потреб сучасних інженерів та забезпечує інтуїтивно зрозумілий процес створення моделей, налаштування граничних умов та візуалізації результатів. Програма підтримує імпорт та експорт даних у різних форматах, що полегшує інтеграцію з іншими CAD-системами та спеціалізованими інженерними програмами. Внутрішня база даних матеріалів містить характеристики широкого спектру

будівельних матеріалів, включаючи бетон, сталь, композитні матеріали, що дозволяє користувачам швидко налаштувати параметри моделей відповідно до специфікацій конкретних проектів.

Моделювання підземних споруд, зокрема перегінних тунелів, представляє особливі виклики, пов'язані з необхідністю врахування складної взаємодії між конструктивними елементами та навколишнім ґрунтовим масивом. SCAD Office пропонує спеціалізовані інструменти для вирішення таких задач, які базуються на сучасних теоретичних підходах до моделювання геотехнічних систем. Програма дозволяє створювати детальні моделі ґрунт-конструкція взаємодії, використовуючи різні типи контактних елементів та граничних умов.

Система підтримує моделювання нелінійної поведінки ґрунтів, включаючи врахування пластичних деформацій, консолідації та повзучості. Це особливо важливо при аналізі тунельних конструкцій, де ґрунтовий масив може демонструвати складну реологічну поведінку під впливом зміни напружень, викликані спорудженням тунелю. SCAD Office використовує передові моделі ґрунтів, такі як модель Мора-Кулона, модель Друкера-Прагера та інші, що дозволяє точно відтворити механічну поведінку різних типів ґрунтів.

Особливу увагу в програмі приділено моделюванню етапності будівництва, що критично важливо для тунельних проектів. Система дозволяє симулювати поступове видалення ґрунту, встановлення тимчасового та постійного кріплення, що дає можливість проаналізувати еволюцію напружено-деформованого стану конструкції протягом всього процесу спорудження. Такий підхід забезпечує більш реалістичне моделювання реальних умов будівництва та дозволяє оптимізувати технологічні рішення.

Використання плоских моделей для аналізу перерізів перегінних тунелів є широко розповсюдженим підходом у геотехнічному проектуванні, який базується на припущенні про плоску деформацію конструкції в площині поперечного перерізу. Цей підхід виправданий для тунелів значної довжини, де напружено-деформований стан у поперечному перерізі можна вважати

незалежним від поздовжньої координати на достатній відстані від порталів та зон зміни геологічних умов.

SCAD Office надає потужні інструменти для створення та аналізу плоских моделей тунельних перерізів. Програма дозволяє точно відтворити геометрію тунелю, включаючи складні профілі та багатоконтурні перерізи. Система підтримує моделювання різних типів оправ, від простих круглих до складних багатокутних та еліпсоподібних форм, що особливо важливо для сучасних транспортних тунелів зі складною внутрішньою структурою.

Моделювання взаємодії оправи з ґрунтовим масивом у SCAD Office реалізовано через систему контактних елементів, які дозволяють передавати нормальні та дотичні зусилля між конструкцією та ґрунтом. Програма автоматично враховує можливість відриву оправи від ґрунту та ковзання по контактній поверхні, що забезпечує реалістичне моделювання роботи системи ґрунт-конструкція. Особливістю SCAD Office є можливість моделювання нелінійних контактних взаємодій з урахуванням тертя та зчеплення, що критично важливо для точного аналізу роботи тунельних оправ.

Одним з найбільш ефективних підходів до моделювання взаємодії тунельної оправи з навколишнім ґрунтовим масивом є використання стержневих елементів, закріплених з одного боку. Цей метод, який отримав назву "метод податливих опор" або "метод пружних зв'язків", дозволяє ефективно відтворити пружно-пластичну поведінку ґрунту навколо тунелю без необхідності створення детальної тривимірної моделі ґрунтового масиву.

SCAD Office надає широкі можливості для реалізації такого підходу. Стержневі елементи, що моделюють взаємодію з ґрунтом, можуть бути налаштовані з різними механічними характеристиками, що відповідають властивостям конкретних типів ґрунтів. Програма дозволяє задавати нелінійні діаграми деформування для цих елементів, що дає можливість врахувати пластичні деформації ґрунту та його обмежену несучу здатність на розтяг.

Закріплення стержневих елементів з одного боку відповідає фізичній картині взаємодії, де ґрунт може сприймати як стискаючі, так і розтягуючі зусилля до

певної межі, після чого відбувається втрата контакту або руйнування ґрунтової структури. SCAD Office автоматично відстежує стан кожного стержневого елемента та враховує зміни в роботі системи, викликані досягненням граничних станів окремих елементів.

Такий підхід особливо ефективний при аналізі тунелів у неоднорідних ґрунтових умовах, де різні ділянки контуру можуть взаємодіяти з ґрунтами, що мають суттєво відмінні механічні властивості. SCAD Office дозволяє легко задавати різні параметри стержневих елементів для різних ділянок контуру, що забезпечує точне моделювання реальних геологічних умов.

Процес визначення оптимальних параметрів тунельної оправи у SCAD Office включає комплексний аналіз напружено-деформованого стану конструкції під дією різних навантажень та впливів. Програма дозволяє враховувати власну вагу конструкції, гідростатичний тиск підземних вод, сейсмічні впливи та технологічні навантаження, що виникають під час експлуатації тунелю.

Аналіз результатів розрахунку у SCAD Office включає детальне дослідження розподілу внутрішніх зусиль в елементах оправи, деформацій конструкції та напружень у ґрунтовому масиві. Програма надає потужні інструменти візуалізації результатів, включаючи епюри моментів, поперечних та поздовжніх сил, карти ізоліній напружень та деформацій. Ця інформація дозволяє інженерам швидко ідентифікувати критичні зони конструкції та оптимізувати її параметри.

Особливістю SCAD Office є можливість автоматизованого підбору арматури для залізобетонних оправ відповідно до діючих нормативних документів. Програма виконує перевірку міцності перерізів за нормальними та похилими перерізами, контролює тріщиностійкість та деформативність конструкції. Для сталевих оправ система автоматично перевіряє стійкість елементів та з'єднань, враховуючи специфіку роботи конструкцій у підземних умовах.

Процес оптимізації параметрів оправи у SCAD Office може бути виконаний як вручну, через поступове коригування геометричних та механічних характеристик конструкції, так і автоматично, з використанням вбудованих алгоритмів оптимізації. Програма дозволяє задавати цільові функції оптимізації,

такі як мінімізація маси конструкції, вартості матеріалів або максимальних напружень, при дотриманні всіх нормативних вимог до міцності та деформативності.

Застосування SCAD Office для проектування перегінних тунелів забезпечує ряд суттєвих переваг порівняно з традиційними методами розрахунку. По-перше, програма дозволяє створювати високоточні моделі, що враховують всі основні фактори, які впливають на роботу тунельних конструкцій. Це включає нелінійну поведінку матеріалів, контактну взаємодію, етапність будівництва та зміну граничних умов у часі.

Точність результатів, що отримуються у SCAD Office, забезпечується використанням сучасних чисельних методів та ретельно протестованих алгоритмів розрахунку. Програма регулярно проходить верифікацію на еталонних задачах та порівнюється з результатами аналітичних рішень та натурних випробувань. Це гарантує надійність результатів розрахунку та їх відповідність реальній поведінці конструкцій.

Інтеграція SCAD Office з іншими програмними продуктами дозволяє створювати комплексні проектні рішення, що охоплюють всі етапи проектування від концептуального дизайну до деталізованих робочих креслень. Програма підтримує експорт результатів у формати, що використовуються у CAD-системах, системах управління проектами та спеціалізованому програмному забезпеченні для геотехнічного моделювання.

Економічна ефективність використання SCAD Office досягається за рахунок можливості швидкого аналізу множини варіантів конструктивних рішень та автоматизованої оптимізації параметрів конструкції. Це дозволяє знаходити найбільш економічні рішення при забезпеченні всіх вимог до безпеки та надійності. Крім того, висока точність розрахунків дозволяє уникнути надмірного запасу міцності, що веде до зниження витрат на матеріали та будівництво.

Програмний комплекс SCAD Office представляє собою оптимальне рішення для розробки плоских моделей перерізів перегінних тунелів та визначення

параметрів оправи з урахуванням взаємодії з ґрунтовим масивом через систему стержневих елементів. Поєднання потужних обчислювальних можливостей, зручного інтерфейсу та спеціалізованих інструментів для геотехнічного моделювання робить цю програму незамінним інструментом для сучасного тунельного проектування.

Можливість моделювання складних нелінійних взаємодій, врахування етапності будівництва та автоматизованої оптимізації конструктивних параметрів забезпечує високу якість проектних рішень та їх відповідність сучасним вимогам до безпеки та економічності підземних споруд.

2.2 Розробка моделі оправи тунелю

Процес побудови розрахункової схеми оправи тунелю включає в себе:

- визначення параметрів оправи та розрахункової області;
- побудова геометричної моделі оправи та створення мережі скінченних елементів з накладанням граничних умов;
- завдання матеріалів оправи та властивостей елементів (визначення моделей деформування ґрунтів та інших характеристик);
- визначення навантаження, які діють на оправу тунелю;
- моделювання стадій навантаження.

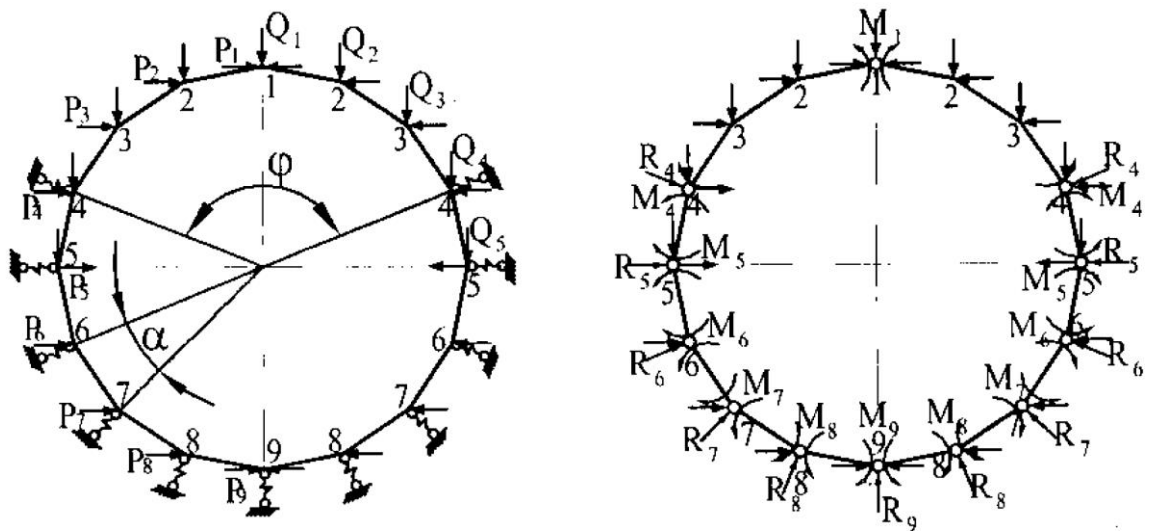


Рисунок 2.1. Розрахункова схема оправи

Розглядаємо оправу NATM, завантажену одиничним навантаженням, яка в процесі розрахунку комбінується з гірським тиском. У тріщинуватих скельних породах величину вертикального гірського тиску можна визначати за формулою проф. М. М. Протод'яконова

$$q_B^H = \gamma h_1, \quad (2.1)$$

$$h_1 = \frac{L}{2f}, \quad (2.2)$$

$$L = D_{3H} + H \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right), \quad (2.3)$$

$f = 7$ – коефіцієнт міцності породи; h_1 і L – висота і ширина склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яконовим (рис. 2.1).

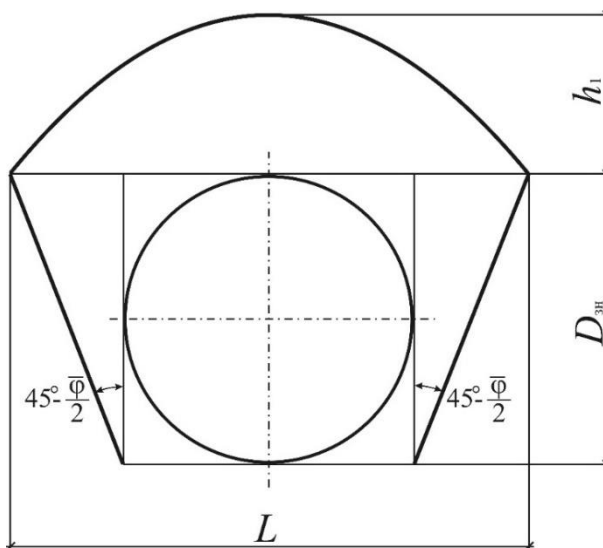


Рисунок. 2.2. Схема для визначення параметрів склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яконовим

Горизонтальний тиск у породах, потрібно розглядати як пасивний – у вигляді пружного відпору. Коефіцієнт пружного відпору k для різних порід можна визначити за табл. 2.1.

Відповідно до вимог ДБН у розрахунку оправи за несучою здатністю величину розрахункових навантажень визначають шляхом множення нормативних навантажень на коефіцієнт перевантаження n :

$$q_B^p = nq_B^H, \quad (2.3)$$

Таблиця 2.1

Коефіцієнт пружного відпору

Характеристика породи	$k, \text{т/м}^3$
Пливун. Пісок щойно насипаний. Глина мокра, м'яка.	Від $0,01 \cdot 10^4$ до $0,05 \cdot 10^4$
Пісок злежаний. Гравій насипаний. Глина волога.	Від $0,05 \cdot 10^4$ до $0,5 \cdot 10^4$
Пісок, гравій щільно злежані. Щебінь. Глина малої вологості.	Від $0,5 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^4$
Грунт піщано-глинястий, штучно ущільнений. Глина тверда.	Від $1,0 \cdot 10^4$ до $2,0 \cdot 10^4$
М'яка тріщинувата скеля. Вапняк, пісковик. Мерзлість.	Від $2,0 \cdot 10^4$ до $10,0 \cdot 10^4$

Тверда, щільна скеля.

Від $10,0 \cdot 10^4$ до $150 \cdot 10^4$

Визначимо ширину склепіння обвалення за формулою (2.3)

$$L = B + 2H \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 5,964 + 2 \cdot 6,108 \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{75}{2} \right) = 5,964 + 2 \cdot 6,108 \cdot \operatorname{tg} (7,5^\circ) = 5,964 + 2 \cdot 6,108 \cdot 0,13165 = 6,8 \text{ м.}$$

Розраховуємо висоту склепіння обвалення – формула (2.2)

$$h_1 = \frac{L}{2f} = \frac{6,8}{2 \cdot 7} = 0,483 \text{ м.}$$

За формулою проф. М. М. Протод'яконова (2.1) визначаємо величину вертикального гірського тиску на оправу:

$$q_B^H = \gamma h_1 = 25 \cdot 0,483 = 12,1 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Визначаємо величину розрахункових навантажень з урахуванням коефіцієнту запасу:

$$q_B^D = n q_B^H = 1,5 \cdot 12,075 = 18,1 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Розглядаючи оправу новоавстрійського методу спорудження тунелю (NATM) за визначеними параметрами та габаритними розмірами оправи будуємо її переріз у програмному середовищі AutoCAD.

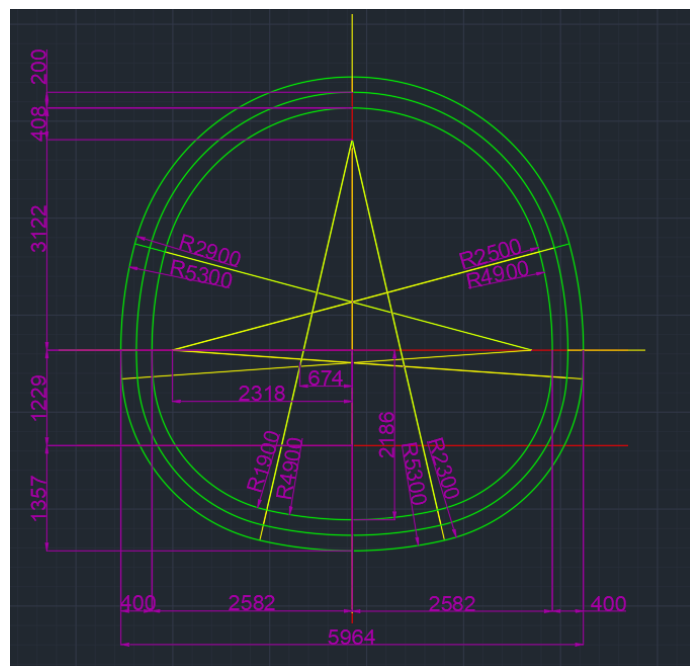


Рисунок 2.3 – Схема оправи новоавстрійського методу спорудження тунелю (NATM) з габаритними розмірами, товщиною 0,4 м у програмному комплексі AutoCAD

Плавний обрис нейтральної осі оправи замінюється вписаним до неї стрижневим багатокутником. Положення нейтральної осі визначається з урахуванням геометричних характеристик поперечного перерізу оправи тунелю.

Тому робимо секторну розбивку оправи на 32 елементи у програмному комплексі AutoCAD. Для подальшого навантаження оправи за стержневою схемою рис. 2.4.

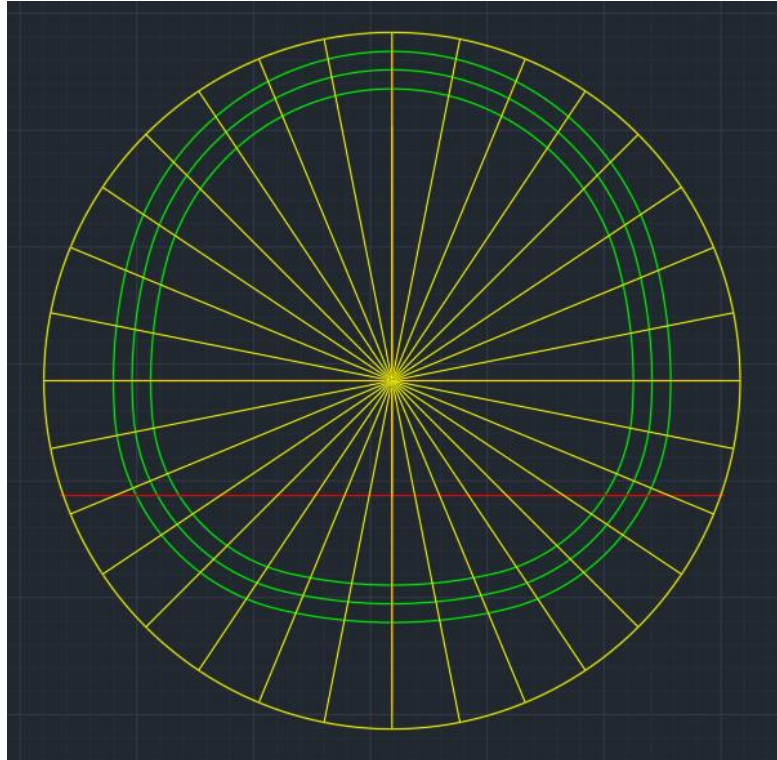


Рисунок 2.4 – Схема оправи новоавстрійського методу спорудження тунелю (NATM) з секційною розміткою на 32 елементи, товщиною 0,4 м у програмному комплексі AutoCAD

Жорсткість оправи протягом кожного стрижня приймаємо постійною, тому що параметри оправи її товщина і армування не змінюються.

Розподілене зовнішнє навантаження від гірського тиску замінюється зосередженими зусиллями, прикладеними у вершинах багатокутника рис. 2.5.

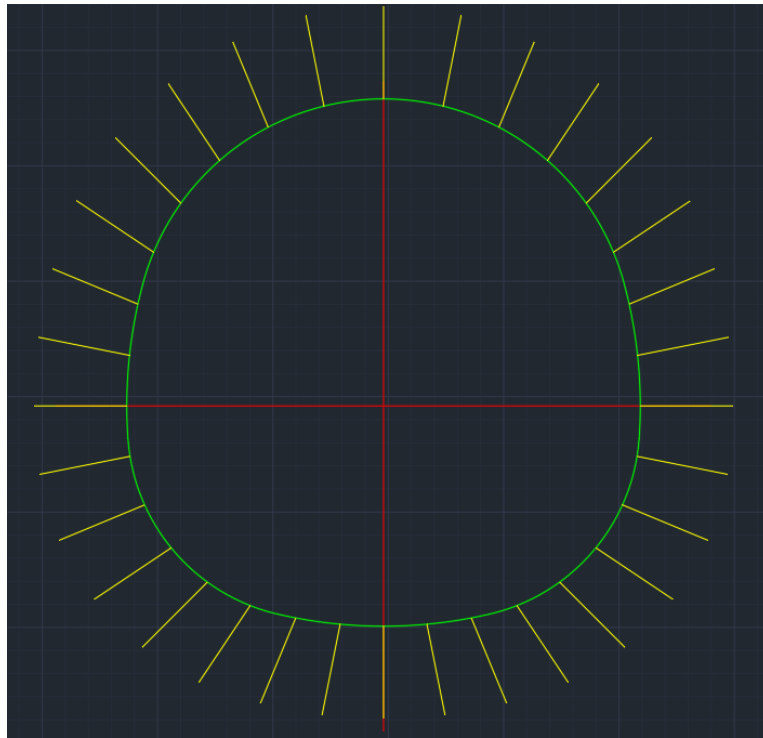


Рисунок 2.5 – Схема середньої лінії оправи з стержневою секційною розміткою новоавстрійського методу спорудження тунелю (NATM) з габаритними розмірами, товщиною 0,4 м у програмному комплексі AutoCAD

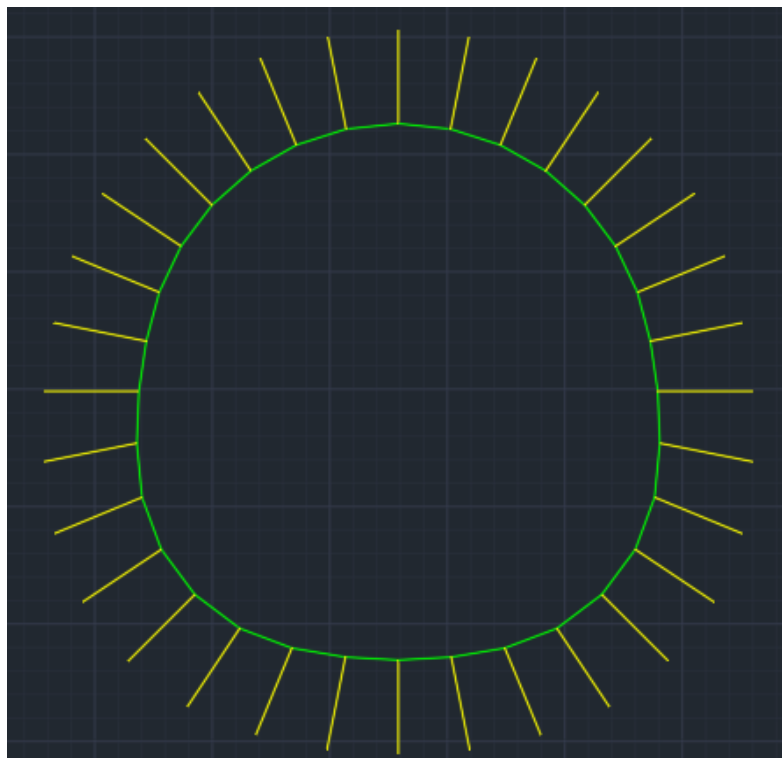


Рисунок 2.6 – Полігональна схема оправи з стержневою секційною розміткою новоавстрійського методу спорудження тунелю (NATM) з габаритними розмірами, товщиною 0,4 м у програмному комплексі AutoCAD

Суцільне пружне ґрунтове середовище змінюємо окремими пружними опорами, поміщеними у вершинах вписаного багатокутника, за винятком верхньої безвідпірної ділянки оправи. Напрямок пружних опор збігається з радіальним.

Задаємо в'язі та жорсткості елементів. На кінцях стержнів жорстке защемлення. Завантажуємо оправу одиничним навантаженням.

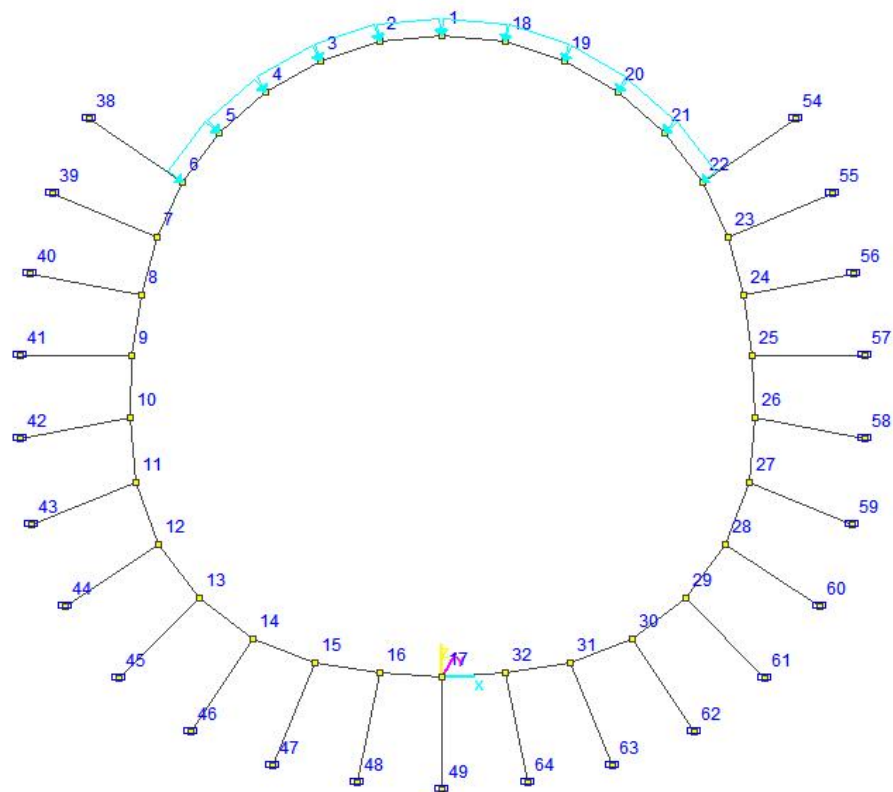


Рисунок 2.7 – Скінчено-елементарна модель тунелю (NATM) із заданими жорсткостями та в'язями у програмному комплексі SCAD

Виконуємо статичний розрахунок у програмному комплексі SCAD та розглядаємо як деформувалась оправа рис. 2.8.

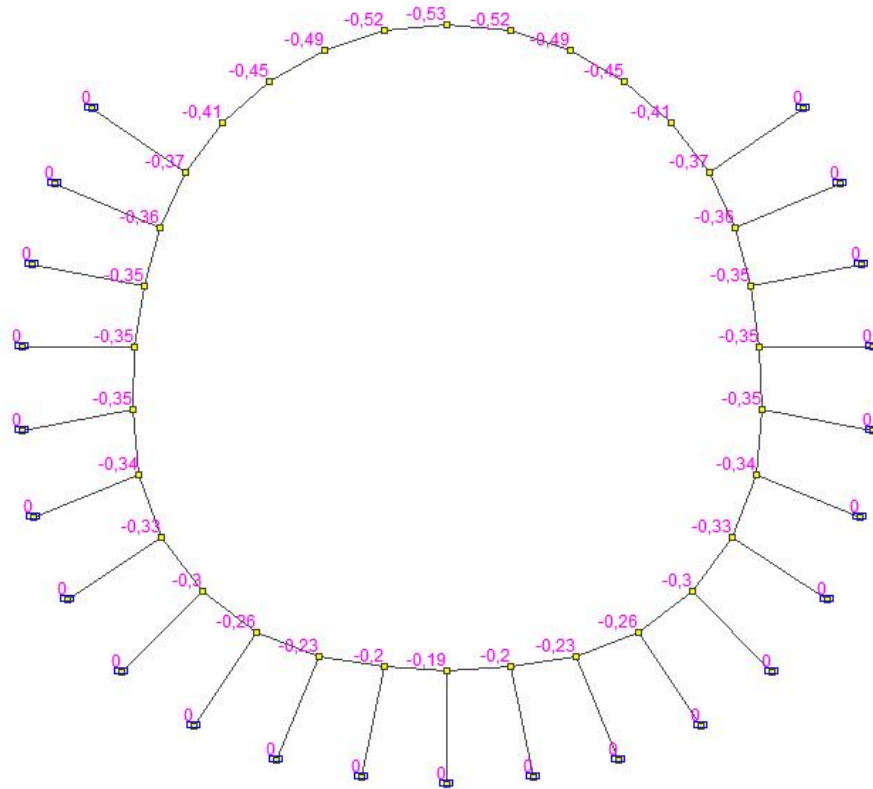


Рисунок 2.8 – Епюра вертикальних переміщень тунелю (NATM) від комбінованого навантаження у програмному комплексі SCAD
 Розрахунок ведемо без урахування сил тертя між зовнішньою поверхнею оправи та ґрунтовим масивом, що йде в запас міцності.

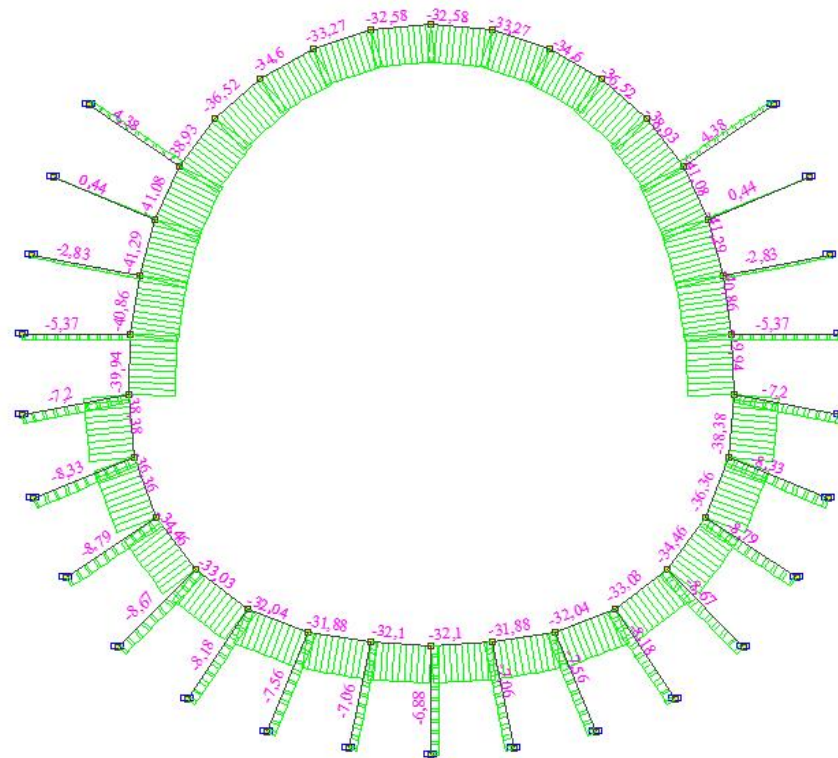


Рисунок 3.2 – Епюра нормальних сил N [кН] моделі перегінного тунелю оправа (NATM) товщиною 0,4 м від комбінованого навантаження у програмному комплексі SCAD

З наведених епюр визначаємо максимальний момент, та максимальну силу у цьому перерізі.

Максимальний момент $M=12,4$ кН*м

Максимальна сила $N=32,6$ кН

3.2 Перевірка на міцність небезпечного перерізу

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перетинах оправи роблять перевірку її на міцність відповідно до вказівок ДБН. Цей розрахунок потрібно проводити для двох перерізів із максимальними згинальними моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином. Наступним кроком є знаходження самого небезпечного перерізу - для позацентрово-стиснутих залізобетонних елементів таким є переріз, де діє максимальний момент і мінімальна нормальна сила.

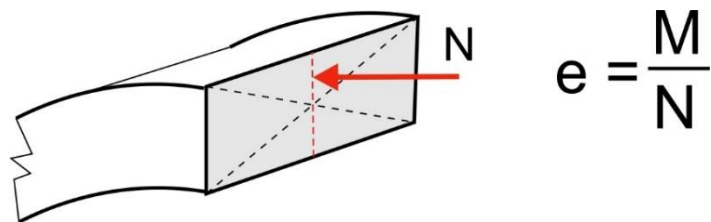


Рисунок 3.3 - Нормальна сила діюча у перерізі блоку, який розраховується на міцність

Перед проведенням перевірки оправи на міцність, слід виконати її армування, виходячи із правила симетричного армування, тобто розміщення однакової кількості арматури в розтягнутій та стиснутій зонах. Таке розміщення пояснюється тим, що нормальний блок може бути змонтований як у зоні від'ємних, так і в зоні додатних моментів.

Арматура елементів оправи складається з поздовжніх і поперечних стержнів, поздовжні стержні є робочими бо вони приймають зусилля в оправі і їхня кількість розраховується. Поперечні стержні (хомути) призначені для забезпечення проектного положення робочої арматури (арматурний каркас) і приймаються конструктивно.

Для поздовжньої робочої арматури потрібно застосовувати стержні діаметром не менше 12 мм і не більше 40 мм. Мінімальна відстань у світлі між стержнями арматури повинна бути не менша діаметра щебню бетону і не менша 25 мм. Найбільшу відстань між осями стержнів робочої арматури приймають не більше за 1,5 товщини елемента.

Згідно з правилами коефіцієнт армування повинен складати $\mu = 1,5 \dots 3 \%$, тобто площа поперечного перерізу арматури $A_s^{\text{сум}}$ повинна становити $1,5 \dots 3 \%$ поперечного перерізу бетону A_b .

$$A_b = b \cdot h \quad (3.1)$$

Розрахунок на міцність позацентрово стиснутих залізобетонних елементів тунельних оправ з залізобетонну виконується відповідно до ДБН В.2.3-14:2006, як позацентрово стиснутих елементів.

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перерізах оправи роблять перевірку її на міцність відповідно до вказівок вказаного ДБН.

Цей розрахунок потрібно проводити для двох перерізів із максимальними згинальними моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином. При розрахунках залізобетонних оправ найчастіше зустрічається перший випадок позацентрального стиснення, що відповідає "великим" ексцентриситетам, коли задовольняється умова

$$\frac{S_6}{S_0} \leq \xi . \quad (3.2)$$

Значення коефіцієнта ξ для бетонів класу С20/25 (В20) і нижче становить 0,8, класу С25/30 (В30) - 0,7 і класу С32/40 (В40) - 0,65.

Перевірку на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють у режимі позацентрального стиску:

$$N \cdot e \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'), \quad (3.3)$$

де N – поздовжня сила в перерізі, який перевіряється; ексцентриситет нормальної сили N відносно центра розтягнутої арматури $e = e_0 + \frac{h}{2} - a$ (геометричний параметр $a' = a$, який дорівнює сумі товщини захисного шару та половинному діаметру стержня); R_b – розрахунковий опір бетону на стиск; b – ширина елемента; x – висота стиснутої зони бетону; h_0 – геометричний параметр перерізу – висота перерізу від верхньої фібри до половини розтягнутої арматури; R_{sc} – розрахунковий опір арматури на стиск; A'_s – площа стиснутої арматури; a' – геометричний параметр перерізу – сумарна відстань від верхньої фібри до половини стиснутої арматури.

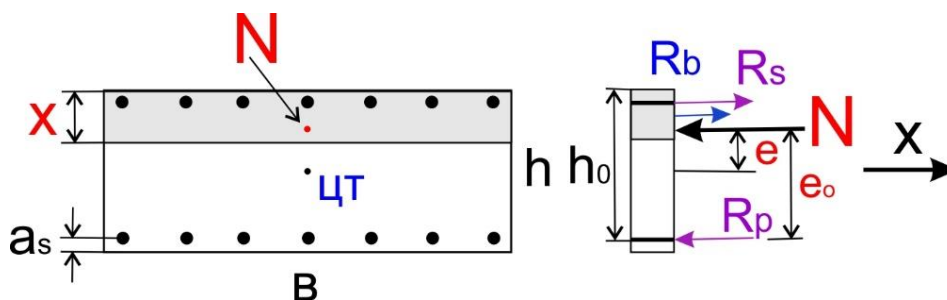


Рисунок 3.4 - Схема діючих зусиль у перерізі оправи

У цих формулах (рис.3.4.):

S_0 - статичний момент площі всього робочого перерізу бетону відносно осі розтягнутої арматури A ;

N - величина нормальної сили в перерізі;

R_u - розрахунковий опір бетону стисненню при вигині;

R_a - розрахунковий опір стиснутої арматури;

R_{ac} - розрахунковий опір розтягнутої арматури;

F_a - площа перерізу розтягнутої арматури;

F'_a - площа перерізу стиснутої арматури;

F_0 - площа перерізу стиснутої зони бетону;

x - відстань від нейтральної осі до крайньої грані стиснутої зони бетону;

b - ширина розрахункового елемента (блоку);

e - відстань від осі розтягнутої арматури до точки дії нормальної сили;

e' - відстань від осі стиснутої арматури до точки дії нормальної сили;

h_0 - відстань від осі розтягнутої арматури до крайньої грані стиснутої зони бетону;

Мінімальну товщину бетонного захисного шару для збірних залізобетонних оправ приймають при товщині елемента від 150 до 300 мм – 20 мм.

Ширина стиснутої зони x визначається з формули

$$N + R_s A_s - R_{sc} A'_s = R_b b x . \quad (3.4)$$

Оскільки $R_s A_s = R_{sc} A'_s$ при симетричному армуванні блока, то

$$x = \frac{N}{R_b b} . \quad (3.5)$$

За наведеними вище формулами проведемо розрахунки.

Площа поперечного перерізу бетону A_b :

$$A_b = 1 \cdot 0,4 = 0,4 \text{ м}^2 .$$

Ексцентриситет e_0 :

$$e_0 = \frac{12,4кНм}{32,6кН} \approx 0,380368 \text{ м.}$$

Площа стержня арматури A_{st} :

$$A_{st} = \frac{\pi \cdot (0,024)^2}{4} \approx 0,000452389 \text{ м}^2.$$

Попередня площа арматури A_s :

$$A_s = 0,01 \cdot 0,4 = 0,004 \text{ м}^2.$$

Кількість стержнів арматури n :

$$n = \frac{0,004}{0,000452389} \approx 8,84 \text{ штук.}$$

Повний ексцентриситет e . Якщо $as'=0.04\text{м}$ (40 мм), що є типовим для збірних елементів), то:

$$e = 0,38 + \frac{0,4}{2} - 0,04 = 0,38 + 0,2 - 0,004 = 0,54 \text{ м.}$$

За формулою $N \cdot e \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$ у спеціально розробленій для розрахунку залізобетонних тунельних оправ програмі, розрахуємо значення стиснутої зони бетону (x):

Розрахунок прямокутного залізобетонного перерізу (блоку) на міцність

Геометричні характеристики блоку		Силіві фактори в блоці	
Введіть ширину блока b , м	1	Введіть нормальну силу N , кН	32,6
Введіть висоту блока h , м	0,4	Введіть згинальний момент M , кНм	12,4
Площа поперечного перерізу Ab , м ²	0,4	Ексцентриситет e_0 , м	0,38
Введіть діаметр арматури d_{st} , м	0,024	Розрахунковий опір бетону R_b , кН/м ²	17000
Введіть коефіцієнт армування μ	0,01	Розрахунковий опір арматури R_s , кН/м ²	280000
Попередня площа арматури A_s , м ²	0,004	Ширина стиснутої зони бетону x , м	0,002
Площа стержня арматури	0,0004522	Повний ексцентриситет e , м	0,54
Кількість стержнів арматури n , штук	8,8		
Введіть n округлене до цілого парного	10		
Фактична площа арматури A_s , м ²	0,0045	Ліва частина рівняння	17,6
Площа розтягнутої арматури, м ²	0,0023	Перша права частина рівняння (бетон)	11,6
Площа стиснутої арматури, м ²	0,0023	Друга права частина рівняння (арматура)	200,0
Введіть товщину захисного шару, м	0,03	Права частина рівняння	211,7
Висота перерізу до верхньої фібри h_0 , м	0,358	Запас міцності N	12,1
Сумарна відстань $a=a'$, м	0,042	ВИСНОВОК:	Виконується

Значення ширини стиснутої зони бетону $x=0.002$ м – є результатом розрахунку на міцність залізобетонного елемента з позацентровим стисненням, що відповідає граничному стану. Таке мале значення x свідчить про те, що

переріз, ймовірно, знаходиться в умовах значного розтягу або великого ексцентриситету, що потребує ефективного армування. Цей параметр є ключовим для оцінки несучої здатності перерізу залізобетонного блоку

Після проведеної перевірки залізобетонного елемента на міцність можна зробити висновок про виконання умови. В ході перевірки з'ясувалося, що міцність перерізу достатня, тобто права сторона формули дорівнює лівій. Замінювати параметри конструкції оправи за рахунок збільшення товщини перерізу, підвищення класу бетону або збільшення відсотку армування не має потреби.

4 СПОРУДЖЕННЯ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ МЕТРОПОЛІТЕНУ

4.1 Проходка перегінного тунелю

Новоавстрійський спосіб проходки тунелів (NATM - New Austrian Tunnelling Method) представляє собою революційний підхід до спорудження підземних виробок, який кардинально змінив філософію тунельного будівництва в другій половині ХХ століття. Цей метод базується на фундаментальному принципі максимального використання несучої здатності навколишнього гірничого масиву, перетворюючи породу з перешкоди на активного учасника конструктивної системи тунелю.

Головною ідеологією NATM є контрольоване використання деформацій гірничого масиву для створення нового рівноважного стану навколо виробки. На відміну від традиційних методів, які прагнуть повністю запобігти переміщенням породи за рахунок потужного кріплення, новоавстрійський спосіб дозволяє породі деформуватися в контрольованих межах, що призводить до природного розвантаження масиву та зменшення навантажень на кріплення. Цей підхід забезпечує не лише економічність будівництва, але й підвищує довгострокову стабільність підземної споруди.

Фізична основа методу полягає в тому, що при проходці виробки навколо неї формується зона порушених порід, яка при правильному керуванні може бути стабілізована та перетворена в несучу конструкцію. Застосування гнучкого кріплення з анкерів, набризг-бетону та податливих арочних конструкцій дозволяє контролювати процес деформування та забезпечити поступовий перехід від первинного напруженого стану масиву до нового рівноважного стану.

Економічна ефективність NATM досягається за рахунок суттєвого зменшення матеріаломісткості конструкцій. Оскільки значна частина навантажень сприймається самою породою, товщина та міцність штучного кріплення можуть бути істотно зменшені порівняно з традиційними методами. Це особливо важливо для довгих перегінних тунелів, де економія матеріалів та

зменшення обсягів робіт призводять до значного зниження загальної вартості проекту.

Проходка перегінних тунелів новоавстрійським способом характеризується специфічною технологічною послідовністю операцій, яка забезпечує ефективне управління поведінкою гірничого масиву. Процес починається з детального геологічного та геотехнічного обстеження траси тунелю, що дозволяє визначити параметри кріплення для різних ділянок з урахуванням мінливості гірничо-геологічних умов.

Основою технології є циклічна проходка з короткими заходками, довжина яких зазвичай не перевищує 1-3 метри залежно від стійкості породи. Така технологія дозволяє швидко реагувати на зміни в поведінці масиву та вчасно корегувати параметри кріплення. Кожен цикл включає послідовне виконання буро-вибухових робіт, прибирання породи, встановлення первинного кріплення та геотехнічний моніторинг.

Особливістю проходки великих перегінних тунелів є застосування уступної схеми розробки, коли переріз тунелю розділяється на декілька частин, що розробляються послідовно. Найбільш поширеною є схема з верхнім та нижнім уступами, де спочатку проходиться верхня частина перерізу з встановленням тимчасового кріплення, а потім розробляється нижня частина з влаштуванням постійної оправи. Така технологія дозволяє зменшити розміри вибою, що полегшує управління стійкістю породи та підвищує безпеку робіт.

Критично важливим елементом технології є система моніторингу деформацій та напружень, яка функціонує протягом всього періоду будівництва. Вимірювальні прилади встановлюються як в кріпленні, так і в масиві породи на різних відстанях від контуру виробки. Це дозволяє отримувати інформацію про розвиток деформаційних процесів в реальному часі та приймати обґрунтовані рішення щодо необхідності підсилення кріплення або зміни технологічних параметрів.

Система первинного кріплення при NATM є комбінованою та включає декілька взаємодоповнюючих елементів. Анкерне кріплення забезпечує

зшивання тріщинуватої породи та створення несучої оболонки навколо виробки. Набризг-бетонне покриття герметизує поверхню та забезпечує рівномірний розподіл навантажень. Податливі арочні конструкції застосовуються в слабких породах для додаткового підтримання контуру та контролю деформацій.

У спішна реалізація новоавстрійського способу проходки тунелів значною мірою залежить від використання спеціалізованої техніки та обладнання, адаптованого до специфічних вимог цього методу. Комплекс механізації для NATM характеризується мобільністю, універсальністю та можливістю швидкого переналаштування для виконання різних технологічних операцій в обмеженому підземному просторі.

Основу механізації складають самохідні бурові установки на гусеничному або колісному ходу, обладнані маніпуляторами з декількома буровими машинами. Сучасні установки дозволяють одночасно вести буріння шпурів в різних частинах вибою, що значно підвищує продуктивність робіт. Системи автоматичного керування бурінням забезпечують високу точність розташування шпурів відповідно до проектної схеми та дозволяють адаптувати параметри буріння до властивостей породи в реальному часі.

Для прибирання зруйнованої породи використовуються спеціальні самохідні навантажувачі з низьким профілем, адаптовані для роботи в тунелях. Ці машини обладнуються потужними гідравлічними системами та можуть працювати з різними типами робочих органів залежно від характеру породи. Транспортування породи здійснюється за допомогою конвеєрних систем або самохідних транспортних засобів, вибір яких залежить від довжини тунелю та об'ємів розробки.

Встановлення анкерного кріплення виконується спеціалізованими анкероустановочними машинами, які забезпечують швидке та точне розміщення анкерів відповідно до проектної схеми. Сучасні машини обладнуються системами автоматичного дозування клейких речовин та контролю якості встановлення анкерів. Для нанесення набризг-бетону використовуються мобільні бетоноукладальні комплекси з роботизованими маніпуляторами, що

забезпечують рівномірне покриття складних поверхонь з мінімальним відскоком матеріалу.

Особливе значення в механізації NATM має обладнання для геотехнічного моніторингу. Автоматизовані системи збору та обробки даних забезпечують безперервний контроль за станом конструкцій та масиву породи. Сучасні системи включають датчики деформацій, тензометри, інклінометри та інші прилади, інтегровані в єдину інформаційну мережу, що дозволяє оперативно оцінювати стан тунелю та приймати рішення щодо коригування технологічних параметрів.

Система вентиляції та пилогазовидалення є критично важливою при проходці тунелю NATM, оскільки інтенсивне використання набризг-бетону та анкерних систем створює специфічні вимоги до якості повітряного середовища. Сучасні вентиляційні комплекси забезпечують не лише видалення шкідливих речовин, але й створення оптимальних умов для твердіння бетону та роботи персоналу.

Буро-вибухові роботи при новоавстрійському способі проходки тунелів мають свої специфічні особливості, пов'язані з необхідністю мінімізації порушення навколишнього масиву та забезпечення контрольованого характеру руйнування породи. Основним принципом організації БВР при NATM є застосування технології контрольованого підривання, яка дозволяє отримувати рівну поверхню контуру виробки та зберігати структурну цілісність породи за межами проектного контуру.

Схема розташування шпурів при NATM розробляється з урахуванням форми перерізу тунелю, властивостей породи та вимог до якості контуру. Типова схема включає врубові шпури, розташовані в центральній частині вибою для створення додаткової вільної поверхні, відбійні шпури для руйнування основної маси породи, та оконтурюючі шпури, розташовані по периметру проектного контуру. Глибина шпурів зазвичай становить 2-4 метри, що забезпечує ефективне руйнування породи при мінімальній кількості вибухових речовин.

Особливу увагу приділяється технології оконтурюючого підривання, яка забезпечує отримання рівної поверхні контуру без значних порушень структури

породи. Застосовуються спеціальні схеми розташування оконтурюючих шпурів з малими відстанями між ними та зменшеними зарядами вибухових речовин. Часто використовується техніка попереднього щілинорізання, коли між оконтурюючими шпурами створюються суцільні щілини за допомогою спеціальних зарядів або механічних пристроїв.

Вибір типу вибухових речовин для NATM визначається необхідністю забезпечення контрольованого характеру вибуху та мінімізації сейсмічного впливу на навколишні конструкції. Найчастіше застосовуються емульсійні вибухові речовини з регульованими детонаційними характеристиками, які дозволяють точно контролювати енергію вибуху. Для оконтурюючих шпурів використовуються спеціальні низькобризантні вибухові речовини або заряди зменшеної потужності.

Система ініціювання при NATM базується на використанні електронних детонаторів з програмованою затримкою, що дозволяє реалізувати складні схеми короткозамедленого підривання. Правильно організована послідовність підриву забезпечує оптимальне дроблення породи, мінімізує розліт шматків та зменшує динамічний вплив на кріплення та обладнання. Застосування систем дистанційного підриву підвищує безпеку робіт та дозволяє точно контролювати момент ініціювання.

Контроль якості БВР при NATM включає оцінку рівності контуру, ступеня дроблення породи та впливу на навколишній масив. Використовуються методи лазерного сканування для точного визначення відхилень фактичного контуру від проектного, що дозволяє корегувати параметри наступних підривів. Сейсмічний моніторинг забезпечує контроль за впливом вибухів на існуючі конструкції та дозволяє оптимізувати параметри зарядів для мінімізації негативних наслідків.

4.2 Спорудження оправи тунелю

Система кріплення при NATM є багатокомпонентною та розрахована на поетапне сприйняття навантажень від гірничого масиву з урахуванням його деформаційної поведінки. Первинне кріплення встановлюється безпосередньо після проходки кожної заходки та складається з анкерів, набризг-бетонного

покриття та, при необхідності, податливих арочних конструкцій. Ця система забезпечує негайну стабілізацію контуру виробки та створює умови для контрольованого розвитку деформацій масиву.

Анкерне кріплення є основним несучим елементом системи та виконує функцію зшивання тріщинуватого масиву, створюючи навколо виробки товстостінну породно-анкерну оболонку. Довжина анкерів визначається інженерно-геологічними умовами та розмірами зони порушених порід, зазвичай вона становить 3-6 метрів. Застосовуються різні типи анкерів: розпірні механічні, що забезпечують негайне закріплення; клейові анкери з полімерними або цементними закріплюючими речовинами; самосвердлівні анкери для складних гірничо-геологічних умов.

Набризг-бетонне покриття наноситься на контур виробки шарами товщиною 5-15 см залежно від стійкості породи та навантажень. Сучасні технології передбачають використання високоміцних бетонів з добавками, що прискорюють твердіння та підвищують адгезію до породи. Армування набризг-бетону здійснюється сталевую або полімерною сіткою, а в окремих випадках - дисперсним армуванням фіброю. Нанесення виконується роботизованими системами, що забезпечують рівномірність покриття та мінімізують втрати матеріалу.

Податливе арочне кріплення застосовується в слабких та нестійких породах як додатковий елемент підтримання. Сучасні арочні конструкції виготовляються зі спеціального прокату або зварюваних профілів з можливістю контрольованого деформування під навантаженням. Установка арок здійснюється з кроком 0,5-1,5 метра залежно від навантажень та характеристик породи.

Система геотехнічного моніторингу є невід'ємною частиною технології NATM та забезпечує безперервний контроль за поведінкою системи "масив-кріплення". Вимірювальні прилади встановлюються на різних етапах будівництва та включають: конвергометри для вимірювання зближення стінок виробки; екстензометри для контролю деформацій в глибині масиву; тензометри

для вимірювання напружень в елементах кріплення; нівелірні марки для контролю осідань поверхні.

Автоматизовані системи збору даних забезпечують обробку інформації в реальному часі та дозволяють швидко реагувати на зміни в поведінці конструкції. Застосування сучасних комп'ютерних технологій дозволяє прогнозувати розвиток деформаційних процесів та оптимізувати параметри кріплення для наступних ділянок тунелю.

Новоавстрійський спосіб проходки тунелів демонструє численні переваги порівняно з традиційними методами, що обумовило його широке поширення в сучасному тунелебудуванні. Основною перевагою є економічна ефективність, яка досягається за рахунок суттєвого зменшення матеріаломісткості конструкцій та скорочення термінів будівництва. Використання несучої здатності породи дозволяє зменшити товщину постійної оправи на 30-50% порівняно з традиційними методами, що особливо важливо для довгих перегінних тунелів.

Технологічна гнучкість NATM дозволяє адаптувати параметри кріплення до мінливих гірничо-геологічних умов без зупинки будівельного процесу. Це особливо важливо при проходці тунелів у складних геологічних умовах з частою зміною типів порід та їх властивостей. Можливість оперативного коригування технологічних параметрів на основі даних моніторингу забезпечує високу надійність конструкцій та безпеку робіт.

Екологічні переваги NATM пов'язані зі зменшенням обсягів використання природних матеріалів та енергоресурсів. Зменшення товщини бетонної оправи призводить до скорочення викидів CO₂ при виробництві цементу, а ефективне використання місцевих порід зменшує потребу в транспортуванні матеріалів. Контрольований характер деформацій зменшує вплив будівництва на навколишнє середовище та існуючі споруди.

Перспективи розвитку технології NATM пов'язані з впровадженням цифрових технологій та штучного інтелекту для оптимізації процесів проектування та будівництва. Використання систем комп'ютерного моделювання дозволяє прогнозувати поведінку масиву та оптимізувати

параметри кріплення ще на стадії проектування. Розвиток систем автоматизованого моніторингу з використанням ІТ-технологій забезпечує більш точний контроль за станом конструкцій та можливість превентивного усунення проблем.

Інтеграція NATM з іншими сучасними технологіями тунелебудування, такими як механізована проходка та заморожування порід, відкриває нові можливості для спорудження тунелів у найскладніших умовах. Розвиток нових матеріалів для кріплення, включаючи високоміцні композити та "розумні" матеріали з адаптивними властивостями, дозволить підвищити ефективність та довговічність підземних конструкцій, споруджених за новоавстрійським способом.

4.3 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Для кожного об'єкта, де виконуються вибухові роботи, повинні бути розроблені конкретні заходи щодо забезпечення безпеки вибухових робіт з урахуванням місцевих умов, особливостей конструкції споруди.

Проекти та паспорти буропідривних робіт, технічні розрахунки на підривання окремих конструкцій споруд, що підлягають перебудові, повинні складатися з урахуванням конкретних штучних і геологічних умов.

Персонал, який здійснює буровибухові роботи, повинен бути ознайомлений під розпис з технічною документацією на ці роботи.

Керівництво вибуховими роботами покладається на призначені наказом посадові особи, в подальшому - особи технічного нагляду, які мають відповідну освіту для ведення гірських, підривних та інших робіт.

Вибухові роботи повинні виконуватися підривниками під керівництвом особи технічного нагляду за письмовим нарядам з ознайомленням під підпис та відповідним нарядами-путівками і проводитися тільки в місцях, що відповідають вимогам правил і інструкцій з безпеки робіт, встановлених проектом буропідривних робіт. Буріння шпурів повинно здійснюватися відповідно до паспорта буропідривних робіт (БПР), затвердженим головним інженером будівельного підрозділу, що веде роботи по ремонту і реконструкції тунелів та інших штучних споруд.

До початку робіт з буріння шпурів і свердловин забій виробки повинен бути оглянутий керівником робіт і приведений у безпечний стан. Забороняється буріння шпурів до приведення забою в безпечний стан (оборка покрівлі, чола та боків виробки, встановлення тимчасової кріплення). Наочна схема розміщення шпурів по забою з зазначенням їх кількості, глибини та призначення повинна бути вивішена у виробці, де ведуться бурові роботи.

Буріння ручним бурильним інструментом шпурів і свердловин, розташованих на висоті більше 1,3 м від підлоги виробки, повинно проводитися з риштування і полків або спеціальних бурових візків, рам, кареток.

Бурити шпури з укусу підірваної породи допускається тільки за умови влаштування вирівняною стійкої майданчики і знаходженні бурильника поза зоною дії породонавантажувальною машини і відсутності небезпеки зсуву породи при її відвантаженні.

Працівники, зайняті на бурінні шпурів і свердловин, повинні бути забезпечені захисними окулярами.

Буріння шпурів ручними перфораторами повинно проводитися із застосуванням забурників довжиною 0,5 - 0,8 м. Застосування більш довгих бурів для забурювання забороняється.

При бурінні шпурів і свердловин повинні бути вжиті заходи по пилепридушення.

Стиснене повітря слід подавати до перфораторів з пневматичним шлангами довжиною 10 - 15 м від повітророзподільника, обладнаного водоспускним краном.

З'єднання пневматичних шлангів повинні виконуватися за допомогою двостороннього ніпеля, а шлангу з перфоратором - за допомогою конусного ніпеля, накидної гайки і штуцера. Кріплення шлангів до штуцерів і ніпелям слід проводити за допомогою стяжних хомутів. Забороняється застосовувати дротяні скрутки для закріплення шлангів.

Витягувати з шпурів заклинивші бури дозволяється тільки із застосуванням бурового ключа або спеціального пристосування.

У разі появи при бурінні будь-яких ознак зміни інженерно-геологічних умов слід припинити буріння шпурів або свердловин і повідомити про це керівнику робіт для вжиття необхідних заходів. Організація водовідливу з підземних виробок під час виробництва робіт, типи застосовуваних насосних установок і устаткування повинні бути визначені проектом. Дренажні та водовідвідні канали у виробках повинні мати міцні настили. Не можна допускати затоплення настилів і відкаточних шляхів.

При використанні для відкачування води безпосередньо з забою виробки малогабаритних переносних пневматичних насосів слід дотримуватися вимоги

безпеки при роботі з ручним пневмоінструментом, а також вимоги пункту 222 цих Правил. Забороняється проводити очищення таких насосів стисненим повітрям.

Насоси, застосовувані для водовідливу в тунелі, повинні мати надійне заземлення і розміщуватися в спеціальних виробках. Підлогу насосних камер повинен бути вище рівня шляхів в тунелі не менше ніж на 0,5 м і міститися в чистоті.

При необхідності влаштування у тунелі водозбірника останній повинен влаштуватися таким чином, щоб його обслуговування було безпечним. Всі водозбірники повинні мати надійне огороження та пристрої для спуску води.

При проходці вертикальних шахтних стволів при реконструкції або ремонту тунелів вимоги до організації в них водовідливу повинні встановлюватися відповідно до вимог «Правил безпеки при будівництві підземних споруд».

Будівельні машини, транспортні засоби, виробниче обладнання, засоби механізації, пристосування, оснащення, ручні машини та інструмент, в тому числі іноземного виробництва, повинні відповідати державним нормативним вимогам охорони праці та мати декларацію про відповідність або сертифікат відповідності.

ВИСНОВКИ

Проведений розрахунок тунельної оправи еліптичної форми і отримані результати розрахунку напружено-деформованого стану дають змогу зробити наступні висновки:

1. Проаналізовані інженерно-геологічні умови спорудження перегінного тунелю дали змогу зробити висновок про те, що ґрунт в якому споруджується перегінний тунель має зони з великою тріщинуватістю тому його міцність приймається мінімальною.

2. Розроблено розрахункову модель тунельної оправи еліптичної форми для чисельного аналізу системи.

3. Виконано аналіз результатів розрахунку тунельної оправи еліптичної форми, яка споруджується NATM.

4. Розроблена технологія спорудження перегінного тунелю в умовах Дніпровського метрополітену Новоавстрійським способом.

5. Проаналізовано вимоги безпеки, які мають дотримуватись під час проходки тунелю та виконанні буровибухових робіт.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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.
2. Заворицкий, В. И. Проектирование подземных транспортных сооружений [Текст] / В. И. Заворицкий. – Київ : Будівельник, 1975. – 204 с.
3. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Начальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ: НТУ, 2006. – 166 с.
4. Петренко, В. Д. Методичні вказівки до курсового й дипломного проектування «Станція метрополітену глибокого закладення (конструкції та спорудження)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, Д. В. Тютюкін. – Д.: Нова ідеологія, 2015. – 30 с.
5. Гайко, Г. І. Конструкції кріплення підземних споруд: Навчальний посібник [Текст] / Г. І. Гайко. – Алчевськ: Дон ДНУ, 2006 – 133с.
6. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій [Текст] / О. Л. Тютюкін. – Дніпро : Журфонд, 2020. – 260 с.
7. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
8. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004. – 176 с.
9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
10. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Киев : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
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. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. – 252 с.