

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
ІНІ 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: Визначення й аналіз параметрів щитової проходки
пeregінного тунелю Київського метрополітену
за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: MT2321


(підпис студента)

/ Артур ЦИМБАЛОВ /
(підпис)

Керівник:


(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /
(підпис, ім'я прізвище)

Нормоконтролер:


(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /
(підпис, ім'я прізвище)

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

Студент


(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: Determination and analysis of the parameters
of the shield tunneling of the Kyiv metro tunnel
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: MT2321 / Artur TSYMBALOV /
(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: «Мости і транспортні тунелі»

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)

студенту Цимбалову Артуру Андрійовичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Визначення й аналіз параметрів щитової проходки
перегінного тунелю Київського метрополітену»

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

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

затверджені наказом від «28» серпня 2024 р. № 939ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу інженерно-геологічних та
гідрогеологічних умов Київського метрополітену, конструкцій перегінного
тунелю з різних матеріалів та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

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

Вступ. Розділ 1. Визначення параметрів оправи перегінного тунелю. Розділ 2.
Аналіз параметрів міцності оправи перегінного тунелю. Розділ 3. Визначення
параметрів щитової проходки перегінного тунелю Київського метрополітену.
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. Визначення параметрів оправи перегінного тунелю.	02.09.2024-29.09.2024	
2	Розділ 2. Аналіз параметрів міцності оправи перегінного тунелю.	30.09.2024-03.11.2024	
3	Розділ 3. Визначення параметрів щитової проходки перегінного тунелю Київського метрополітену. Висновки. Оформлення ВКР.	04.11.2024-05.12.2024	
4	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	09.12.2024-12.01.2025	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2025	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2025	

Студент

_____ (підпис)

Артур ЦИМБАЛОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Олексій ТЮТЬКІН

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

59 стор., 11 рис., 9 табл., 14 літературних джерел.

Об'єкт розробки – перегінний тунель.

Мета роботи – визначення й аналіз параметрів щитової проходки перегінного тунелю Київського метрополітену.

Метод дослідження – метод кільця, що вільно деформується.

В магістерській роботі проаналізовано конструктивні особливості збірних залізобетонних оправ і виконано визначення параметрів оправи перегінного тунелю. Проведена розробка варіантів оправи перегінного тунелю і техніко-економічне порівняння.

На основі методу кільця, що вільно деформується, проведено аналіз силових факторів в оправі перегінного тунелю. Зроблена перевірка на міцність елементів оправи із залізобетону та виконане дослідження впливу гідростатичного тиску на силові фактори в оправі.

Визначено й проаналізовано параметри щитової проходки перегінного тунелю Київського метрополітену.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, ПЕРЕГІННИЙ ТУНЕЛЬ, ЩИТОВА ПРОХОДКА, МЕТОД КІЛЬЦЯ, ЩО ВІЛЬНО ДЕФОРМУЄТЬСЯ, СИЛОВІ ФАКТОРИ, ТЕХНОЛОГІЯ СПОРУДЖЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ.....	9
1.1 Конструктивні особливості збірних залізобетонних оправ.....	9
1.2 Розробка варіантів оправи перегінного тунелю.....	12
1.3 Техніко-економічне порівняння	16
2 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МІЦНОСТІ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ...	23
2.1 Визначення навантажень на оправу перегінного тунелю.....	23
2.2 Розрахунок оправи як кільця, що вільно деформується	25
2.3 Перевірка на міцність елементів оправи із залізобетону	27
2.4 Дослідження впливу гідростатичного тиску на силові фактори в оправі.....	31
3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЩИТОВОЇ ПРОХОДКИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ	40
3.1 Загальні положення.....	40
3.2 Цикл проходки.....	40
3.3 Цикл монтажу оправи	42
3.4 Визначення основних розмірів щита	46
3.5 Транспортування ґрунту.....	50
3.6 Переміщення тунелепрохідницького комплексу.....	51
3.7 Тампонаж заоправного простору та спеціальні роботи	52
3.8 Гідроізоляція тунельної оправи	54
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	58

ВСТУП

Спорудження об'єктів метрополітену є складним комплексним завданням по освоєнню підземного простору, яке характеризується зведенням вертикальних (шахтні стволи), горизонтальних (збійки, перегінні тунелі), похилих (ескалаторні тунелі) та складних за конфігурацією (станції глибокого та мілкового закладення) споруд. Особливістю такого планомірного освоєння є те, що воно відбувається в різноманітних інженерно-геологічних умовах.

Найбільш протяжними в системі метрополітену підземними спорудами є перегінні тунелі. Складність їхнього спорудження пов'язана з тим, що інженерно-геологічні умови можуть бути представлені слабкими породами, такими як піски, супіски, суглинки, глини тощо. Додаткову складність додає наявність горизонту підземних або ґрунтових вод, які зменшують міцність та стійкість слабких порід. Така ситуація наявна в м. Києві, а вказані особливості та складності притаманні спорудженню Київського метрополітену, особливо мілкового закладення.

Перегінні тунелі, як відомо, споруджують на основі щитової проходки, тобто із застосуванням тунелепрохідницького механізованого комплексу (далі по тексті – ТПМК). ТПМК, флагманом якого є прохідницький щит, повинен забезпечувати не тільки усі цикли проходки перегінного тунелю (розробку породи, її транспортування, монтаж оправи, тампонаж, гідроізоляцію тощо), а й задовольняти вимогам безпеки робітників, а також забезпечувати завдяки своїй конструкції та деяким іншим особливостям міцність та стійкість обводненого масиву, складеного слабкими породами.

Окрім технології щитової проходки важливу роль у підтриманні такого масиву відіграє конструкція оправи, яка є збірною. Варіанти оправ, що застосовувалися раніше, тобто блочні залізобетонні або тубінгові чавунні, не втратили свого розповсюдження, але деякі їхні особливості, наприклад, гідроізоляція на основі виключно чеканення швів або метрова ширина вздовж осі, свідчать про те, що їхній потенціал майже вичерпаний.

Логічним рішенням в сукупному процесі варіантного проектування та аналізу технології щитової проходки є комбінація сучасного ТПМК з різними видами привантаження (повітряне, пінне, ґрунтове) і оправи збільшеної ширини з блоків, що мають трапецієподібну форму, і, відповідно, площі спирання на слабкий ґрунт, а також системи гумової та інших видів гідроізоляції. Застосування ТПМК разом із варіантами оправи, що вже використовувалися, також можливо, але ступінь ефективності такого рішення буде невисоким.

Відповідно, задачею, яка постає під час спорудження метрополітену в слабкому обводненому ґрунтовому масиві, наприклад, в м. Києві, є визначення та аналіз параметрів щитової проходки в комплексі. Варіантне проектування повинно базуватися на виборі різних типів тунельної оправи з урахуванням конструктивних особливостей збірних залізобетонних оправ. Це підкреслює той факт, що навіть при отриманні під час техніко-економічного порівняння даних слід керуватися вищевикладеними даними, коригуючи отримане рішення.

Визначення та аналіз параметрів міцності залізобетонної оправи з блоків, що мають трапецієподібну форму, слід виконувати з урахуванням зміни рівня ґрунтових вод. Ця задача є актуальною для отримання закономірностей силових параметрів, що зв'язані з дією гірського та гідростатичного тиску. Під час визначення та аналізу щитової проходки слід розробити положення та алгоритми усіх циклів роботи ТМПК.

Таким чином, враховуючи проаналізоване вище визначення й аналіз параметрів щитової проходки перегінного тунелю Київського метрополітену є актуальною задачею випускної кваліфікаційної роботи.

1 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ

1.1 Конструктивні особливості збірних залізобетонних оправ

Спосіб проходки перегінного тунелю значно залежить від місцевих інженерно-геологічних умов [3, 7, 8]. На основі проведених вишукувань можна зробити висновок, що геологія у місці будівництва дуже різноманітна. Було виявлено багато видів піску, супіску та глини. У ході проектування необхідно виконати порівняння в технічному та економічному відношенні декількох можливих варіантів оправи (із залізобетонних блоків В40, залізобетонних тюбінгів В40 та чавунних тюбінгів) [14]. Здебільшого необхідно вибирати оправи із залізобетону, і тільки в особливо важких інженерно-геологічних умовах може бути допущено застосування оправ з чавунних тюбінгів.

Оправи тунелів, які споруджуються щитовим способом, відрізняються різноманітністю конструктивних форм та матеріалів, які використовуються. Широке застосування в будівництві тунелів в складних інженерно-геологічних умовах за допомогою ТПМК набули оправи з водонепроникних високоточних залізобетонних блоків, до яких висуваються наступні умови [1, 2]:

- вони не повинні мати відхилення від проєктних розмірів більше 0,5 мм, що вище вимог до чавунних тюбінгів;
- при великих гідростатичних тисках мати водонепроникність як у межах тіла бетону, так і в стиках;
- сприймати навантаження від гірничого та гідростатичного тиску, від тампонажу заоправного простору, а також зусилля щитових гідроциліндрів;
- бажано обмежуватись одним конструктивним типом кільця оправи для її спорудження як на прямих, так і на кривих ділянках траси;
- допускати виготовлення блоків територіально близько від місця будівництва тунелю.

Таким вимогам відповідає оправа з універсальних клинових кілець [10].

Клинове кільце створено двома непаралельними поперечними торцевими

площинами. Одна площина перпендикулярна до поздовжньої осі кільця, а інша нахилена під кутом до цієї осі, тож ширина кільця по зовнішньому діаметру міняється від максимального значення до мінімального. По центру кільця його ширина відповідає номінальній (середній).

На прямих ділянках кільця монтують попарно таким чином, що нахилені торці з'єднуються між собою й з поворотом одного кільця на 180° відносно другого. При цьому площини протилежних торців кілець набувають паралельність.

На горизонтальних та вертикальних криволінійних ділянках потрібний радіус кривої досягається поворотом одного з попарних кілець відносно іншого на відповідну величину кута.

Застосування універсальних клинових кілець дозволяє звести оправу з перев'язкою швів, яка володіє підвищеною жорсткістю. Кільце складається з одного замкового блока клинової форми, вдавлююмого до поздовжньої осі, що необхідно для обжимання ущільнюючих прокладок, двох суміжних та необхідної кількості нормальних блоків в залежності від діаметра тунелю.

Число та розміри блоків з перев'язкою швів в кільці повинно відповідати числу та кроку щитових гідроциліндрів. Досвід робіт показує, що при монтажі чергового блоку обробки для попередження видавлювання блоків раніше змонтованого кільця повинно прибиратися мінімальна кількість щитових гідроциліндрів. При цьому в попередньому кільці не повинен знаходитись блок, повністю звільнений від зусилля гідроциліндрів.

Для попередження зміщення суміжних кілець оправи кільцевий стик блоків рекомендується виконувати за схемою «паз-виступ».

Теоретична максимальна ширина кільця оправи залежить від її діаметру та мінімального радіуса кривої на трасі.

Нові технічні засоби монтажу, такі як пневматичний захват, не обмежують розмірів та вагу елементів оправи, але при цьому необхідно мати момент обертання кільцевого укладальника не менше суми максимальної ваги блока та зусилля, необхідного для обжимання прокладок.

Поперечний переріз елементів оправи вибирається, як правило, суцільним, що є більш раціональним за критеріями водонепроникності, технології виготовлення та вартості.

Зв'язки між елементами оправ бувають конструктивні, сприймаючі внутрішні зусилля та працюючі протягом всього терміну служби споруди, та монтажні, тимчасово використані в процесі зборки оправи. На відміну від традиційних рішень постановки конструктивних зв'язків розтягу, в оправі з універсальних кілець такі зв'язки відсутні.

Відсутність вказаних зв'язків компенсується комплексом спеціальних технічних рішень [1, 10, 14]:

- висока точність виготовлення блоків, з допусками до 0,5 мм;
- конструкція радіальних та кільцевих стиків;
- технологія монтажу кільця з високою точністю установки елементів оправи;
- технологія нагнітання розчину через отвори в блоках або канали в оболонці щита, безперервно та достатньо рівномірно утворюючого навколо кілець пружній відпор при їх сходженні з хвостовою оболонкою.

Як показує досвід будівництва тунелів, що залягають в слабких водо насичених ґрунтах, вказаними заходами може бути забезпечена жорсткість обробки з універсальних кілець без зв'язків розтягу, необхідна для її стійкості в період експлуатації.

В практиці українського будівництва тунелів із застосуванням механізованих щитів з активним привантаженням забою присутній позитивний досвід використання оправ із залізобетонних блоків з металевим екраном, обжимаючих породу. Радіальні стики між блоками в кільці приймають плоскими, зі зменшеною площадкою обпирання по висоті перерізу за рахунок прокладок та чеканочної канавки. В радіальних стиках передбачаються тимчасові монтажні болти, встановлені нахилено та загвинчені в полімерні втулки сусіднього блоку. Монтажні болти знімаються через 30...50 кілець та використовуються повторно.

1.2 Розробка варіантів оправи перегінного тунелю

Варіант 1. Оправа із чавунних тюбінгів В30

Перевагами цієї оправи є мінімальна кількість типорозмірів тюбінгів, повна водонепроникність за будь-якого гідростатичного тиску й простота забезпечення перев'язки поздовжніх стиків у суміжних кільцях (простим зміщенням замкового елемента ліворуч і праворуч від вертикальної осі на 1...2 болтових кроки) [2, 11]. Недоліком цієї оправи є відсутність плоскої поверхні в лотку і як наслідок – необхідність улаштування колії для відкатки на дерев'яному настилі або бетонній основі, а також складність подальшого очищення лотка від бруду (рис. 1.1).

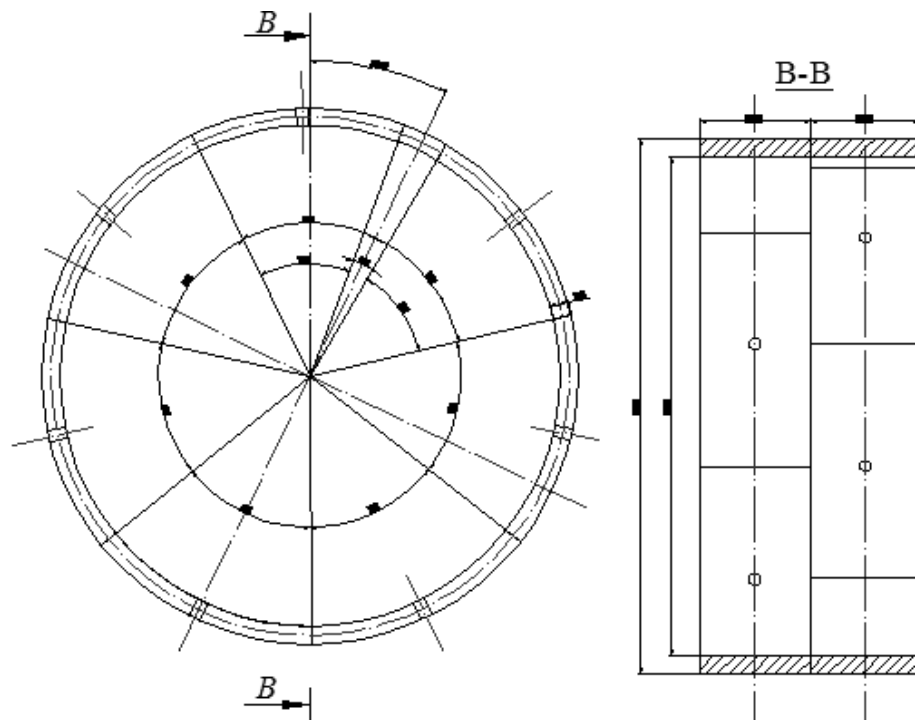


Рисунок 1.1 – Оправа із чавунних тюбінгів

Для визначення товщини блоків застосовано емпіричну формулу [14]:

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_{\text{вн}}^2}{f}} = 7,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,75^2}{0,6}} = 17,45 \text{ см}$$

де $R_{\text{вн}}$ – внутрішній радіус оправи в м; f – коефіцієнт міцності породи, за

класифікацією проф. М. М. Протод'яконова; n – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює $n=7.5$ для чавунних тюбінгів; приймаємо $h = 20$ см.

Варіант 2. Оправа із залізобетонних тюбінгів В40

Залізобетонні тюбінгові оправи без плоского лотка за принциповим конструктивним рішенням аналогічні чавунним: у кільце оправи входять три типорозміри тюбінгів – «н», «з», «с» (рис. 1.2) [14].

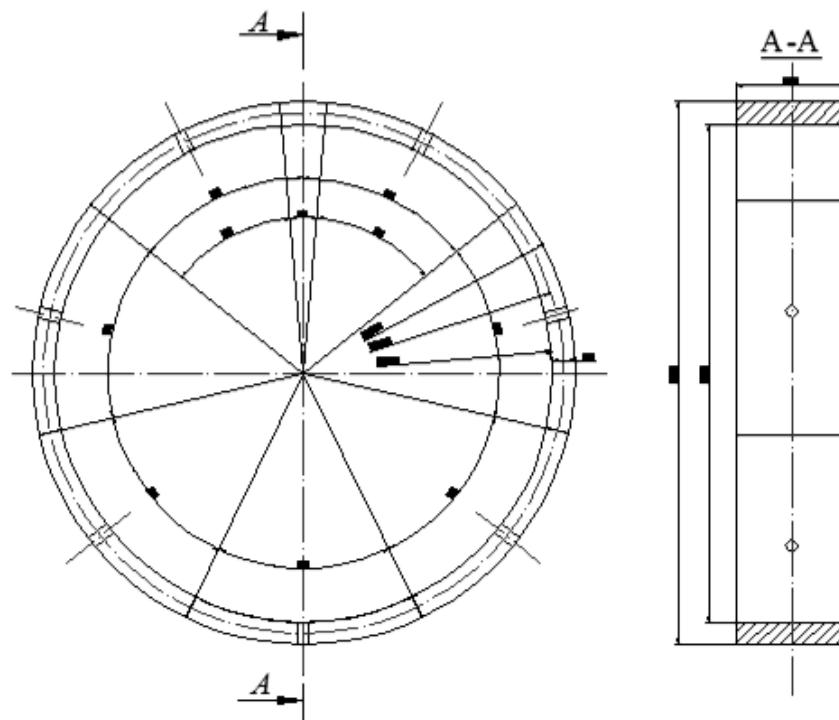


Рисунок 1.2 – Оправа із залізобетонних тюбінгів

Для визначення товщини блоків застосовано емпіричну формулу:

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_{вн}^2}{f}} = 9 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,75^2}{0,6}} = 20,95 \text{ см}$$

де $R_{вн}$ – внутрішній радіус оправи в м; f – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова; n – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює $n = 9$ – для залізобетонних тюбінгів з бетону класу В40; приймаємо $h = 25$ см.

Варіант 3. Оправа із залізобетонних блоків В40

Для визначення товщини блоків застосовано емпіричну формулу:

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_{вн}^2}{f}} = 9 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,75^2}{0,6}} = 20,95 \text{ см}$$

де $R_{вн}$ – внутрішній радіус оправи в м; f – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова; n – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює $n=9$ – для залізобетонних блоків з бетону класу В40. Приймаємо $h = 25$ см (рис. 1.3).

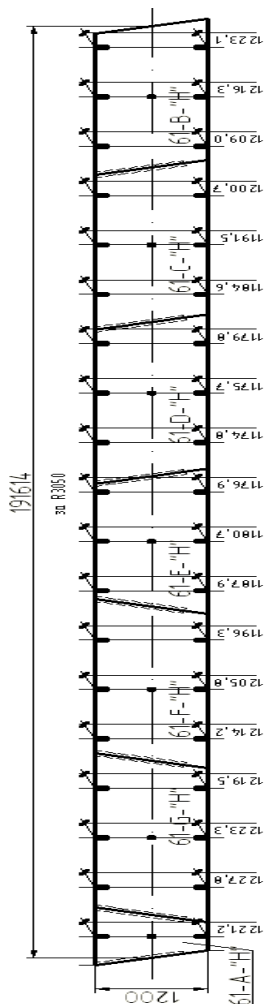


Рисунок 1.3 – Розгортка кільця $D_{зовн}/D_{вн}=6100/5600$

(вигляд з зовнішньої сторони)

Блоки в кільці мають плоскі стики, при цьому поздовжні торці блоку симетрично нахилені відносно поздовжньої осі тунелю так, що кожен блок має в плані трапецієподібну форму (по типу оправ, розповсюджених на будівництві колекторних тунелів) [2, 14]. На поздовжніх торцях блоків вбудовані півциліндричні пази, яким відповідають циліндричні гребні на поздовжніх торцях сусідніх блоків. На кожному кільцевому торці блоку передбачені два пластмасових патрона, в які встановлюють пластмасово-металеві дюбелі, які забезпечують зв'язок між кільцями. Конічна форма двосторонніх дюбелів, здавлюваних в пластмасові патрони блоків двох суміжних кілець гідроциліндрами щита, в поєднанні з направляючими елементами шпунтового з'єднання блоків в кільці забезпечує високоякісний монтаж оправ (рис. 1.4).

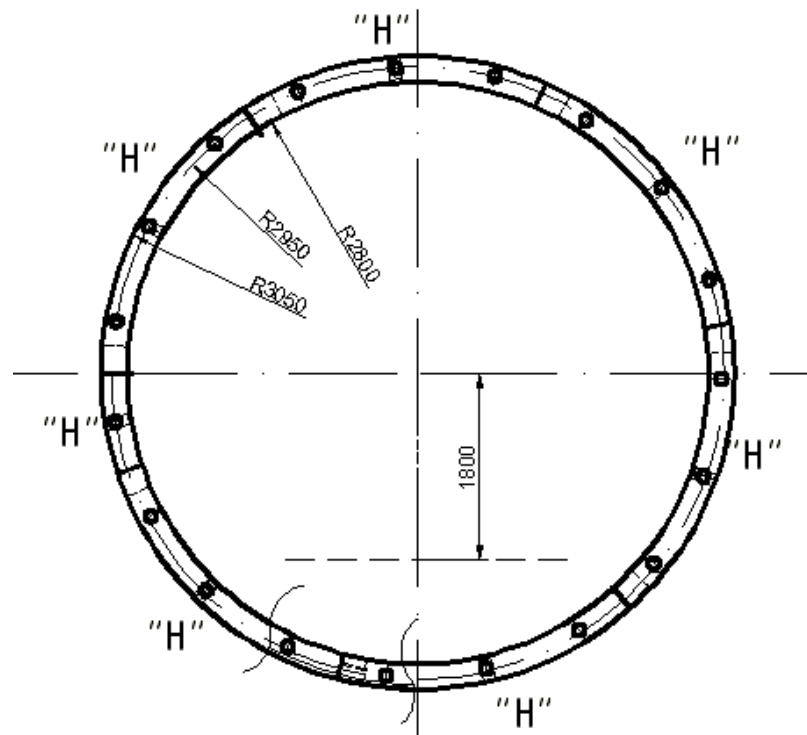


Рисунок 1.4 – Розбивка кільця без лоткового блоку на елементи

Кінематика зборки, яка передбачує три ступені свободи переміщення універсального кільця на монтажі, дозволяє використовувати такі кільця як на криволінійних, так і на прямих ділянках траси. Поворот кожного непарного універсального кільця на 180° відносно горизонтальної осі забезпечує спорудження тунелю на горизонтальному повороті, а поворот парного та

непарного кілець відносно поздовжньої осі тунелю на 90° з одночасним поворотом кожного непарного на 180° відносно вертикальної осі дає можливість змінити напрям тунелю в профілі. З використанням універсального кутового кільця можуть бути пройдені й прямі ділянки траси. Для цього необхідно кожне непарне кільце розвертати на 180° відносно вертикальної осі попереднього [11].

Крім того, кожне універсальне кільце можна обертати відносно поздовжньої осі тунелю в межах 360° з перев'язкою блоків окремих кілець на половину їх довжини. Це дає можливість коригувати положення щита при проходці.

1.3 Техніко-економічне порівняння

Після визначення параметрів трьох варіантів оправи виконується їх техніко-економічне обґрунтування з метою встановлення найбільш економічного за трудовитратами варіанта [4], який далі приймається для статичного розрахунку. Для цього для кожного з них виконується розрахунок об'ємів робіт зі спорудження одного метра тунелю. У перелік робіт входять:

Варіант 1

1. Розробка породи (m^3). Об'єм визначається за формулою:

$$V_p = \frac{\pi D_{zn}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 5.9^2}{4} = 27.33 m^3,$$

де D_{zn} – зовнішній діаметр оправи.

2. Навантаження породи (m^3):

$$V_n = k_p V_p = 1.1 \cdot 27.33 = 30 m^3,$$

де k_p – коефіцієнт розрихлення дорівнює 1.1.

3. Монтаж чавунної оправи (m^3):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 0.7 \cdot \frac{3.14}{4} \cdot (5.9^2 - 5.5^2) = 2.51 m^3$$

де $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр оправи; λ – коефіцієнт, який враховує наявність порожнин в залізобетонному елементі (для блоків $\lambda=1$, для тубінгів $\lambda=0,7$).

Монтаж чавунної оправи (т). Масу одного метра чавунної оправи можна визначити за формулою:

$$G_k = (0,24...0,30) \gamma \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 0.24 \cdot 7.2 \cdot \frac{3.14}{4} (5.9^2 - 5.5^2) = 6,2 m$$

де γ – питома вага чавуну, СЧ-21-40 $\gamma = 72.0 \text{кН}/m^3 = 7.2 m/m^3$.

У формулі мінімальне значення коефіцієнта необхідно приймати при $D_{\text{зн}} > 8,0$ м, максимальне – при $D_{\text{зн}} < 8,0$ м.

Масу кільця чавунної оправи можна визначити помноживши масу одного метра на ширину кільця.

4. Нагнітання за оправу (m^2):

$$S_k = L_k \cdot 1 = \pi D_{\text{зн}} = 3.14 \cdot 5.9 = 18.53 m^2$$

де L_k – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

5. Чеканення швів (на один метр тунелю):

$$L_{\text{ч.шв.}} = L_{\text{вн}} + n \cdot 1 = \pi D_{\text{вн}} + n = 3.14 \cdot 5.5 + 7 = 24,27 \text{пог.м},$$

де $L_{\text{вн}}$ – довжина кола оправи по внутрішньому діаметру; n – кількість поздовжніх швів у оправі.

Таблиця 1.1 – Розрахунок трудовитрат Варіанту № 1

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, <i>чол.год</i>	
					На одиницю	На об'єм
1.	Розробка породи	29-80-7	100м^3	27,33	38,55	10,54
2.	Навантаження породи	29-94-1	100м^3	30	41,08	12,32
3.	Монтаж оправи	29-128-4	1т	2.51	4,55	0,114
4.	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-138-6	100м^2	18	68,1	12,25
5.	Чеканка швів	29-145-16	100м	24.27	276,5	67,11
					Всього:	102,33

Варіант 2

1. Розробка породи (м^3). Об'єм визначається за формулою:

$$V_p = \frac{\pi D_{\text{зн}}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 6^2}{4} = 28.26 \text{ м}^3$$

де $D_{\text{зн}}$ – зовнішній діаметр оправи.

2. Навантаження породи (м^3):

$$V_n = k_p V_p = 1.1 \cdot 28.26 = 31.1 \text{ м}^3$$

де k_p – коефіцієнт розрихлення дорівнює 1,1.

3. Монтаж залізобетонної оправи (м^3):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 0.7 \cdot \frac{3.14}{4} \cdot (6^2 - 5.5^2) = 3.16 \text{ м}^3$$

де $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр оправи; λ – коефіцієнт, який враховує наявність порожнин в залізобетонному елементі (для блоків $\lambda=1$, для тюбінгів $\lambda=0,7$).

Масу кільця залізобетонної оправи для визначення маси одного елемента і подальшого використання в статичному розрахунку можна визначити за формулою:

$$G_k = \gamma V_k l = 2.5 \cdot 3.16 \cdot 1 = 7,9 \text{ т} ,$$

де γ – питома вага залізобетону ($\gamma=2,5 \text{ т/м}^3$); l – ширина кільця.

4. Нагнітання за оправу (м^2):

$$S_k = L_k \cdot 1 = \pi D_{\text{зн}} = 3.14 \cdot 6 = 18.84 \text{ м}^2$$

де L_k – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

5. Чеканення швів (на один метр тунелю):

$$L_{\text{ч.ш.}} = L_{\text{вн}} + n \cdot 1 = \pi D_{\text{вн}} + n = 3.14 \cdot 5.5 + 7 = 24,27 \text{ пог.м} ,$$

де $L_{\text{вн}}$ – довжина кола оправи по внутрішньому діаметру; n – кількість поздовжніх швів у оправі.

Таблиця 1.2 – Розрахунок трудовитрат Варіанту № 2

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, <i>чол.год</i>	
					На одиницю	На об'єм
1.	Розробка породи	29-80-7	100м^3	28,26	38,55	10,88
2.	Навантаження породи	29-94-1	100м^3	31,1	41,08	12,75
3.	Монтаж оправи	29-126-13	100м^3	3,16	3570,8	112,81
4.	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-138-6	100м^2	18,84	68,1	12,83
5.	Чеканка швів	29-145-11	100м	24,27	100,33	24,35
					Всього:	173,64

Варіант 3

1. Розробка породи (м^3). Об'єм визначається за формулою:

$$V_p = \frac{\pi D_{\text{зн}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 6,1^2}{4} = 29,21\text{м}^3$$

де $D_{\text{зн}}$ – зовнішній діаметр оправи.

2. Навантаження породи (м^3):

$$V_n = k_p V_p = 1,1 \cdot 29,21 = 32,13\text{м}^3$$

де k_p – коефіцієнт розрихлення дорівнює 1,1.

3. Монтаж залізобетонної оправи (м^3):

$$V_{\kappa} = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 1 \cdot \frac{3.14}{4} \cdot (6,1^2 - 5,6^2) = 4,59 \text{ м}^3$$

де $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр оправи; λ – коефіцієнт, який враховує наявність порожнин в залізобетонному елементі (для блоків $\lambda=1$, для тюбінгів $\lambda=0,7$).

Масу кільця залізобетонної оправи для визначення маси одного елемента і подальшого використання в статичному розрахунку можна визначити за формулою:

$$G_{\kappa} = \gamma V_{\kappa} l = 2,5 \cdot 4,59 \cdot 1,2 = 13,77 \text{ т} ,$$

де γ – питома вага залізобетону ($\gamma=2,5 \text{ т/м}^3$); l – ширина кільця.

4. Нагнітання за оправу (м^2):

$$S_{\kappa} = L_{\kappa} \cdot 1 = \pi D_{\text{зн}} = 3.14 \cdot 6,1 = 19,15 \text{ м}^2$$

де L_{κ} – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

5. Чекання швів (на один метр тунелю):

$$L_{\text{ч.ш.}} = L_{\text{вн}} + n \cdot 1 = \pi D_{\text{вн}} + n = 3,14 \cdot 5,6 + 7 = 24,58 \text{ пог.м} ,$$

де $L_{\text{вн}}$ – довжина кола оправи по внутрішньому діаметру; n – кількість поздовжніх швів у оправі.

Таблиця 1.3 – Розрахунок трудовитрат Варіанту № 3

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, <i>чол.год</i>	
					На одиницю	На об'єм
1.	Розробка породи	29-80-7	100м^3	29,21	38,55	11,26
2.	Навантаження породи	29-94-1	100м^3	32,13	41,08	13,2
3.	Монтаж оправи	29-126-13	100м^3	4,59	3570,8	163,9
4.	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-138-6	100м^2	19,15	68,1	13,28
5.	Чеканка швів	29-145-11	100м	24,58	100,33	24,66
					Всього:	226,3

За результатами техніко-економічного порівняння за трудовитратами Варіант 1 з чавунних тюбінгів є найменш витратним, однак за прямими витратами на матеріали два варіанти є дешевшими. До подальшого обґрунтування та аналізу приймається Варіант 3 з оправою із залізобетонних блоків В40.

2 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МІЦНОСТІ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ

2.1 Визначення навантажень на оправу перегінного тунелю

Статичний розрахунок оправи слід проводити для можливих несприятливих сполучень основних та додаткових навантажень [5, 6]. Для виконання розрахунків в випускній кваліфікаційній роботі виконано розрахунок оправи в експлуатаційній стадії і виконати перевірку її елементів на міцність.

У розріджених і слабких зволжених породах (мулкі породи, пливуні, глини і суглинки текучої і м'якопластичної консистенції) нормативна величина вертикального гірського тиску дорівнює повній вазі порід, що залягають над тунелями [13, 14]:

$$q_b^H = \sum \gamma_i h_i = 16 \cdot 0,7 + 16 \cdot (2,4 + 4,3) + 19 \cdot 1,7 = 150,7 \text{ кН/м}^2,$$

де γ_i і h_i – відповідно питома вага і потужність i -го шару порід, який залягає вище:

- для насипного ґрунту $\gamma=16 \text{ кН/м}^3$, потужність шару становить 0,7 м;
- для піску $\gamma=16 \text{ кН/м}^3$, шар розділений лінзою супіску на дві частини потужністю 2,4 та 4,3 м;
- для супіску $\gamma=19 \text{ кН/м}^3$, потужність шару – 1,7 м.

Горизонтальний тиск у цих породах є активним, і його нормативна середня розрахункова інтенсивність складає за результатами досліджень.

$$q_r^H = (0,8 \dots 0,9) q_b^H = 0,9 \cdot 150,7 = 135,63 \text{ кН/м}^2$$

На рівні замка оправи горизонтальний тиск буде дорівнювати

$$q_r^3 = (0,8 \dots 0,9) (q_b^H - \gamma R_{3H}) = 0,9 \cdot (150,7 - 16 \cdot 3,05) = 91,71 \text{ кН/м}^2$$

а на рівні лотка

$$q_r^H = (0,8 \dots 0,9)(q_b^H + \gamma R_{\text{зн}}) = 0,9 \cdot (150,7 + 16 \cdot 3,05) = 179,55 \text{ кН/м}^2$$

де $R_{\text{зн}}$ – зовнішній радіус оправи; γ – питома вага породи.

Для слабких порід інтенсивність реакції породи, яка зрівноважує інтенсивність вертикального гірського тиску, власної ваги оправи і виштовхувальної сили (тільки у зволжених породах), знаходять як:

$$P = q_b^p + \pi g - 0,5\pi R_{\text{зн}} = 165,77 + 3,14 \cdot 9,81 - 0,5 \cdot 3,14 \cdot 3,05 = 191,78 \text{ кН},$$

де q_b^p – розрахункове значення вертикального тиску; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Відповідно до вимог ДБН [4] у розрахунку оправи за несучою здатністю величину розрахункових навантажень визначають шляхом множення нормативних навантажень на коефіцієнт перевантаження n :

$$q_b^p = nq_b^H = 1,1 \cdot 150,7 = 165,77 \text{ кН/м}^2$$

$$q_r^p = nq_r^H = 0,8 \cdot 135,63 = 108,5 \text{ кН/м}^2$$

Нормативна власна вага оправи визначається як:

$$p^H = \frac{G_k}{2\pi r} = \frac{16,38}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,9} = 0,91$$

де G_k – маса кільця оправи (приймається за об'ємом, який визначено під час проєктування варіантів); $r = \frac{R_{\text{вн}} + R_{\text{зн}}}{2} = \frac{2,8 + 3,05}{2} = 2,925 \text{ м}$ – середній радіус оправи.

Розрахункове значення власної ваги оправи визначається множенням на коефіцієнт перевантаження $p^p = np^H = 1,1 \cdot 0,91 = 1,001$.

2.2 Розрахунок оправи як кільця, що вільно деформується

Під час розрахунку оправи в експлуатаційній стадії оправа кругового перерізу розглядається як кільце, що вільно деформується під дією зовнішніх навантажень (рис. 2.1) [13, 14].

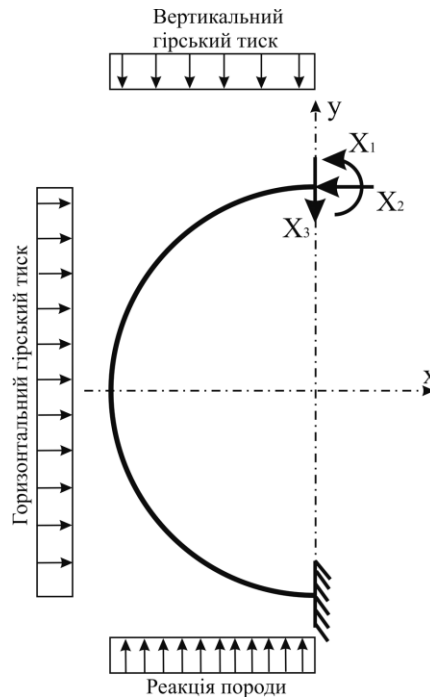


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема для методу кільця, що вільно деформується

Канонічними рівняннями деформації такої системи є:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0,$$

$$\delta_{22}X_2 + \Delta_{1p} = 0.$$

Згинальний момент та нормальна сила в кожному перерізі, який розташовано під кутом α , будуть дорівнювати відповідно:

$$M = M_p - X_2 r \cos \alpha = 0,$$

$$N = N_p + X_2 \cos \alpha = 0.$$

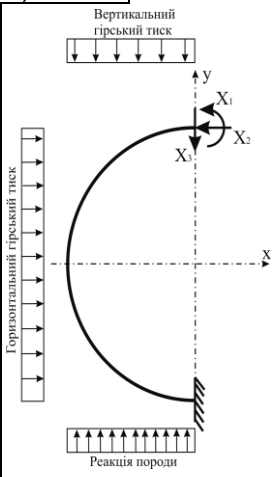
Розрахунок за методом кільця, що вільно деформується, проведено за допомогою файла MKVD.xls. Нижче наведена роздруківка програми із

вихідними даними та результатами розрахунку (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку

Розрахунок оправи методом кільця, що вільно деформується

Тип тунелю	Цимбалов (Перегінний)	
Введіть глибину закладення, м	H	9,1
Введіть висоту води, м	$H_в$	6,1
Введіть питому вагу ґрунту, кН/м ³	γ	17
Введіть внутрішній радіус оправи, м	$R_{вн}$	2,8
Введіть зовнішній радіус оправи, м	$R_{зн}$	3,05
Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м ²	$q_в^p$	165,8
Введіть розрахункове значення горизонтального тиску на рівні замку, кН/м ²	$q_г^3$	82,5
Введіть різницю між розрахунковим значенням горизонтального тиску на рівні лотку і замку, кН/м ²	q_p	79,1
Введіть розрахункове значення інтенсивності реакції породи, кН/м ²	P	191,8
Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м ²	p^p	0,91



Розрахункова схема оправи методом кільця, що вільно деформується

Розрахунок згинальних моментів, кН·м
Момент, M

Кут нахилу	Від p^p	Від $q_в^p$	Від $q_в$	Від $q_г^3$	Від q_p	Від P	Сумарний
0	4,2	461,2	-38,9	-191,9	-77,3	-87,4	69,9
45	1,2	27,8	-7,1	0,0	-2,3	-32,1	-12,6
90	-4,8	-473,5	44,4	191,9	92,0	101,7	-48,4
135	-2,6	-137,4	24,3	0,0	63,4	159,0	106,5
180	12,7	905,4	-116,8	-191,9	15,5	-601,3	23,5

Розрахунок нормальних сил, кН
Нормальна сила N

Кут нахилу	Від p^p	Від $q_в^p$	Від $q_в$	Від $q_г^3$	Від q_p	Від P	Сумарна
0	-1,4	-53,6	23,7	251,6	75,5	62,0	357,9
45	0,7	214,9	21,8	125,8	49,7	43,9	456,9
90	4,4	505,7	18,7	0,0	0,0	0,0	528,8
135	5,6	395,5	19,9	125,8	70,9	-165,0	452,8
180	1,4	53,6	28,4	251,6	165,7	-62,0	438,7

2.3 Перевірка на міцність елементів оправи із залізобетону

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перерізах оправи з максимальним згинальним моментом проводять перевірку на міцність. Для цього будують епюри моментів та нормальних сил із визначенням двох перерізів з максимальними згинальними моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином [14].

У розрахунках кругових оправ найчастіше зустрічається перший випадок позацентрального стиснення, що відповідає великим ексцентриситетам.

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

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 стержня 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 .

1. Визначення площі поперечного перерізу блока:

$$A_b = bh,$$

де b і h – ширина і товщина елемента оправи відповідно.

$$A_b = bh = 0,25 \cdot 1,2 = 0,3 \text{ м}^2$$

2. Попереднє визначення площі арматури:

$$A_s^{\text{сум}} = \mu A_b.$$

$$A_s^{\text{сум}} = \mu A_b = 0,02 \cdot 0,3 = 0,006 \text{ м}^2.$$

3. Площа поперечного перерізу одного стержня становить:

$$A_{\text{ст}} = \pi r_{\text{ст}}^2,$$

де $r_{\text{ст}}$ – радіус стержня арматури.

$$A_{\text{ст}} = \pi r_{\text{ст}}^2 = 3,14 \cdot 0,009^2 = 0,000254 \text{ м}^2$$

4. Визначення кількості стержнів робочої арматури:

$$n = \frac{A_s^{\text{сум}}}{A_{\text{ст}}}.$$

$$n = \frac{A_s^{\text{сум}}}{A_{\text{ст}}} = \frac{0,006}{0,000254} = 23,62.$$

Кількість округлюється до цілого парного значення. Приймаємо 24 стержні.

5. Фактична площа арматури становить:

$$A_s^{\text{факт}} = A_s + A'_s = n A_{\text{ст}}.$$

$$A_s^{\text{факт}} = 24 \cdot 0,000254 = 0,0061 \text{ м}^2.$$

6. Площа розтягнутої A_s та стиснутої A'_s арматури:

$$A_s = A'_s = \frac{A_s^{\text{факт}}}{2}$$

$$A_s = \frac{0,0061}{2} = 0,00305 \text{ м}^2.$$

7. Визначення ексцентриситету нормальної сили e_0 відносно геометричної осі центру ваги перерізу елемента (рис. 2.2-2.3):

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{69,9}{357,9} = 0,195\text{ м.}$$

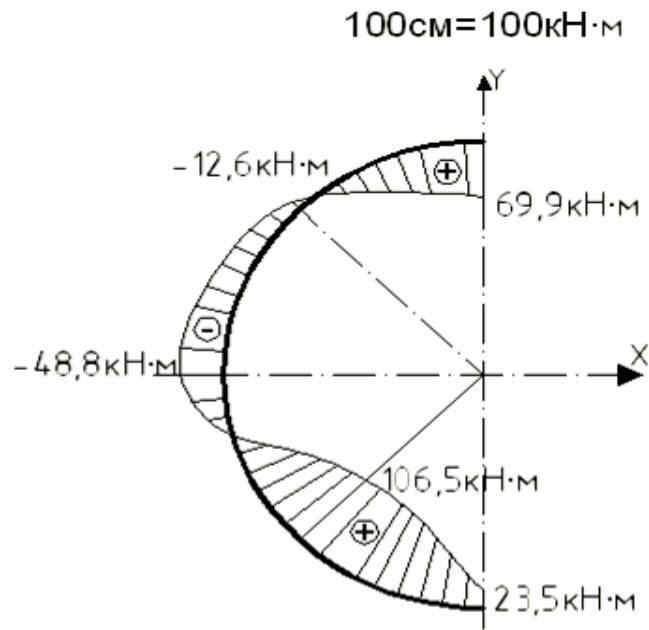


Рисунок 2.2 – Епюра згинальних моментів

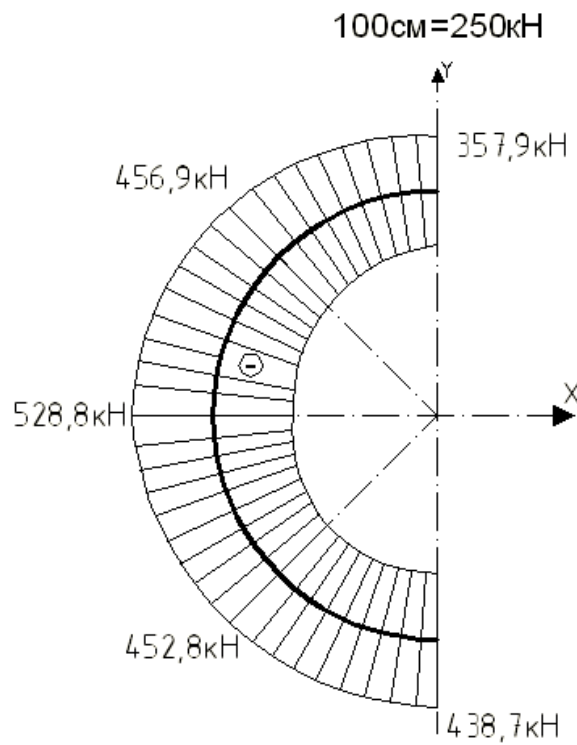


Рисунок 2.3 – Епюра нормальної сили

8. Перевірку блоків на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють у режимі позацентрального стиску [14]:

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

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.

$$e = e_0 + \frac{h}{2} - a = 0,195 + \frac{0,25}{2} - 0,02 = 0,3 \text{ м}$$

9. Ширина стиснутої зони x визначається з формули

$$N + R_s A_s - R_{sc} A'_s = R_b b x.$$

$$x = \frac{N}{R_b b}$$

$$x = \frac{N}{R_b b} = \frac{357,9}{22000 \cdot 0,25} = 0,065 \text{ м}$$

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

$$357,9 \cdot 0,3 \leq 22000 \cdot 0,25 \cdot 0,065 (0,221 - 0,5 \cdot 0,065) + 356000 \cdot 0,00305 (0,221 - 0,029)$$

$$107,37 \leq 275,86$$

Умова виконується, отже переріз елементів оправи та стержнів армування підібраний вірно.

2.4 Дослідження впливу гідростатичного тиску на силові фактори в оправі

Окрім гірського тиску на оправу діє гідростатичний тиск, тобто взаємодія оправы з масивом ускладнюється дією води [9, 12]. Відповідно, якщо в експлуатаційній стадії гірський тиск може вважатися константною величиною (особливо, в скельному масиві), то коливання водопритоку і, відповідно, зміна гідростатичного тиску є основним фактором зміни НДС та формування взаємодії між нею та масивом. Слід також відмітити, що вплив водопритоків на формування силових факторів є важливим параметром, але загальної теорії гідростатичного тиску у випадку підземних об'єктів немає, так як різноманітні впливи води на оправу та оточуючий масив не систематизовані [14].

Важливий той факт, що питання урахування гідростатичного тиску недостатньо розроблене, що обумовлено його уявною простотою. Причому гідростатичний тиск в розрахунках підземних споруд з важливого постійного навантаження перейшов в розряд тимчасових тривалих, що також понизило інтерес до докладного вивчення.

Існує дві основні концепції обліку гідростатичного тиску [9, 14]. Перша розглядає його як активне навантаження, що підкоряється законам гідростатики. У розрахункових схемах воно розглядається як рівномірна вертикальна і нерівномірна трапецієподібна горизонтальна. До подошви прикладається негативний гідростатичний тиск (виштовхуюча архімедова сила). Недоліком концепції є той факт, що підземна споруда розглядається як би в розриві від взаємодії ґрунту, який зазнає зміни від дії підземних вод. Друга концепція розглядає гідростатичний тиск як пасивний, тобто оточуючий споруду ґрунт вважається підданим зважуючій дії води і його питома вага зменшується на деяку величину. Дія гідростатичного тиску приймається схожою з дією пружного відпору. Як видно з викладу основних принципів цих двох концепцій, вони суперечать один одному: дія підземних вод приймається то активною, то пасивною.

Вірнішим підходом, на жаль, мало розробленим і не оформленим в концепцію, є інтерпретація дії гідростатичного тиску відповідно до напружено-деформованого стану системи «кріплення–масив». Вірність цього підходу довели результати нечисленних експериментів тому єдино вірним рішенням, яке можна прийняти за відсутності достатньої інформації про складну і різноманітну дію підземних вод, є проведення серії експериментів і натурних спостережень, які можна буде оформити в концепцію, що адекватно відповідає дійсності і можливість використання, що дає, в практичних розрахунках.

Для виконання науково-дослідної роботи, проведемо ряд розрахунків із змінним рівнем ґрунтових вод. Прийнято чотири варіанти висоти ґрунтової води над шелигою склепіння: 7,5; 5,8; 4,4 та 3,0 м, які відповідають максимальній, мінімальній та проміжним між ними висотам води над склепінням, які наявні на інженерно-геологічному розрізі для ділянки траси із ухилом в 3 проміле, в якій поверхня землі і відповідно глибина закладення не змінні, а змінюється лише висота води (рис. 2.4).

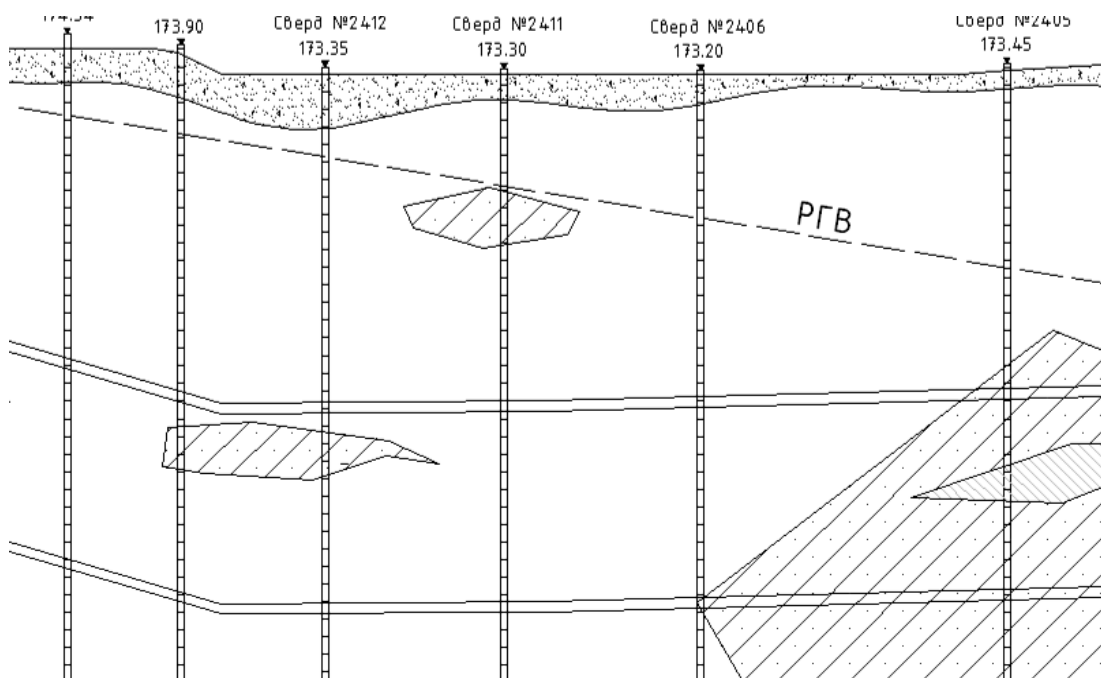


Рисунок 2.4 – Зміна рівня ґрунтових вод по довжині тунелю

Нижче наведені результати розрахунку чотирьох варіантів (табл. 2.2-2.5) та таблиці обробки результатів (табл. 2.6).

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку

Розрахунок оправи методом кільця, що вільно деформується

Тип тунелю	Цимбалов (7,5 м)	
Введіть глибину закладення, м	H	9,1
Введіть висоту води, м	H_e	7,5
Введіть питому вагу ґрунту, кН/м ³	γ	17
Введіть внутрішній радіус оправи, м	$R_{вн}$	2,8
Введіть зовнішній радіус оправи, м	$R_{зн}$	3,05
Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м ²	q_e^p	165,8
Введіть розрахункове значення горизонтального тиску на рівні замку, кН/м ²	q_z^3	82,5
Введіть різницю між розрахунковим значенням горизонтального тиску на рівні лотку і замку, кН/м ²	q_p	79,1
Введіть розрахункове значення інтенсивності реакції породи, кН/м ²	P	191,8
Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м ²	p^p	0,91

Розрахунок згинальних моментів, кН·м
Момент, M

Кут нахилу	p^p	q_e^p	q_e	q_z^3	q_p	P	Сумарний
	Від	Від	Від	Від	Від	Від	
0	4,2	461,2	-47,9	-191,9	-77,3	-87,4	61,0
45	1,2	27,8	-8,8	0,0	-2,3	-32,1	-14,2
90	-4,8	-473,5	54,6	191,9	92,0	101,7	-38,2
135	-2,6	-137,4	29,8	0,0	63,4	159,0	112,1
180	12,7	905,4	-143,6	-191,9	15,5	-601,3	-3,3

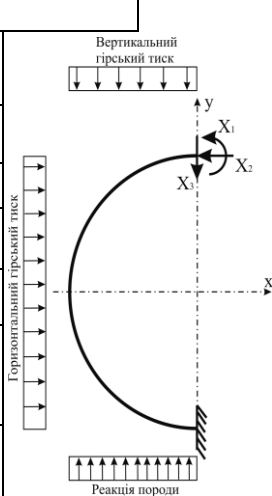
Розрахунок нормальних сил, кН
Нормальна сила N

Кут нахилу	p^p	q_e^p	q_e	q_z^3	q_p	P	Сумарна
	Від	Від	Від	Від	Від	Від	
0	-1,4	-53,6	27,6	251,6	75,5	62,0	361,7
45	0,7	214,9	25,7	125,8	49,7	43,9	460,7
90	4,4	505,7	22,6	0,0	0,0	0,0	532,6
135	5,6	395,5	23,8	125,8	70,9	-165,0	456,6
180	1,4	53,6	32,2	251,6	165,7	-62,0	442,6

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку

Розрахунок оправи методом кільця, що вільно деформується

Тип тунелю	Цимбалов (5,8 м)	
Введіть глибину закладення, м	H	9,1
Введіть висоту води, м	$H_в$	5,8
Введіть питому вагу ґрунту, кН/м ³	γ	17
Введіть внутрішній радіус оправи, м	$R_{вн}$	2,8
Введіть зовнішній радіус оправи, м	$R_{зн}$	3,05
Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м ²	$q_в^p$	165,8
Введіть розрахункове значення горизонтального тиску на рівні замку, кН/м ²	$q_г^3$	82,5
Введіть різницю між розрахунковим значенням горизонтального тиску на рівні лотку і замку, кН/м ²	q_p	79,1
Введіть розрахункове значення інтенсивності реакції породи, кН/м ²	P	191,8
Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м ²	p^p	0,91



Розрахункова схема
оправи методом кільця,
що вільно деформується

Розрахунок згинальних моментів, кН·м
Момент, M

Кут нахилу	p^p		$q_в^p$		$q_в$	$q_г^3$		q_p	P	Сумарний
	Від	Від	Від	Від		Від	Від			
0	4,2	461,2	-37,0	-191,9	-77,3	-87,4	71,8			
45	1,2	27,8	-6,8	0,0	-2,3	-32,1	-12,2			
90	-4,8	-473,5	42,2	191,9	92,0	101,7	-50,6			
135	-2,6	-137,4	23,1	0,0	63,4	159,0	105,3			
180	12,7	905,4	-111,1	-191,9	15,5	-601,3	29,3			

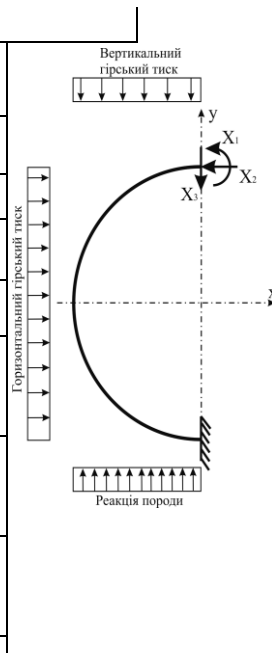
Розрахунок нормальних сил, кН
Нормальна сила N

Кут нахилу	p^p		$q_в^p$		$q_в$	$q_г^3$		q_p	P	Сумарна
	Від	Від	Від	Від		Від	Від			
0	-1,4	-53,6	22,9	251,6	75,5	62,0	357,1			
45	0,7	214,9	21,0	125,8	49,7	43,9	456,0			
90	4,4	505,7	17,9	0,0	0,0	0,0	528,0			
135	5,6	395,5	19,1	125,8	70,9	-165,0	452,0			
180	1,4	53,6	27,5	251,6	165,7	-62,0	437,9			

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку

Розрахунок оправи методом кільця, що вільно деформується

Тип тунелю	Цимбалов (4,4 м)	
Введіть глибину закладення, м	H	9,1
Введіть висоту води, м	$H_в$	4,4
Введіть питому вагу ґрунту, кН/м ³	γ	17
Введіть внутрішній радіус оправи, м	$R_{вн}$	2,8
Введіть зовнішній радіус оправи, м	$R_{зн}$	3,05
Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м ²	$q_в^p$	165,8
Введіть розрахункове значення горизонтального тиску на рівні замку, кН/м ²	$q_г^3$	82,5
Введіть різницю між розрахунковим значенням горизонтального тиску на рівні лотку і замку, кН/м ²	q_p	79,1
Введіть розрахункове значення інтенсивності реакції породи, кН/м ²	P	191,8
Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м ²	p^p	0,91



Розрахункова схема оправи методом кільця, що вільно деформується

Розрахунок згинальних моментів, кН·м
Момент, M

Кут нахилу	p^p	$q_в^p$	$q_г$	$q_г^3$	q_p	P	Сумарний
	Від	Від	Від	Від	Від	Від	
0	4,2	461,2	-28,1	-191,9	-77,3	-87,4	80,8
45	1,2	27,8	-5,1	0,0	-2,3	-32,1	-10,6
90	-4,8	-473,5	32,0	191,9	92,0	101,7	-60,8
135	-2,6	-137,4	17,5	0,0	63,4	159,0	99,8
180	12,7	905,4	-84,3	-191,9	15,5	-601,3	56,1

Розрахунок нормальних сил, кН
Нормальна сила N

Кут нахилу	p^p	$q_в^p$	$q_г$	$q_г^3$	q_p	P	Сумарна
	Від	Від	Від	Від	Від	Від	
0	-1,4	-53,6	19,1	251,6	75,5	62,0	353,2
45	0,7	214,9	17,2	125,8	49,7	43,9	452,2
90	4,4	505,7	14,1	0,0	0,0	0,0	524,1
135	5,6	395,5	15,3	125,8	70,9	-165,0	448,1
180	1,4	53,6	23,7	251,6	165,7	-62,0	434,1

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку

Розрахунок оправи методом кільця, що вільно деформується

Тип тунелю	Цимбалов (3,0 м)		
Введіть глибину закладення, м	H	9,1	
Введіть висоту води, м	$H_{\text{в}}$	3	
Введіть питому вагу ґрунту, кН/м ³	γ	17	
Введіть внутрішній радіус оправи, м	$R_{\text{вн}}$	2,8	
Введіть зовнішній радіус оправи, м	$R_{\text{зн}}$	3,05	
Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м ²	$q_{\text{в}}^p$	165,8	
Введіть розрахункове значення горизонтального тиску на рівні замку, кН/м ²	$q_{\text{г}}^3$	82,5	
Введіть різницю між розрахунковим значенням горизонтального тиску на рівні лотку і замку, кН/м ²	$q_{\text{р}}$	79,1	
Введіть розрахункове значення інтенсивності реакції породи, кН/м ²	P	191,8	
Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м ²	p^p	0,91	Розрахункова схема оправи методом кільця, що вільно деформується

Розрахунок згинальних моментів, кН·м
Момент, M

Кут нахилу	p^p		$q_{\text{в}}^p$		$q_{\text{г}}^3$		$q_{\text{р}}$		Сумарний
	Від	Від	Від	Від	Від	Від	Від		
0	4,2	461,2	-19,2	-191,9	-77,3	-87,4	89,7		
45	1,2	27,8	-3,5	0,0	-2,3	-32,1	-8,9		
90	-4,8	-473,5	21,8	191,9	92,0	101,7	-71,0		
135	-2,6	-137,4	11,9	0,0	63,4	159,0	94,2		
180	12,7	905,4	-57,5	-191,9	15,5	-601,3	82,9		

Розрахунок нормальних сил, кН
Нормальна сила N

Кут нахилу	p^p		$q_{\text{в}}^p$		$q_{\text{г}}^3$		$q_{\text{р}}$		Сумарна
	Від	Від	Від	Від	Від	Від	Від		
0	-1,4	-53,6	15,2	251,6	75,5	62,0	349,4		
45	0,7	214,9	13,3	125,8	49,7	43,9	448,4		
90	4,4	505,7	10,2	0,0	0,0	0,0	520,3		
135	5,6	395,5	11,4	125,8	70,9	-165,0	444,3		
180	1,4	53,6	19,9	251,6	165,7	-62,0	430,2		

Таблиця 2.6 – Узагальнені результати розрахунку

Моменти сумарні					
Висота води, м	Момент (замок), кН·м	Момент (45 градусів), кН·м	Момент (гор. діаметр), кН·м	Момент (135 градусів), кН·м	Момент (лоток), кН·м
7,5	61,0	-14,2	-38,2	112,1	-3,3
5,8	71,8	-12,2	-50,6	105,3	29,3
4,4	80,8	-10,6	-60,8	99,8	56,1
3,0	89,7	-8,9	-71,0	94,2	82,9
Нормальні сили сумарні					
Висота води, м	Норм. сила (замок), кН·м	Норм. сила (45 градусів), кН·м	Норм. сила (гор. діаметр), кН·м	Норм. сила (135 градусів), кН·м	Норм. сила (лоток), кН·м
7,5	361,7	460,7	532,6	456,6	442,6
5,8	357,1	456,0	528,0	452,0	437,9
4,4	353,2	452,2	524,1	448,1	434,1
3,0	349,4	448,4	520,3	444,3	430,2
Моменти від впливу гідростатичного тиску					
Висота води, м	Момент (замок), кН·м	Момент (45 градусів), кН·м	Момент (гор. діаметр), кН·м	Момент (135 градусів), кН·м	Момент (лоток), кН·м
7,5	-47,9	-8,8	54,6	29,8	-143,6
5,8	-37,0	-6,8	42,2	23,1	-111,1
4,4	-28,1	-5,1	32,0	17,5	-84,3
3,0	-19,2	-3,5	21,8	11,9	-57,5
Нормальні сили від впливу гідростатичного тиску					
Висота води, м	Норм. сила (замок), кН·м	Норм. сила (45 градусів), кН·м	Норм. сила (гор. діаметр), кН·м	Норм. сила (135 градусів), кН·м	Норм. сила (лоток), кН·м
7,5	27,6	25,7	22,6	23,8	32,2
5,8	22,9	21,0	17,9	19,1	27,5
4,4	19,1	17,2	14,1	15,3	23,7
3,0	15,2	13,3	10,2	11,4	19,9

За результатами таблиць побудовані графіки залежностей силових факторів від висоти води над склепінням (рис. 2.5-2.6).

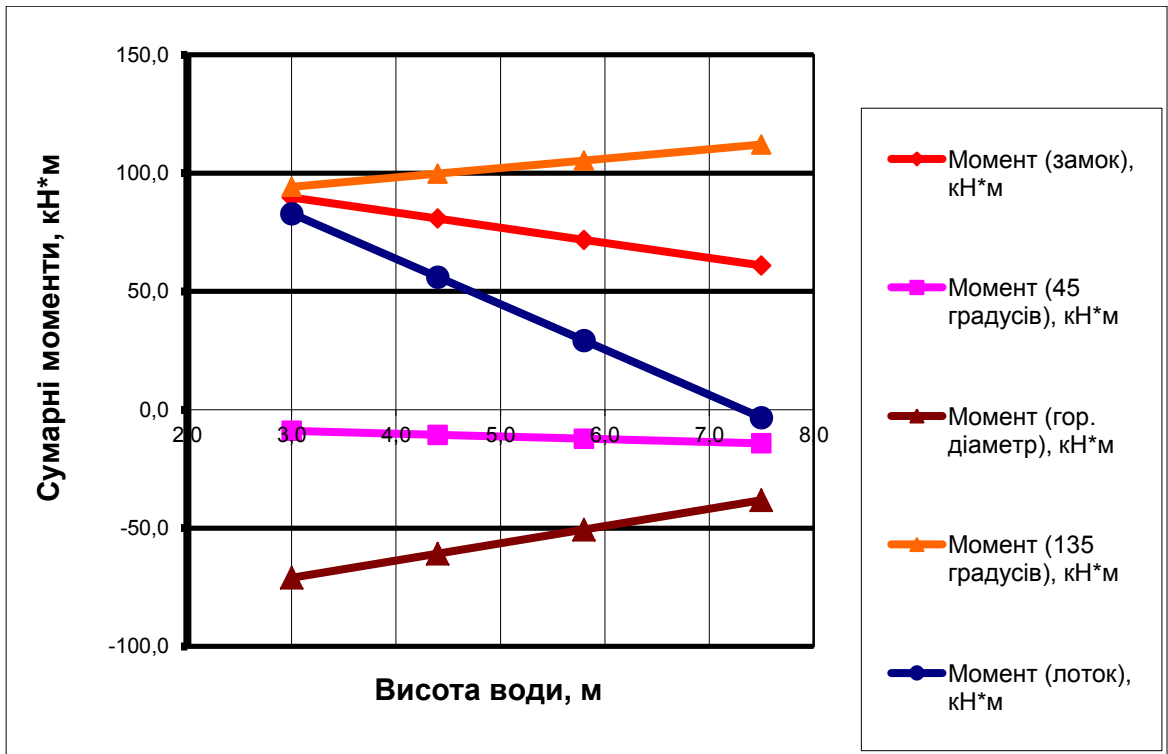


Рисунок 2.5 – Графік залежності моментів від висоти води над склепінням

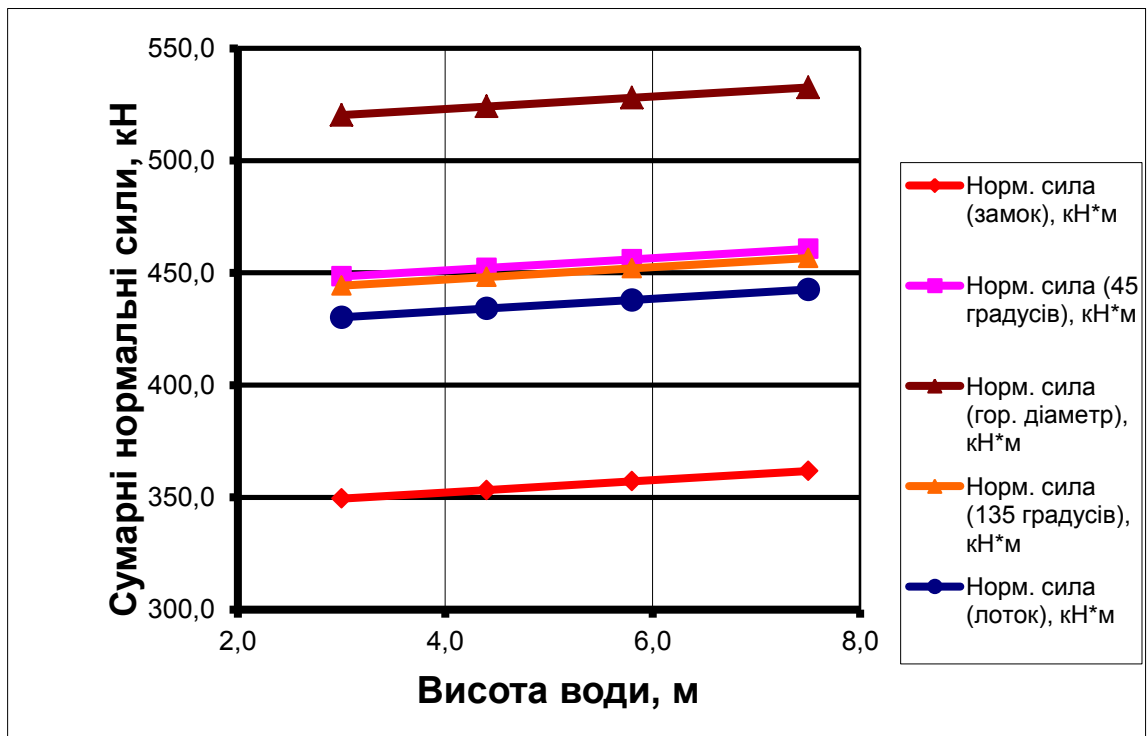


Рисунок 2.6 – Графік залежності нормальних сил від висоти води над склепінням

Аналіз графіків залежностей силових факторів в оправі є передбачуваним, так як має лінійний характер для всіх випадків, що пояснюється лінійним

характером розвитку напірних ґрунтових вод. Але при сумісному аналізі сумарних моментів та моментів тільки від гідростатичного тиску, відмічаючи лінійний характер останніх, слід відмітити, що однозначної дії напірних ґрунтових вод не визначається. Наприклад, моменти від гідростатичного тиску позначені зростанням та зменшенням в залежності від точки на оправі. Так при збільшенні висоти води моменти на горизонтальному діаметрі та в точці 135 градусів вони позитивні, а в замку, точці 45 градусів та лотку – від’ємні. Тобто зробити висновок, що вплив гідростатичного тиску на силові фактори в оправі однаковий, неможна, про що свідчить розподіл сумарних моментів, які при суперпозиції із гірським тиском також неоднорідні.

Однак, однорідність силових факторів, яка не властива моментам, відмічається у розподілі нормальних сил. Дія напірних вод із змінною висотою лінійно збільшує значення сумарних нормальних сил за рахунок збільшення цієї ж компоненти від гідростатичного тиску. Цей факт вже відмічався в деяких роботах, а також було відмічене те, що збільшення висоти води покращує статичну роботу оправу, так як нормальні сили збільшуються, а момент в замку зменшується (рис. 4.2). Проведемо перевірку міцності елемента оправу на ділянці із максимальним рівнем ґрунтової води (7,5 м). Визначення ексцентриситету нормальної сили e_0 відносно геометричної осі центру ваги перерізу елемента:

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{61,0}{361,7} = 0,169 \text{ м.}$$

Перевірку блоків на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють у режимі позацентрового стиску [14]:

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

$$361,7 \cdot 0,274 \leq 22000 \cdot 0,25 \cdot 0,066 (0,221 - 0,5 \cdot 0,066) + 356000 \cdot 0,00305 (0,221 - 0,029)$$

$$99,11 \leq 277,7$$

Умова виконується, отже переріз елементів оправу та стержнів армування для випадку максимального гідростатичного тиску підібраний вірно.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЩИТОВОЇ ПРОХОДКИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

3.1 Загальні положення

Дана установка є тунелепрохідницьким комплексом для ведення проходки з ґрунтовим привантаженням. Виїмка ґрунту здійснюється за допомогою роторного виконавчого органа. Комплекс зібраний у вигляді щита (щита з ґрунтовим привантаженням ЕРВ). Виробником є фірма «Херренкнехт». Об'єм поставки фірми Херренкнехт АГ включає прохідницьку установку, тюрбінговий укладальник (еректор), візки, а також відповідно до цього переліку гідравлічні та структурні електричні агрегати. Усе це разом зветься прохідницьким комплексом [8, 10].

Щити з ґрунтовим привантаженням (скорочено ЕРВ) використовуються, головним чином, у зв'язаному ґрунті з високою часткою глини та мулу, який має низьку водопроникність. Для того, щоб уникнути осадки або спучення ґрунту, опорою призабійного простору при проходці за допомогою щита з ґрунтовим привантаженням є відділений за допомогою центрального ротора ґрунт.

Для використання відділеного у забої ґрунту у якості опорної середи, ґрунт повинен мати наступні властивості: добру пластична реформованість; від пульповидної до м'якої консистенції; невелике внутрішнє тертя; малу водопроникність. У повному обсязі цими властивостями, як правило, не наділений жодний ґрунт ні перед виїмкою, ні після виїмки. Щоб зробити матеріал придатним до розробки, його треба довести до необхідних властивостей за допомогою добавок, таких як бентоніт та піна, враховуючи при цьому зміну тиску ґрунту.

3.2 Цикл проходки

Ґрунт у призабійному просторі відділяється за допомогою інструмента на обертальному роторі та через отвори подається у забій [1, 8, 10]. Потім він

переміщується з пластичною пульпою. Сила гідроциліндрів через стіну напруження передається на пульпу це перешкоджає неконтрольованому попаданню ґрунту з призабійного простору до робочої камери. Стабільністю вважається, коли пульпа більше не ущільнюється у робочій камері завдяки виникаючому тиску ґрунту та води. Тоді домінуючий тиск ґрунту у призабійному просторі буде відповідати статичному тиску ґрунту. Якщо опорний тиск пульпи буде перевищувати стан рівноваги, відбудеться подальше ущільнення пульпи у робочій камері, а також нерозробленого ґрунту, що може призвести до вспучування ділянки поверхні землі перед щитом. При деякому зменшенні тиску ґрунту нерозроблений ґрунт може проникнути до робочій камери та викликати просадку поверхні землі. Розроблений ґрунт доставляється за допомогою шнекового транспортера з робочої камери, яка знаходиться під тиском, у тунель, який знаходиться під атмосферним тиском. Для того, щоб передача матеріалу з місця виходу шнека до стрічки транспортера проходила без шлюзування, ґрунт повинен мати невелику водопроникність, щоб уникнути потоку через шнековий транспортер.

На тиск ґрунту впливають наступні основні фактори:

- швидкість проходки;
- розроблена маса ґрунту;
- тиск добавок для того, щоб надати ґрунту необхідних властивостей.

Звичайним способом регулювання тиску ґрунту у час проходки за встановленою швидкістю є зміна швидкості шнекового транспортеру. Коли ґрунт відвантажуються швидко, при високій швидкості шнеку, тиск ґрунту падає. Коли ґрунт відвантажуються повільно, тиск ґрунту зростає.

Здійснювати регулювання тиском ґрунту також можна через швидкість проходки. При цьому зменшення швидкості висунення щитових гідрогідроциліндрів впливає на зменшення тиску ґрунту, а збільшення швидкості висунення щитових гідроциліндрів впливає на збільшення тиску ґрунту. Слід підтримувати у період проходки тиск ґрунту на постійному рівні. Щоб уникнути осідання та розм'якшення ґрунту, тиск, який створюється у

робочій камері, повинен бути збалансований з тиском ґрунту перед ротором.

Тиск ґрунту або опорний тиск відображається на пульті керування за допомогою датчиків тиску ґрунту, які розміщені на різних рівнях стіни тиску. Щоб досягнути кращого змішування та необхідного стану ґрунту і щоб зменшити обертання щита, швидкість обертання ротора у час проходки може змінюватись. Усі необхідні дані для експлуатації тунелепрохідницького комплексу та керування знаходяться у кабіні керування. Швидкість проходки, обертання ротора та транспортування шнеком можуть регулюватися звідти.

Напрямок проходки регулюється з кабіни керування комплексом і задається завдяки регулюванню тиску на групі артикуляційних гідроциліндрів.

3.3 Цикл монтажу оправи

Розвантаження та складування доставлених на будівельний майданчик блоків оправи виконуються краном у місцях, зазначених на будівельному генплані. Скошене універсальне кільце оправи складається з семи оригінальних залізобетонних блоків, які маркуються латинськими літерами «А, В, С, D, Е, F» та «G» [1, 2, 10]. Усі блоки одного кільця оправи повинні бути виготовлені у одному комплекті форм, що контролюється цифрою на блоці. Усі сім блоків кільця оправи доставляються у кузові (внутрішня ширина кузова 2700 мм) до місця розвантаження у ТПК за одну ходку автомашини. Погрузка блоків до знімного кузова виконується на поверхні. Порядок вкладання блоків повинен бути таким, щоб першими на монтаж під блокоукладальник були подані блок «D» та суміжні з ним «С» та «Е». Блоки вкладаються по три у штабель на два спеціальних пристрої для підйому блоків. Між суміжними блоками у штабелі вкладаються дерев'яні бруски. Стропувальник проводить стропову штабель та встановлює його у кузов, знаходячись за межами кузова. Другий штабель з трьома блоками оправи встановлюють паралельно першому. В останню чергу у задній частині кузова розміщують замковий блок. Кузов з блоками за допомогою козлового крану КС-50-42Б опускають у монтажну камеру та встановлюють на автомобіль КраЗ. Автомобіль доставляє блоки до зони

розвантаження у ТПК – візок №4.

За допомогою тьюбінгового крану блоки по одному захоплюють та переміщують на податчик блоків, де блок розгортають на 90 градусів та вкладають на пристрій для подачі блоків до технологічного візку №3. За допомогою транспортного товкача вкладений блок переміщують на одну позицію вперед, та вертають транспортний товкач у початкове положення. Повторюють процес до тих пір, доки на пристрої подачі блоків не буде вкрито всі сім блоків кільця. Завантаження блоків у податчик відбувається у тій же послідовності, у якій блоки встановлюються у кільце оправи. Монтаж кожного кільця оправи необхідно виконувати по схемі, яка розрахована комп'ютером ТПК та перевірена маркшейдерською службою. Пристрій подачі використовується як магазин для блоків. Він підводить блоки у вірному положенні під еректор (блокоукладальник). Монтаж кільця починається з того, що пересувна платформа пересувається на один блок до еректора та еректор фіксує блок. Підйомна рама шістьма гідрогідроциліндрами підіймає блоки з пересувної платформи, яка потім зміщується на один блок назад. Підйомна рама опускається, та блоки знову лягають на пластикові накладки пересувної платформи. Робочий цикл повторюється для кожного блоку.

Для вкриття нового кільця оправи після циклу проходки необхідно переключитися на пульт керування у робочий режим «Установка кільця». Тільки після включення робочого режиму «Установка кільця» пульт дистанційного керування блокоукладальника буде розблоковано. Блокоукладальник встановлено під захистом хвостової оболонки щита. Блокоукладальник з телескопічним маніпулятором та вільним центром має 6 ступенів свободи. Привід блокоукладальника гідравлічний. Кінематика блокоукладальника а великі запаси зусиль дозволяють тонко регулювати положення блоків, що встановлюються. У період часу, необхідного для монтажу блоків оправи, оператор блокоукладальника має можливість керувати щитовими гідрогідроциліндрами. Пересування ТПК у цьому режимі неможливе, доки оператор не передасть керування машиністу щита на пульт

керування. У кожен блок при формовці у центрі тяжіння закладається пластмасовий дюбель з різьбою під вантажний гвинт.

Перед початком монтажу блоків наступного кільця, фланцева поверхня попереднього кільця повинна бути очищена. Першим у кільце монтують блок «D», який має форму трапеції, причому цей блок встановлюють вузькою стороною до забою. Далі блоки монтують по одному з обох сторін блоку «D», у відповідності зі схемою розміщення блоків у кільце. Перед подачею блоку оправи у зону монтажу необхідно виконати підготовчі роботи [1, 2, 8, 10]:

- закріпити у гніздах на одному торці блоку за допомогою в'язкого мастила направляючу штангу;
- закрутити грузовий гвинт у пластмасовий дюбель;
- блок подавати на монтаж тією стороною до раніше змонтованого кільця, де є спеціальний паз на фланцевому торці блоку;
- забити кувалдою з'єднувальні пластмасові шпильки;
- перед монтажем, фланцева поверхня попереднього кільця та стики поверхні блоку, що монтується повинні бути очищені від бруду;
- блок або тьюбінг подається без перекосу відносно площини попередньо змонтованого кільця.

Конструкція залізобетонної оправи тунелю має гумові ущільнювачі по периметру елементів оправи, що забезпечує її водонепроникність.

Перед монтажем кожного кільця, необхідно проводити заміри горизонтального та вертикального випередження, а також відхилення площини кільця від проєктного положення. Для того щоб виконувати геометрію кільця, що монтується, слід обов'язково проводити інструментальний контроль установки першого блоку у проєктне положення.

Блоки розвантажують за допомогою козлового крану, що переміщує блоки до накопичувача блоків оправи. Накопичувач переміщує блоки в зону монтажу для захвату їх укладальником.

Монтаж кільця оправи виконують у наступній послідовності [10]:

- прибрати щитові гідроциліндри на ділянці одного елемента оправи, що

монтується. Прибирання надто великої кількості гідроциліндрів може призвести до переміщення щита назад;

- монтаж блоків в кільце проводиться по схемі, що надає маркшейдерська служба, знизу до верху, розпочинаючи з лоткового блоку. Подальший монтаж наступних блоків проводиться по чергово по правому і лівому бокам відносно лотка;

- захопити вантажний гвинт кліщовим захватом блокоукладальника, розміщеним на траверсі;

- за допомогою блокоукладальника встановити тубінг або блок у проєктне положення;

- управляючі блокоукладальником, направити шпильки у гнізда «Би-блок» системи попереднього кільця;

- піджати блок блокоукладальником, щоб шпильки наполовину увійшли у гнізда;

- за допомогою щитових гідрогідроциліндрів, притиснути блок до контакту з раніше змонтованим кільцем оправи;

- блок утримувати щитовими гідроциліндрами до закінчення монтажу кільця оправи;

- встановити болтові кріплення;

- встановити криволінійні шпильки і загвинтити їх;

- звільнити вилку захвату;

- викрутити пристрій для захвату;

- змонтувати інші елементи оправи до замикання кільця.

Аналогічним чином продовжується монтаж блоків оправи у відповідності зі схемою розміщення блоків. Перед монтажем ключового блоку обов'язково змазати його скошені торці змазкою для запобігання зриву стрічки набухаючої гуми у процесі монтажу. Після завершення монтажу кільця необхідно притиснути його щитовими гідроциліндрами.

Прохідницький комплекс складається з наступних частин (рис. 4.1): Щит; Ротор; Привід ротору; Еректор; Подаючий контур; Шлюзи для персоналу;

Візок; Транспортна трубопровідна мережа.

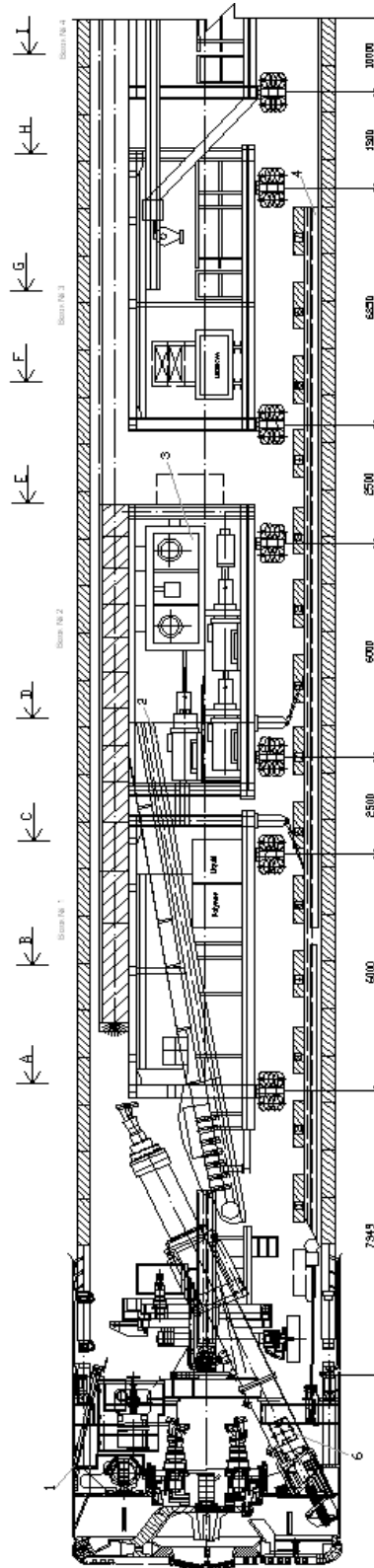


Рисунок 4.1 – Щитовий комплекс «Херренкнехт»

3.4 Визначення основних розмірів щита

1. Повна довжина щита [14]:

$$L_{щ} = L_{нч} + L_{ок} + L_{хо}$$

де $L_{нч}$ – довжина ножової частини, приймається рівною 1,0...1,2 м; $L_{ок}$ – довжина опорного кільця; $L_{ок}=2b$, де b – ширина кільця оправи; $L_{хо}$ – довжина хвостової оболонки щита, $L_{хо}=l_1+l_2+l_3$, де $l_1=(1,2...2,2)b$ – довжина перекриття кільця оправи (1,2b приймається для стійких порід, 2,2b – для нестійких); $l_2=0,6$ м – довжина виступаючої під оболонку частини щитового гідроциліндра; $l_3=0,15$ м – величина зазору між опорною плитою щитового гідроциліндра і торцевою площиною оправи.

Приймаємо: $L_{нч}=1$ м;

$$L_{ок} = 2 \cdot b = 2 \cdot 1,2 = 2,4$$
м

$$L_{хо} = 2 + 0,6 + 0,15 = 2,75$$
м

Звідси

$$L_{щ} = L_{нч} + L_{ок} + L_{хо} = 1 + 2,4 + 2,75 = 6,15$$
м

2. Внутрішній діаметр оболонки щита $D_{щ}$ повинен бути дещо більшим за зовнішній діаметр оправи $D_{зн}$ для того, щоб врахувати можливі неточності при монтажі оправи й забезпечити можливість кута повороту щита відносно оправи на криволінійних ділянках траси (0,8 % від $D_{зн}$).

Зовнішній діаметр щита $D_{щ}$ складає

$$D_{щ} = 1,008D_{зн} + 2\delta,$$

де $\delta=30$ мм – товщина оболонки щита.

$$D_{щ} = 1,008D_{зн} + 2\delta = 1,008 \cdot 6,1 + 2 \cdot 0,03 = 6,21$$
м

3. Відношення $L_{щ}/D_{щ}$ називається коефіцієнтом маневреності щита. Величина цього коефіцієнта складає 0,4...0,75 для щитів великого, 0,75...1,0 – середнього і більше, 1,0 – малого діаметрів.

$$L_{щ}/D_{щ}=6,15/6,21=0,99$$

4. Приблизна вага щита визначається за формулою:

$$G_{щ} = 85D_{щ}^2 - 250 = 3027,95кН$$

5. Величина необхідного повного зусилля щитових гідроциліндрів F:

$$F \geq (1,1...1,3)R$$

де R – загальна сила граничного опору.

$$R=R_1+R_2+R_3+R_4$$

де R₁ – опір щиту породи по лобовій поверхні:

у породах із міцністю $f \geq 1,0$ R₁=0, у породах із міцністю $f < 1,0$:

$$R_1 = Sq_e^p = 30,27 \cdot 108,5 = 3284,29кН / м$$

де S – площа поперечного перерізу щита за зовнішнім діаметром;

R₂ – опір щиту породи по зовнішній поверхні:

$$R_2 = f_{m1} \left[(q_e^p + P + q_z^3 + q_z^n) L_{щ} D_{щ} + G_{щ} \right] + 1000\pi C L_{щ} D_{щ} + 0,05 f_{m1} k_D \Delta L_{щ} D_{щ}$$

де $f_{т1}$ – коефіцієнт тертя сталі по ґрунту ($f_{т1}=0,4...0,5$); C – питоме зчеплення між ґрунтом та сталлю щита (для сипких, напівскельних та скельних ґрунтів C=0; для глинястих – C=5...10кН/м³); $k_D=(D_0/D_{щ})k$ – наведений коефіцієнт пружного відпору ґрунту ($D_0=5м$ – розмірний коефіцієнт; Δ – обжимання ґрунту боковою поверхнею: при $f \geq 1,0$ він дорівнює нулю; при $f < 1,0$ він дорівнює:

$$\Delta = \frac{1}{6f+4} - 0,77 = \frac{1}{6 \cdot 0,6+4} - 0,77 = -0,64$$

$$k_D = \frac{D_0}{D_{uy}} k = \frac{5}{6,21} \cdot 5000 = 4025,76 \text{кН} / \text{м}^3$$

$$\begin{aligned} R_2 &= f_{m1} \left[(q_6^p + P + q_2^3 + q_2^a) L_{uy} D_{uy} + G_{uy} \right] + 1000 \pi C L_{uy} D_{uy} + \\ &+ 0,05 f_{m1} k_D \Delta L_{uy} D_{uy} = 0,45 \left[(165,77 + 191,78 + 91,71 + 179,55) 6,15 \cdot 6,21 + 3027,95 \right] + \\ &+ 1000 \cdot 3,14 \cdot 0 \cdot 6,15 \cdot 6,21 + 0,05 \cdot 0,45 \cdot 4025,76 \cdot (-0,64) \cdot 6,15 \cdot 6,21 = \\ &= 9955,42 \text{кН} / \text{м} \end{aligned}$$

R_3 – опір щиту частини кріплення, яке розміщене під хвостовою оболонкою знаходять за формулою:

$$R_3 = f_{m2} (1, 2 \dots 2, 2) G_k$$

де f_{T2} – коефіцієнт тертя пари «матеріал оправи – сталь» (для пари «чавун-сталь» $f_{T2}=0,18$; для пари «бетон-сталь» $f_{T2}=0,5$)

$$R_3 = f_{m2} 1,5 G_k = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 16,38 = 12,28 \text{кН} / \text{м}$$

R_4 – опір щиту частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом визначається наступним чином:

$$R_4 = k_m f_{m2} G_{щк}$$

де $k_m=2$ – коефіцієнт місцевого опору; $G_{щк}$ – вага частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом, яка приблизно дорівнює вазі щита $G_{щ}$.

$$R_4 = k_m f_{m2} G_{щк} = 2 \cdot 0,45 \cdot 3027,95 = 2725,155 \text{кН} / \text{м}$$

Отже

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 3284,29 + 9955,42 + 12,28 + 2725,155 = 15977,145 \text{кН} / \text{м}$$

$$F \geq 1,3 \cdot 15977,145 \text{кН} / \text{м}$$

$$F \geq 20770,29 \text{кН} / \text{м}$$

6. Зусилля одного гідроциліндра дорівнює:

$$P_0 = \frac{(1,3...1,5)F}{n}$$

де n – кількість гідроциліндрів, які визначаються з конструктивних міркувань залежно від діаметра щита (2...3 гідроциліндра на один нормальний блок)

Приймаємо 14 гідроциліндрів

$$P_0 = \frac{(1,3...1,5)F}{n} = \frac{1,4 \cdot 20770,29}{14} = 2077,03 \text{кН}$$

3.5 Транспортування ґрунту

Розроблений ґрунт через отвори у роторі попадає у робочу камеру, а з неї ґрунт потрапляє на шнековий транспортер. Шнековий переміщує транспортує ґрунт від забою і розвантажує ґрунт на стрічковий конвеєр, що змонтований по центру. Безперервний стрічковий конвеєр переміщує ґрунт до розвантажувального кузова, що розташований під конвеєром на вантажному автомобілі. Стрічковий конвеєр розвантажує ґрунт у кузов, а потім ґрунт вивозиться автомобілями по змонтованому тунелю під кран для видачі на поверхню [8, 10].

Кожух шнекового транспортеру оснащено п'ятьма отворами для нагнітання піни. Діаметр шнеку та його сердечника визначає максимально допустимий розмір частинок – 240 мм. Шнековий транспортер запирається засувкою. Засувка зачиняється за допомогою гідроциліндрів та має аварійну функцію зачинення у разі вимкнення електроенергії. З загрузочної воронки ґрунт попадає на стрічковий транспортер, який доставляє його до автомобіля. Стрічковий транспортер має довжину 60 м. Гумова стрічка транспортеру має бокові направляючі. Очистка стрічки відбувається за допомогою скребка, який регулюється механічно та влаштований на приводній станції.

Ґрунт з стрічкового транспортеру попадає до з'ємного кузова, який встановлено на автомобілі КрАЗ. Розроблений на довжину 1,2 м ґрунт (на одне кільце оправи) в об'ємі 38 куб.м. загружається на чотири автомашини. Автомашини, перша з яких завозить комплект блоків на кільце оправи, слідує по тунелю одна за одною та послідовно завантажується ґрунтом. Автомобіль доставляє ґрунт у камеру, де проводиться стропова кузову за чотири проушини та підйом його на поверхню за допомогою козлового крану КС-50-42Б. На обладнаній площадці розвантаження кузов опускають на землю, стропують його на дві передні проушини по дві стропи на проушину, відкривають кріплення заднього борту та виконують розвантаження ґрунту. Потім кузов опускають на землю, запирають кріплення заднього борту, стропують кузов за чотири точки, опускають у монтажну камеру та встановлюють на автомобіль. Автомобіль проїжджає по тунелю, а на його місце під розвантаження заїжджає наступний автомобіль з ґрунтом. На площадці розвантаження екскаватор «пряма лопата» або автопогрузчик проводять погрузку ґрунту на автосамоскиди, які вивозять ґрунт за межі будівельного майданчику.

3.6 Переміщення тунелепрохідницького комплексу

Середня частина щита з хвостовою оболонкою з'єднана шарнірно [8, 10, 14]. Стик шарніру має два ущільнення – кероване та аварійне. Поворот хвостової оболонки відносно ріжучої та середньої частини щита здійснюється за допомогою 16-ти артикуляційних (керувальних) гідроциліндрів з рухом циліндру 150 мм. ТПК оснащено 19 щитовими (прохідницькими) гідроциліндрами, які мають рух 1800 мм. Кожен щитовий гідрогідроциліндр зі сторони циліндра спирається на опорне кільце, а зі сторони штоку, через опорний башмак, на змонтовані блоки оправи. Щитові гідроциліндри виконують дві функції: переміщують ТПК вперед та підтримують блоки оправи під час монтажу. Щит відштовхується від останнього змонтованого кільця оправи та тисне ротором на забій. Керування напрямком руху ТПК здійснюється спеціальним механізмом, який використовує різні комбінації

зміни тиску у групах щитових гідроциліндрів та роботу артикуляційних гідроциліндрів. Щитові та артикуляційні гідроциліндри обладнані системою заміру руху. Зміна руху гідроциліндру відбувається безконтактно за допомогою датчику руху, що встановлено у гідроциліндрі. Фактичне положення гідроциліндрів відображається на пульті керування. Герметичність хвостової оболонки щита по відношенню до навколишнього ґрунтового масиву досягається за допомогою трирядного щіткового ущільнення. У простір між рядами щіток у 6-ти місцях безперервно закачується спеціальне консистентне мастило. Обладнання щита щітковим ущільненням необхідно для того, щоб попередити проникнення нестійкого водонасиченого ґрунту та розчину, яким проводиться нагнітання, крізь щілину між хвостовою оболонкою ТПК та тунельною оправою. Крім того, це ущільнення дозволяє підтримувати тиск на чоло забою на необхідному рівні. Зовнішній ряд щіткового ущільнення обладнаний пластинами зворотного потоку, які перешкоджають потрапляння розчину, яким проводиться нагнітання за тунельну оправу, до забійної зони. Технологічне обладнання щита розміщується на частково відкритих порталних візках, які пересуваються за прохідницьким щитом за допомогою коліс. На технологічних візках встановлено усе необхідне обладнання, яке потрібно для роботи щита з ґрунтопривантаженням та для монтажу оправи.

3.7 Тампонаж заоправного простору та спеціальні роботи

При щитовій проходці в складних інженерно-геологічних умовах для збереження цілісності ґрунтового масиву та забезпечення мінімальної осадки поверхні, а також для забезпечення стійкості тунельної оправи дуже важливим є якісне виконання робіт по тампонажу заоправного простору та, в разі необхідності, – по закріпленню ґрунтів перед щитом рихлих чи розрихляючихся при проходці [7, 8].

Заоправний простір утворюється в процесі монтажу чергового кільця обробки та при передвижці щита. Нагнітання тампонажного розчину ведеться постійно під час передвижки механізованого щита через трубки, розміщені в

оболонці щита, або через пробкові отвори в блоках оправи, з контролем за дотриманням заданого тиску та об'єму нагнітаючого розчину.

Тиск, при якому слід виконувати тампонаж, повинен бути вище тиску привантаження бентонітового розчину. Об'єм нагнітаючого тампонажного розчину повинен відповідати об'єму, необхідного для заповнення зазору між зовнішнім контуром обробки та контуром розробки забою.

В результаті такого тампонажу заоправного простору вдається попередити осадок навіть водо насиченого піщаного ґрунту. До ущільнюючого тампонажного розчину пред'являються досить жорсткі вимоги. Розчин повинен мати текучу консистенцію при малій водовіддачі та залишатися в рідкому стані на час вимушених зупинок проходки.

Для приготування тампонажного розчину використовуються спеціальні установки, розміщені на поверхні або в шахті та складаються з силосів (для цементу, піску та інших заповнювачів), вагових чи об'ємних дозаторів, розчино змішувача, лабораторного обладнання.

Розчин транспортується до механізованого щита спеціальними вагонетками, до вихідного сопла яких підключається всмоктуючий шланг бетононасосу. При великій довжині та значному діаметрі тунелю, який будується, для доставки розчину до механізованого щита використовуються ємності з розчинонасосами. Безпосередньо на механізованому щиті або на першій захитовій платформі встановлюється роторний розподільник, від якого розчин по шлангам чи стаціонарним розвідним трубопроводам подається в поздовжні трубопроводи, а від них до площини заднього торця хвостової оболонки механізованого щита.

Присутні автоматизовані установки для приготування та нагнітання тампонажного розчину за оправу. При роботі ТПМК з активним привантаженням забою в ряді випадків необхідно виконувати як з поверхні, так безпосередньо й з механізованого щита роботи по стабілізації ґрунтів перед ним чи навколо нього. До таких випадків відносяться: вивід ТПМК зі стартової камери в ґрунтовий масив, проведення крупних ремонтів, видалення перешкод, ввід в демонтажну камеру. Для цієї цілі часто використовують цементно-

струйні технології, буронабивні палі або технологію «стіна в ґрунті».

Іноді приходиться застосовувати штучне водопониження для зниження величини гідростатичного тиску в ґрунті при роботі механізованих щитів з активним привантаженням забою. За останні роки все частіше стали використовувати при щитовій проходці стабілізацію нещільних або схильних до розрихлення нестійких ґрунтів, в першу чергу пісаних, розміщених перед або навколо механізованого щита, через ін'єктори, розміщені в механізованому щиті.

При необхідності виконання бурових робіт на установлюючі вузлах, закріплених безпосередньо на щитовому корпусі або на блокоукладчику, монтується бурова машина.

3.8 Гідроізоляція тунельної оправи

Після спорудження ділянки тунелю між двома камерами проводять роботи по гідроізоляції стиків та болтових з'єднань. Гідроізоляція тунельної оправи забезпечується використанням набухаючої гуми для ущільнення стиків блоків та нагнітанням спеціального розчину за оправу. Для чеканки швів оправи використовується герметик у комбінації з шнуром та захисною стрічкою. Роботи з використанням цих матеріалів виконуються відносно рекомендацій фірм виробників [8, 10].

Для запобігання просадок ґрунту на поверхні, вільний простір між породою та кільцем оправи, який виникає при переміщення щита, необхідно заповнити. Заповнюючий розчин подається у зазори кільця по усьому об'єму синхронізовано з проходкою. Недостатня кількість розчину може викликати просадки на поверхні та пробої води у тунелі. Надто велика кількість розчину руйнує систему щита та щіткове ущільнення, а також може викликати блокування щита у зоні ріжучого ротору.

На ділянках розчин для нагнітання доставляється автобетонозмішувачем. Коли відстань до ТПК не надто велика, розчин для нагнітання до пристрою може подаватися бетононасосом, або у розчиноперемішувачі, який

доставляється до ТПК на автомашині. ТПК обладнано двома насосами для густого матеріалу (розчину), які по шлангам перекачують розчин за оправу через канали для нагнітання. Швидкість та продуктивність подаючих поршнів насосу може гідравлічно змінюватись. За допомогою важеля керування насос можна перемикнути з ходу у напрямку «вперед» на хід за напрямком «назад». Кожна з чотирьох груп каналів для нагнітання обладнана датчиком тиску, які передають дані до системи керування. Кожен з поршнів насосів оснащено індикатором, який дає можливість зафіксувати число циклів поршня на заходку, тобто кількість розчину на кільце. Таким чином, гідравлічне керування кількості розчину дозволяє узгоджувати кількість нагнітаючого розчину через кожену групу каналів зі швидкістю проходки.

Система керування дозволяє проводити нагнітання у зазор між оправою та породою одночасно з переміщенням щита у ручному або автоматичному режимі. З панелі керування на пульті можна увімкнути або вимкнути окремі точки нагнітання. Система керування також дозволяє контролювати мінімальний тиск розчину у зазорі нижче якого тиск розчину не повинен падати та максимально допустимий динамічний тиск. У точці нагнітання, при досягненні встановленого тиску, точна миттєво відключається.

Щоб трубопроводи від ємкості для розчину до точки нагнітання не засмічувалися, їх необхідно дбайливо чистити. Чистка установки повинна проводитися у залежності від часу твердіння розчину, який використовується для нагнітання. Рекомендовані виробником інтервали чистки необхідно скоротити для запобігання виникнення «пробок». Видалення «пробок» за допомогою стиснутого повітря категорично забороняється.

Для підвищення загальної водонепроникності тунельної оправи та ліквідації окремих пробіїв води після чеканки швів та закладення місць болтових з'єднань виконують ущільнювальне нагнітання. Ущільнювальне нагнітання виконують бентонітовим розчином у місцях пробіїв води з тиском до 0,15 МПа.

Ін'єктори встановлюють у пробкові отвори блоків, попередньо пробурих у

них шпур з заглибленням у породу на 10...15 см.

Для ліквідації окремих пробоїв води один шпур пробурюється у місці пробою та три – навколо нього з радіусом 1,0...1,5 м. Нагнітання проводиться до тих пір, доки не припиниться поглинання розчину при граничному тиску.

Якість виконаних робіт по ущільнювальному нагнітання встановлюється виходячи з зовнішнього огляду.

Виконання робіт по нагнітання розчину за тунельну оправу відбувається наступним чином:

- доставка суміші для нагнітання автобетонозмішувачами на ділянку у визначений час і в необхідній кількості згідно замовлення ділянці та складу, розробленого лабораторією КВП ВАТ «Київметробуд»;

- прийом суміші для нагнітання на ділянці в бетононасос через сито;

- підключення шлангів до системи нагнітання ТПК для подальшого проведення первинного нагнітання розчину за оболонку щита;

- нагнітання розчину за оболонку щита під час його пересування $V_{\min} = 1,6 \text{ м}^3$;

- після закінчення процесу нагнітання система обов'язково очищується, методом промивки водою.

Категорично забороняється проводити переміщення щита без виконання технологічного процесу первинного нагнітання спеціального розчину.

При проходці тунелю під наступне кільце, цикл процесу нагнітання повторюється.

В разі необхідності, можливе проведення нагнітання в монтажні отвори тунельної оправы.

ВИСНОВКИ

1. В магістерській роботі проаналізовано конструктивні особливості збірних залізобетонних оправ і виконано визначення параметрів оправи перегінного тунелю для трьох варіантів, причому більшої уваги приділено перспективному варіанту оправи з блоків, що мають трапецієподібну форму.

2. Проведена розробка варіантів оправи перегінного тунелю і техніко-економічне порівняння, прийнято Варіант 3 з оправою із залізобетонних блоків В40, що мають трапецієподібну форму та інноваційну систему гідроізоляції.

3. На основі методу кільця, що вільно деформується, проведено аналіз силових факторів в оправі перегінного тунелю. Зроблена перевірка на міцність елементів оправи із залізобетону.

4. Виконане дослідження впливу гідростатичного тиску на силові фактори в оправі, для чого прийнято чотири варіанти висоти ґрунтової води над шелигою склепіння (7,5; 5,8; 4,4 та 3,0 м). З'ясовано, що дія напірних вод із змінною висотою лінійно збільшує значення сумарних нормальних сил за рахунок збільшення цієї ж компоненти від гідростатичного тиску.

5. Визначено й проаналізовано параметри щитової проходки перегінного тунелю Київського метрополітену, розраховано основні розміри прохідницького щита та розроблено всі цикли спорудження 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. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Навчальний посібник. Частина 2 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – К.: НТУ, 2009. – 216 с.
3. Гайко, Г. І. Конструкції кріплення підземних споруд: Навчальний посібник [Текст] / Г. І. Гайко. – Алчевськ: Дон ДНУ, 2006 – 133 с.
4. ДБН Д.2.2.-29-99 Ресурсні елементні кошторисні норми. Збірка 29. Тунелі та метрополітени [Текст]. – Київ: Держбуд України, 2006. – 271 с.
5. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
6. Заворицкий, В. И. Проектирование подземных транспортных сооружений [Текст] / В. И. Заворицкий. – Київ : Будівельник, 1975. – 204 с.
7. Кауфман, Л. Л. Строительство тоннелей. Часть I. [Текст] / Л.Л. Кауфман, Н.И. Кулдыркаев, Б.А. Лысиков. – Донецк: Норд-Прес, 2006. – 360 с.
8. Кауфман, Л. Л. Строительство тоннелей. Часть II. [Текст] / Л. Л. Кауфман, Н. И. Кулдыркаев, Б. А. Лысиков. – Донецк: Норд-Прес, 2006. – 330 с.
9. Петренко, В. Д. Сравнительный анализ результатов натурных исследований и математического моделирования перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, В. И. Петренко. / Міжвід. зб. наук. праць «Геотехнічна механіка». – Дніпропетровськ: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2007. – Вип. 73. – С. 91-100.
10. 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.

11. Самедов, А. М. Будівництво міських підземних споруд: навч. посіб. [Текст] / А. М. Самедов, В. Г. Кравець. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 400 с.

12. Тютькин А. Л. Исследование напряженно-деформированного состояния обделки перегонного тоннеля с учетом передвижения щита / Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Новые технологии подземного строительства и добычи полезных ископаемых», 11-13 апреля 2008 г., г. Алчевск. – Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2008. – С. 133-139.

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

14. Тютькін, О. Л. Тунелі і метрополітени. Навчально-методичні рекомендації для курсового проектування «Спорудження тунелів щитовим способом» [Електрон. видання] / Уклад. О. Л. Тютькін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 60 с.