

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

«Будівництво, архітектура та інфраструктура»  
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
ОС «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю  
в м. Дніпрі із застосуванням альтернативного виду кріплення  
за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»  
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: MT2321

  
(підпис студента)

/ Данііл ТЕН /  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

  
(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /  
(посада, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

  
(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /  
(посада, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент

  
(підпис)

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

«Будівництво, архітектура та інфраструктура»  
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

**Пояснювальна записка**  
до кваліфікаційної роботи  
ОС «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю  
в м. Дніпрі із застосуванням альтернативного виду кріплення  
за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»  
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: МТ2321

\_\_\_\_\_

(підпис студента)

/ Данііл ТЕН /

\_\_\_\_\_

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

\_\_\_\_\_

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

\_\_\_\_\_

(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

\_\_\_\_\_

(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**  
**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: Substantiation of the shield tunneling of the metro tunnel  
in Dnipro with the use of an alternative type of lining  
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 / Daniil TEN /  
(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 Тену Даніілу Дмитровичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю в м. Дніпрі із застосуванням альтернативного виду кріплення»

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

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

затверджені наказом від «16» лютого 2024 р. № 157ст

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

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

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

Вступ. Розділ 1. Аналіз геологічних і гідрологічних умов та варіантне проектування оправи. Розділ 2. Обґрунтування параметрів альтернативного кріплення на основі дослідження силових факторів. Розділ 3. Обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю з монолітно-пресованою оправою. 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:<br>(підпис консультанта,<br>дата) | Завдання прийняв:<br>(підпис студента, дата) |
|--------|---|---|--|
|        |   |   |  |

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи  | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Вступ. Розділ 1. Аналіз геологічних і гідрологічних умов та варіантне проєктування оправи.                                       | 02.09.2024-<br>29.09.2024     |          |
| 2     | Розділ 2. Обґрунтування параметрів альтернативного кріплення на основі дослідження силових факторів.                             | 30.09.2024-<br>03.11.2024     |          |
| 3     | Розділ 3. Обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю з монолітно-пресованою оправою. Висновки. Оформлення ВКР. | 04.11.2024-<br>05.12.2024     |          |
| 4     | Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.        | 09.12.2024-<br>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)

Данііл ТЕН

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олексій ТЮТ'КІН

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 стор., 11 рис., 8 табл., 15 літературних джерел.

Об'єкт розробки – перегінний тунель із альтернативним видом кріплення (умови Дніпровського метрополітену).

Мета роботи – обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю в м. Дніпрі із застосуванням альтернативного виду кріплення.

Метод дослідження – метод О. Ю. Бугаєвої.

В магістерській роботі виконано аналіз геологічних і гідрологічних умов проведене варіантне проектування та техніко-економічне порівняння варіантів.

Проведене обґрунтування параметрів альтернативного кріплення на основі дослідження силових факторів. На основі методу О. Ю. Бугаєвої проведено розрахунки монолітно-пресованої оправи з варіацією їхньої товщини.

Обґрунтована технологія щитової проходки перегінного тунелю з монолітно-пресованою оправою. Визначено параметри прохідницького щита, розраховано параметри вентиляції та електровозної відкатки.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, ПЕРЕГІННИЙ ТУНЕЛЬ, МЕТОД О. Ю. БУГАЄВОЇ, ТЕХНОЛОГІЯ СПОРУДЖЕННЯ, ЩИТОВА ПРОХОДКА, МОНОЛІТНО-ПРЕСОВАНА ОПРАВА

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП .....  | 7  |
| 1 АНАЛІЗ ГЕОЛОГІЧНИХ І ГІДРОЛОГІЧНИХ УМОВ ТА ВАРІАНТНЕ<br>ПРОЄКТУВАННЯ ОПРАВИ.....                     | 9  |
| 1.1 Аналіз геологічних і гідрологічних умов .....  | 9  |
| 1.2 Визначення параметрів конструкції кругових оправ .....   | 11 |
| 1.3 Техніко-економічне порівняння варіантів.....   | 20 |
| 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АЛЬТЕРНАТИВНОГО КРІПЛЕННЯ НА<br>ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ФАКТОРІВ.....    | 23 |
| 2.1 Визначення навантажень.....  | 23 |
| 2.2 Розрахунок оправ за методом О. Ю. Бугаєвої.....  | 25 |
| 2.3 Обґрунтування параметрів альтернативного кріплення на основі визначення<br>її міцності .....       | 34 |
| 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЩИТОВОЇ ПРОХОДКИ ПЕРЕГІННОГО<br>ТУНЕЛЮ З МОНОЛІТНО-ПРЕСОВАНОЮ ОПРАВОЮ ..... | 37 |
| 3.1 Визначення параметрів прохідницького щита.....   | 37 |
| 3.2 Технологія спорудження перегінного тунелю з монолітно-пресованою<br>оправи .....                   | 41 |
| 3.4 Розрахунок електровозної відкатки .....  | 51 |
| 3.5 Побудова циклограми виробництва робіт і розрахунок вентиляції .....                                | 53 |
| ВИСНОВКИ.....  | 58 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....  | 59 |

## ВСТУП

Спорудження перегінних тунелів метрополітену в міцних породах, таких, які наявні в м. Дніпрі, має дві глобальні схеми проходки – щитову і еректорну. Кожна з цих схем має свої особливості застосування оправ, а також вибору їхніх елементів (блоків, ребристих блоків або тьобінгів) та матеріалу (залізобетон, чавун, монолітний бетон або залізобетон). Колова форма оправи притаманна щитовій проходці, прохідницький агрегат для якої має круговий обрис; еректорна, тобто безщитова проходка дозволяє змінювати форму і застосовувати неколові обриси.

Слід відмітити, що щитова проходка на сьогодні має високу долю під час спорудження перегінних тунелів, оскільки фірми, що створюють прохідницькі комплекси, пропонують висококласні щити для найміцніших порід. В м. Дніпрі, метрополітен якого закладено в породах з міцністю за проф. Протод'яконовим  $f=6...12$ , доволі ефективно споруджувати за допомогою щиту або тунелепрохідницької машини.

Однак, після досвіду поновлення будівництва Дніпровського метрополітену в 2016 році еректорний спосіб також розглядається як високоефективний. Турецька фірма «Лімак» без допомоги щиту успішно пройшла сотні метрів перегінних тунелів, застосовуючи НАТМ – Новоавстрійський метод спорудження тунелів [12-15]. Цей метод ґрунтується на буровибуховому способі руйнування міцної породи і монолітному створенні оправи, яка влаштовується в два прийоми: спочатку торкретуванням наносять тимчасову оправу, а потім споруджують постійну.

На відміну від щитового способу, НАТМ базується не на зведенні збірних оправ з блоків та тьобінгів, з характерним для цього процесу первинним нагнітанням та чеканенням швів, а на процесі бетонування, який задіяний і під час створення тимчасового кріплення незначної товщини, і в процесі спорудження постійної оправи, що має значне армування і може мати неколове окреслення.

Альтернативним варіантом, який поєднує в собі елементи щитової та еректорної проходки, є спорудження тунелю за допомогою щита, який формує оправу з монолітно-пресованого бетону. В цьому варіанті є переваги щитового способу, а саме високий рівень механізації під час розробки породи, захист працівників, відсутність вибухового процесу, створення оправи колового окреслення. А також присутні і переваги NATM [15], а саме відсутність додаткових процесів гідроізоляції (відсутність чеканення швів, нагнітання тощо), створення безшовної оправи, при цьому щит виступає в ролі домкрату, який запресовує бетон, що неможливе в NATM.

Такий спосіб проходки перегінного тунелю, що базується не на застосуванні збірних елементів, а монолітного бетону, ефективно застосовувався під час будівництва підземних споруд в 1960-1970-х роках, але потім його роль зменшувалася [8]. Це пояснювалося тим, що під час застосування застарілих технологій та бетонних сумішей невисокої якості не можна було досягти оправи, яка б мала нормативну міцність. Однак тепер, після досвіду Дніпровського метрополітену, під час спорудження якого було застосовано бетонні суміші нового покоління, ця проблема не є такою гострою.

Проте, все ж таки застосування монолітно-пресованого бетону в якості альтернативного матеріалу для кріплення має один важливий недолік, а саме неможливість армування суміші під час її укладання і пресування. Тобто застосування бетону, навіть високої якості, зменшує область його застосування, обмежуючи міцними ґрунтами. При цьому міцність оправи повинна бути обґрунтованою з позиції силових факторів, згинальних моментів та нормальних сил, які в ній виникають.

Таким чином, тема випускної кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістра», а саме обґрунтування технології щитової проходки перегінного тунелю в м. Дніпрі із застосуванням альтернативного виду кріплення (монолітно-пресована оправа) є актуальною і приймається до виконання.

# 1 АНАЛІЗ ГЕОЛОГІЧНИХ І ГІДРОЛОГІЧНИХ УМОВ ТА ВАРІАНТНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОПРАВИ

## 1.1 Аналіз геологічних і гідрологічних умов

На вибір типу оправи і визначення основних параметрів вирішальний вплив мають інженерно-геологічні умови розташування тунелю (геологія і гідрогеологія, положення тунелю відносно поверхні землі і границь пластів породи, його діаметр) [1, 2].

Оцінка інженерно-геологічних умов при виборі типу тунельної оправи виконується з таких позицій. У будь-яких породах, а особливо зволжених, оправа повинна бути водостійкою проти випадкової, поверхневої або підземної води.

При вирішенні ряду задач гірської справи, які виникають при будівництві метрополітенів, необхідно знати властивості ґрунтів та гірських порід. Особливо важливо, крім фізико-механічних характеристик, є визначення реологічних властивостей, тобто параметрів повзучості ґрунтів та гірських порід [6, 7].

У загальному випадку визначення ряду параметрів фізико-механічних властивостей порід, що необхідні для характеристики їх стійкості у виробках, що проходяться, є основою інженерно-геологічних вишукувань.

Сучасні відкладення представлені насипними ґрунтами та асфальтовим покриттям з щербенистою підсіпкою, пісками, суглинками з включеннями будівельного бруду до 10...30 % потужністю 1,4...4,8 м.

Далі залягають суглинки і супіски з тонкими прошарками пилюватих пісків та суглинки з прошарками супіску і лінзами піску. Коефіцієнт пористості  $e=0,65$ , показник консистенції  $0,50 < I_L < 0,75$ , питоме зчеплення  $c^H=0,025$ , кут внутрішнього тертя  $\varphi^H=19^\circ$ , модуль пружності  $E=17,0$  МПа, а питома вага –  $\gamma=18$  кН/м<sup>3</sup>.

Нижче товща представлена суглинками сірувато-зеленими слюдистими з тонкими прошарками піску, тугопластичними, що характеризуються

властивостями:  $e=0,65$ ;  $0,25 < I_l < 0,50$ ;  $c^H=0,034$  МПа;  $\varphi^H=23^\circ$ ;  $E=25,0$  МПа;  $\gamma=18$  кН/м<sup>3</sup>.

Під суглинками розташовані глини товщиною від 10 до 20 м. Характеризуються вони такими властивостями:  $e=0,65$ ;  $0,25 < I_l < 0,50$ ;  $c^H=0,057$  МПа;  $\varphi^H=18^\circ$ ;  $E=21,0$  МПа;  $\gamma=18$  кН/м<sup>3</sup>.

Основним шаром є плагіограніти сірі, біотити, біотит-роговоуламкові граніти, діорити. Скельний масив порушено тектонічними зонами різноманітного характеру, напрямку і потужності. Межа міцності на одноосний стиск складає 5,9 МПа. Коефіцієнт міцності масиву дорівнює 0,2...0,3 МПа і на незначних ділянках середньо- і слаботріщинуватих ґрунтів підвищується до 0,7 МПа.

Рівень підземних вод залягає на глибині 1,6...2,4 м. Занурення станції під статичний рівень складає 43,0...44,0 м (рис. 1.1).

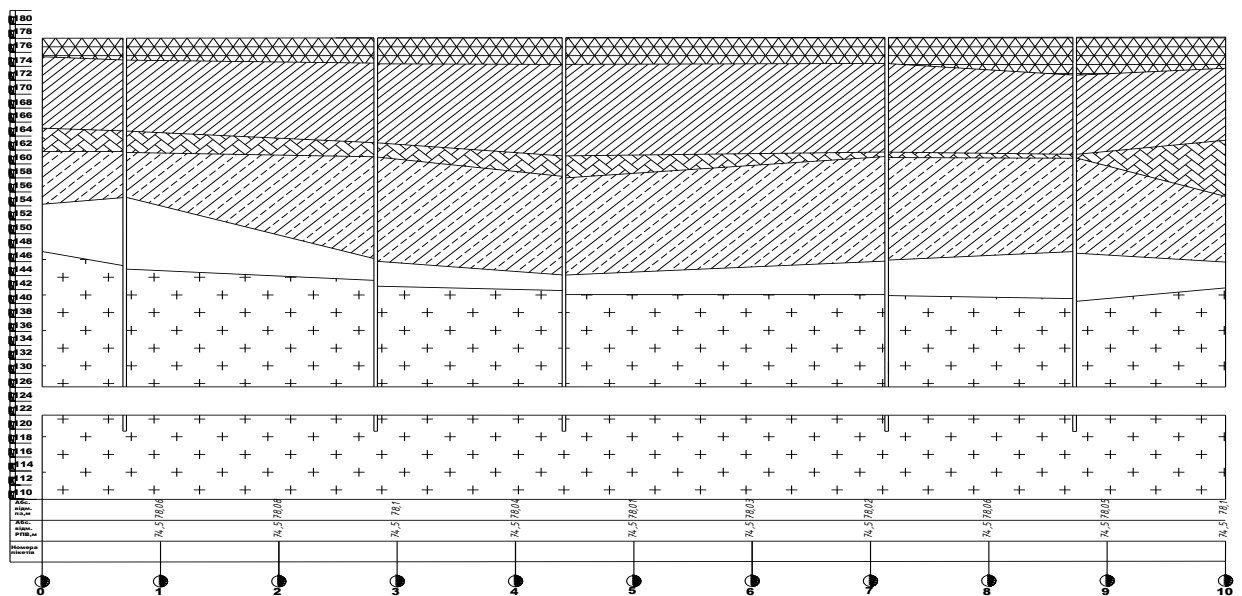


Рисунок 1.1 – Геологічна будова ділянки

На ділянках розвитку послаблених зон, при проходці тунелів рекомендується вести випереджаюче буріння горизонтальних розвідочних свердловин для виявлення істинної потужності зон і розділяючих їх блоків скельних ґрунтів.

Характеристики шарів ґрунту оточуючого масиву відповідають реальним

інженерно-геологічним умовам закладання станції, виконані у відповідності до прийнятих нормативних положень.

Таким чином, вивчення інженерно-геологічних умов, визначення в результаті деформаційні та міцнісні характеристики є основою для визначення параметрів гірського тиску, реологічних властивостей порід та взаємодії тимчасового та постійного кріплення вироблень великого перетину з деформуємим ґрунтом, а моделювання характеру поведінки ґрунтового масиву і стійкості кріплення виробок дає можливість створити технології проходження виробок великого поперечного перетину і обумовити застосування належних способів їх будівництва [1, 2].

## **1.2 Визначення параметрів конструкції кругових оправ**

У ході проектування необхідно виконати порівняння в технічному та економічному відношенні декількох можливих варіантів оправи (із залізобетонних блоків і тюбінгів, з монолітно-пресованого бетону або чавунних тюбінгів). Здебільшого необхідно вибирати оправи із залізобетону або бетону, і тільки в особливо важких інженерно-геологічних умовах може бути допущено застосування оправ з чавунних тюбінгів [11].

Для виготовлення залізобетонних блоків і тюбінгів застосовують бетон класу не нижче С25/30, а чавунні тюбінги відливають з чавуну марки СЧ-21-40.

### **Варіант №1. Збірна оправа із блоків з плоским лотком**

Для визначення товщини блоків Варіанту №1 (рис. 1.2) слід скористатися емпіричною формулою [11]:

$$h = n^3 \sqrt{\frac{R_{\text{вн}}^2}{f}} = 10^3 \sqrt{\frac{2,55^2}{6}} = 10,3 \text{ см,}$$

де  $R_{\text{вн}}$  – внутрішній радіус оправи, м;  $f$  – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова;  $n$  – емпіричний коефіцієнт, який

дорівнює:  $n=10$  – для залізобетонних блоків з бетону класу С25/30.

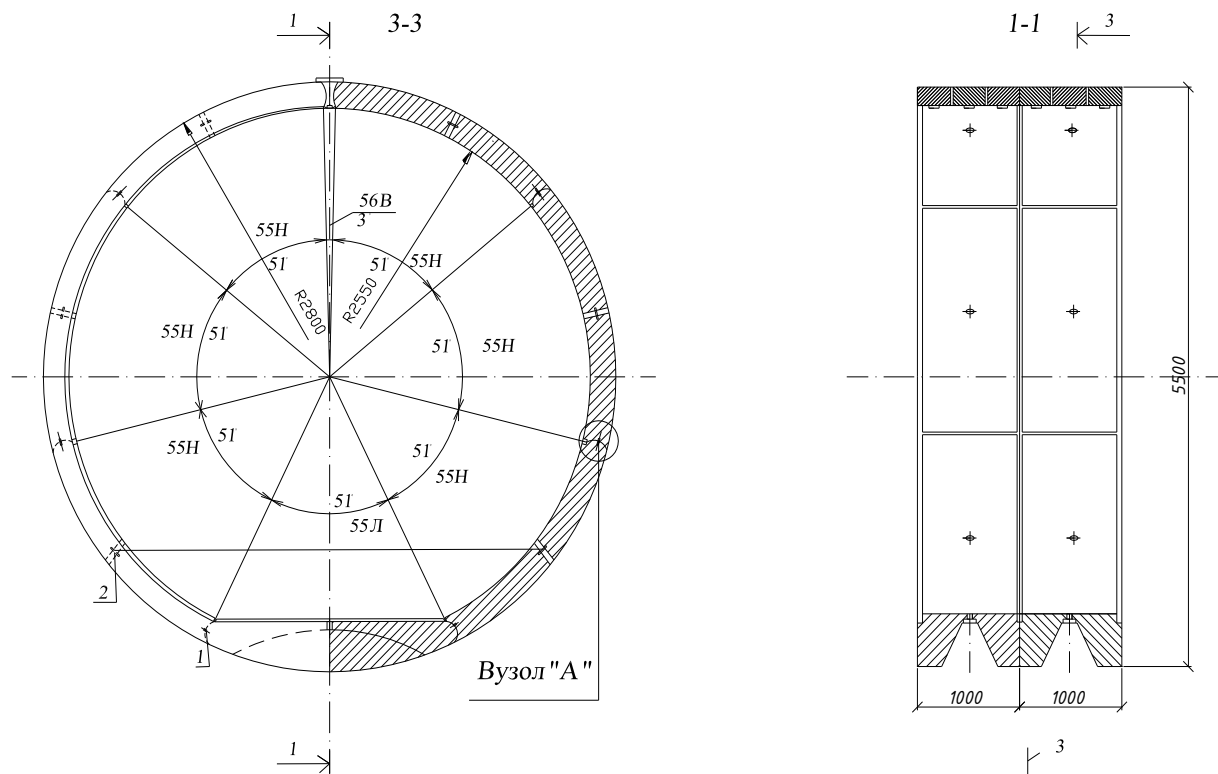


Рисунок 1.2 – Варіант №1. Збірна оправа із блоків з плоским лотком

Незалежно від результатів розрахунку товщина оправи із залізобетонних блоків повинна бути не менше 15 см, а товщина бортів або оболонок залізобетонних тюрбінгів – не менше 10 см. Розміри елементів оправи, отримані розрахунком, округляють до 5 см.

У перелік робіт входять:

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

$$V_p = \frac{\pi D_{3H}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,4^2}{4} = 22,9 m^3,$$

де  $D_{3H}$  – зовнішній діаметр оправи.

Навантаження породи ( $m^3$ ):

$$V_{\text{н}} = k_{\text{р}} V_{\text{р}} = 22,9 \cdot 2 = 45,8 \text{ м}^3,$$

де  $k_{\text{р}}$  – коефіцієнт розрихлення.

Монтаж залізобетонної оправи ( $\text{м}^3$ ):

$$V_{\text{к}} = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 1 \frac{3,14}{4} (5,4^2 - 5,1^2) = 2,47 \text{ м}^3,$$

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

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

$$G_{\text{к}} = \gamma V_{\text{к}} l = 2,5 \cdot 2,47 \cdot 1 = 6,2 \text{ т},$$

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

Нагнітання за оправу ( $\text{м}^2$ ):

$$S_{\text{к}} = L_{\text{к}} \cdot 1 = \pi D_{\text{зн}} = 3,14 \cdot 5,4 \cdot 1 = 16,9 \text{ м}^2,$$

де  $L_{\text{к}}$  – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

Чеканка швів (на один метр тунелю):

$$L_{\text{ч.ш.}} = L_{\text{вн}} + n \cdot 1 = \pi D_{\text{вн}} + n = 3,14 \cdot 5,1 + 9 = 25,01 \text{ м},$$

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

### Варіант №2. Збірна залізобетонна оправа із тюбінгів з плоским лотком

Для визначення висоти бортів тюбінгів (рис. 1.3) слід скористатися емпіричною формулою [11]:

$$h = n^3 \sqrt{\frac{R_{\text{вн}}^2}{f}} = 9^3 \sqrt{\frac{2,55^2}{6}} = 9,25 \text{ см},$$

де  $R_{\text{вн}}$  – внутрішній радіус оправи, м;  $f$  – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова;  $n$  – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює:  $n=9$  – для залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу В40.

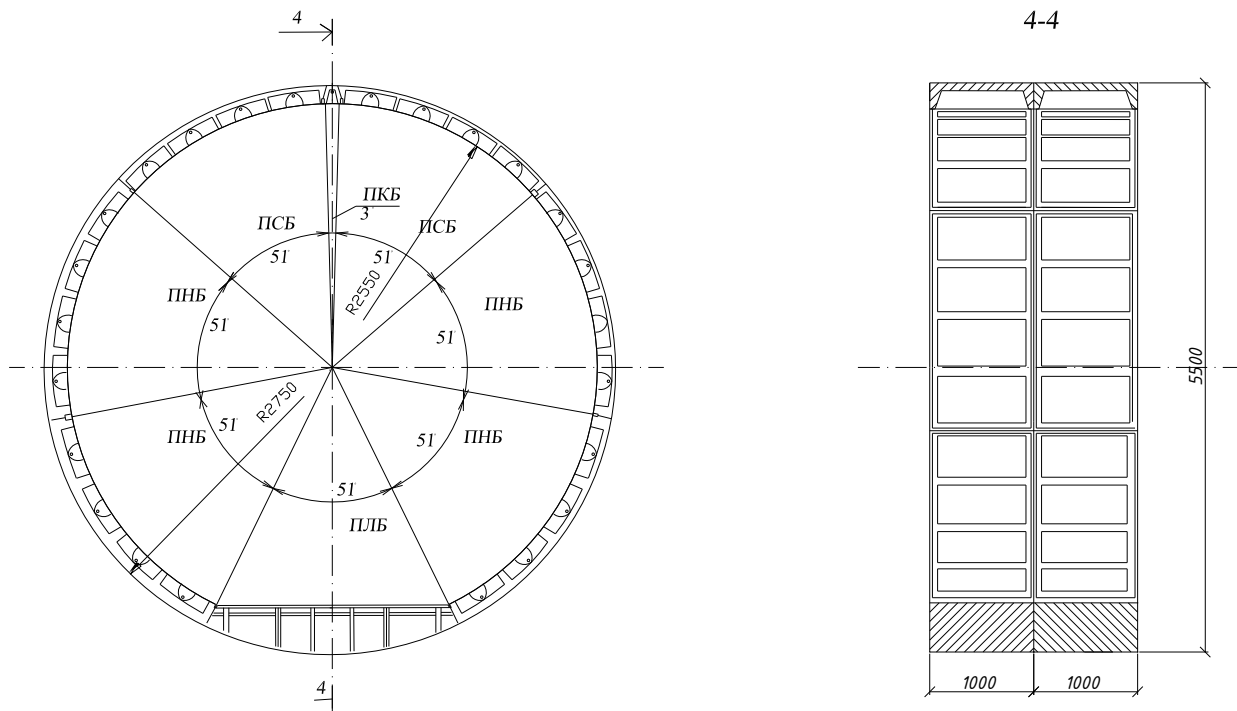


Рисунок 1.3 – Варіант №2. Збірна залізобетонна оправа із тюбінгів з плоским лотком

Незалежно від результатів розрахунку товщина оправи із залізобетонних блоків повинна бути не менше 15 см, а товщина бортів або оболонок

залізобетонних тюбінгів – не менше 10 см. Розміри елементів оправи, отримані розрахунком, округляють до 5 см.

У перелік робіт входять:

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

$$V_p = \frac{\pi D_{\text{зн}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,4^2}{4} = 22,9 m^3,$$

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

Навантаження породи ( $m^3$ ):

$$V_n = k_p V_p = 22,9 \cdot 2 = 45,8 m^3,$$

де  $k_p$  – коефіцієнт розрихлення.

Монтаж залізобетонної оправи ( $m^3$ ):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 0,7 \frac{3,14}{4} (5,4^2 - 5,1^2) = 1,73 m^3,$$

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

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

$$G_k = \gamma V_k l = 2,5 \cdot 1,73 \cdot 1 = 4,325 m,$$

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

Нагнітання за оправу ( $m^2$ ):

$$S_k = L_k \cdot 1 = \pi D_{3H} = 3,14 \cdot 5,4 \cdot 1 = 16,9 m^2,$$

де  $L_k$  – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

Чеканка швів (на один метр тунелю):

$$L_{ч.ш.} = L_{BH} + n \cdot 1 = \pi D_{BH} + n \cdot 1 = 3,14 \cdot 5,1 + 11 = 27,01 m,$$

де  $L_{BH}$  – довжина кола оправы по внутрішньому діаметру;  $n$  – кількість поздовжніх швів в оправі.

Розрахунок трудовитрат заноситься у таблицю.

### **Варіант №3. Збірна оправа із блоків В40 із плоским лотком**

Для визначення висоти бортів тубінгів (рис. 1.4) слід скористатися емпіричною формулою [11]:

$$h = n^3 \sqrt{\frac{R_{BH}^2}{f}} = 9^3 \sqrt{\frac{2,55^2}{6}} = 9,25 cm,$$

де  $R_{BH}$  – внутрішній радіус оправы, м;  $f$  – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова;  $n$  – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює:  $n=9$  – для залізобетонних блоків і тубінгів з бетону класу В40.

У перелік робіт входять:

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

$$V_p = \frac{\pi D_{3H}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,4^2}{4} = 22,9 m^3,$$

де  $D_{3H}$  – зовнішній діаметр оправы.

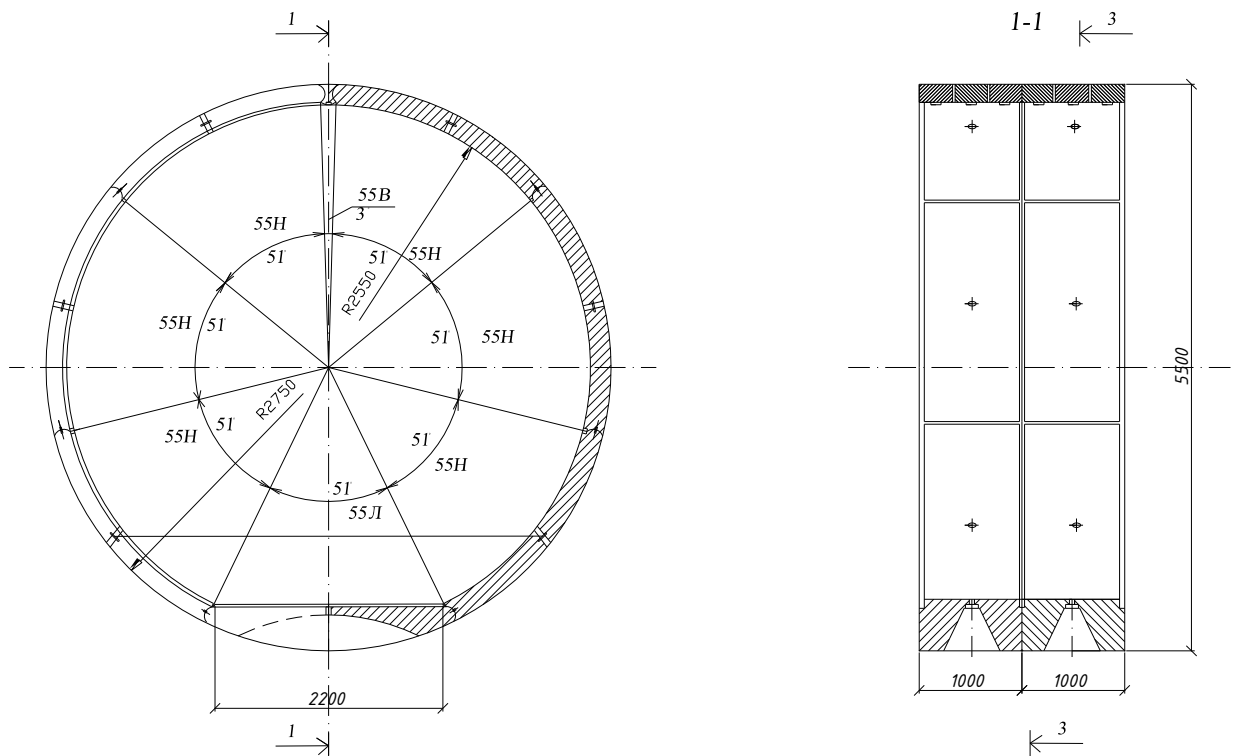


Рисунок 1.4 – Варіант №3. Збірна оправа із блоків В40 із плоским лотком

Навантаження породи ( $m^3$ ):

$$V_n = k_p V_p = 22,9 \cdot 2 = 45,8 m^3,$$

де  $k_p$  – коефіцієнт розрихлення.

Монтаж залізобетонної оправи ( $m^3$ ):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{3H}^2 - D_{BH}^2) = 1 \frac{3,14}{4} (5,4^2 - 5,1^2) = 2,47 m^3,$$

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

Масу кільця залізобетонної оправи для визначення маси одного елемента і

подальшого використання в статичному розрахунку можна визначити за формулою:

$$G_k = \gamma V_k l = 2,5 \cdot 2,47 \cdot 1 = 6,2 \text{ м},$$

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

Нагнітання за оправу ( $\text{м}^2$ ):

$$S_k = L_k \cdot 1 = \pi D_{\text{зн}} = 3,14 \cdot 5,4 \cdot 1 = 16,9 \text{ м}^2,$$

де  $L_k$  – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

Чеканка швів (на один метр тунелю):

$$L_{\text{ч.ш.}} = L_{\text{вн}} + n \cdot 1 = \pi D_{\text{вн}} + n = 3,14 \cdot 5,1 + 9 = 25,01 \text{ м},$$

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

#### **Варіант №4. Монолітно-пресована оправа**

Для визначення товщини монолітно-пресованої оправы (рис. 1.5) слід скористатися емпіричною формулою [11]:

$$h = n^3 \sqrt{\frac{R_{\text{вн}}^2}{f}} = 14^3 \sqrt{\frac{2,55^2}{6}} = 15,1 \text{ см},$$

де  $R_{\text{вн}}$  – внутрішній радіус оправы, м;  $f$  – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова;  $n$  – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює:  $n = 14$  – для монолітно-пресованого бетону класу В30.

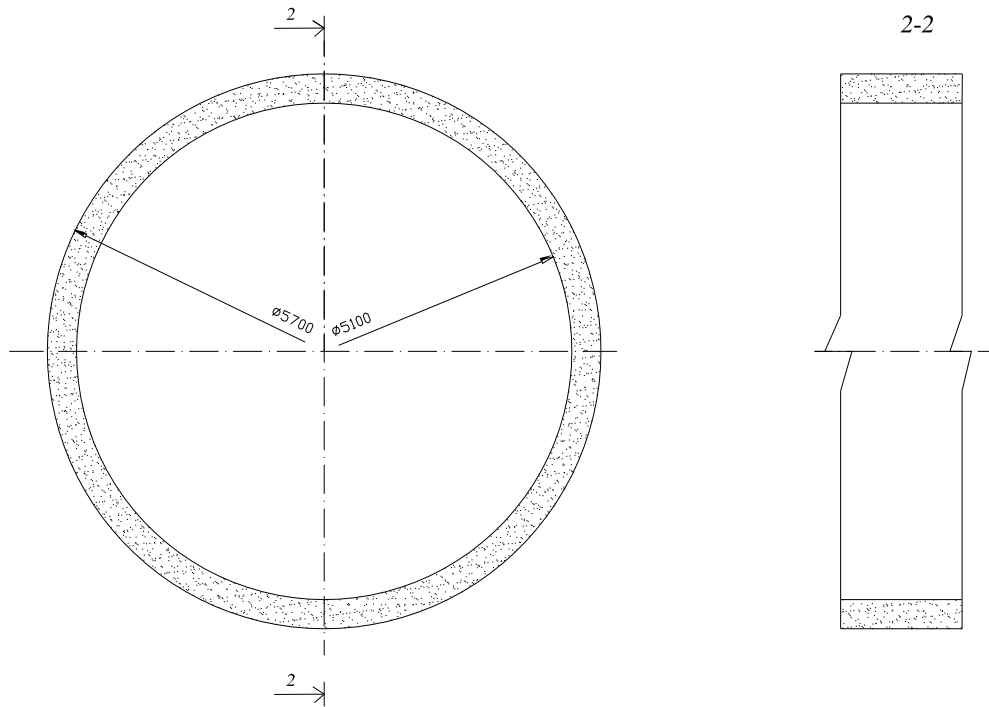


Рисунок 1.5 – Варіант №4. Монолітно-пресована оправа

У перелік робіт входять:

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

$$V_p = \frac{\pi D_{\text{зн}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,5^2}{4} = 23,7 m^3,$$

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

Навантаження породи ( $m^3$ ):

$$V_n = k_p V_p = 23,7 \cdot 2 = 47,5 m^3,$$

де  $k_p$  – коефіцієнт розрихлення.

Монтаж залізобетонної оправи ( $m^3$ ):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{\text{зн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 1 \frac{3,14}{4} (5,5^2 - 5,1^2) = 3,43 m^3,$$

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

Масу кільця бетонної оправи для визначення маси одного елемента і подальшого використання в статичному розрахунку визначено за формулою:

$$G_k = \gamma V_k l = 2,4 \cdot 3,43 \cdot 1 = 8,23 \text{ т} ,$$

де  $\gamma$  – питома вага бетону ( $\gamma = 2,4 \text{ т/м}^3$ );  $l$  – ширина кільця.

### 1.3 Техніко-економічне порівняння варіантів

Розрахунки трудовитрат по чотирьом варіантам занесені у таблиці 1.1-1.4. Шифри та значення трудовитрат наведені в [4].

Таблиця 1.1 – Розрахунок трудовитрат варіанта №1

| №№ | Найменування робіт                             | Шифр      | Од. виміру         | Об'єм робіт | Трудовитрати, люд.-год |          |
|----|--|-----------|--------------------|-------------|------------------------|----------|
|    |  |           |                    |             | На одиницю             | На об'єм |
| 1  | Розробка породи                                | 29-626-5  | 100 м <sup>3</sup> | 22,9        | 372,88                 | 85,4     |
| 2  | Навантаження породи                            | 29-94-2   | 100 м <sup>3</sup> | 45,8        | 104,44                 | 47,8     |
| 3  | Монтаж оправи                                  | 29-126-13 | 100 м <sup>3</sup> | 2,47        | 1570,8                 | 38,8     |
| 4  | Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу | 29-136-4  | 100 м <sup>2</sup> | 16,9        | 200,66                 | 33,9     |
| 5  | Чеканення швів                                 | 29-145-11 | 100 м              | 25,01       | 100,33                 | 25,1     |
|    |  |           |                    |             | Всього:                | 231,0    |

Таблиця 1.2 – Розрахунок трудовитрат варіанта №2

| №№ | Найменування робіт                             | Шифр      | Од. виміру         | Об'єм робіт | Трудовитрати, люд.-год |          |
|----|--|-----------|--------------------|-------------|------------------------|----------|
|    |  |           |                    |             | На одиницю             | На об'єм |
| 1  | Розробка породи                                | 29-62-6   | 100 м <sup>3</sup> | 22,9        | 372,88                 | 85,4     |
| 2  | Навантаження породи                            | 29-94-2   | 100 м <sup>3</sup> | 45,8        | 104,44                 | 47,8     |
| 3  | Монтаж оправи                                  | 29-98-8   | 100 м <sup>3</sup> | 1,73        | 1570,8                 | 27,2     |
| 4  | Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу | 29-136-8  | 100 м <sup>2</sup> | 16,9        | 200,66                 | 33,9     |
| 5  | Чеканення швів                                 | 29-145-11 | 100 м              | 27,01       | 100,3                  | 27,1     |
|    |  |           |                    |             | Всього:                | 221,4    |

Таблиця 1.3 – Розрахунок трудовитрат варіанта №3

| №№ | Найменування робіт                             | Шифр     | Од. виміру         | Об'єм робіт | Трудовитрати, люд.-год |          |
|----|--|----------|--------------------|-------------|------------------------|----------|
|    |  |          |                    |             | На одиницю             | На об'єм |
| 1  | Розробка породи                                | 29-62-6  | 100 м <sup>3</sup> | 22,9        | 372,88                 | 85,4     |
| 2  | Навантаження породи                            | 29-94-2  | 100 м <sup>3</sup> | 45,8        | 104,44                 | 47,8     |
| 3  | Монтаж оправи                                  | 29-98-8  | 100 м <sup>3</sup> | 2,47        | 1570,8                 | 38,8     |
| 4  | Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу | 29-107-8 | 100 м <sup>2</sup> | 16,9        | 200,66                 | 33,9     |
| 5  | Чеканення швів                                 | 29-145-9 | 100 м              | 25,01       | 100,33                 | 25,1     |
|    |  |          |                    |             | Всього:                | 231,0    |

Таблиця 1.4 – Розрахунок трудовитрат варіанта №4

| №№ | Найменування робіт  | Шифр    | Од. виміру         | Об'єм робіт | Трудовитрати, люд.-год |          |
|----|---------------------|---------|--------------------|-------------|------------------------|----------|
|    |                     |         |                    |             | На одиницю             | На об'єм |
| 1  | Розробка породи     | 29-62-5 | 100 м <sup>3</sup> | 23,7        | 372,88                 | 88,4     |
| 2  | Навантаження породи | 29-94-2 | 100 м <sup>3</sup> | 47,5        | 104,44                 | 49,6     |
| 3  | Монтаж оправи       | 29-988  | 100 м <sup>3</sup> | 3,43        | 1126,54                | 38,6     |
|    |                     |         |                    |             | Всього                 | 176,6    |

Після розрахунку трудовитрат за чотирма варіантами, проводиться порівняння їх загальних трудовитрат і обирається найбільш економічний варіант, тобто Варіант №4. Монолітно-пресована оправа. Якщо різниця у вартості двох варіантів не перевищує 10 % (межу точності економічних розрахунків), то їх можна вважати рівноцінними і рішення приймається на основі технічних міркувань залежно від типу й призначення тунелю. Для прийнятого варіанта оправи № 4 (монолітно-пресована оправа) виконують обґрунтування параметрів.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АЛЬТЕРНАТИВНОГО КРІПЛЕННЯ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ФАКТОРІВ

### 2.1 Визначення навантажень

Статичний розрахунок оправи слід проводити для можливих несприятливих сполучень основних та додаткових навантажень [3, 5].

Основними навантаженнями є постійні навантаження, які діють в експлуатаційній стадії [5]:

- а) власна вага оправи;
- б) вертикальний тиск порід;
- в) горизонтальний тиск порід – активний або пасивний (у вигляді пружного відпору);
- г) гідростатичний тиск підземних вод;
- д) рухоме навантаження від транспорту у автошляхових тунелях (при побудові проїзної частини по перекриттю).

Додатковими є тимчасові навантаження, які діють головним чином у будівельній стадії:

- а) поздовжній тиск щитових гідроциліндрів;
- б) вага механізмів для збирання оправи (блокоукладальників);
- в) тиск розчину, що нагнітається за оправу.

Відповідно до цього статичний розрахунок збірної оправи проводиться для двох стадій її роботи: експлуатаційної і в будівельної. Для виконання курсового проєкту достатньо виконати розрахунок оправи в експлуатаційній стадії і виконати перевірку її елементів на міцність (за першим граничним станом).

При визначенні нормативних навантажень від тиску порід і гідростатичного тиску підземних вод потрібно керуватися такими міркуваннями.

У глинястих породах тугопластичної, напівтвердої і твердої консистенції, а також у сухих піщаних і скельних породах величину вертикального гірського тиску можна визначати за формулою проф. М. М. Протод'яконова [5, 11]:

$$q_B^H = \gamma h_1 = 24 \cdot 0,6 = 14,4 \text{ кН/м}^2,$$

$$h_1 = \frac{L}{2f} = \frac{6,9}{2 \cdot 6} = 0,6 \text{ м},$$

$$L = D_{3H} + 2D_{3H} \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right) = 5,5 + 2 \cdot 5,5 \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{75^\circ}{2} \right) = 6,9 \text{ м},$$

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

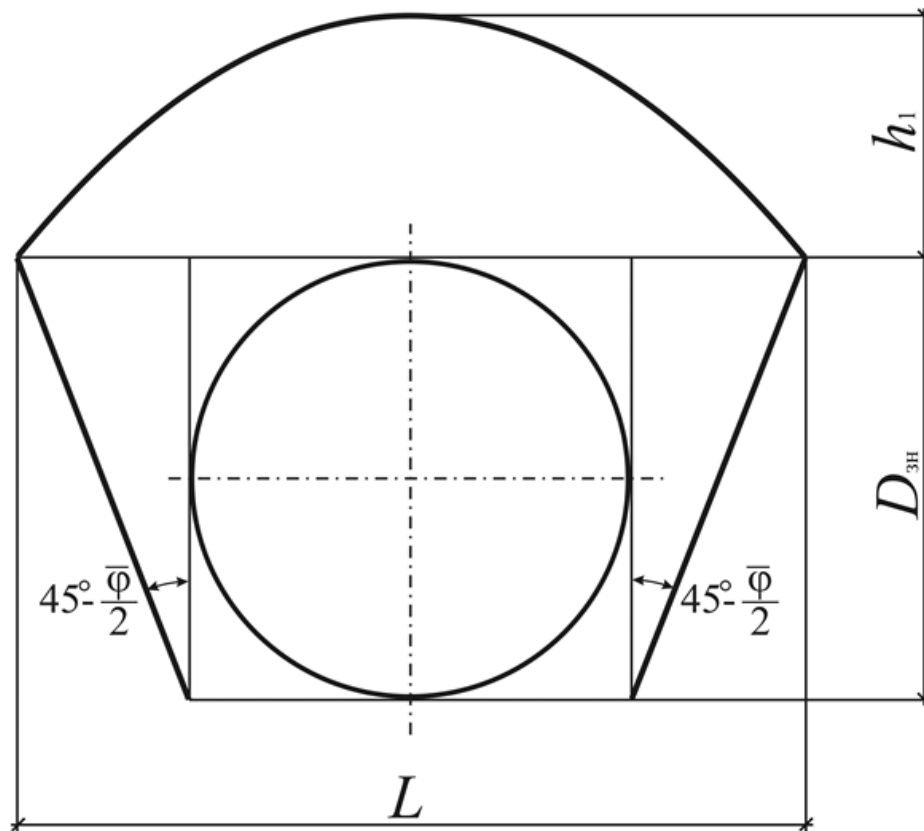


Рисунок 2.1 – Схема для визначення параметрів склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яконовим

Відповідно до вимог ДБН у розрахунку оправи за несучою здатністю величину розрахункових навантажень визначають шляхом множення

нормативних навантажень на коефіцієнт перевантаження  $n$  :

$$q_B^p = nq_B^H = 1,5 \cdot 14,4 = 21,6 \text{ кН} / \text{м}^2.$$

Горизонтальний тиск у міцних породах потрібно розглядати як пасивний – у вигляді пружного відпору.

Нормативна власна вага оправи визначається як

$$p^H = \frac{G_k}{2\pi r} = \frac{8,23}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,65} = 0,99 \text{ т} / \text{м}^2,$$

де  $G_k$  – маса кільця оправи (приймається за проектним об'ємом, який визначено при проєктуванні варіантів);  $r = \frac{R_{вн} + R_{зн}}{2} = \frac{2,55 + 2,75}{2} = 2,65$  м – середній радіус оправи.

Розрахункове значення власної ваги оправи визначається множенням на коефіцієнт перевантаження  $p^p = np^H = 1,1 \cdot 0,99 = 1,1 \text{ т} / \text{м}^2$ .

## 2.2 Розрахунок оправи за методом О. Ю. Бугаєвої

Оправу тунелів, які споруджують у стійких та міцних породах, слід визначати з урахуванням пружного відпору порід. У цьому випадку може бути рекомендований метод О. Ю. Бугаєвої як найбільш простий, але за точністю результатів він не поступається іншим методам розрахунку [10, 11].

Суть метода О. Ю. Бугаєвої полягає в тому, що еюра пружного відпору передбачається відомою. Передбачувана еюра описується такими тригонометричними кривими, які виходять із нульових точок (рис. 2.2):

$$k\delta = -k\delta_A \cos 2\psi \text{ при } \frac{\pi}{4} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2};$$

$$k\delta = k\delta_A \sin^2 \psi + k\delta_B \cos^2 \psi \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \pi,$$

де  $k$  – коефіцієнт пружного відпору породи;  $\delta$  – радіальне переміщення оправи в перерізі, нахиленому під кутом до вертикалі;  $\delta_A$ ,  $\delta_B$  – невідомі переміщення перерізів  $A$  і  $B$  оправи відповідно (визначаються у процесі розрахунку).

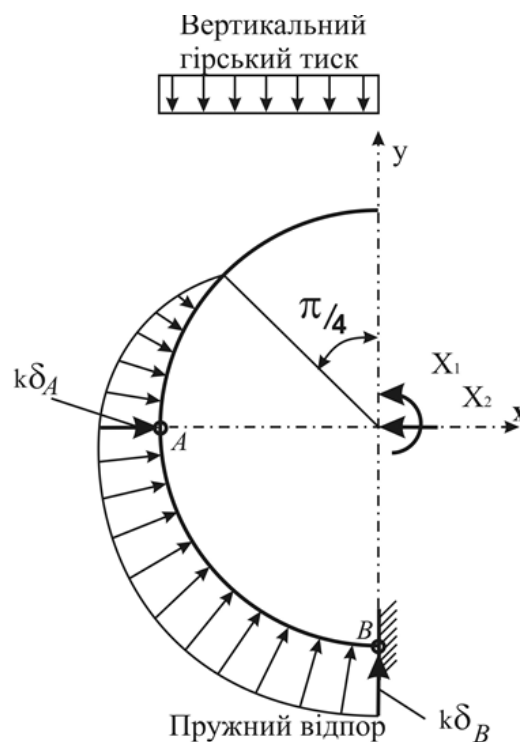


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема для методу О. Ю. Бугасвої

Канонічними рівняннями деформації такої системи є такі:

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

$$\delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0.$$

Для оправи постійної жорсткості зусилля в перерізах (згинальний момент  $M$  і нормальна сила  $N$ ) на одиницю ширини оправи можуть бути визначені за

такими формулами.

Зусилля в перерізах від гірського тиску:

$$M_q = q_B^p R_{3H} r [Am + B + Cn(1 + m)]$$

$$N_q = q_B^p R_{3H} r [Dm + F + Gn(1 + m)],$$

де  $r$  – осьовий радіус оправ;  $A, B, C, D, F, G, m, n$  – коефіцієнти (табл. 2.1).

$$m = 2 - \frac{R_{3H}}{r} = 2 - \frac{2,85}{2,7} = 0,94;$$

$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{EI}{r^3 R_{3H} kb}} = \frac{1}{0,06416 + \frac{0,073}{2,7^3 \cdot 2,85 \cdot 800000}} = 15,6,$$

де  $EI$  – жорсткість оправ.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів  $A, B, C, D, F, G$

| Кут нахилу перерізу | $A$     | $B$     | $C$      | $D$     | $F$     | $G$     |
|---------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 0                   | 0,1628  | 0,0872  | -0,00700 | 0,2122  | -0,2122 | 0,0210  |
| 45                  | -0,0250 | 0,0250  | -0,00084 | 0,1500  | 0,3500  | 0,01485 |
| 90                  | -0,1250 | -0,1250 | 0,00825  | 0       | 1,0000  | 0,00575 |
| 135                 | 0,0250  | -0,0250 | 0,00022  | -0,1500 | 0,9000  | 0,01380 |
| 180                 | 0,0872  | 0,1628  | -0,00837 | -0,2122 | 0,7122  | 0,02240 |

Зусилля в перерізах від власної ваги оправ:

$$M_p = p^p r^2 (A_1 + B_1 n),$$

$$N_p = p^p r (C_1 + D_1 n),$$

де  $p^p$  – власна вага оправи;  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  і  $D_1$  – коефіцієнти (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнтів  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  і  $D_1$

| Кут нахилу перерізу | $A_1$   | $B_1$    | $C_1$   | $D_1$   |
|---------------------|---------|----------|---------|---------|
| 0                   | 0,3447  | -0,02198 | -0,1667 | 0,06592 |
| 45                  | 0,0334  | -0,00267 | 0,3375  | 0,04661 |
| 90                  | -0,3928 | 0,02589  | 1,5708  | 0,01804 |
| 135                 | -0,0335 | 0,00067  | 1,9186  | 0,04220 |
| 180                 | 0,4405  | -0,02620 | 1,7375  | 0,07010 |

Зусилля в перерізах від тиску ґрунтових вод

$$M_B = -\gamma_B R_{3H}^2 r (A_2 + B_2 n),$$

$$N_B = \gamma_B R_{3H}^2 (C_2 + D_2 n) + \gamma_6 q_6 R_{3H},$$

де  $\gamma_B$  – питома вага води;  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  і  $D_2$  – коефіцієнти (табл. 2.3).

Формулами можна користуватись, якщо задовольняються такі умови:

$$\left[ 0,04167(1+m)q_B^p + 0,01308 \frac{r}{R_{3H}} p^p \right] > 0,06541 \gamma_B R_{3H},$$

$$\left\{ 1,5q_B^p + 4,7124 \frac{r}{R_{3H}} p^p - \left[ 0,0122(1+m)q_B^p + 0,03833 \frac{r}{R_{3H}} p^p \right] n \right\} > \gamma_B R_{3H} \left( \frac{3\pi}{4} - 0,01915n \right).$$

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  і  $D_2$ 

| Кут нахилу перерізу | $A_2$    | $B_2$    | $C_2$   | $D_2$   |
|---------------------|----------|----------|---------|---------|
| 0                   | 0,17240  | -0,01097 | 0,58385 | 0,03294 |
| 45                  | 0,01673  | -0,00132 | 0,42771 | 0,02329 |
| 90                  | -0,19638 | 0,01294  | 0,21460 | 0,00903 |
| 135                 | -0,01679 | 0,00036  | 0,39413 | 0,02161 |
| 180                 | 0,22027  | -0,01312 | 0,63125 | 0,03509 |

Повні зусилля знаходяться як сума зусиль, визначених за наведеними вище формулами:

$$M = M_q + M_p + M_B,$$

$$N = N_q + N_p + N_B.$$

Розрахунок за методом О. Ю. Бугаєвої проведено за допомогою файлу Excel for Windows – MOUB.xls [11], який розміщений у каталозі розрахункових програм TONNEL при зміні товщини монолітно-пресованої оправи на 5 см (15 см, 20 см, 25 см).

| Розрахунок оправи методом О.Ю. Бугаєвої                              |                  |                  |                      |          |
|--|------------------|------------------|----------------------|----------|
| Тип тунелю   |                  | Даніїл Тен       |                      |          |
| Введіть глибину закладення, м  | $H$              | 50               |                      |          |
| Введіть висоту води, м   | $H_e$            | 5                |                      |          |
| Введіть питому вагу ґрунту, кН/м <sup>3</sup>                        | $\gamma$         | 24               |                      |          |
| Введіть внутрішній радіус оправи, м                                  | $R_{вн}$         | 2,55             |                      |          |
| Введіть зовнішній радіус оправи, м                                   | $R_{зн}$         | 2,7              |                      |          |
| Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м <sup>2</sup> | $q_{\epsilon}^p$ | 21,6             |                      |          |
| Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м <sup>2</sup> | $p^p$            | 11,1             |                      |          |
| Значення середнього радіусу оправи, м                                | $r$              | 2,625            |                      |          |
| Введіть значення коефіцієнту   | $m$              | 0,94             | Розрахункова схема   |          |
| Введіть значення коефіцієнту   | $n$              | 15,6             | методу О.Ю. Бугаєвої |          |
| Введіть значення коефіцієнту пружного відпору, кН/м <sup>3</sup>     | $k$              | 800000           |                      |          |
| <b>Розрахунок згинальних моментів, кН·м</b>                          |                  |                  |                      |          |
| <b>Момент, M</b>   |                  |                  |                      |          |
|  | $p^p$            | $q_{\epsilon}^p$ | $q_e$                | Сумарний |
|  | Від              | Від              | Від                  |          |
| Кут нахилу   |                  |                  |                      |          |
| 0  | 0,1386           | 4,3453           | -0,2426              | 4,2      |
| 45   | -0,6312          | -3,6622          | 0,7390               | -3,6     |
| 90   | 0,8478           | 1,0989           | -1,0494              | 0,9      |
| 135  | -1,7628          | 0,7897           | 2,1383               | 1,2      |
| 180  | 2,4307           | -1,3076          | -2,9849              | -1,9     |
| <b>Розрахунок нормальних сил, кН</b>                                 |                  |                  |                      |          |
| <b>Нормальна сила N</b>  |                  |                  |                      |          |
|  | $p^p$            | $q_{\epsilon}^p$ | $q_e$                | Сумарна  |
|  | Від              | Від              | Від                  |          |
| Кут нахилу   |                  |                  |                      |          |
| 0  | 25,1064          | 36,3224          | 126,6                | 188,0    |
| 45   | 31,0202          | 54,8453          | 126,2                | 212,1    |
| 90   | 53,9692          | 68,4687          | 126,9                | 249,3    |
| 135  | 75,0850          | 68,6218          | 125,7                | 269,4    |
| 180  | 82,4900          | 69,4385          | 127,6                | 279,5    |

| Розрахунок оправи методом О.Ю. Бугаєвої                              |          |            |   |          |
|--|----------|------------|---|----------|
| Тип тунелю   |          | Даніїл Тен |   |          |
| Введіть глибину закладення, м  | $H$      | 50         |   |          |
| Введіть висоту води, м   | $H_e$    | 5          |   |          |
| Введіть питому вагу ґрунту, кН/м <sup>3</sup>                        | $\gamma$ | 24         |   |          |
| Введіть внутрішній радіус оправи, м                                  | $R_{ен}$ | 2,55       |   |          |
| Введіть зовнішній радіус оправи, м                                   | $R_{зн}$ | 2,75       |   |          |
| Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м <sup>2</sup> | $q_e^p$  | 21,6       |   |          |
| Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м <sup>2</sup> | $p^p$    | 11,1       |   |          |
| Значення середнього радіусу оправи, м                                | $r$      | 2,65       | Розрахункова схема методу О.Ю. Бугаєвої |          |
| Введіть значення коефіцієнту   | $m$      | 0,94       |   |          |
| Введіть значення коефіцієнту   | $n$      | 15,6       |   |          |
| Введіть значення коефіцієнту пружного відпору, кН/м <sup>3</sup>     | $k$      | 800000     |   |          |
| <b>Розрахунок згинальних моментів, кН·м</b>                          |          |            |   |          |
| <b>Момент, M</b>   |          |            |   |          |
|  | $p^p$    | $q_e^p$    | $q_e$                                   | Сумарний |
| Кут нахилу   | Від      | Від        | Від                                     |          |
| 0  | 0,1412   | 4,4679     | -0,2541                                 | 4,4      |
| 45   | -0,6432  | -3,7655    | 0,7740                                  | -3,6     |
| 90   | 0,8640   | 1,1299     | -1,0990                                 | 0,9      |
| 135  | -1,7966  | 0,8119     | 2,2393                                  | 1,3      |
| 180  | 2,4772   | -1,3445    | -3,1259                                 | -2,0     |
| <b>Розрахунок нормальних сил, кН</b>                                 |          |            |   |          |
| <b>Нормальна сила N</b>  |          |            |   |          |
|  | $p^p$    | $q_e^p$    | $q_e$                                   | Сумарна  |
| Кут нахилу   | Від      | Від        | Від                                     |          |
| 0  | 25,3455  | 36,9950    | 129,0                                   | 191,4    |
| 45   | 31,3157  | 55,8610    | 128,6                                   | 215,8    |
| 90   | 54,4832  | 69,7367    | 129,3                                   | 253,5    |
| 135  | 75,8001  | 69,8926    | 128,1                                   | 273,8    |
| 180  | 83,2756  | 70,7243    | 130,1                                   | 284,1    |

| Розрахунок оправи методом О.Ю. Бугаєвої                              |          |            |   |          |
|--|----------|------------|---|----------|
| Тип тунелю   |          | Даніїл Тен |   |          |
| Введіть глибину закладення, м  | $H$      | 50         |   |          |
| Введіть висоту води, м   | $H_e$    | 5          |   |          |
| Введіть питому вагу ґрунту, кН/м <sup>3</sup>                        | $\gamma$ | 24         |   |          |
| Введіть внутрішній радіус оправи, м                                  | $R_{вн}$ | 2,55       |   |          |
| Введіть зовнішній радіус оправи, м                                   | $R_{зн}$ | 2,8        |   |          |
| Введіть розрахункове значення вертикального тиску, кН/м <sup>2</sup> | $q_e^p$  | 21,6       |   |          |
| Введіть розрахункове значення власної ваги оправи, кН/м <sup>2</sup> | $p^p$    | 11,1       |   |          |
| Значення середнього радіусу оправи, м                                | $r$      | 2,675      | Розрахункова схема методу О.Ю. Бугаєвої |          |
| Введіть значення коефіцієнту   | $m$      | 0,94       |   |          |
| Введіть значення коефіцієнту   | $n$      | 15,58      |   |          |
| Введіть значення коефіцієнту пружного відпору, кН/м <sup>3</sup>     | $k$      | 800000     |   |          |
| <b>Розрахунок згинальних моментів, кН·м</b>                          |          |            |   |          |
| <b>Момент, M</b>   |          |            |   |          |
|  | $p^p$    | $q_e^p$    | $q_e$                                   | Сумарний |
| Кут нахилу   | Від      | Від        | Від                                     |          |
| 0  | 0,1788   | 4,6360     | -0,3119                                 | 4,5      |
| 45   | -0,6512  | -3,8649    | 0,8044                                  | -3,7     |
| 90   | 0,8392   | 1,1095     | -1,0958                                 | 0,9      |
| 135  | -1,8317  | 0,8331     | 2,3449                                  | 1,3      |
| 180  | 2,5658   | -1,3294    | -3,3262                                 | -2,1     |
| <b>Розрахунок нормальних сил, кН</b>                                 |          |            |   |          |
| <b>Нормальна сила N</b>  |          |            |   |          |
|  | $p^p$    | $q_e^p$    | $q_e$                                   | Сумарна  |
| Кут нахилу   | Від      | Від        | Від                                     |          |
| 0  | 25,5455  | 37,6184    | 131,5                                   | 194,7    |
| 45   | 31,5834  | 56,8418    | 131,1                                   | 219,5    |
| 90   | 54,9864  | 70,9911    | 131,8                                   | 257,8    |
| 135  | 76,4901  | 71,1310    | 130,5                                   | 278,1    |
| 180  | 84,0196  | 71,9577    | 132,6                                   | 288,6    |



Рисунок 2.3 – Діаграма зміни згинальних моментів від товщини оправи

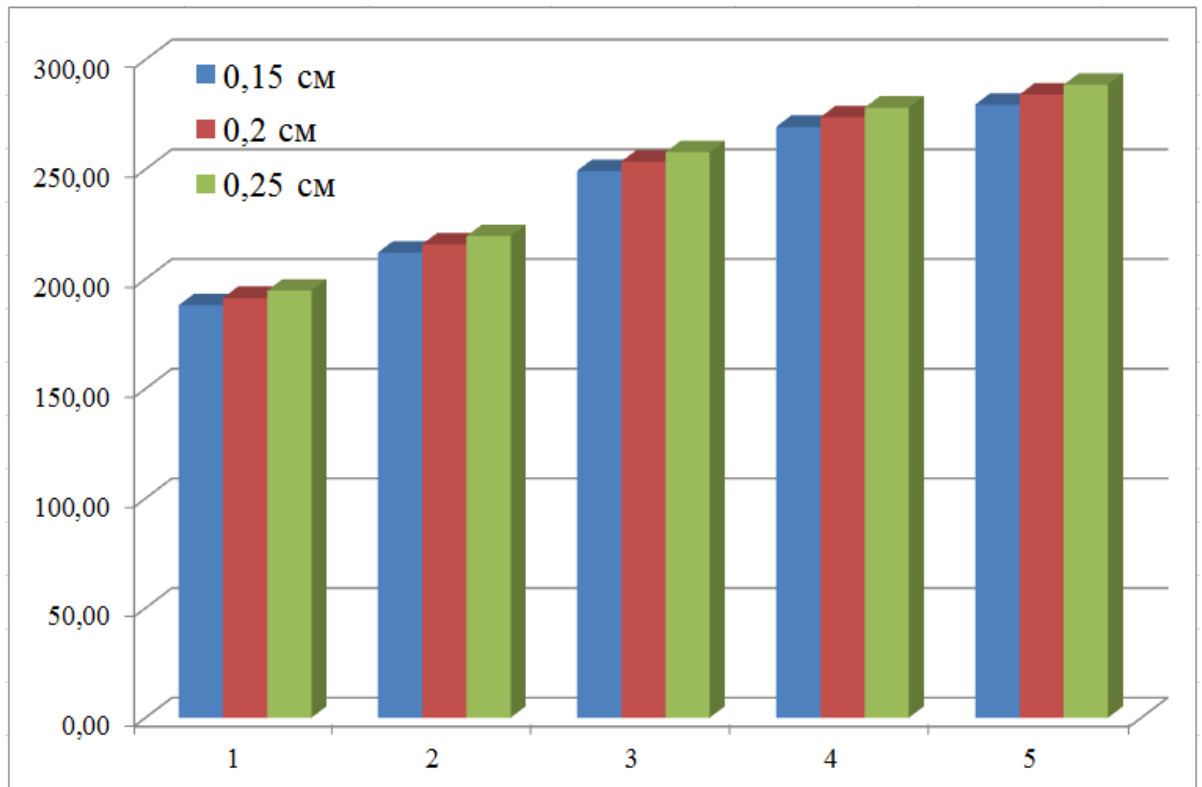


Рисунок 2.4 – Діаграма зміни нормальних сил від товщини оправи

Зміна згинальних моментів і нормальних сил в залежності від зміни товщини оправи є монотонною і не стрибкоподібною, що дає підґрунтя для гіпотези, що запроєктовану в Розділі 1 оправу товщиною 0,2 м можна зменшити без втрати міцності. Для перевірки цієї гіпотези проведемо визначення міцності оправи різної товщини на основі отриманих значень силових факторів – згинальних моментів і нормальних сил.

### 2.3 Обґрунтування параметрів альтернативного кріплення на основі визначення її міцності

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перерізах оправи із максимальним згинальним моментом проводять перевірку на міцність [9, 11]. Для цього проводять будову епюр моментів та нормальних сил із визначенням двох перерізів із максимальними згинальними моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином.

При розрахунках кругових оправ найчастіше зустрічається перший випадок позацентрового стиснення, що відповідає великим ексцентриситетам.

Розрахунок для оправи з монолітно-пресованого бетону товщиною 0,15 м проводять за формулою для позацентрового стиску з малим ексцентриситетом (перевірка виконана:  $e_0 < 0,225h = 0,021 < 0,034$ ):

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{4,2}{188} = 0,021\text{ м};$$

$$N \leq mR_b \frac{bh^2}{h + 2e_0};$$

$$188 \leq 0,9 \cdot 17000 \frac{1 \cdot 0,15^2}{0,15 + 2 \cdot 0,021},$$

$$188 > 1792,9$$

де  $m = 0,9$  – коефіцієнт умов роботи;  $R_b$  – розрахунковий опір бетону класу

C25/30 під час стиску;  $N$  – поздовжня сила в перерізі;  $e_0$  – відстань від сили  $N$  до центру тяжіння поперечного перерізу;  $b$  і  $h$  – ширина і товщина оправи.

Умова виконана, запас міцності  $n = \frac{1792,9}{188} = 9,54$  разів.

Розрахунок для оправи з монолітно-пресованого бетону товщиною 0,2 м проводять за формулою для позацентрового стиску з малим ексцентриситетом (перевірка виконана:  $e_0 < 0,225h = 0,022 < 0,045$ ):

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{4,4}{191,4} = 0,022 \text{ м};$$

$$N \leq mR_b \frac{bh^2}{h + 2e_0};$$

$$191,4 \leq 0,9 \cdot 17000 \frac{1 \cdot 0,2^2}{0,2 + 2 \cdot 0,022},$$

$$191,4 < 2508,2$$

де  $m = 0,9$  – коефіцієнт умов роботи;  $R_b$  – розрахунковий опір бетону класу C25/30 під час стиску;  $N$  – поздовжня сила в перерізі;  $e_0$  – відстань від сили  $N$  до центру тяжіння поперечного перерізу;  $b$  і  $h$  – ширина і товщина оправи.

Умова виконана, запас міцності  $n = \frac{2508,2}{191,4} = 13,1$  разів.

Розрахунок для оправи з монолітно-пресованого бетону товщиною 0,25 м проводять за формулою для позацентрового стиску з малим ексцентриситетом (перевірка виконана:  $e_0 < 0,225h = 0,023 < 0,056$ ):

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{4,5}{194,7} = 0,023 \text{ м}$$

$$N \leq mR_b \frac{bh^2}{h + 2e_0};$$

$$194,7 \leq 0,9 \cdot 17000 \frac{1 \cdot 0,3^2}{0,3 + 2 \cdot 0,023},$$

$$194,7 < 3979,8$$

де  $m = 0,9$  – коефіцієнт умов роботи;  $R_b$  – розрахунковий опір бетону класу С25/30 під час стиску;  $N$  – поздовжня сила в перерізі;  $e_0$  – відстань від сили  $N$  до центру тяжіння поперечного перерізу;  $b$  і  $h$  – ширина і товщина оправи.

Умова виконана, запас міцності  $n = \frac{3979,8}{194,7} = 20,4$  разів.

Таким чином, доведено, що міцність для товщини монолітно-пресованої оправи 0,15; 0,2; 0,25 м є достатньою, а запас міцності знаходиться в межах 9,54...20,4 разів. Гіпотеза, уведена вище, про зменшення товщини оправи підтверджується, тобто запроєктовану оправу товщиною 0,2 м можна зменшити до 0,15 м, а запас міцності буде значним і складати 9,54 разів.

## 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЩИТОВОЇ ПРОХОДКИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ З МОНОЛІТНО-ПРЕСОВАНОЮ ОПРАВОЮ

### 3.1 Визначення параметрів прохідницького щита

Для порід міцністю  $f=2\dots 8$  слід обрати щит із фрезерним робочим органом (рис. 3.1) або ТВМ-щит (рис. 3.2), який прийнятий в випускній кваліфікаційній роботі [9, 11].

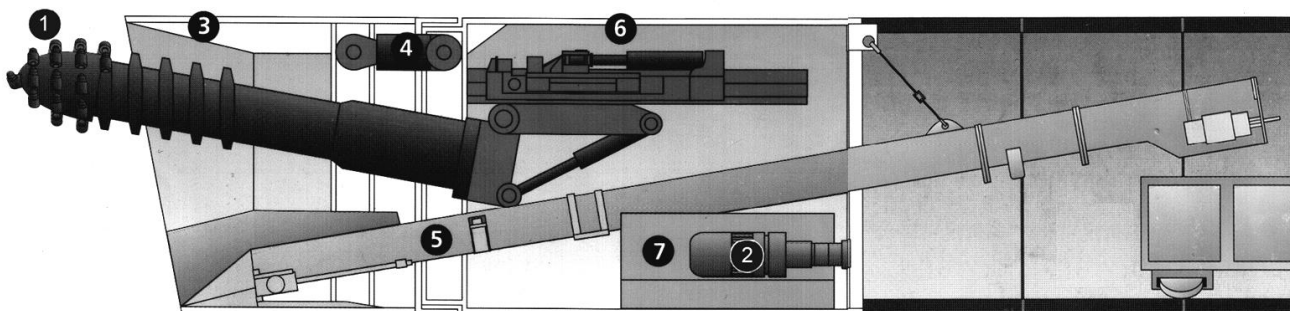


Рисунок 3.1 – Щит із фрезерним робочим органом:

- 1 – фрезерний робочий орган; 2 – щитовий гідроциліндр;  
3 – ножове кільце; 4 – гідроциліндр управління;  
5 – транспортер; 6 – оболонка щита; 7 – гідроагрегат

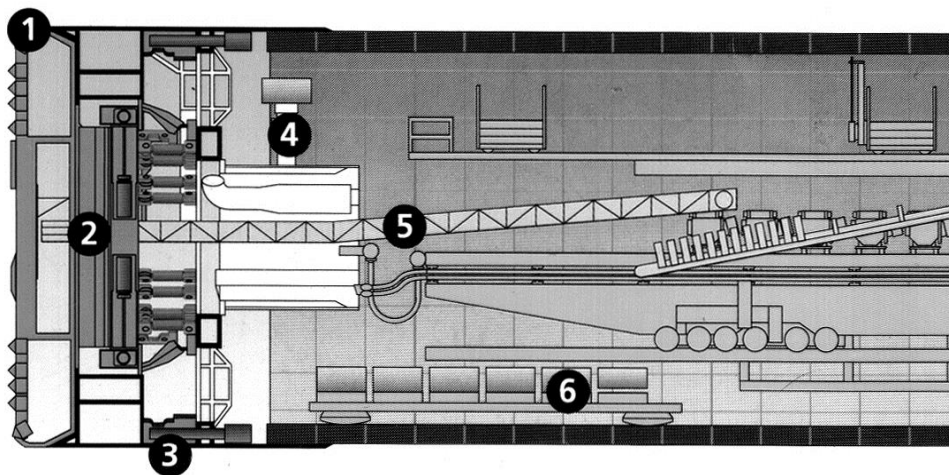


Рисунок 3.2 – ТВМ-щит:

- 1 – робочий орган із шарошками; 2 – привод;  
3 – щитовий гідроциліндр; 4 – кріплення вкладальник;  
5 – транспортер I; 6 – тубінговий транспортер;  
7 – силовий агрегат; 8 – транспортер II

Повна довжина щита  $L_{щ}$  складає [11]:

$$L_{щ} = L_{нч} + L_{ок} + L_{хо} = 1 + 2 + 2,95 = 5,95 м,$$

де  $L_{нч}$  – довжина ножової частини;  $L_{ок}$  – довжина опорного кільця;  $L_{хо}$  – довжина хвостової оболонки щита.

Довжина ножової частини  $L_{нч}$  приймається рівною 1,0...1,2 м.

Довжину опорного кільця  $L_{ок}$  знаходять із умови:

$$L_{ок} = 2b = 2 \cdot 1 = 2 м,$$

де  $b$  – ширина кільця оправи.

Довжина хвостової оболонки щита  $L_{хо}$  складає:

$$L_{хо} = l_1 + l_2 + l_3 = 2,2 \cdot b + 0,6 + 0,15 = 2,95 м,$$

де  $l_1 = (1,2...2,2)b$  – довжина перекриття кілець 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.

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 і забезпечити можливість кута повороту щита відносно оправи на криволінійних ділянках траси (0,8 % від  $D_{зн}$ ).

Зовнішній діаметр щита  $D_{щ}$  складає:

$$D_{щ} = 1,008D_{зн} + 2\delta = 1,008 \cdot 5,7 + 2 \cdot 0,03 = 5,8 м,$$

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

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.

Приблизна вага щита  $G_{щ}$  :

$$G_{щ} = 85D_{щ}^2 - 250 = 85 \cdot 5,8^2 - 250 = 2609 \text{ кН.}$$

Величина необхідного повного зусилля щитових гідроциліндрів  $F$  :

$$F \geq (1,1 \dots 1,3)R = 1,1 \cdot 5851,4 = 6436,54,$$

де  $R$  – загальна сила граничного опору.

Загальну силу граничного опору  $R$  знаходять за формулою:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 0 + 1677 + 1564,4 + 2609 = 5851,4,$$

де  $R_1$  – опір щиту породи по лобовій поверхні;  $R_2$  – опір щиту породи по зовнішній поверхні;  $R_3$  – опір щиту частини кріплення, яке розміщене під хвостовою оболонкою;  $R_4$  – опір щиту частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом.

Опір щиту породи по лобовій поверхні  $R_1$  дорівнює нулю у породах із міцністю  $f \geq 1,0$ ; у породах із міцністю  $f < 1,0$ :

$$R_1 = Sq_{\Gamma}^p,$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу щита за зовнішній діаметром.

Опір щиту породи по зовнішній поверхні  $R_2$  знаходять за формулою:

$$R_2 = f_{T1} \left[ (q_B^p + P + q_r^3 + q_r^p) L_{щ} D_{щ} + G_{щ} \right] + 1000 \pi C L_{щ} D_{щ} + 0,05 f_{T1} k_D \Delta L_{щ} D_{щ} = 0,4 [(21,6 + 0 + 0 + 0) 5,95 \cdot 5,8 + 2609] = 1341'$$

де  $f_{T1}$  – коефіцієнт тертя сталі по ґрунту ( $f_{T1} = 0,4 \dots 0,5$ );  $C$  – питоме зчеплення між ґрунтом та сталлю щита (для сипких, півскельних та скельних ґрунтів  $C = 0$ ; для глинястих –  $C = 5 \dots 10$  кН/м<sup>3</sup>);

$$k_D = \frac{D_0}{D_{щ}} k = \frac{5}{5,8} \cdot 8 \cdot 10^5 = 689655,12 \text{ кН/м}^3 \text{ – наведений коефіцієнт пружного}$$

відпору ґрунту,  $D_0 = 5$  м – розмірний коефіцієнт;  $\Delta$  – обжимання ґрунту боковою поверхнею (при  $f \geq 1,0$  він дорівнює нулю; при  $f < 1,0$  він дорівнює

$$\Delta = \frac{1}{6f + 4} - 0,077).$$

Опір щиту частини кріплення, яке розміщене під хвостовою оболонкою  $R_3$  знаходять за формулою:

$$R_3 = f_{T2} (1,2 \dots 2,2) G_k = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 2609 = 1565,4,$$

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

Опір щита частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом  $R_4$ :

$$R_4 = k_M f_{T2} G_{щк} = 2 \cdot 0,5 \cdot 2609 = 2609,$$

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

Зусилля одного гідроциліндра дорівнює:

$$P_o = \frac{(1,3...1,5)F}{n} = \frac{1,3 \cdot 6000}{18} = 433,3 \text{кН},$$

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

### 3.2 Технологія спорудження перегінного тунелю з монолітно-пресованою оправою

Технологія спорудження тунелю з монолітно-пресованою оправою заснована на принципі формування готової оправи за хвостовою оболонкою щита в процесі його переміщення до забою з щільним примиканням оправи по контуру до масиву, що запобігає зсуву породи всередину виробки. Цій вимозі задовольняє основна технологічна схема спорудження тунелю (рис. 3.3) [8, 11].

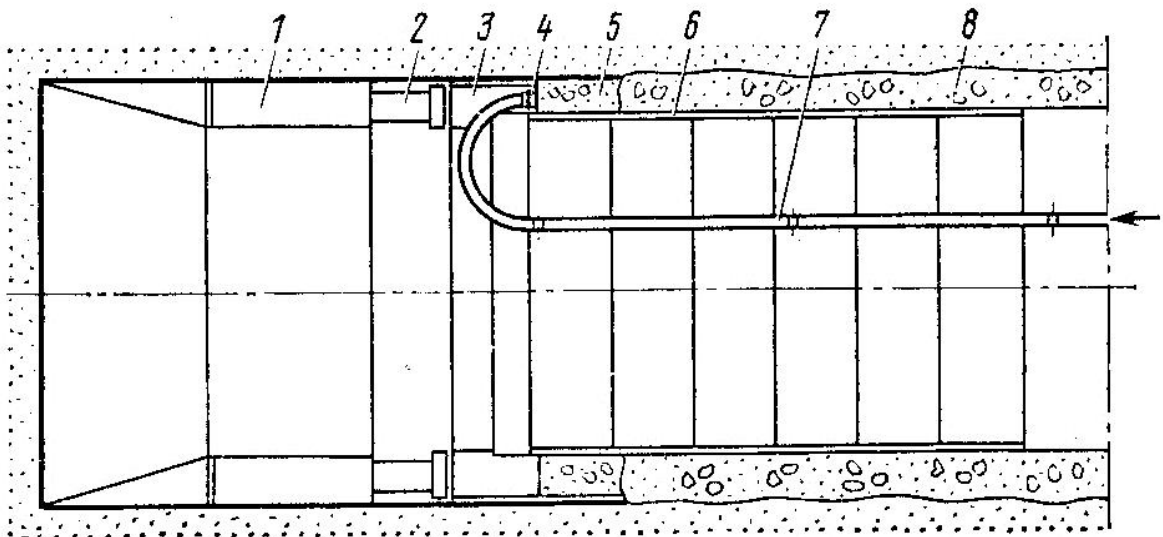


Рисунок 3.3 – Схема спорудження тунельної оправи

за щитом з монолітно-пресованого бетону:

- 1 – щит; 2 – гідроциліндри; 3 – пресуюче кільце; 4 – замковий пристрій;  
5 – бетонна суміш; 6 – опалубка; 7 – бетонопровід; 8 – оправа

По цій схемі роботи виконують в такій послідовності. Після завершення операцій, пов'язаних з розробкою і прибиранням ґрунту, переміщенням щита, відведенням пресуючого кільця і установкою опалубки, утворюється кільцевий простір, всередину якого бетононасосом або пневмобетононагнітачем по бетонопроводу 7 подається бетонна суміш. Як тільки бетонна суміш заповнить кільцевий простір, замковий пристрій 4 перекриває отвір в бетонопроводі для впускання суміші, включаються гідроциліндри 2 щита, зусиллям яких він переміщається на забій. Реактивне зусилля гідроциліндрів через пресуюче кільце 3 передається на бетонну суміш в кільцевому просторі, ущільнює її під великим тиском. Пресуюче кільце встановлене із зазором по периметру кільцевого простору, що дозволяє йому вільно переміщатися. Порова вода, насичена частинками цементу і пилюватих, в процесі пресування видаляється з бетонної суміші через цей зазор. Оболонка щита безперервно витягується з кільцевого простору, обжата підвищеним тиском, в результаті цього бетонна маса піддається перепресуванню (формуванню заново) з об'єму однієї конфігурації в іншу (див. рис. 3.3).

По такій схемі можна споруджувати тунелі за будь-яких гірсько-геологічних умов (в пісках, супісках, лесах, суглинках, мергелях, глинистих сланцях, вапняках, піскуватих сланцях, інших ґрунтах, що сприяють щитовій проходці, необводнених і здатних надати відпор пресованої або перепресованої бетонної суміші при формуванні оправи. Виняток становлять водонасичені ґрунти – пливуни, розріджений мул, стійкі ґрунти з водопритокою більше 10 м<sup>3</sup>/ч – в них можна зводити монолітно-пресовані оправи, якщо роботи проводяться із застосуванням спеціальних способів осушення.

По схемі (див. рис. 3.3) споруджуються міські тунелі колекторів в переставних або ковзаючих опалубках, перегінні тунелі метрополітенів і гідротехнічні в переставних опалубках. Особливість схеми: всі операції по спорудженню тунелю взаємозв'язані, виконуються послідовно. Бетонувати оправи можна тільки після розробки ґрунту і його прибирання, а розробляти забій – після спорудження чергового кільця оправи. На практиці часто основну

схему модифікують з урахуванням конкретних гірничотехнічних умов з метою розділення і забезпечення незалежного виробництва бетонних і прохідницьких робіт.

Кільцевий стик бетонної оправи завжди знаходиться зовні формуючої опалубки, і при наступному циклі вона не надає шкідливої дії на бетон у стадії твердіння. По даній схемі прийнятий прохідницький комплекс для будівництва перегінних тунелів метрополітену.

Тунелі по приведеній схемі споруджують з використанням комплексу устаткування, що включає основні елементи [8, 11]:

- прохідницький щит;
- пресуюче кільце;
- опалубку;
- механізм для зняття, переміщення і установки секцій опалубки;
- машину для подачі бетонної суміші за опалубку;
- бетонопровод, бетонний вузол для приготування бетонної суміші;
- інше устаткування, вживане для доставки бетонної суміші до машини і для видачі, вантаження і транспортування ґрунту.

Всі існуючі конструкції щитів, призначених для проходки тунелю в широкому діапазоні геологічних умов (в слабких, нестійких і в міцних стійких ґрунтах), можна використовувати для спорудження тунелів з монолітно-пресованими оправою і при порівняно нескладній їх реконструкції (в основному хвостової частини). В тих випадках, коли по статичному розрахунку товщина монолітно-пресованої оправи значно перевищує товщину збірної оправи, для якого призначений прохідницький щит, потрібно його модернізувати.

Прохідницькі щити для спорудження монолітно-пресованої оправи повинні задовольняти ряду вимог, обумовлених прийнятою технологічною схемою. Всі технологічні схеми розроблені за умови ведення проходки механізованим щитом. Це визначається не тільки технологічними, але і економічними чинниками: на спорудження 1 м тунелю з монолітно-пресованого бетону

витрачається в 2...4 рази більше часу, ніж на монтаж кільця збірної оправи шириною 1 м. Отже, на розробку, завантаження і видачу ґрунту з щита повинен витрачатися мінімальний час, щоб забезпечити конкурентоспроможність методу.

Особливості спорудження монолітно-пресованої оправи як найменшого ступеня впливають на конструкцію щита для технологічних областей вживання яких – достатньо стійкі міцні породи. Практично для цих схем можна використовувати без реконструкції всі механізовані щити, створені для збірної тунельної оправи. Щити для роботи поповнюються системою гідроциліндрів для підтягання пристрою розпору, в який упираються щитові циліндри при пересуванні щита. Діаметр щита можна зберегти, оскільки монолітно-пресована оправи має достатню для міцних порід при її товщині міцність (перевищує товщину збірної оправи всього на 25...35 %). Щити для роботи (бетон укладається на стійку породу) мають пресуюче кільце. Модифікація конструкції щита полягає в наступному: подовжується хвостова частина; збільшується товщина оболонки; щит оснащується пресуючим кільцем і компенсаторами; встановлюється направляюча рама для формуючої опалубки знімається накладка на зовнішній поверхні корпусу; збільшується зовнішній діаметр щита; змінюється гідросистема щита.

Подовження хвостової частини щита викликано необхідністю розмістити в ній пресуюче кільце і компенсатори (встановлюються між щитовими циліндрами і пресуючим кільцем). Це вимушена міра, оскільки погіршується маневреність і до певної міри збільшується опір пересуванню щитів.

Як приклад показано подовження хвостової частини щита (рис. 3.4) за допомогою обичайки.

Оболонка щита повинна зварюватися по стиках високоякісними електродами і бути в 2 рази більше в порівнянні із звичайною. Це викликано тим, що вона сприймає велике радіальне навантаження при пресуванні і зусилля у випадку заклинювання пресуючого пристрою при його перекосі в процесі переміщення щита. Корпус щита повинен бути без накладок у вигляді

циліндра з гладкою зовнішньою поверхнею. Це дозволяє зменшити витрату бетону і забезпечити більш щільний контакт оправи, що зводиться, з навколишнім масивом.

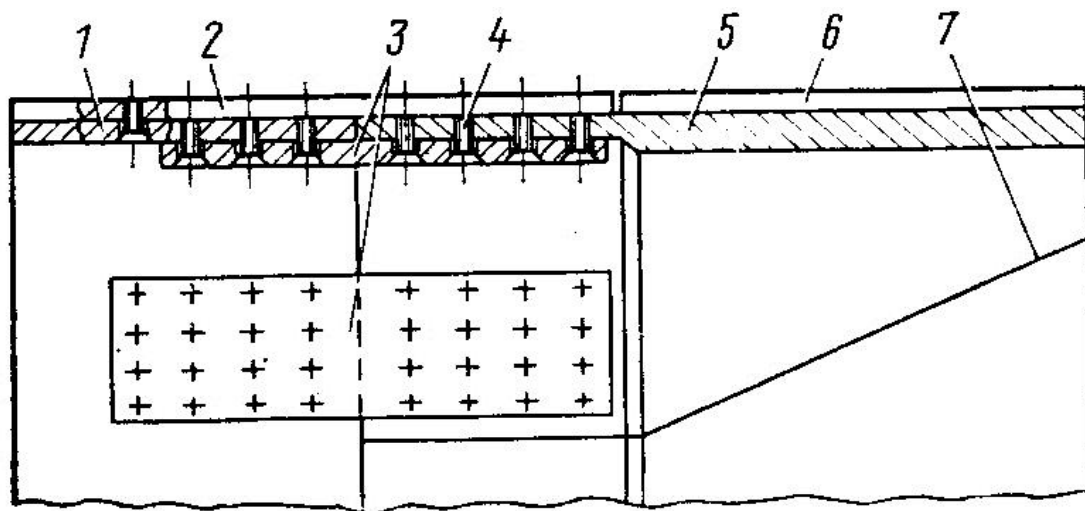


Рисунок 3.4 – Потовщена обичайка до щита:

1 – хвостова оболонка щита; 2, 3, 6 – накладки;

4 – болт; 5 – обичайка; 7 – зварний стик

Для тунелів діаметром менше 3,2 м можна використовувати існуючі щити з незначними конструктивними змінами; для проходки тунелів діаметром до 5,5...6 м потрібно збільшити діаметр щита. Це викликано необхідністю: 1) підвищити несучу здатність бетонного оправи в ґрунтах, що чинять достатньо значний гірський тиск; 2) забезпечити кращу перепресування бетонній суміші. Наприклад, для перегінних тунелів метрополітену товщина кільця монолітно-пресованої оправи під хвостовою оболонкою щита рівна 280 мм (для збірної оправи – 200 мм). З урахуванням потовщеної хвостової оболонки і збільшеного до 5200 мм внутрішнього діаметра монолітно-пресованого оправи діаметр щита збільшується до 5900 мм (діаметр щитів із збірним оправою – 5632 мм).

Збільшення діаметра існуючих щитів зв'язано з складними конструктивними змінами в корпусі, тому такі щити доцільно проектувати і виготовляти на заводі, як нове прохідницьке устаткування. Щити збільшеного

діаметра використані при будівництві тунелів колекторів і в метробудуванні. Для цього за щитом потрібно було створити комплект спеціалізованого устаткування, пов'язаного з щитом в єдиний технологічний комплекс.

**Пресуюче кільце.** Усередині хвостової оболонки щита (або за пристроєм розпору) розташоване пресуюче кільце. Воно забезпечено рухомих захисним кільцем і компенсаторами – спеціальними шарнірними пристосуваннями в місцях приєднання штоків циліндрів щита до пресуючого кільця (рис. 3.5).

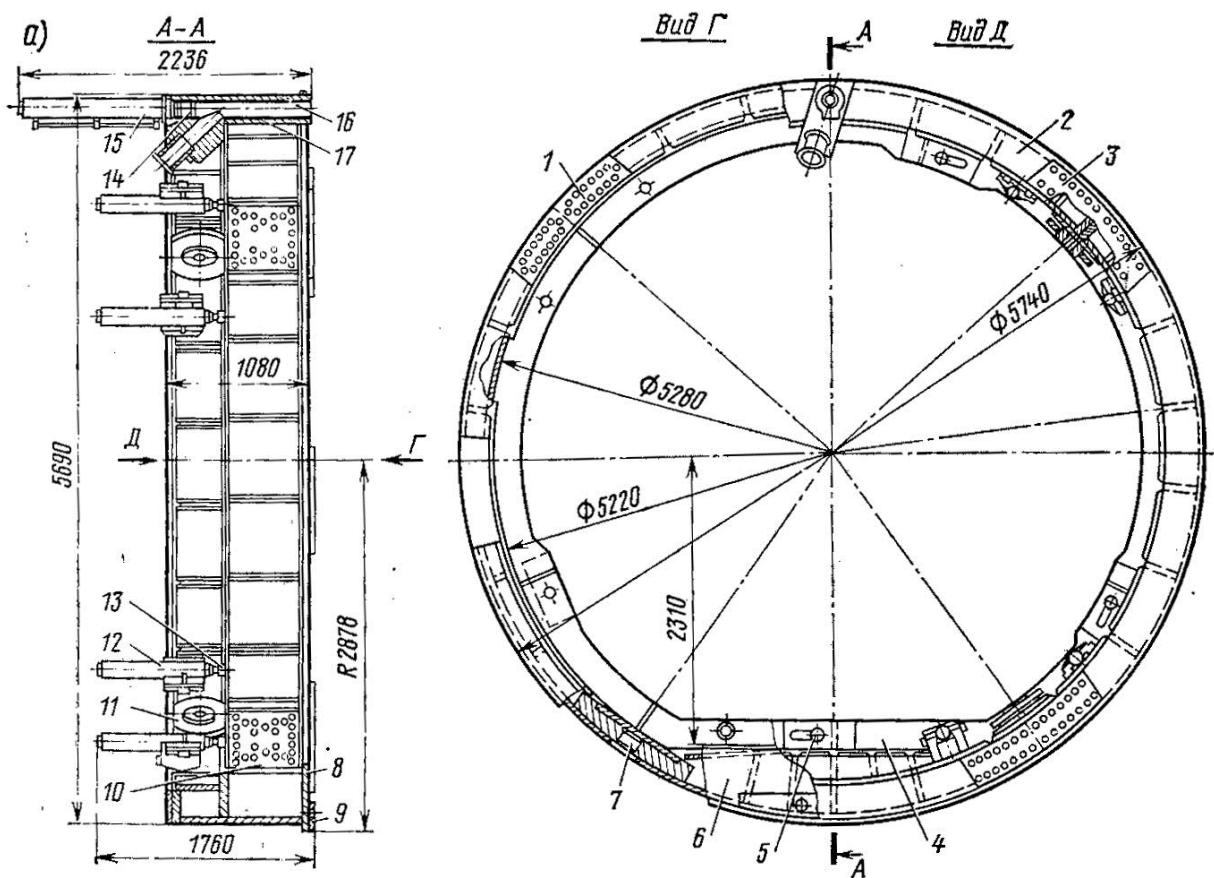


Рисунок 3.5 – Пресуюче суцільне нероз'ємне кільце:

- 1, 3 – накладки; 2 – сегменти; 4 – елементи рухомого захисного кільця;
- 5 – шарніри для з'єднання елементів рухомого захисного кільця;
- 6 – сегмент плоского лотка; 7 – шпонка; 8, 9 – розширення кільця;
- 10 – накладка; 11 – з'єднання клемами; 12, 15 – гідравлічні циліндри;
- 13 – сферичні шарніри; 14 – банник;
- 16 – канал для бетонної суміші; 17 – гільза

Опорна частина пресуючого кільця сприймає зусилля щитових гідроциліндрів, а нажимна частина (пуансон) входить в зазор між опалубкою і оболонкою щита (або поверхнею виробки) і передає ці зусилля на пресовану масу. Опорна і нажимна частина кільця є єдиною конструкцією, що складається з окремих жорстко скріплюючих по периметру сегментів. Залежно від умов транспортування по стовбуру і тунелю, а також монтажу пресуюче кільце може виконуватися; суцільнозварним.

Рухоме захисне кільце складається із збірних елементів, сполучених шарнірами. Циліндри (встановлені на опорній частині пресуючого кільця) притискують кільце до торця опалубки. Це запобігає виходу суміші через зазор між пуансоном пресуючого кільця і примикаючими до нього поверхнями оболонки щита і опалубки при заповненні заопалубочного простору бетонною сумішшю.

При зворотному ході пресуючого кільця рухоме захисне кільце залишається притиснутим до опалубки, що виключає зсув останньої у бік забою. У ряді випадків захисне кільце не використовують, і циліндри упираються в торець опалубки. В склепінчастій частині пресуючого кільця вбудовано пристосування для подачі бетонної суміші з бетонопровода в заопалубочний простір. Пристосування має гідроциліндр для перекриття каналу подачі суміші щоб уникнути зворотного витікання її в бетонопровод в процесі пресування. Розміри діаметра пресуючого кільця прийняті з урахуванням забезпечення зазорів по 10...15 мм між пуансоном і оболонкою щита і між опалубкою і пуансоном; це необхідне для того, щоб пресують кільце при повороті не заклинювалось.

При нерівномірному навантаженні суцільного пресуючого кільця щитовими циліндрами воно може одержати перекид, тобто обернутися в площині, подовжньої осі щита, що приведе до деформації і виходу з ладу штоків циліндрів. Для усунення виникаючих при цьому поперечних зусиль на штоках циліндрів встановлюють компенсатори з підпружиненим стрижнем з сферичними опорними поверхнями торців. Якщо немає навантаження,

стрижень утримується посередині щодо подовжньої осі щитового циліндра; при поворотах пресуючого кільця він відкланяється в ту або іншу сторону від середнього положення, зводячи до мінімуму додаткові втрати на тертя при передачі зусиль від щитових циліндрів на пресуюче кільце.

Зчіпне пристосування приєднується до штока щитового циліндра і пресуючого кільця. Воно працює спільно з компенсатором, забезпечуючи поворот системи що до штока циліндра у всіх площинах і, якщо необхідно, швидке від'єднання штока циліндра від пресуючого кільця. Для повороту пресуючого кільця при зворотному його ходу в щиті звичайно встановлюють від 4 до 8 циліндрів із зчіпними пристосуваннями.

**Технічна характеристика механізованих щитів 105М.** Окрім механізованого щита, комплекс включає: перестановник опалубки – самохідний візок з порталною рамою і самостійною ходовою частиною, усередині рами розміщувався транспортний міст. На порталній рамі розташовано 6 циліндрів: два шарнірно сполучені для підтримки і підйому верхнього сектора; два розташовані в площині робочого майданчика порталної рами для підтримки двох стулок верхнього сектора; два – на «ногах» рами для відриву від бетону, підйому, переміщення і установки нижнього сектора опалубки. Перестановник пересувається по колії 2000 мм. Для заповнення рейкового шляху під час зняття нижнього сектора опалубки передбачена вставна ланка (рис. 3.6). Два бетонопроводи закріплені на кронштейнах справа і зліва від рейкових шляхів перестановника; внутрішній діаметр труб – 150 мм, загальна довжина бетонопровода – 50 м; бетоновкладальний візок – складається з порталної рами і ходової частини по типу перестановника; на візок (встановлювалися два пневмобетонагнітача, кран-балки для підйому і переміщення контейнерів з бетонною сумішшю і інші пристосування.

Візок має електричний привід, що забезпечує її переміщення по рейковій колії шириною 2000 мм; два пневматичних нагрівача місткістю до 500 л, робочий тиск 0,6 МПа, подача 10 м<sup>3</sup>/ч кожного, об'єм ресівера 2 м<sup>3</sup>; пресуюче кільце – суцільна конструкція з коробчастих сегментів.

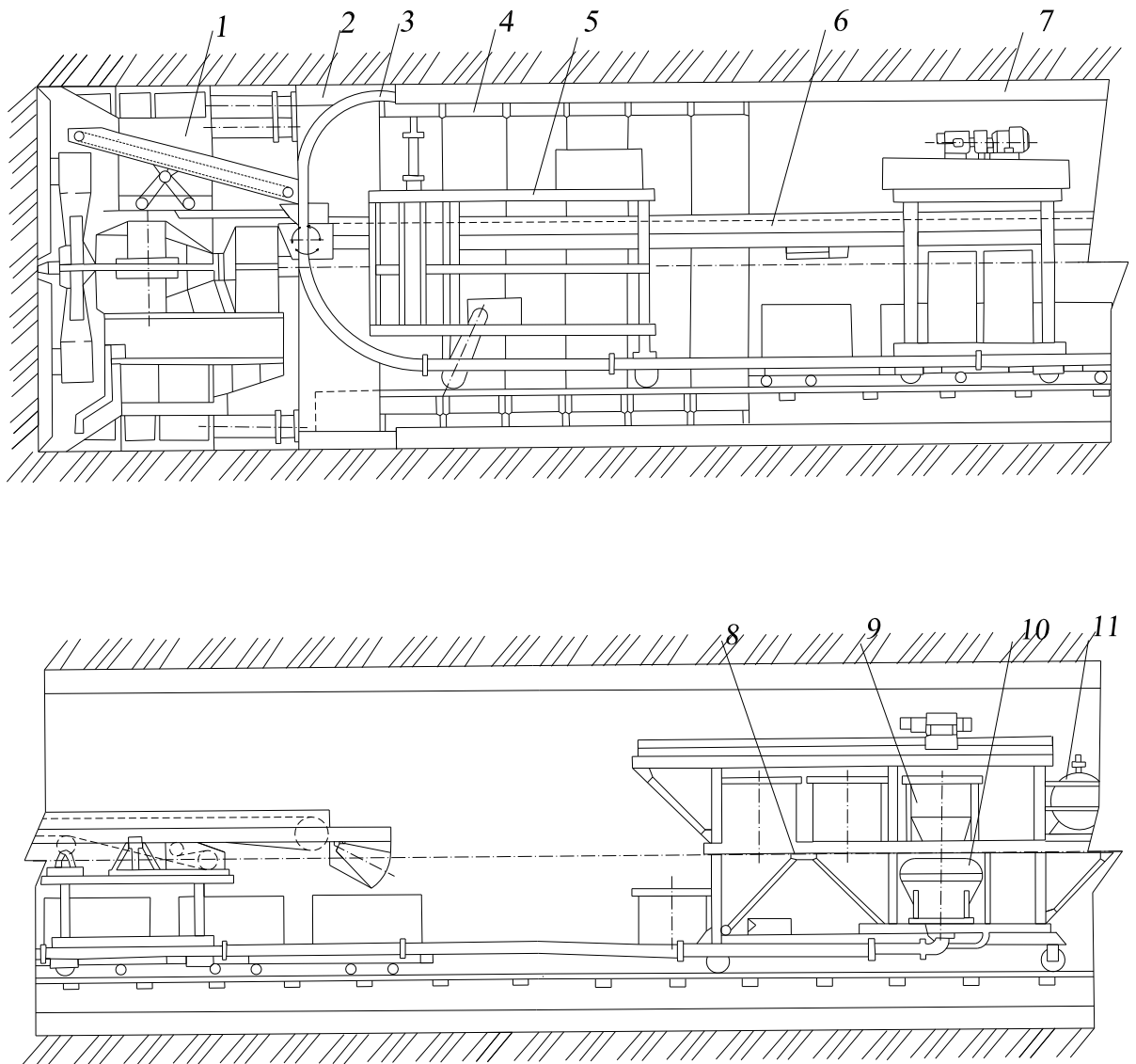


Рисунок 3.6 – Комплекс устаткування по спорудженню перегінного тунелю з монолітно-пресованою оправою:

- 1 – щит; 2 – пресуюче кільце; 3 – бетонопровод; 4 – опалубка;  
 5 – механізм для перестановки опалубки; 6 – конвеєр; 7 – оправи;  
 8 – візок для бетонування; 9 – бетоновізок; 10 – пневмобетонагнітач;  
 11 – ресивер; 12 – бетонозмішувач з бункерами для цементу

Торець пуансона має гумове ущільнення. У верхній частині був вмонтований патрубок для підключення бетонопровода. Патрубок

забезпечений шиберним затвором для перекриття бетонопровода під час пресування. Основні розміри пресуючого кільця, мм; зовнішній діаметр 5700, внутрішній діаметр 5100, ширина 1430; переставну опалубку, що шарнірно складається, з шести металевих секцій шириною 1000 мм. Секція (розміри в мм: зовнішній діаметр 5100, висота 4858, ширина 1000; маса 5642 кг) складаються з двох секторів: верхнього з одним шарніром і двох стулок і нижнього з лотка і двох стулок з двома шарнірами. До нижнього сектора опалубки приварювалися рейки, по яких переміщався перестановник опалубки. Сектори опалубки і секції з'єднувалися на болтах.

Основні етапи циклу [8, 11]:

1) після переміщення щита у виробку пресуюче кільце трьома щитовими циліндрами, на яких воно закріплено, переміщається в крайнє положення у бік щита;

2) бетонопровод розбирається на ділянці зняття нижнього сектора опалубки;

3) перестановник підводиться до чергової секції опалубки;

4) секція відривається від бетону і складається в транспортне положення, після чого переміщається назад, звільняючи місце під вставну путню ланку;

5) в місце, що звільнилося від знятої опалубки, встановлюється вставна ланка шляху;

6) перестановник доставляє секції до місця монтажу, та з його допомогою вмонтовуються секції опалубки;

7) потім збирається бетонопровод і відкривається шиберний затвор;

8) бетонна суміш від бетонного вузла доставляється в контейнерах до бетоновкладального візка, перевантажувалася в пневматичний бетононагнітач і подається в заопалубочний простір;

9) після заповнення бетонною сумішшю заопалубочного простору бетонопровод перекривався шиберним затвором;

10) перед пресуванням бетонної суміші забійні циліндри упиралися в забій – забійна суміш пресувалася (бетон пересувається по двохступеневому режиму: на першій ступені тиском 0,15...0,2 МПа протягом 3 мін, на другій –

1,0...1,2 МПа 6...8 мін), потім забійні циліндри після пресування забиралися та очищалися бетонопроводи;

11) після розробки забою пресуюче кільце відсувається в крайнє положення у бік щита і цикл повторюється.

### 3.4 Розрахунок електровозної відкатки

Сутністю розрахунку електровозної відкатки є визначення основних параметрів робіт із перевезення породи, яка розробляється за цикл прохідницьких робіт. Як основний тяговий засіб для переміщення поїздів рейковим транспортом слід застосовувати контактні або акумуляторні електровози постійного струму. Для цього необхідно визначитися з назвою електровоза і вагонетки [11].

Визначаємо кількість вагонеток  $z_{\text{в}}^{3\text{р}}$ , які може потягти електровоз за умови зрушення:

$$z_{\text{в}}^{3\text{р}}(G + G_o) \leq \frac{1000F_T}{\omega_{3\text{р}} + \omega_i + 110a_{3\text{р}}} - P_c = z(16,2 + 0,76) \leq \frac{1000 \cdot 0,9}{5 + 3 + 110 \cdot 0,05} - 4,25 = z16,96 \leq 62,42 = 4шт$$

де  $G = 0,9 \frac{V_{\text{ваг}} \gamma}{k_p} = 0,9 \frac{1,5 \cdot 24}{2} = 16,2 \text{ т}$  – маса породи у вагонетці, в т;  $G_o$  – маса порожньої вагонетки, в т;  $F_T$  – сила тяги електровоза, в т;  $\omega_{3\text{р}}$  – опір зрушення вагонеток з місця (дорівнює  $\omega_{3\text{р}} = 8...5 \text{ кг/т}$  при вазі породи  $G = 6...15 \text{ т}$ ,  $\omega_{3\text{р}} = 11...9 \text{ кг/т}$  при вазі породи  $G = 3...5 \text{ т}$  та  $\omega_{3\text{р}} = 13...12 \text{ кг/т}$  при вазі породи  $G = 1...2 \text{ т}$ );  $\omega_i$  – опір уклону перегінного тунелю (збігається із значенням уклону в проміле);  $a_{3\text{р}}$  – опір руху потягу із ґрунтом при зрушенні з місця ( $a_{3\text{р}} = 0,04...0,05 \text{ м/с}^2$ );  $P_c$  – загальна маса електровоза (в т).

Кількість отриманих вагонеток округлюється в меншу сторону.

Визначаємо кількість вагонеток  $z_B^{GM}$ , які може зупинити електровоз з умови руху вниз та гальмування:

$$z_B^{3p}(G + G_o) \leq \frac{F_T'}{110a_{GM} + \omega_i - \omega_{GM}} - P_c = z(16,2 + 0,76) \leq \frac{1020}{110 \cdot 0,39 + 3 - 5} - 4,25 = z16,96 \leq 20,68 = 1шт$$

де  $a_{GM}$  – коефіцієнт опору за умови руху вниз ( $a_{GM}=0,39$  м/с<sup>2</sup>, тобто при екстремому гальмуванні максимальний шлях потяга дорівнює 10 м при швидкості руху 10 км/год);  $F_T' = 1000\psi P_c = 1000 \cdot 0,24 \cdot 4,25 = 1020$  кН – скоригована сила тяги електровоза ( $\psi$  – коефіцієнт зчеплення ведучих коліс з рейками, який дорівнює 0,24);  $\omega_{GM}$  – опір руху потяга із ґрунтом за умови руху вниз (дорівнює  $\omega_{GM}=9\dots 8$  кг/т при вазі породи  $G=1\dots 2$  т,  $\omega_{GM}=7\dots 6$  кг/т при вазі породи  $G=3\dots 5$  т та  $\omega_{GM}=5\dots 3$  кг/т при вазі породи  $G=6\dots 15$  т).

Кількість отриманих вагонеток округлюється в меншу сторону і для подальшого розрахунку приймається менше значення.

Тривалість рейсу  $T_p$ , год, складається із тривалості руху потягу  $T_{руху}$  та тривалості маневрів  $T_m$  протягом рейсу ( $T_m$  дорівнює 0,3 години):

$$T_p = T_{руху} + T_m = 0,29 + 0,3 = 1, \text{ год.}$$

Тривалість руху потягу  $T_{руху}$  визначається як:

$$T_{руху} = \frac{2L}{0,75} = \frac{2 \cdot 0,6}{0,75 \cdot 5,5} = 0,29 \text{ год}$$

де  $L$  – довжина відкатки, в км, приймається рівною половині довжини тунелю;  $V$  – швидкість руху потягу в км/год, (не більше 10 км/год із умови

безпеки руху в підземних виробках).

Необхідна кількість електровозів по відкатці породи визначається за формулою:

$$N = \frac{mn_0}{n_p} = \frac{1,5 \cdot 2}{1} = 3 \text{шт.}$$

де  $m$  – коефіцієнт нерівномірності відкатки,  $m = 1,5$ ;  $n_0$  – кількість рейсів, необхідне для перевезення породи, яка розробляється за цикл,

$$n_0 = \frac{G_{\text{цикл}}}{ZG} = \frac{24,62}{1 \cdot 16,2} = 2 \text{шт.} \quad (G_{\text{цикл}} - \text{маса породи, яка розробляється за цикл});$$

$n_p$  – можлива кількість рейсів одного потягу з породою за цикл  $n_p = T/T_p = 1/1 = 1p$  ( $T$  – час протягом якого проводиться розробка и відкатка породи (визначають за циклограмою). Необхідна кількість електровозів округлюється в більшу сторону до цілого числа.

### 3.5 Побудова циклограми виробництва робіт і розрахунок вентиляції

Під час щитової проходки тунелів комплексна механізація робіт передбачає неперервне й одночасне виконання механізованим способом всіх основних і допоміжних операцій від забою до ділянки тунелю, яку уже споруджено [8, 11].

Технологічна схема передбачає: розробку ґрунту робочим органом щита; прибирання ґрунту із забою і транспортування його до вагонеток або автотранспорту; зачищення забою, профілактичний огляд механізмів і переміщення щита; монтаж оправи; первинне нагнітання за оправу; нарощування колії за щитом, доставку матеріалів і елементів оправи тощо.

Циклограма відображає технологічну послідовність робочих процесів під час спорудження тунелю і витрати часу на їх виконання, а також характеризує швидкість проходки конкретної ділянки тунелю. Циклограма складається виходячи із об'єму робіт, складу ланки, трудовитрат на виконання робіт.

Побудова циклограми починається після розрахунку тривалості роботи, яка

виконується. Після отримання тривалості всіх робіт їх наносять на графік, виходячи із таких міркувань:

1. Монтаж оправи виконують одразу після пересування щита, під час якого робочі процеси, які пов'язані із його роботою, припиняються.

2. Усі операції циклу повинні бути узгодженими таким чином, щоб усі члени ланки протягом зміни були задіяні в технологічному процесі. Для перевірки кількість працівників у кожному часі циклу повинна залишатися однаковою.

3. Чекання швів можна виконувати під час розробки й прибирання ґрунту, але не переривати під час пересування щита, що пояснюється тим, що чекання швів проводять не ближче 10...15 м від щита.

4. Тривалість циклу всіх робіт необхідно приймати кратною числу години робочої зміни.

Штучну вентиляцію підземних виробок слід застосовувати на усіх стадіях тунельних та будівельно-монтажних робіт, а також в період тимчасової перерви в процесі прохідницьких робіт.

Кількість повітря, яке потрібно для вентиляції виробок, визначається за максимальною кількістю людей, одночасно зайнятих на підземних роботах, виходячи із норми не менше 6 м<sup>3</sup>/хв на людину і проводиться за формулою [11]:

$$Q = \frac{6N}{60},$$

де 6 (м<sup>3</sup>/хв) – норма подачі свіжого повітря на одну людину;  $N$  – найбільша кількість людей, які знаходяться в тупиковій виробці.

Отриману за формулою кількість повітря перевіряють за швидкістю його руху по підземній виробці, яка повинна становити  $0,25 < V < 6$  м/с:

$$V = \frac{Q}{S},$$

де  $S$  – площа перерізу виробки, що вентилюється.

Якщо швидкість руху повітря менше 0,25 м/с, то кількість повітря (м<sup>3</sup>/с) для вентиляції визначається:

$$Q = 0,25S .$$

Розрахункова продуктивність вентилятора (м<sup>3</sup>/с) буде дещо більше через компенсацію втрати повітря через нещільності трубопроводу:

$$Q_v = pQ ,$$

де  $p$  – емпіричний коефіцієнт доставки, який знаходиться:

$$p = \left( \frac{\beta d L}{3m} \sqrt{R} + 1 \right)^2 ,$$

$\beta$  – коефіцієнт питомої стикової повітряпроникливості, який дорівнює 0,001;  $d$  – діаметр труб, м;  $L$  – довжина трубопроводу, м (але не більше 200 м);  $m$  – довжина ланки труби, м, причому  $m=2,5$  м при  $d \leq 0,6$  м та  $m=3,5$  м при  $d > 0,6$  м;  $R$  – аеродинамічний опір трубопроводу.

Аеродинамічний опір трубопроводу  $R$  (в кілоджоулях) складає:

$$R = 6,5\alpha \frac{L}{d^5} ,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, який при  $d = 0,3$  м складає  $\alpha = 0,00045$ ; при  $d = 0,4$  м складає  $\alpha = 0,00040$ ; при  $d = 0,5$  м складає  $\alpha = 0,00035$ ; при  $d \geq 0,6$  м складає  $\alpha = 0,00030$ .

Статичний напір  $h_{ст}$  (мм вод. ст.) в вентиляційному трубопроводі:

$$h_{ст} = RQQ_B,$$

Після розрахунку коефіцієнта доставки  $p$  і статичного напору  $h$  вибирають значення максимального коефіцієнта корисної дії  $\eta$  та знаходять швидкість повітря через вихідний отвір вентилятора  $V_B$ .

Швидкість повітря за номограмою складає 20 м/с. Площа вихідного отвору вентилятору  $F_B$  дорівнює:

$$F_B = \frac{Q_B}{V_B}.$$

Для розрахунку вентиляції застосуємо програму Розрахунок вентиляції.xls.

Таблиця 3.1 – Розрахунок вентиляції при виконанні робіт

|   | Ген Д.        |
|---|---------------|
| Введіть довжину ділянки <b>L</b> (не більше 200 м), м                   | <b>200</b>    |
| Введіть діаметр оправи <b>D</b> , м                                     | <b>5,1</b>    |
| Введіть максимальну кількість працівників <b>N</b> , чоловік            | <b>22</b>     |
| Введіть діаметр труб для вентиляції <b>d</b> , м                        | <b>0,4</b>    |
| Введіть довжину ланки труби <b>m</b> , м                                | <b>2,5</b>    |
| Площина перерізу виробки <b>S</b> , м <sup>2</sup>                      | <b>20,42</b>  |
| Кількість повітря (за кількістю працівників) <b>QП</b> , м <sup>3</sup> | <b>132,00</b> |
| Швидкість руху <b>V</b> , м/с (порівняти із <b>VП</b> )                 | <b>0,11</b>   |
| Потрібна швидкість руху <b>VП</b> , м/с                                 | <b>0,25</b>   |
| Потрібна кількість повітря <b>Q</b> , м <sup>3</sup> /с                 | <b>5,10</b>   |
| Розрахункова продуктивність вентилятора <b>Qв</b> , м <sup>3</sup> /с   | <b>5,80</b>   |

Таблиця 3.1 (продовження) – Розрахунок вентиляції при виконанні робіт

|   |                  |
|---|------------------|
| Коефіцієнт доставки $\eta$                                | <b>1,14</b>      |
| Аеродинамічний опір трубопроводу $R$ , кіломюрів          | <b>38,09</b>     |
| Введіть коефіцієнт аеродинамічного опору $\alpha$         | <b>0,0003</b>    |
| Статичний напір вентилятору $h$ , мм. вод. ст. (даПа)     | <b>1127,2986</b> |
| Площа вихідного отвору вентилятору $F_v$ , м <sup>2</sup> | <b>0,29</b>      |
| Введіть швидкість повітря $V_v$ (за номограмою), м/с      | <b>20</b>        |

Знайшовши площу вихідного отвору вентилятора  $F_v$ , підбираємо його назву і параметри. Так як площа вихідного отвору мала (0,3 м<sup>2</sup>), то обираємо вентилятор мінімального отвору – СВМ-4м (0,6 м<sup>2</sup>).

## ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз геологічних і гідрологічних умов, проведене варіантне проєктування та техніко-економічне порівняння за чотирма варіантами, на основі якого обрано найбільш економічний варіант, тобто Варіант №4 з монолітно-пресованою оправою.

2. На основі методу О. Ю. Бугаєвої проведено розрахунки монолітно-пресованої оправи з варіацією їхньої товщини. Отримані значення силових факторів (згинальних моментів і нормальних сил) для монолітно-пресованої бетонної оправи товщиною 0,15; 0,2; 0,25 м.

3. Проведене обґрунтування параметрів альтернативного кріплення на основі дослідження силових факторів. Виявлено, що залежності згинальних моментів і нормальних сил від зміни товщини оправи є монотонними і не стрибкоподібними.

4. Доведено, що міцність для товщини монолітно-пресованої оправи 0,15; 0,2; 0,25 м є достатньою, а запас міцності знаходиться в межах 9,54...20,4 разів. Гіпотеза про зменшення товщини оправи підтверджена, тобто запроєктовану оправу товщиною 0,2 м можна зменшити до 0,15 м, а запас міцності буде значним і складати 9,54 разів.

5. Обґрунтована технологія щитової проходки перегінного тунелю з монолітно-пресованою оправою. Визначено параметри прохідницького щита, розраховано параметри вентиляції та електровозної відкатки.

## 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. Кауфман, Л. Л. Строительство тоннелей. Часть I. [Текст] / Л.Л. Кауфман, Н.И. Кулдыркаев, Б.А. Лысиков. – Донецк: Норд-Прес, 2006. – 360 с.
7. Кауфман, Л. Л. Строительство тоннелей. Часть II. [Текст] / Л. Л. Кауфман, Н. И. Кулдыркаев, Б. А. Лысиков. – Донецк: Норд-Прес, 2006. – 330 с.
8. 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.
9. Самедов, А. М. Будівництво міських підземних споруд: навч. посіб. [Текст] / А. М. Самедов, В. Г. Кравець. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 400 с.
10. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій [Текст] / О. Л. Тютюкін. – Дніпро : Журфонд, 2020. – 260 с.
11. Тютюкін, О. Л. Тунелі і метрополітени. Навчально-методичні рекомендації для курсового проектування «Спорудження тунелів щитовим способом» [Електрон. видання] / Уклад. О. Л. Тютюкін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 60 с.

12. Arz, P. Modern Methods of Tunnel Support in NATM Tunnelling [Текст] / P. Arz, S. Semprich // Proc. Symp. Taipei Rapid Transit Systems, 1993, C. 677-686.

13. Aygar E. B. Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks [Текст] / E. B. Aygar // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12, 541-556.

14. El-Kilany, M. E. Numerical simulation of New Austrian Tunneling Method a case study [Текст] / M. E. El-Kilany, T. A. El-Sayed // Jökull Journal, 2017, 67(1), 17-35.

15. Wittke, W. New Austrian Tunneling Method (NATM) – Stability Analysis and Design [Текст] / W. Wittke, B. Pierau, C. Erichsen // Berlin: WBI GmbH, 2016. – 330 p.