



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет науки і технологій

Кафедра «Транспортна інфраструктура»

ТУНЕЛІ І МЕТРОПОЛІТЕНИ

**Навчально-методичні рекомендації для курсового проєктування
«СПОРУДЖЕННЯ ТУНЕЛІВ
ЩИТОВИМ СПОСОБОМ»**

*Електронний аналог
друкованого видання*

Дніпро
2023

УДК 624.191.8
Т 84

Укладачі:
*Тютькін Олексій Леонідович,
Купрій Володимир Павлович,
Мірошник Віталій Анатолійович*

Рецензенти:
докт. техн. наук, проф. *В. Д. Петренко*
(Український державний університет науки і технологій),
докт. техн. наук, проф. *С. П. Мінєєв*
(Інститут геотехнічної механіки імені М. С. Полякова
Національної академії наук України)

Рекомендовано каф. «ТІ» (протокол № 10 від 26.04.2023)
Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 613 від 17.05.2023)

Т 84 Тунелі і метрополітени. Навчально-методичні рекомендації для курсового проектування «Спорудження тунелів щитовим способом» / Уклад. О. Л. Тютькін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 60 с.

Навчально-методичні рекомендації містять теоретичні та практичні рекомендації щодо виконання курсового проекту на тему «Спорудження тунелів щитовим способом» здобувачами освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» з освітніх програм «Мости і транспортні тунелі», «Відновлення та будівництво штучних споруд на об'єктах національної транспортної системи» та можуть бути використані в роботі над відповідними розділами дипломних проектів.

Іл. 24. Табл. 19. Бібліогр.: 7 назв.

© Тютькін О. Л., Купрій В. П., Мірошник В. А., 2023

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2023

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Обсяг, зміст і структура курсового проекту	4
2 Проектування поздовжнього профілю тунелю	6
3 Обґрунтування вибору типу оправи.....	7
4 Проектування конструкції кругових оправ	9
4.1 Габарити для проектування оправи.....	9
4.2 Конструктивні рішення чавунних тюбінгових оправ.....	15
4.3 Конструктивні рішення залізобетонних блочних і тюбінгових оправ	17
4.4 Визначення параметрів конструкції кругових оправ	20
4.4.1 Визначення товщини елемента оправи	20
4.4.2 Визначення ширини кільця та перевірка маси елемента	20
4.4.3 Визначення кількості елементів у кільці	21
4.4.4 Розбивка кільця на елементи та перев'язка стиків	21
5 Техніко-економічне обґрунтування варіантів оправи	24
6 Статичний розрахунок оправи тунелю	26
6.1 Визначення навантажень	26
6.2 Розрахунок оправи як кільця, що вільно деформується	29
6.3 Розрахунок оправи за методом О. Ю. Бугаєвої.....	32
6.4 Перевірка оправи на міцність	36
6.4.1 Перевірка на міцність оправи з бетону	36
6.4.2 Перевірка на міцність елементів оправи із залізобетону	37
6.4.3 Перевірка оправи на міцність для елементів оправи із чавуну	39
7 Виконання робіт під час будівництва тунелю.....	40
7.1 Вибір прохідницького щита та визначення його параметрів	40
7.2 Розрахунок електровозної відкатки.....	44
8 Побудова циклограми виконання робіт	46
9 Проектування вентиляції під час виконання робіт	49
Додаток.....	52
Бібліографічний список	59

Вступ

Основним завданням курсового проєкту є закріплення теоретичних знань і набуття практичних навичок у розрахунку й проєктуванні збірних тунельних оправ кругового обрису й основних етапів виконання робіт зі спорудження тунелів щитовим способом. Виконуючи курсовий проєкт, студент повинен виявити не тільки теоретичні знання конструкцій оправ і методів їх розрахунків, але й достатню інженерну підготовку для самостійного вибору найбільш доцільного технічно та економічно обґрунтованого рішення. Також він повинен правильно застосувати відповідні методи розрахунку конкретних конструкцій з урахуванням інженерно-геологічних умов і діючих навантажень, а також обрати тип щита й отримати уявлення про технологію робіт під час щитової проходки тунелів.

Щитова проходка є основним способом спорудження тунелів колового окреслення у інженерно-геологічних умовах будь-якої складності, а також під час будівництва міських і підводних тунелів.

Різноманітність природних і геологічних умов, у яких споруджуються транспортні тунелі, виключає стандартний підхід до вибору типів конструкції оправ і способів виконання робіт. У кожному випадку умов можливі різні проєктні рішення, і тому вибір найбільш доцільного з них вимагає творчого застосування знань.

1 Обсяг, зміст і структура курсового проєкту

Обсяг курсового проєкту – один аркуш креслення формату А1 (варіанти оправи) і пояснювальна записка на 18-20 сторінках формату А4.

Виконуючи курсовий проєкт, необхідно вирішити такі основні питання:

1. Запроєктувати поздовжній профіль тунелю.
2. Запроєктувати тип і конструкцію тунельної оправи на підставі техніко-економічного порівняння кількох варіантів.
3. Виконати статичний розрахунок прийнятого типу оправи.
4. Визначити основні параметри щита.
5. Скласти проєкт виконання робіт зі спорудження тунелю щитовим способом (розробка, прибирання і транспортування породи, монтаж оправи, нагнітання цементного розчину, гідроізоляція, чекання швів тощо).
6. Вибрати необхідний прохідницький щит.
7. Розрахувати параметри електровозної відкатки.

8. Виконати розрахунок вентиляції під час виконання робіт.
9. Запроектувати циклограму виконання робіт.

Курсовий проєкт має містити такі розділи:

1. **Вступ.**
2. **Проектування поздовжнього профілю тунелю.**
3. **Обґрунтування вибору типу оправи.**
4. **Проектування конструкції збірних кругових оправ.**
5. **Техніко-економічне обґрунтування варіантів оправи.**
6. **Статичний розрахунок оправи тунелю.**
7. **Виконання робіт під час будівництва тунелю.** У розділ повинні входити як окремі підрозділи:
 - вибір прохідницького щита та визначення його параметрів;
 - обґрунтування вибору та опис способу виконання робіт за всіма виробничими операціями (розробка та навантаження ґрунту, монтаж оправи, нагнітання за оправу, чекання швів, допоміжні роботи);
 - розрахунок електровозної відкатки породи.
8. **Побудова циклограми виконання робіт.**
9. **Проектування вентиляції під час виконання робіт.**
10. **Бібліографічний список.**

Креслення до проєкту повинні містити конструкції трьох варіантів оправи, а також поперечні перерізи (три кільця з перев'язкою для збірних оправ).

2 Проектування поздовжнього профілю тунелю

У завданні зазначається назва тунелю і його призначення (залізничний, автошляховий, метрополітен), а також задаються породи, що перетинаються тунелем. Необхідно побудувати поздовжній профіль тунелю в обраному горизонтальному та вертикальному масштабах (рекомендується обирати горизонтальний масштаб рівним 1:10000 або 1:5000, а вертикальний – 1:1000 або 1:500, рис. 2.1).

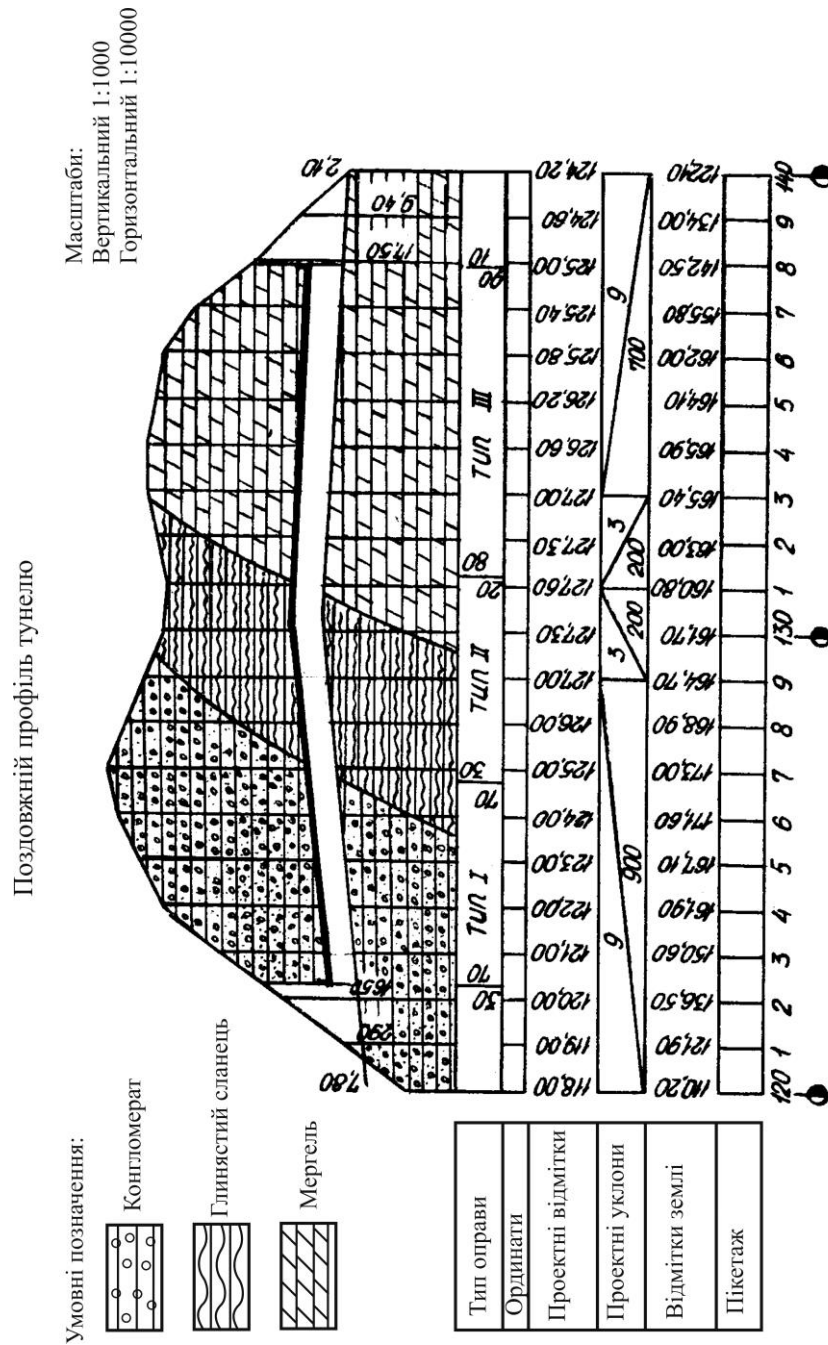


Рис. 2.1. Загальний вигляд поздовжнього профілю тунелю

Проектуючи поздовжній профіль тунелю, треба брати до уваги таке [1]:

1. Проект повинен бути складений для всього тунелю або його ділянки між двома порталами або суміжними шахтами, відстань між якими вказана в завданні.

2. Мінімальний уклон $i_{\min}$ у залізничних тунелях за умовами водовідводу повинен бути не менше 3 ‰. Для залізничних тунелів обов'язковим є пом'якшення заданого керівного уклону i_k . Пом'якшений керівний уклон i_{Π} знаходять шляхом множення коефіцієнта пом'якшення на значення керівного уклону:

$$i_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot i_k, \quad (2.1)$$

де k_{Π} – коефіцієнт пом'якшення керівного уклону.

У разі з'єднання двох ділянок колії різниця між їх уклонами повинна становити не більше 6 ‰, тобто уклон ділянки, який поєднується з мінімальним уклоном $i_{\min}=3$ ‰, повинен бути не більше 9 ‰ (з умов плавного руху потяга), а потім переходити до пом'якшеного керівного уклону i_{Π} .

Якщо довжина тунелю від 0,3 до 1,0 км, коефіцієнт пом'якшення керівного уклону k_{Π} дорівнює 0,9; від 1,0 до 3,0 км – $k_{\Pi}=0,85$; більше 3,0 км – 0,8...0,75.

3. Поздовжній уклон автошляхових тунелів повинен бути не менше 4 ‰ і не більше 40 ‰.

4. Тунелі метрополітену мають прогнутий профіль, що бажано за умовами експлуатації електрорухомого складу. Найбільший допустимий уклон перегінних тунелів метрополітену 40 ‰, а найменший – 3 ‰.

3 Обґрунтування вибору типу оправи

На вибір типу оправи й визначення основних параметрів вирішальний вплив мають інженерно-геологічні й гідрогеологічні умови розташування тунелю [2; 3].

У нестійких водонасичених породах ($f < 0,3 \dots 0,4$) (мули, пливуні, піски, текучі супіски й суглинки з лінзами піску тощо), а також у зонах розломів і тектонічної роздрібненості оправа повинна бути водонепроникною. Кільце оправи як у робочій, так і в монтажній стадії повинне мати достатню жорсткість, тобто слід збірну оправу проектувати із зв'язками розтягнення й пе-

рев'язкою без лоткового блока. У цьому випадку краще застосувати оправу з тюбінгів із сірого чавуну марки СЧ 21-40. Модифікований чавун марки МСЧ 28...38-90...120 може бути застосований за великого гірського і гідростатичного тиску, особливо для тунелів великих діаметрів ($D_{\text{вн}} > 8,0$ м).

У зволжених слабкостійких ($f = 0,5 \dots 1,0$) і стійких ($f = 1,5 \dots 3,0$) породах можливе застосування чавунних тюбінгових і блочних залізобетонних оправ з металевим або поліетиленовим екраном по внутрішній поверхні. Якщо значення гідростатичного тиску на рівні замка тунелю понад $0,15 \dots 0,20$ МПа, можна застосовувати обидва типи оправ; якщо значення тиску більше $0,2 \dots 0,4$ МПа – чавунну тюбінгову оправу. У стійких скельних зволжених породах при гідростатичному тиску до $0,15$ МПа перевага може бути віддана блочній залізобетонній оправі з внутрішнім поліетиленовим екраном.

У слабкостійких породах природної вологості з невисоким коефіцієнтом міцності ($f = 0,5 \dots 2,0$) (піски, супіски, суглинки, глини) з діаметром тунелю $D_{\text{вн}} > 7,0 \dots 8,0$ м слід застосовувати оправу з блоків суцільного перерізу зі зв'язком між кільцями у вигляді кільцевої шпонки із затверділого цементно-піщаного розчину або оправу із залізобетонних тюбінгів зі зв'язком на болтах. При $D_{\text{вн}} < 6,0 \dots 7,0$ м можливо застосування оправ із залізобетонних тюбінгів або блоків суцільного і ребристого поперечних перерізів.

У незволжених напівскельних і скельних породах ($f > 2,0 \dots 3,0$) застосовують, залежно від діаметра тунелю, оправу із залізобетонних тюбінгів, блоків ребристого або суцільного поперечного перерізу з плоскими (залізобетонні тюбінги) або циліндричними опукло-ввігнутими стиками з наявністю лоткового блока.

У незволжених стійких напівскельних і скельних породах ($f > 3,0$) з великими діаметрами тунелів ($D_{\text{вн}} \geq 7,0$ м) перевагу віддають оправі із залізобетонних тюбінгів або ребристих блоків.

Призначаючи тип поперечного перерізу елемента (тюбінги, ребристі блоки, блоки суцільного перерізу), зважають на такі міркування: 1) оправу із залізобетонних тюбінгів і ребристих блоків мають підвищену жорсткість і не потребують під час монтажу верхньої частини кільця підтримки висувними балками; 2) зменшена в місці оболонки товщина оправу з тюбінгів і ребрис-

тих блоків у поєднанні з більш низькою тріщиностійкістю цих оправ збільшує їхню водопроникність; 3) вихід бетону на виготовлення тюбінгів і ребристих блоків, а отже і їхня маса, менші, ніж блоків суцільного перерізу, але потреба в металі вища через великі витрати арматури, наявність болтових зв'язків і закладних металевих деталей, які обрамовують отвори.

4 Проектування конструкції кругових оправ

4.1 Габарити для проектування оправ

Оправу для тунелів, що проходять щитами, проектують у вигляді замкнутої збірної конструкції з круговим обрисом. Внутрішній діаметр оправ транспортних тунелів визначається габаритами наближення будівель або конструкцій [4].

Для залізничних тунелів внутрішній обрис оправ повинен задовольняти габарит наближення будівель «С» з урахуванням електричної тяги (рис. 4.1). Висоту габариту H та його ширину зверху B призначають залежно від конструкції підвіски контактного проводу: у разі закріплення на несучому тросі приймають $H=6,4$ м та $B=2,04$ м, а без несучого троса – $H=6,25$ м та $B=2,24$ м. Для двоколісного залізничного тунелю приймається той самий габарит, відстань між осями колії складає 4,10 м.

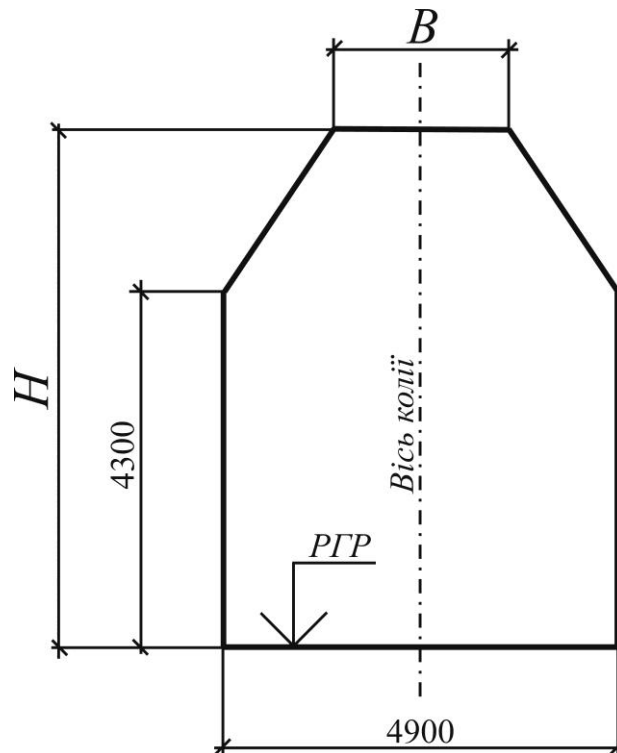


Рис. 4.1. Габарит наближення будівель «С»

На кресленні формату А1 слід навести всі варіанти оправи, а в обраному варіанті накреслити верхню будову колії (рис. 4.2).

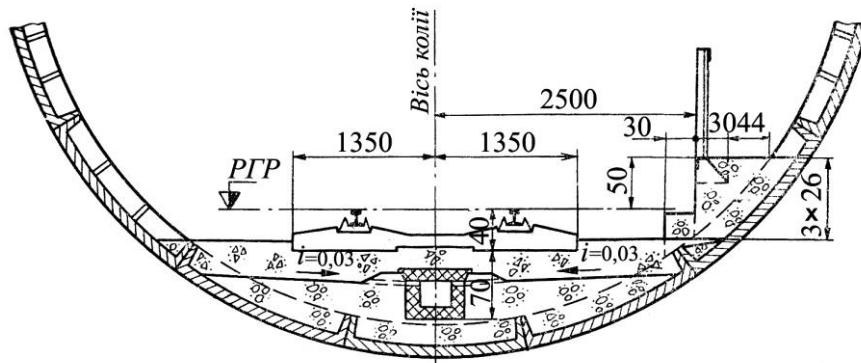


Рис. 4.2. Верхня будова колії залізничного тунелю

Внутрішній діаметр оправи автошляхових тунелів призначають залежно від габариту наближення будівель «Г» (рис. 4.3).

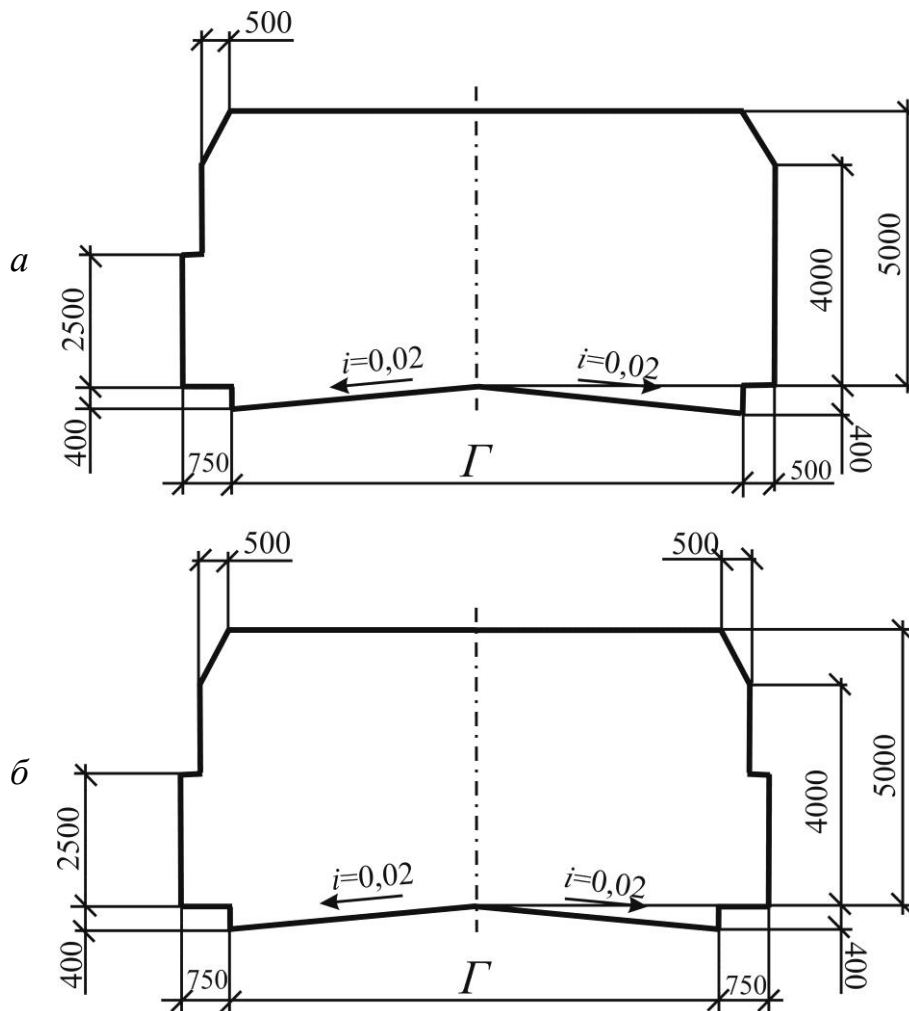


Рис. 4.3. Габарит наближення будівель «Г»:
а – з одним тротуаром; б – з двома тротуарами

Габарит Г-7 ($G=7\,000$ мм) приймають для тунелів на автомобільних дорогах III категорії (інтенсивність руху від 1 000 до 3 000 автомашин за добу), а габарит Г-8 ($G=8\,000$ мм) – на дорогах II категорії (інтенсивність руху від 3 000 до 5 000 автомашин за добу). На дорогах I категорії (інтенсивність руху більше 5 000 автомашин за добу) слід проєктувати два паралельних тунелі для роздільного руху по двох смугах у кожному з них. У автошляхових тунелях повинно бути передбачене влаштування одного тротуару шириною 1,0 м. Якщо інтенсивність пішохідного руху по тунелю понад 1 000 пішоходів на годину, необхідно проєктувати два тротуари шириною 1,0 м кожний.

На кресленні формату А1 слід навести всі варіанти оправи, а в обраному варіанті накреслити верхню будову колії для автошляхового тунелю (рис. 4.4).

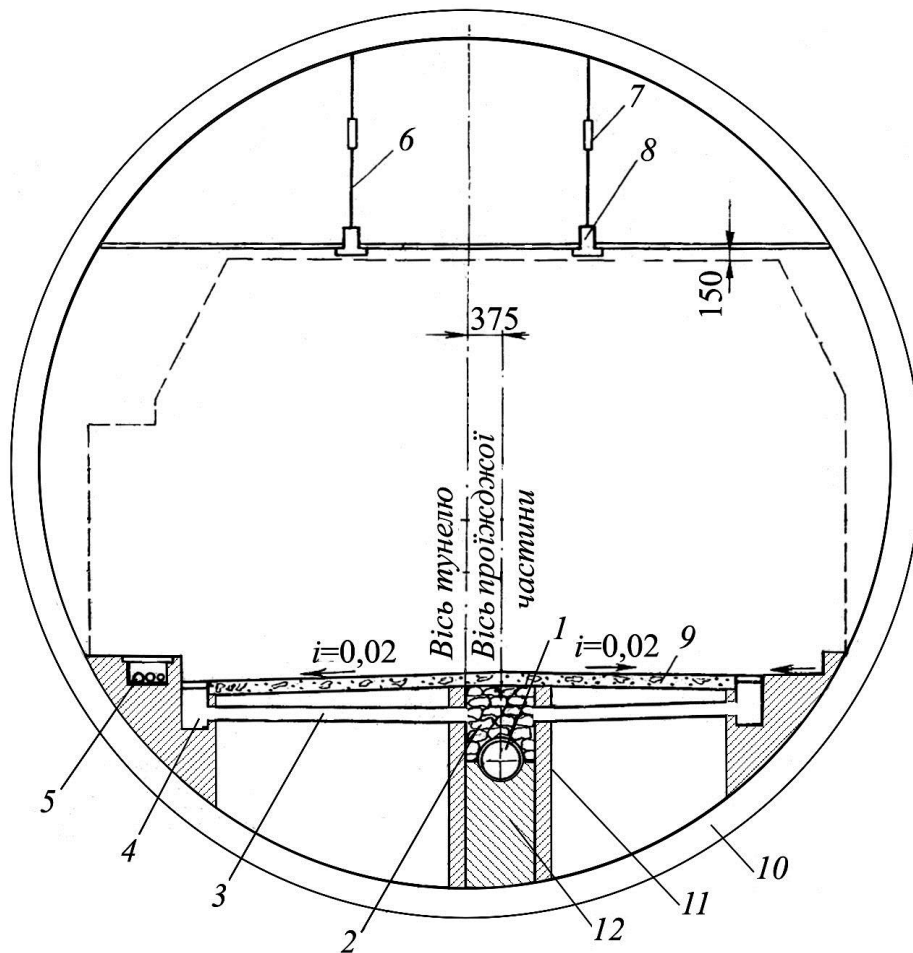


Рис. 4.4. Верхня будова автошляхового тунелю:

- 1 – керамічна перфорована труба; 2 – гравій; 3 – чавунна водовідвідна труба;
- 4 – водовідвідна канавка; 5 – тунельні комунікації; 6 – підвіска; 7 – стяжна муфта;
- 8 – перекриття вентиляційного каналу; 9 – залізобетонні плити; 10 – оправа;
- 11 – несучі конструкції; 12 – бетонна основа лотка

Внутрішній діаметр оправи перегінних тунелів метрополітену глибокого розташування приймають відповідно до габариту наближення будівель для метрополітенів не менше 5,1 м (рис. 4.5).

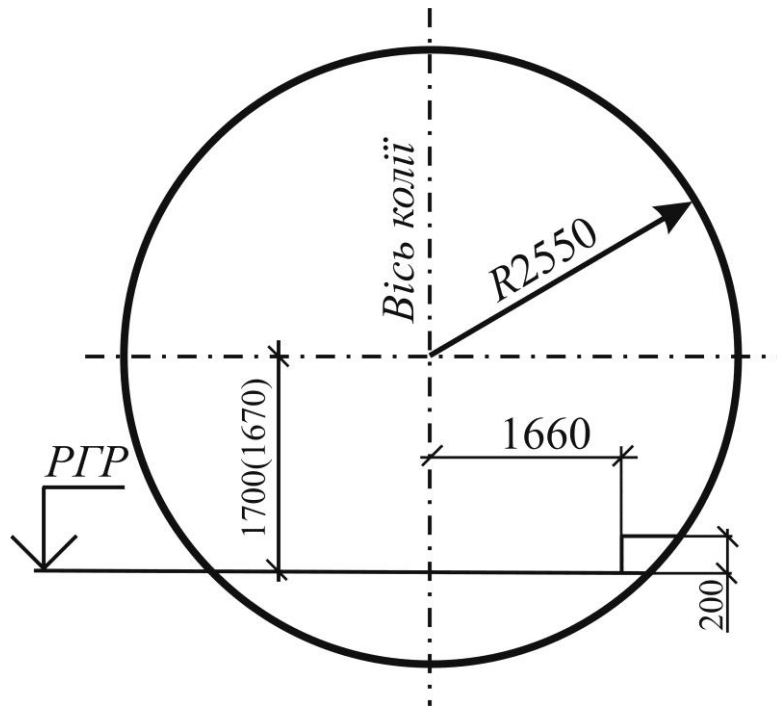


Рис. 4.5. Габарит наближення будівель для перегінного тунелю

При кресленні обраного варіанта слід урахувати особливості верхньої будови колії перегінного тунелю метрополітену (рис. 4.6).

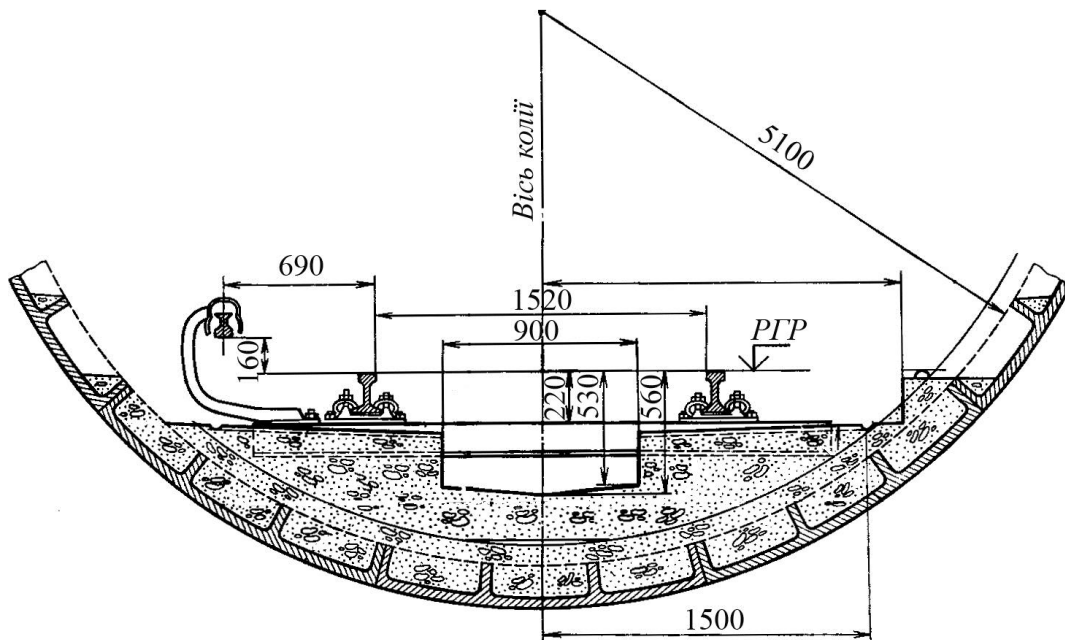


Рис. 4.6. Верхня будова колії перегінного тунелю метрополітену

Після побудови габариту наближення будівель проводиться конструювання внутрішнього обрису оправи. Для цього навколо габариту з найменшим радіусом, який дозволяє описати габарит, будують коло. Внутрішній обрис тунельної оправи окреслюють відносно основних точок заданого габариту з таким розрахунком, щоб між її контуром та точками габариту залишались зазори на випадок осідання або неправильної технології виконання робіт. Величини зазорів Δ повинні становити для всіх верхніх точок габариту $\Delta=10\dots25$ см, для нижніх – $\Delta=10\dots15$ см (більше значення величини зазору приймається в слабких породах).

Внутрішній обрис перегінного тунелю збігається з обрисом габариту наближення будівель.

Внутрішній обрис для залізничних тунелів окреслюють із урахуванням зазорів (рис. 4.7).

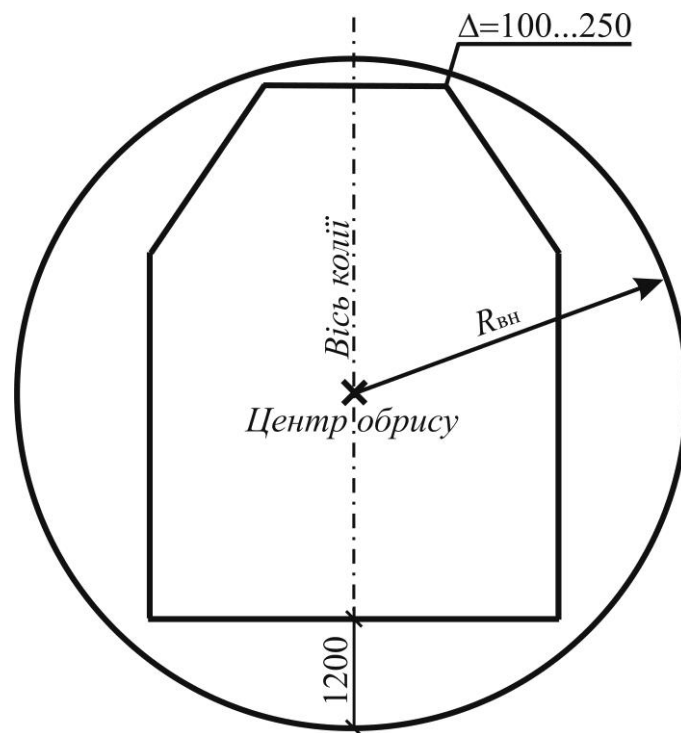


Рис. 4.7. Побудова внутрішнього обрису для залізничного одноколійного тунелю

Нижній простір висотою до 1,2...1,4 м проєктується для залізничного тунелю для розміщення в ньому верхньої будови колії та улаштування водовідвідного лотка. Для двоколійного тунелю внутрішній обрис будується таким самим способом.

Внутрішній обрис для автошляхових тунелів також окреслюють із урахуванням зазорів (рис. 4.8).

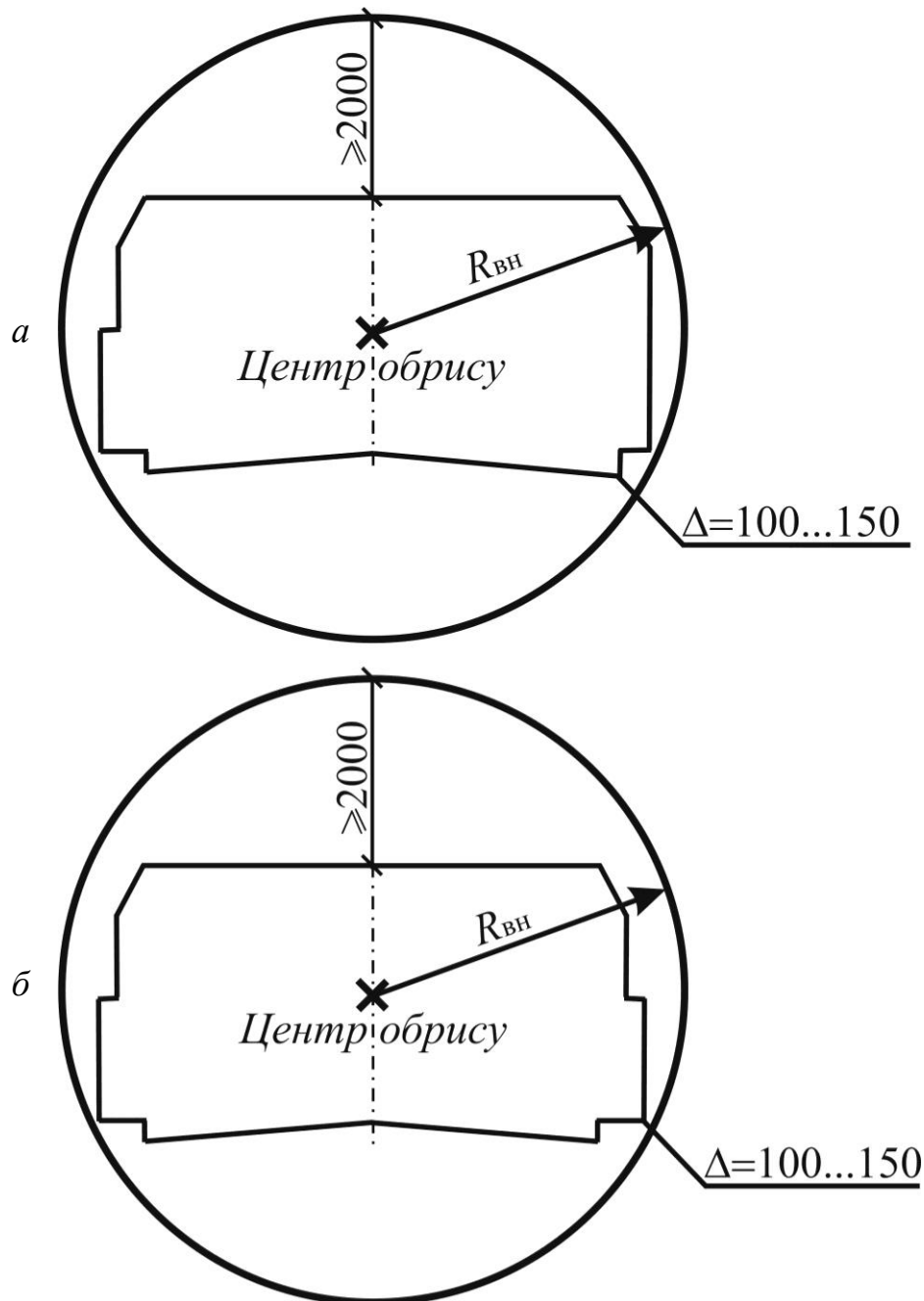


Рис. 4.8. Побудова внутрішнього обрису для автошляхового тунелю:
a – з одним тротуаром; *б* – з двома тротуарами

Верхній простір висотою більше 2 м проєктується для автошляхового тунелю для його подальшої нормальної вентиляції.

Якщо внутрішній обрис у випадку габариту з одним тротуаром перехрещується з нижніми точками габариту, центр внутрішнього обрису слід пересунути по горизонталі на 0,3...0,5 м в бік тротуару. Така ситуація виникає тому, що габарит з одним тротуаром на відміну від габариту з двома тротуарами є несиметричним стосовно вертикальної осі.

4.2 Конструктивні рішення чавунних тюбінгових оправ

Конструктивні рішення чавунних тюбінгових оправ відрізняються кількістю типорозмірів елементів, що складають кільце [3].

Кільце оправи без плоского лотка має три типорозміри тюбінгів:

- нормальний «н», обидва поздовжніх борти якого спрямовані радіально;
- замковий «з» клиноподібної форми;
- суміжний «с», у якого один поздовжній борт, що примикає до замкового тюбінга, скошений.

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). 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.

Кільце оправи з плоским лотком включає чотири типорозміри елементів:

- нормальний «н»;
- замковий «з»;
- суміжний «с»;
- лотковий блок «л», який виконано із залізобетону, а плоска внутрішня поверхня якого покрита чавунною ребристою плитою, зв'язаною з арматурою блока.

Перевагою цієї оправи є те, що вона не потребує перев'язки поздовжніх стиків (для забезпечення перев'язки в склад кільця включають додатковий половинний тюбінг «п» («н/2»)). Недоліками оправ з плоским лотком є велика кількість типорозмірів, складність герметизації стиків між лотковим і нормальним блоком через різну точність виготовлення залізобетонних і чавунних елементів.

Тюбінги чавунної оправи з'єднуються між собою в поздовжніх і кільцевих бортах болтами зі сталі марок СТ3 або СТ5 діаметром 20...45 мм. Для полегшення монтажу діаметри болтових отворів приймаються на 3...4 мм більшими діаметра болтів. Болтові отвори в кільцевих бортах розміщують

в один ряд по середній лінії з однаковим кроком. У поздовжніх бортах болтові отвори розміщують у два ряди. Максимальна довжина чавунних тюбінгів (по зовнішній хорді) не повинна перевищувати 2 м (рис. 4.8).

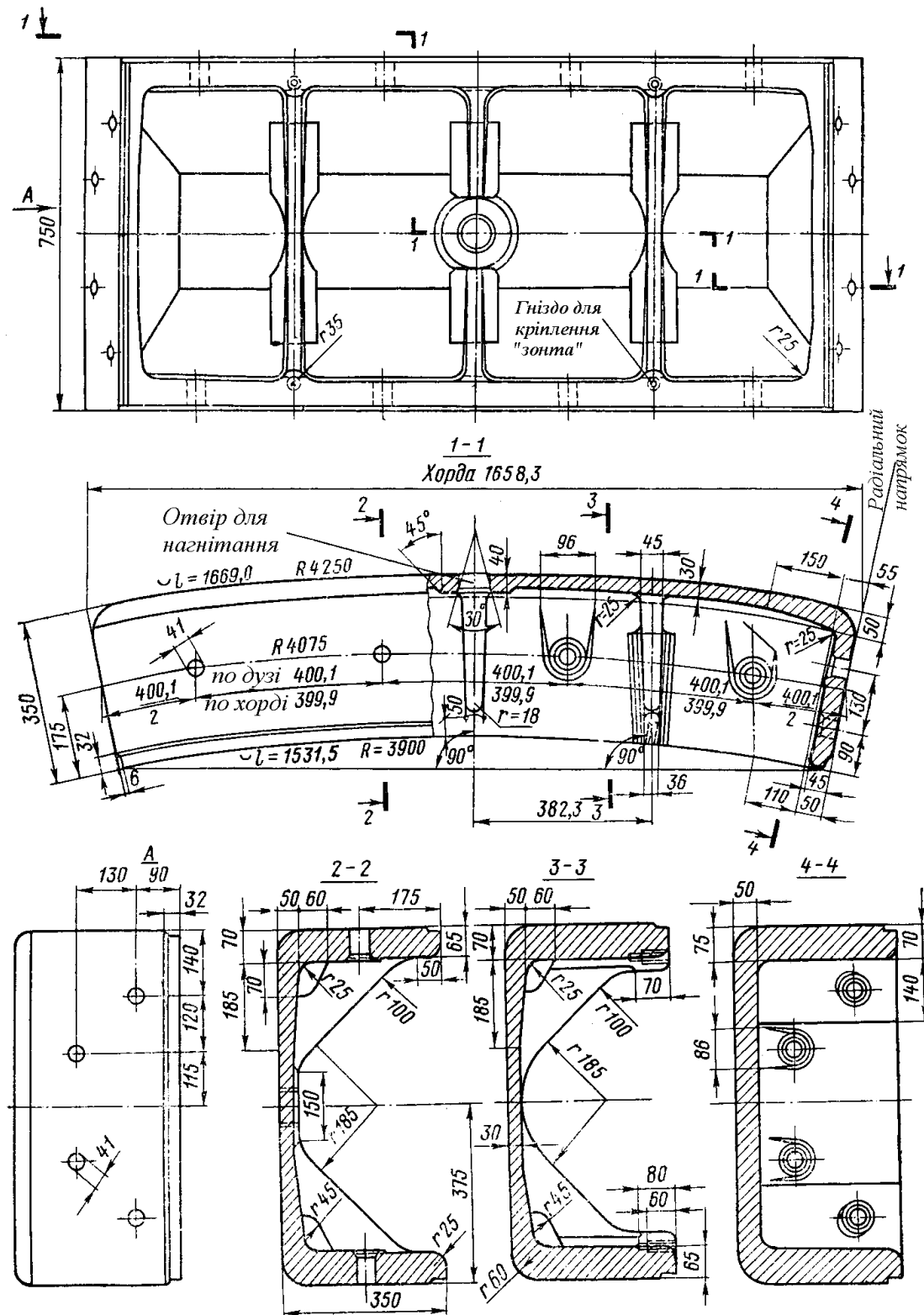


Рис. 4.8. Конструкція типового чавунного тюбінга

4.3 Конструктивні рішення залізобетонних блочних і тюбінгових оправ

Конструктивні рішення збірних залізобетонних кругових оправ розрізняють:

- за типом поперечного перерізу елементів (тюбінги, блоки ребристого і суцільного перерізу);
- типом поздовжніх стиків у кільці (плоскі стики з болтовими зв'язками, монтажними шпильками, трубчатою вставкою; шарнірні стики циліндричні опукло-ввігнуті або плоскі зі зменшеною площиною обпирання та пружною прокладкою);
- характером зв'язку між суміжними кільцями.

Залізобетонні тюбінгові оправы без плоского лотка за принциповим конструктивним рішенням аналогічні чавунним: у кільце оправы входять три типорозміри тюбінгів – «н», «з», «с».

Для виключення недоліків, пов'язаних із відсутністю горизонтального лотка тунелю, у склад кільця входять залізобетонний лотковий блок «л» суцільного поперечного перерізу або ребристого із зовнішньої сторони, а для забезпечення перев'язки поздовжніх стиків – половинний тюбінг «п» («н/2»).

Оправы з ребристих блоків відрізняються від тюбінгових більшою товщиною спинки й бортів кожного елемента кільця та відсутністю болтових зв'язків у поздовжніх стиках. Кільця можуть мати три типорозміри ребристих блоків («н», «з», «с»), частіше – чотири («н», «з», «с», «л») за відсутності перев'язки поздовжніх стиків або п'ять («н», «з», «с», «л», «п»), якщо оправу монтують з перев'язкою поздовжніх стиків.

Відсутність болтових зв'язків у поздовжніх стиках знижує жорсткість кільця, але підвищує тріщиностійкість і водонепроникність оправы. Якщо між кільцями передбачені болтові зв'язки, то всі поздовжні стики роблять плоскими з монтажними шпильками (між блоками «л», «н», «з», «п») або з трубчатим вкладишем (між блоками «з» і «с»).

В оправах, де болтові зв'язки між кільцями замінені на монтажні шпильки або не передбачені зв'язки, поздовжні стики виконують циліндричними опукло-ввігнутими або плоскими, але зі зменшеною висотою опорних площадок. У тому і в іншому випадках стик може розглядатися як шарнірний.

Зв'язок між кільцями підвищує жорсткість оправы як труби, що особливо важливо на монтажній стадії. Жорсткість кільця оправы забезпечується порушенням болтових зв'язків у поздовжніх стиках між елементами (оправа

із залізобетонних тубінгів). У таких самих геологічних умовах за менших діаметрів тунелю вимоги до жорсткості оправи знижуються. У поздовжніх стиках між елементами болтові зв'язки не ставлять навіть в оправах із залізобетонних тубінгів (рис. 4.9), замінюючи їх на монтажні шпильки.

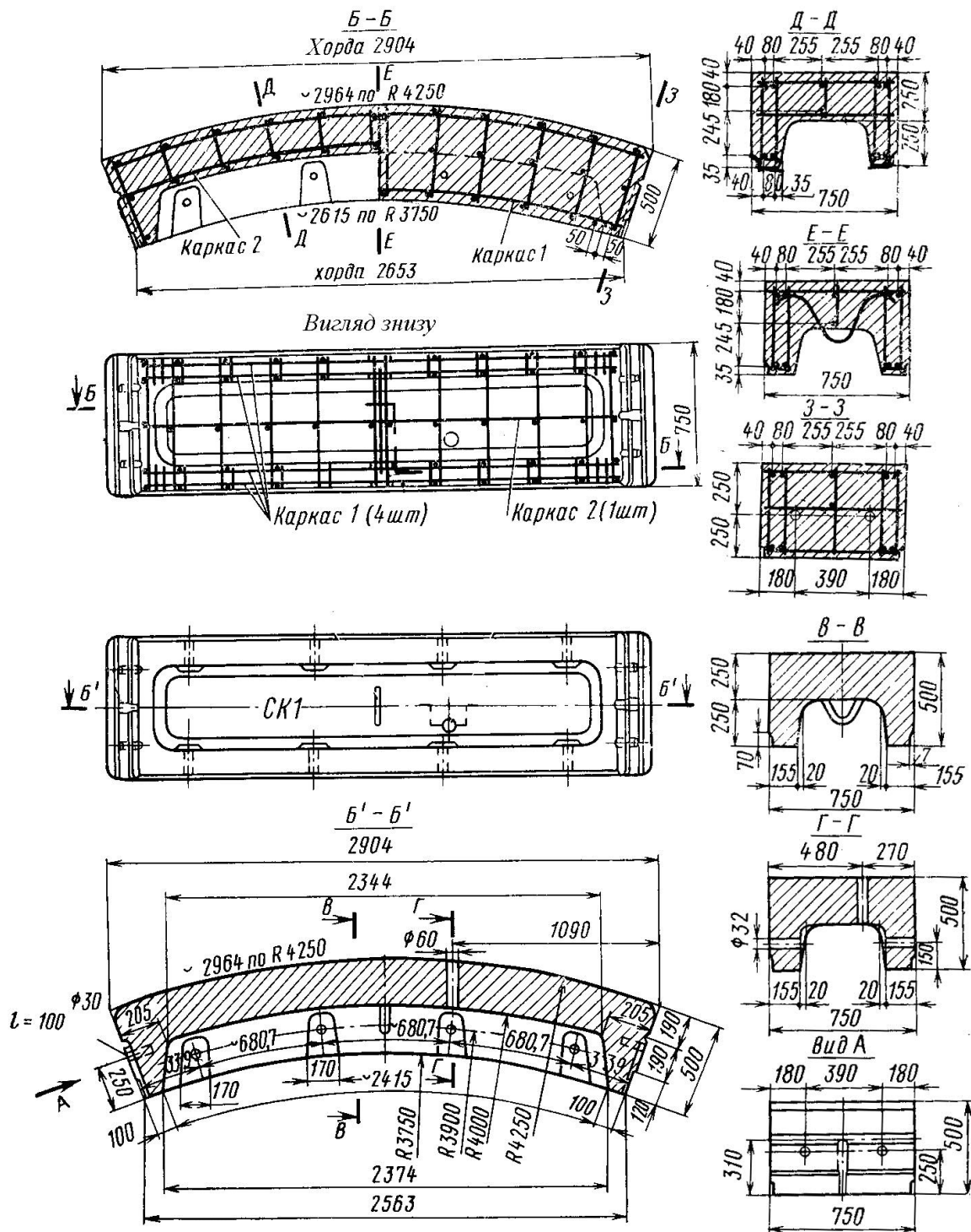


Рис. 4.9. Конструкція типового залізобетонного тубінга

Конструктивні рішення оправ з блоків суцільного перерізу відрізняються за характером зв'язків між кільцями, типом поздовжніх стиків, кількістю типорозмірів блоків у кільці. Кільце оправи з блоків з болтовими сполученнями між кільцями має три («н», «з», «с»), чотири («н», «з», «с», «л») або п'ять («л», «н», «з», «п», «с») типорозмірів блоків.

Кільце оправи з блоків з монтажними шпильками між кільцями складається з блоків трьох типорозмірів: лоткового «л», нормальних «н», замкових вкладишів «в». Вкладиші (2-3 по ширині кільця) при замиканні кільця заводять у зазор з торця. Поздовжні стики між блоками циліндричні опукло-ввігнуті з монтажними шпильками. Для встановлення шпильок по кільцевих стиках у кожному блоці (окрім лоткового і вкладишів) передбачені ніші.

Перевагою цієї конструкції є те, що шпильки дозволяють монтувати верхню частину кільця без висувних балок, що підтримують оправу, але припускають деяку деформацію кільця без взаємодії із сусідніми через різницю в діаметрах отвору і шпильок (3...4 мм). Завдяки цьому, а також шарнірності поздовжніх стиків, кільце оправи являє собою багатошарнірну систему, що покращує його статичну роботу під навантаженням. Недоліки: послаблення перерізу блока нішами; можливість появи тріщин у місцях розташування монтажних шпильок між кільцями в разі значних деформацій кільця. Кільце оправи з блоків зі шпонкою між кільцями для щитової проходки має три («н», «з», «с») або чотири («н», «з», «с», «л») типорозміри блоків, а для безщитової (еректорної) проходки – один («н») або два («л», «н»). За відсутності замкового блока замикання кільця забезпечується перебором породи над замковою частиною оправи на 15...20 см. Поздовжні стики між блоками – плоскі з циліндричною шпонкою із затверділого піщано-цементного розчину, що нагнітається в циліндричний паз після монтажу кільця.

Найпоширенішою у вітчизняній практиці тунеле- і метробудування є оправа з блоків без зв'язків між кільцями з циліндричними опукло-ввігнутими стиками, що дістала назву уніфікована. Кільце оправи має три типорозміри блоків: лотковий «л», нормальні «н», вкладиші «в». Завдяки шарнірності стиків і відсутності зв'язків між кільцями оправа має високу деформативність, що покращує її статичну роботу під навантаженням. Недоліки оправи теж впливають з її високої деформативності: необхідність підклинки блоків у породу і оболонки щита під час монтажу для забезпечення необхідної геометрії кільця та можливість отримання неприпустимої еліптичності кільця до моменту твердіння розчину.

4.4 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.

Бетонні і залізобетонні несучі конструкції слід виконувати із важких бетонів відповідно до вимог [4; 5]. Мінімальний клас бетону за міцністю на стиск призначається не нижче наведених у табл. 1 Додатку. Чавунні тюбінги відливають з чавуну марки СЧ-21-40 (табл. 2 Додатку).

4.4.1 Визначення товщини елемента оправи

Для визначення товщини блоків і висоти бортів тюбінгів слід скористатися емпіричною формулою:

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_{\text{вн}}^2}{f}}, \text{ см} \quad (4.1)$$

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

$n=14$ – для монолітно-пресованого бетону класу С25/30 (В30);
 $n=13$ – для монолітно-пресованого бетону класу С32/40 (В40);
 $n=12$ – для залізобетонних тюбінгів з бетону класу С25/30 (В30);
 $n=10$ – для залізобетонних блоків з бетону класу С25/30 (В30);
 $n=9$ – для залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу С32/40 (В40);
 $n=7,5$ – для чавунних тюбінгів і залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу вище С40/50 (В50).

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.

4.4.2 Визначення ширини кільця та перевірка маси елемента

Ширина кільця визначає (якщо кількість елементів у кільці фіксована) масу елемента, а отже, і вантажопідйомність механізму для монтажу оправи. Але чим більше ширина кільця, тим менше цей показник і тим менші витрати на будівництво тунелю.

З урахуванням викладених вимог ширину кільця можна призначати:

1) для тунелів відносно невеликих діаметрів (D_{BH} до 4,5 м) у нестійких породах в межах 0,6...1,0 м, у стійких – 0,75...1,25 м;

2) для тунелів середніх і великих діаметрів ($D_{BH} > 5,0$ м) у нестійких породах у межах 0,5...1,0 м, у стійких – 0,75...1,0 м. При цьому чим слабкіше порода і чим більше діаметр тунелю, тим менша ширина кільця.

В обмежених умовах тунелю вантажопідйомність також обмежена. За даними практики маса елемента не повинна перевищувати 1,0...1,5 т для тунелів діаметром $D_{BH} < 4,5$ м; 1,5...2,0 т при $4,5 < D_{BH} < 6,5$ м; 2,5...3,0 т при $D_{BH} > 6,5$ м.

4.4.3 Визначення кількості елементів у кільці

Загальну кількість елементів у кільці можна прийняти рівною:

5 елементів – при $D_{BH} = 3,6...4,0$ м;

7 елементів – при $D_{BH} = 4,5...6,0$ м;

9 елементів – при $D_{BH} = 6,5...8,0$ м;

11 елементів – при $D_{BH} = 8,5...9,5$ м.

Кількість елементів у кільці для зниження трудовитрат на монтаж і гідроізоляцію поздовжніх стиків повинна бути по можливості мінімальною. Але маса елемента не повинна перевищувати 1,0...3,0 т, а довжина дуги по зовнішній стороні повинна бути не більше 2,0...3,0 м. Таку перевірку слід провести після розбивки кільця на елементи.

4.4.4 Розбивка кільця на елементи та перев'язка стиків

Завданням розбивки кільця на елементи є визначення розмірів та положення всіх типорозмірів елементів у кільці. Її можна виконувати двома шляхами: а) на основі пошуку кутів елементів (α) та б) на основі пошуку довжини елементів по дузі (l). Розбивку кільця на елементи виконують, виходячи із таких міркувань:

1. Усі нормальні елементи («н») мають однаковий центральний кут α_n .

2. Центральний кут замкового елемента («з») α_z приймається рівним 6...10°. Якщо розрахунок проводиться в довжинах, то довжину по дузі елемента («з») приймають рівною $l_z = 0,3...0,5$ м.

3. Для спрощення побудов центральний кут лоткового елемента («л») α_l можна приймати рівним центральному куту нормального елемента («н») α_n . Якщо розрахунок проводиться в довжинах, то плоску внутрішню поверхню (плоский лоток) елемента («л») l_l приймають рівною 2,2...2,4 м.

4. Сума центральних кутів суміжного («с») α_c та половини замкового елемента α_3 складає центральний кут нормального елемента («н») α_n , тобто

$$\alpha_n = \alpha_c + \frac{\alpha_3}{2}. \quad (4.2)$$

5. Перед розбивкою кільця на елементи, залежно від діаметра оправи, обирають кількість елементів у кільці згідно з п. 4.4.1 та перевіряють довжину та масу нормального елемента l_n . Якщо довжина та маса відповідає вимогам, задаються кутом замкового елемента α_3 . Для випадку кільця без лоткового елемента визначають кут суміжного α_c за формулою (4.2) і за допомогою транспортиру визначають всі кути елементів на кресленні (рис. 4.10).

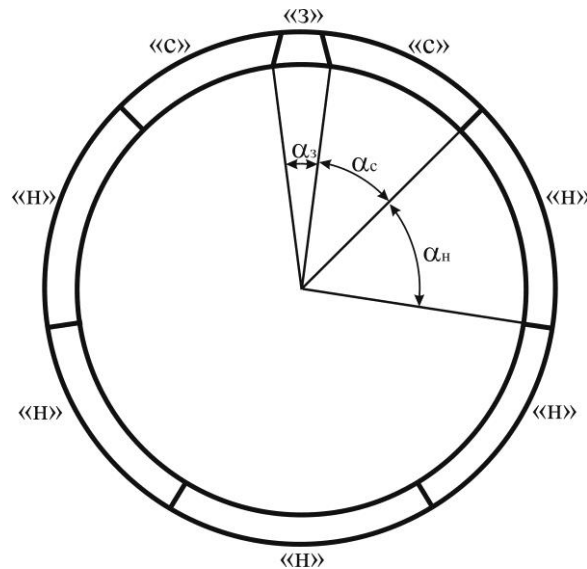


Рис. 4.10. Розбивка кільця без лоткового блока на елементи

6. Перев'язку поздовжніх стиків проводять таким чином, що суміжні кільця повертаються одне відносно одного на половину кута нормального елемента $\frac{\alpha_n}{2}$.

7. Якщо кільце має лотковий елемент, тоді для перев'язки поздовжніх стиків у кільце вводять половинні елементи «п» ($\alpha_n/2$), які встановлюють то ліворуч, то праворуч від лоткового. Центральний кут такого елемента $\frac{\alpha_n}{2}$ визначають

$$\frac{\alpha_n}{2} = \frac{360^\circ - \alpha_{\text{л}}}{n}, \quad (4.3)$$

де n – кількість половин нормальних елементів ($\alpha_n/2$).

Розбивку кільця на кресленні починають після того, як вже намічено лотковий елемент, і відкладають кількість половин від нормального елемента ($\langle\text{н}\rangle/2$) на основі кута, який визначено за формулою (4.3) (рис. 4.11).

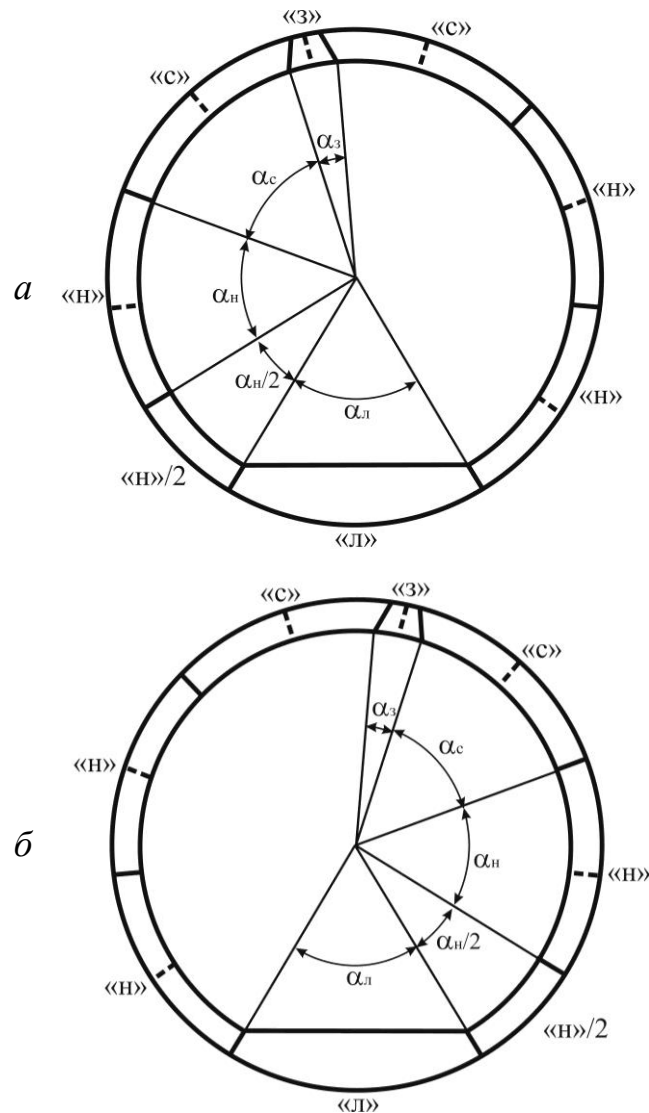


Рис. 4.11. Розбивка кільця з лотковим блоком на елементи (а) та кільце після перев'язки (б)

Потім симетрично в обидва боки відкладаються значення кутів нормального елемента α_n шляхом подвоєння кута $\frac{\alpha_n}{2}$. Верхню частину оправи розбивають на два суміжні («с») та один замковий («з») елементи, причому повинно виконуватися рівняння (4.2). Якщо перев'язку в конструкції кільця з лотковим елементом не роблять, то необхідність в половинному елементі відпадає.

8. Кути елементів визначають з точністю до 1'.

5 Техніко-економічне обґрунтування варіантів оправи

Після визначення параметрів трьох варіантів оправи виконується їх техніко-економічне обґрунтування з метою встановлення найбільш економічного за трудовитратами варіанта, 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:

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

$$V_p = \frac{\pi D_{3H}^2}{4}, \quad (5.1)$$

де D_{3H} – зовнішній діаметр оправи.

5.2. Навантаження породи (м^3):

$$V_H = k_p V_p, \quad (5.2)$$

де k_p – коефіцієнт розрихлення, значення якого можна отримати із табл. 3 Додатку.

5.3. Монтаж залізобетонної оправи (м^3):

$$V_K = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{3H}^2 - D_{BH}^2), \quad (5.3)$$

де λ – 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:

$$G_K = \gamma V_K l, \quad (5.4)$$

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

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

$$G_K = (0,24 \dots 0,30) \gamma \frac{\pi}{4} (D_{3H}^2 - D_{BH}^2), \quad (5.5)$$

де γ – питома вага чавуну, її значення можна отримати із табл. 2 Додатка.

У формулі мінімальне значення коефіцієнта необхідно приймати при $D_{3H} > 8,0 \text{ м}$, максимальне – при $D_{3H} < 8,0 \text{ м}$.

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

5.4. Нагнітання за оправу (m^2):

$$S_K = L_K \cdot 1 = \pi D_{3H}, \quad (5.6)$$

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

5.5. Чеканення швів (на один метр тунелю):

$$L_{ч.ш.} = L_{BH} + n \cdot 1 = \pi D_{BH} + n, \quad (5.7)$$

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

Розрахунок трудовитрат заноситься у таблицю (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Розрахунок трудовитрат варіанта № ____

№ пор.	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, люд.-год	
					На одиницю	На об'єм
1	Розробка породи		m^3			
2	Навантаження породи		m^3			
3	Монтаж оправы		m^3 або (т)			
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу		m^2			
5	Чеканення швів		м			
					Всього:	

Примітка. Шифри та значення трудовитрат, які потрібні на виконання робіт зі спорудження одного метра тунелю, наведені в табл. 4-7 Додатку.

Після розрахунку проводиться порівняння загальних трудовитрат за трьома варіантами і обирається найбільш економічний варіант. Якщо різниця у вартості двох варіантів не перевищує 10 % (межу точності економічних розрахунків), то їх можна вважати рівноцінними й рішення приймається на основі технічних міркувань залежно від типу й призначення тунелю. Для прийнятого варіанта оправы виконують статичний розрахунок і детально розробляють конструкцію.

6 Статичний розрахунок оправи тунелю

6.1 Визначення навантажень

Статичний розрахунок оправи слід проводити для можливих несприятливих сполучень основних та додаткових навантажень [4].

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

- 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) навантаження від руху 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 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.

6.1. 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:

$$q_B^H = \sum \gamma_i h_i, \quad (6.1)$$

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

6.2. Горизонтальний тиск у цих породах є активним, і його нормативна середня розрахункова інтенсивність складає за результатами досліджень для глинястих порід не менш ніж

$$q_{\Gamma}^H = (0,8...0,9)q_B^H. \quad (6.2)$$

На рівні замка оправи горизонтальний тиск буде дорівнювати

$$q_{\Gamma}^3 = (0,8...0,9)(q_B^H - \gamma R_{3H}), \quad (6.3)$$

а на рівні лотка

$$q_{\Gamma}^L = (0,8...0,9)(q_B^H + \gamma R_{3H}), \quad (6.4)$$

де R_{3H} – зовнішній радіус оправи; γ – питома вага породи.

6.3. Активний горизонтальний тиск у незв'язних породах на рівні замка оправи потрібно визначати за формулою:

$$q_{\Gamma}^3 = q_B^H tg^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (6.5)$$

а на рівні лотка оправи –

$$q_{\Gamma}^L = (q_B^H + 2\gamma R_{3H})tg^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (6.6)$$

де q_B^H – вертикальний гірський тиск (нормативне значення); φ – кут внутрішнього тертя породи.

Для визначення питомої ваги і уявного кута внутрішнього тертя породи слід користуватися даними табл. 8 Додатка.

6.4. Для порід, які наведені в п. 1-3, інтенсивність реакції породи, яка зрівноважує інтенсивність вертикального гірського тиску, власної ваги оправи і виштовхувальної сили (тільки у зволжених породах), знаходять як:

$$P = q_B^P + \pi g - 0,5\pi R_{3H}, \quad (6.7)$$

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

У сухих породах або водонепроникних шарах остання складова у формулі (6.7) відсутня.

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

$$q_B^H = \gamma h_1, \quad (6.8)$$

$$h_1 = \frac{L}{2f}, \quad (6.9)$$

$$L = D_{3H} + 2D_{3H} \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (6.10)$$

f – коефіцієнт міцності породи; h_1 і L – відповідно висота і ширина склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яконовим (рис. 6.1).

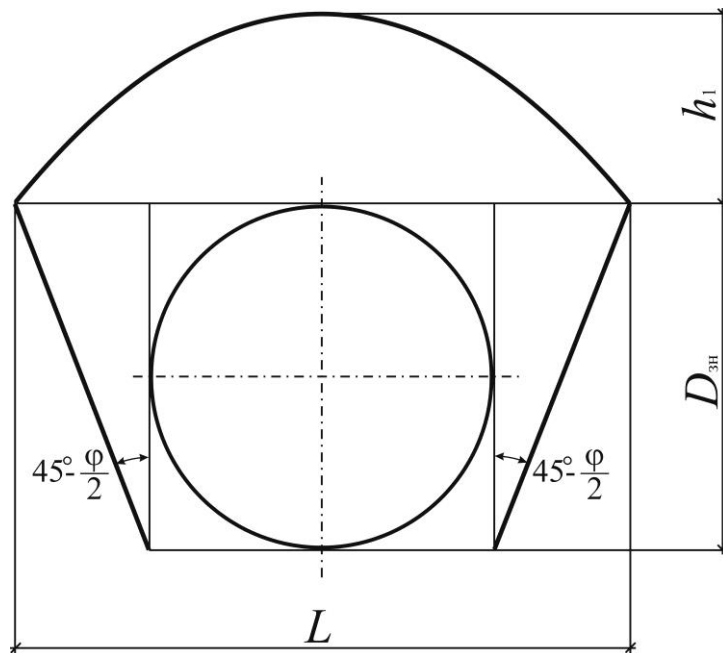


Рис. 6.1. Схема для визначення параметрів склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яконовим

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

$$q_B^p = nq_B^H, \quad (6.11)$$

$$q_\Gamma^p = nq_\Gamma^H. \quad (6.12)$$

Коефіцієнти перевантаження для різних видів навантаження можна визначити за табл. 9 Додатка.

6.7. Горизонтальний тиск у породах, наведених у п. 4, потрібно розглядати як пасивний – у вигляді пружного відпору. Коефіцієнт пружного відпору k для різних порід можна визначити за табл. 3 Додатка.

6.8. Нормативна власна вага оправи визначається як:

$$p^H = \frac{G_K}{2\pi r}, \quad (6.13)$$

де G_K – маса кільця оправи (приймається за об'ємом, який визначено під час проєктування варіантів); $r = \frac{R_{BH} + R_{ZH}}{2}$ – середній радіус оправи.

Розрахункове значення власної ваги оправи визначається множенням на коефіцієнт перевантаження $p^P = np^H$.

6.9. Питому вагу зволжених порід γ' при підрахунку величини гірського тиску потрібно визначати з урахуванням дії води, тобто $\gamma' = \gamma - \gamma_B$ (γ_B – питома вага води, $\gamma_B = 10 \text{ кН/м}^3$), а гідростатичний тиск підземних вод необхідно розглядати як самостійне основне навантаження, що діє на водонепроникну оправу в експлуатаційній стадії.

6.10. У разі застосування водопроникних оправ із монолітно-пресованого бетону чи залізобетонних блоків передбачається, що гідростатичний тиск ґрунтових вод може сприймається внутрішньою залізобетонною суцільною оболонкою, яка підтримує обклеювальну гідроізоляцію. У зволжених породах, де використовується водонепроникна оправа, враховується також тиск води, який визначається як $q_B = 0,9\gamma_B H_B$ (H_B – розрахункова висота горизонту води над склепінням тунелю, м).

6.2 Розрахунок оправи як кільця, що вільно деформується

Під час розрахунку оправи в експлуатаційній стадії для випадку дії вертикального та активного горизонтального тиску породи оправа кругового перерізу розглядається як кільце, що вільно деформується під дією зовнішніх навантажень [3; 6].

Для цього методу розрахунку характерні такі припущення:

1. Оправа розглядається як система, що лінійно деформується.
2. При дії зовнішніх навантажень на оправу дотримуються принципу незалежності дії сил.

3. Жорсткість оправи постійна ($EI = \text{const}$).

Розрахункова схема оправи для методу кільця, що вільно деформується, є розрахунковою схемою методу сил (рис. 6.2).

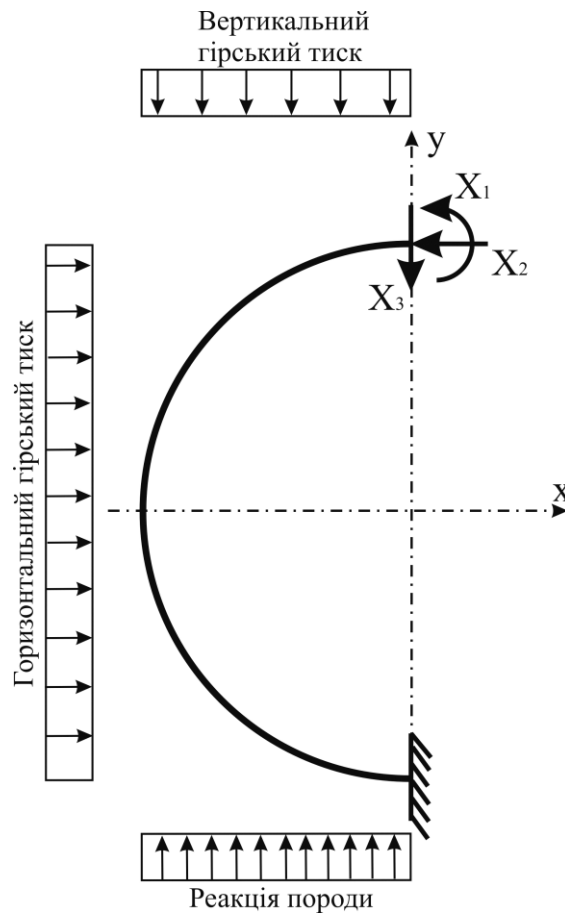


Рис. 6.2. Розрахункова схема для методу кільця, що вільно деформується

Канонічними рівняннями деформації такої системи є:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0, \quad (6.14)$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0. \quad (6.15)$$

Для спрощення цієї системи невідомі X_1 та X_2 (X_3 при симетричному навантаженні дорівнює нулю) переносяться на абсолютно жорстку консоль, тому $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$.

Система канонічних рівнянь набуває вигляду:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0, \quad (6.16)$$

$$\delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0. \quad (6.17)$$

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

$$M = M_p - X_2 r \cos \alpha = 0, \quad (6.18)$$

$$N = N_p + X_2 \cos \alpha = 0. \quad (6.19)$$

Визначити зусилля в перерізах оправи (на 1 м тунелю) від основних навантажень можна, користуючись розрахунковими формулами (табл. 6.1). Розрахунок за методом кільця, що вільно деформується, можна провести вручну або за допомогою файла Excel for Windows – **MKVD.xls**.

Таблиця 6.1

Визначення зусиль в оправі від зовнішніх навантажень

Кут нахилу перерізу α	Зусилля	Зовнішні навантаження		
		Власна вага оправи p^p	Вертикальний гірський тиск q_B^p	Тиск води q_B
0	M	$+0,5000 p^p R_{3H}^2$	$+0,2990 q_B^p R_{3H}^2$	$-0,2500 R_{3H}^3$
	N	$-0,5000 p^p R_{3H}$	$-0,1060 q_B^p R_{3H}$	$+0,7500 R_{3H}^2 + q_B R_{3H}$
45	M	$+0,1414 p^p R_{3H}^2$	$+0,0180 q_B^p R_{3H}^2$	$-0,0457 R_{3H}^3$
	N	$+0,2514 p^p R_{3H}$	$+0,4250 q_B^p R_{3H}$	$+0,5457 R_{3H}^2 + q_B R_{3H}$
90	M	$-0,5700 p^p R_{3H}^2$	$-0,3070 q_B^p R_{3H}^2$	$+0,2850 R_{3H}^3$
	N	$+1,5700 p^p R_{3H}$	$+1,000 q_B^p R_{3H}$	$+0,2150 R_{3H}^2 + q_B R_{3H}$
135	M	$-0,3117 p^p R_{3H}^2$	$-0,0891 q_B^p R_{3H}^2$	$+0,1558 R_{3H}^3$
	N	$+2,0188 p^p R_{3H}$	$+0,7821 q_B^p R_{3H}$	$+0,3442 R_{3H}^2 + q_B R_{3H}$
180	M	$+1,5000 p^p R_{3H}^2$	$+0,5870 q_B^p R_{3H}^2$	$-0,7500 R_{3H}^3$
	N	$+0,5000 p^p R_{3H}$	$+0,1060 q_B^p R_{3H}$	$+1,2500 R_{3H}^2 + q_B R_{3H}$

Визначення зусиль в оправі від зовнішніх навантажень

Кут нахилу перерізу α	Зусилля	Зовнішні навантаження		
		Горизонтальний гірський тиск на рівні замка q_{Γ}^3	Горизонтальний гірський тиск на рівні лотка $q_{\Gamma}^{\text{л}}$	Інтенсивність реакції породи P
0	M	$-0,2500 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}^2$	$-0,1050 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}^2$	$-0,0490 P R_{3\text{H}}^2$
	N	$+1,0000 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}$	$+0,3130 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}$	$+0,1060 P R_{3\text{H}}$
45	M	0	$-0,0031 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}^2$	$-0,0180 P R_{3\text{H}}^2$
	N	$+0,5000 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}$	$+0,2062 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}$	$+0,0750 P R_{3\text{H}}$
90	M	$+0,2500 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}^2$	$+0,1250 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}^2$	$+0,0570 P R_{3\text{H}}^2$
	N	0	0	0
135	M	0	$+0,0861 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}^2$	$+0,0891 P R_{3\text{H}}^2$
	N	$+0,5000 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}$	$+0,2938 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}$	$-0,2821 P R_{3\text{H}}$
180	M	$-0,2500 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}^2$	$+0,0210 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}^2$	$-0,3370 P R_{3\text{H}}^2$
	N	$+1,0000 q_{\Gamma}^3 R_{3\text{H}}$	$+0,6870 q_{\Gamma}^{\text{л}} R_{3\text{H}}$	$-0,1060 P R_{3\text{H}}$

6.3 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 [3; 6].

Суть методу О. Ю. Бугаєвої полягає в тому, що епюра пружного відпору передбачається відомою. Передбачувана епюра описується такими тригонометричними кривими, які виходять з нульових точок (рис. 6.3):

$$k\delta = -k\delta_A \cos 2\psi \text{ при } \frac{\pi}{4} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}; \quad (6.20)$$

$$k\delta = k\delta_A \sin^2 \psi + k\delta_B \cos^2 \psi \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \pi, \quad (6.21)$$

де k – коефіцієнт пружного відпору; δ – радіальне переміщення оправи в перерізі, нахиленому під кутом до вертикалі; δ_A , δ_B – невідомі переміщення перерізів A і B оправи відповідно (визначаються у процесі розрахунку).

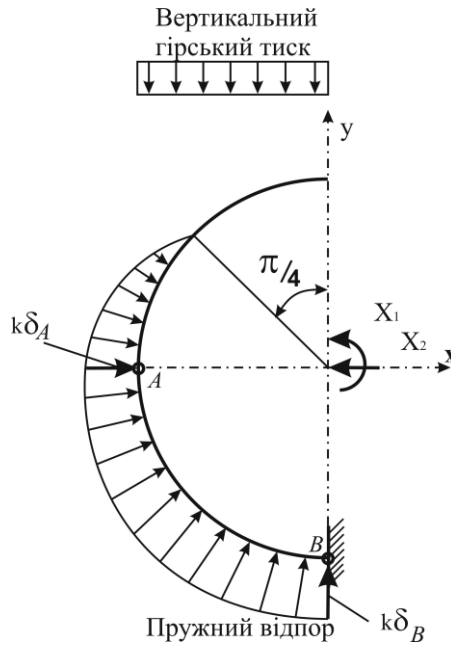


Рис. 6.3. Розрахункова схема для методу О. Ю. Бугасевої

Канонічними рівняннями деформації такої системи є такі:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0, \quad (6.22)$$

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

$$\Sigma Y = 0, \quad (6.23)$$

$$\delta_A = \delta_{A1}X_1 + \delta_{A2}X_2 + \Delta_{Ap}.$$

δ_{11} , δ_{22} – переміщення, δ_A , δ_B – невідомі переміщення перерізів А і В оправи відповідно, що знаходяться за допомогою інтегралів Мора. Кількість рівнянь у методі сил дорівнює кількості невідомих, в даному розрахунку крім X_1 , X_2 невідомими є δ_A і δ_B .

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

1. Зусилля в перерізах від гірського тиску:

$$M_q = q_B^p R_{3H} r [Am + B + Cn(1 + m)], \quad (6.24)$$

$$N_q = q_B^p R_{3H} r [Dm + F + Gn(1 + m)], \quad (6.25)$$

де r – осьовий радіус оправи; A, B, C, D, F, G, m, n – коефіцієнти (формули (6.26) і (6.27) й табл. 6.2).

$$m = 2 - \frac{R_{3H}}{r}; \quad (6.26)$$

$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{EI}{r^3 R_{3H} kb}}, \quad (6.27)$$

де EI – жорсткість оправи.

Таблиця 6.2

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

2. Зусилля в перерізах від власної ваги оправи:

$$M_p = p^p r^2 (A_1 + B_1 n), \quad (6.28)$$

$$N_p = p^p r (C_1 + D_1 n), \quad (6.29)$$

де p^p – власна вага оправи; A_1, B_1, C_1 і D_1 – коефіцієнти (табл. 6.3).

Таблиця 6.3

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

3. Зусилля в перерізах від тиску ґрунтових вод

$$M_B = -\gamma_B R_{3H}^2 r (A_2 + B_2 n); \quad (6.30)$$

$$N_B = \gamma_B R_{3H}^2 (C_2 + D_2 n) + \gamma_6 q_6 R_{3H}, \quad (6.31)$$

де γ_B – питома вага води; A_2 , B_2 , C_2 і D_2 – коефіцієнти (табл. 6.4).

Таблиця 6.4

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

Формулами (6.30) та (6.31) можна користуватись, якщо задовольняються такі умови:

$$\left[0,04167(1+m)q_B^p + 0,01308 \frac{r}{R_{3H}} p^p \right] > 0,06541\gamma_B R_{3H}, \quad (6.32)$$

$$\left\{ 1,5q_B^p + 4,7124 \frac{r}{R_{3H}} p^p - \left[0,0122(1+m)q_B^p + 0,03833 \frac{r}{R_{3H}} p^p \right] n \right\} > \gamma_B R_{3H} \left(\frac{3\pi}{4} - 0,01915n \right). \quad (6.33)$$

Повні зусилля знаходять як суму зусиль, визначених за наведеними вище формулами:

$$M = M_q + M_p + M_B, \quad (6.34)$$

$$N = N_q + N_p + N_B. \quad (6.35)$$

Розрахунок за методом О. Ю. Бугаєвої можна провести вручну або за допомогою файла Excel for Windows – **MOUB.xls**.

6.4 Перевірка оправи на міцність

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. У розрахунках кругових оправ найчастіше зустрічається перший випадок позацентрального стиснення, що відповідає великим ексцентриситетам. Розрахункові опори для матеріалів оправи наведені в табл. 2 Додатка.

6.4.1 Перевірка на міцність оправи з бетону

Розрахунок для оправи з бетону проводять за формулою для позацентрального стиску з малим ексцентриситетом ($e_0 < 0,225h$) [5]:

$$N \leq mR_b \frac{bh^2}{h + 2e_0}, \quad (6.36)$$

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

У випадку позацентрального стиску з великим ексцентриситетом ($e_0 \geq 0,225h$) слід користуватися формулою:

$$N \leq \frac{1,75mR_{bt}bh}{\left(6\frac{e_0}{h} - 1\right)}. \quad (6.37)$$

Якщо в ході перевірки з'ясується, що міцність перерізу недостатня, тобто права сторона формули менше за ліву, то слід змінити параметри конструкції оправи за рахунок збільшення товщини перерізу h або підвищення класу бетону. Якщо і це призводить до значного збільшення перерізу або перевірка знову не виконується, слід відмовитися від бетонної оправи і замінити її на залізобетонну або чавунну.

6.4.2 Перевірка на міцність елементів оправи із залізобетону

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 [5].

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 $\mu=1,5\dots3\%$, тобто площа поперечного перерізу арматури $A_s^{\text{сум}}$ повинна становити $1,5\dots3\%$ поперечного перерізу бетону A_b .

1. Визначення площі поперечного перерізу блока:

$$A_b = bh, \quad (6.38)$$

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

2. Попереднє визначення площі арматури:

$$A_s^{\text{сум}} = \mu A_b. \quad (6.39)$$

3. Площа поперечного перерізу одного стержня становить:

$$A_{1\text{ст}} = \pi r_{\text{ст}}^2, \quad (6.40)$$

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

4. Визначення кількості стержнів робочої арматури:

$$n = \frac{A_s^{\text{сум}}}{A_{1\text{ст}}}. \quad (6.41)$$

Кількість стержнів округлюється до **цілого парного значення**.

5. Фактична площа арматури становить:

$$A_s^{\text{факт}} = A_s + A'_s = n A_{1\text{ст}}. \quad (6.42)$$

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

$$A_s = A'_s = \frac{A_s^{\text{факт}}}{2}. \quad (6.43)$$

7. Визначення ексцентриситету нормальної сили e_0 відносно геометричної осі центру ваги перерізу елемента:

$$e_0 = \frac{M}{N}. \quad (6.44)$$

8. Перевірку блоків та тубінгів на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють у режимі позacentрового стиску:

$$N \cdot e \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'), \quad (6.45)$$

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 (рис. 6.4 і 6.5).

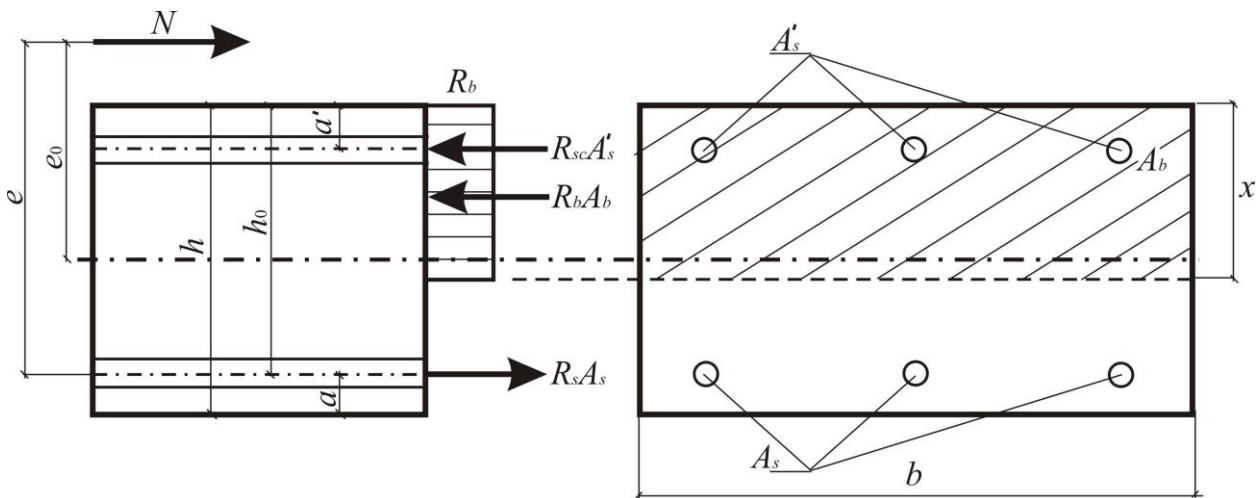


Рис. 6.4. Схема позначень для розрахунку на міцність блока

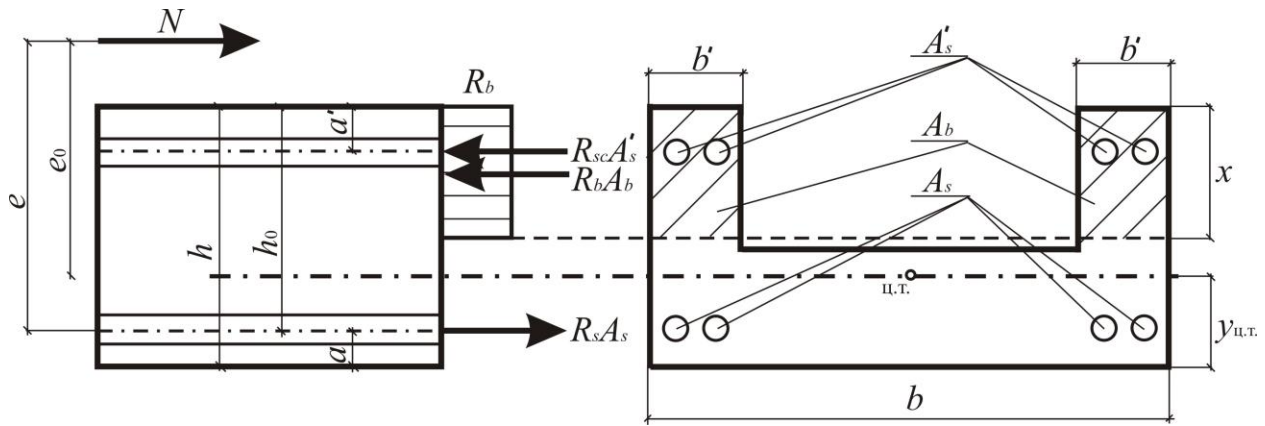


Рис. 6.5. Схема позначень для розрахунку на міцність тюбінга

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

9. Ширина стиснутої зони x визначається з формули

$$N + R_s A_s - R_{sc} A'_s = R_b b x. \quad (6.46)$$

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

$$x = \frac{N}{R_b b}. \quad (6.47)$$

10. Після проведеної перевірки залізобетонного елемента на міцність робиться висновок про її виконання. Якщо в ході перевірки з'ясується, що міцність перерізу недостатня, тобто права сторона формули більше за ліву, то слід змінити параметри конструкції оправи за рахунок збільшення товщини перерізу, підвищення класу бетону або збільшення відсотку армування. Якщо це призводить до значного збільшення перерізу або перевірка знову не виконується, слід відмовитися від залізобетонної оправи і замінити її на чавунну.

6.4.3 Перевірка оправи на міцність для елементів оправи із чавуну

Перевірку на міцність чавунних тюбінгів проводять за формулами:

$$\frac{N}{F} - \frac{My_1}{I} \leq R_c, \quad (6.48)$$

$$\frac{N}{F} + \frac{My_2}{I} \leq R_u, \quad (6.49)$$

де N та M – поздовжня сила та момент у перерізі, який перевіряється; F та I – площа поперечного перерізу та момент інерції чавунного тюбінгу; y_1 та y_2 – відстань від центру ваги перерізу до стиснутої та розтягнутої фібри тюбінгу відповідно; R_c та R_u – розрахункові опори чавуну на стиск та розтяг відповідно (див. табл. 2 Додатка).

7 Виконання робіт під час будівництва тунелю

7.1 Вибір прохідницького щита та визначення його параметрів

Вибираючи прохідницький щит, слід керуватися результатами аналізу інженерно-геологічних умов [3; 7]:

1. Для порід міцністю $f=0,3\ldots1,5$ – щит з екскаваторним робочим органом (рис. 7.1) або КТ-5,6.

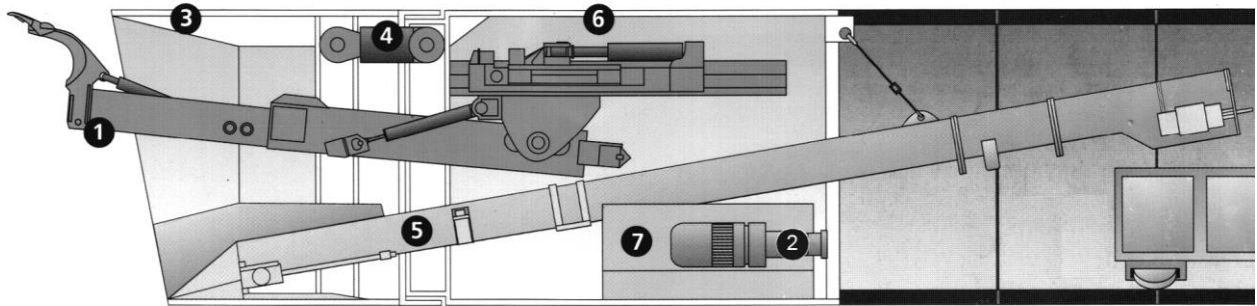


Рис. 7.1. Щит з екскаваторним робочим органом: 1 – екскаваторний робочий орган; 2 – щитовий гідроциліндр; 3 – ножове кільце; 4 – гідроциліндр управління; 5 – транспортер; 6 – оболонка щита; 7 – гідроагрегат

2. Для порід міцністю $f=0,3\ldots1,5$ – щит комбінованого типу (Mixshield) або з роторним органом; для порід з $f=1,5\ldots4,0$ – щит комбінованого типу з посиленням робочим органом (рис. 7.2).

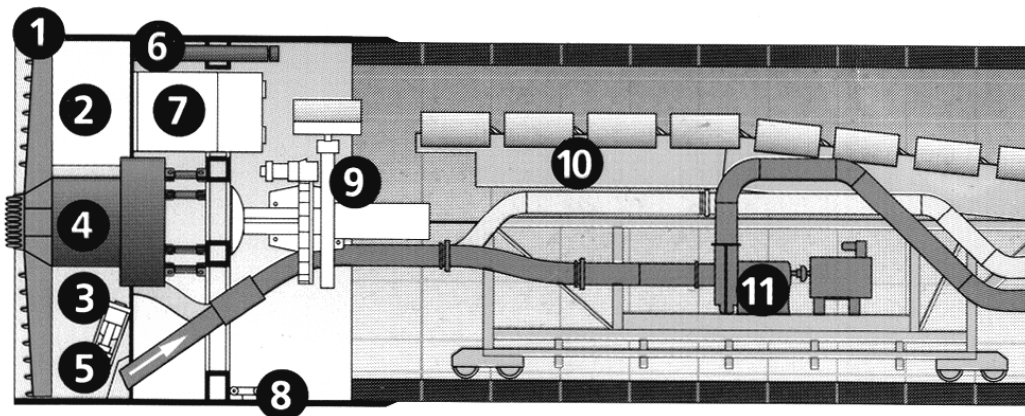


Рис. 7.2. Mixshield (Миксщит – щит комбінованого типу): 1 – планшайба; 2 – подушка з повітря; 3 – бентонітова суспензія; 4 – привод; 5 – каменеподрібнювач; 6 – щитовий гідроциліндр; 7 – кесонна камера; 8 – гідроциліндр управління; 9 – кріплення вкладальник; 10 – транспортер для елементів оправи; 11 – вузол розподілення бентонітової суспензії

3. Для порід міцністю $f=0,5\ldots2,5$ – щит із ґрунтовим привантаженням забою (ЕРВ-щит) (рис. 7.3).

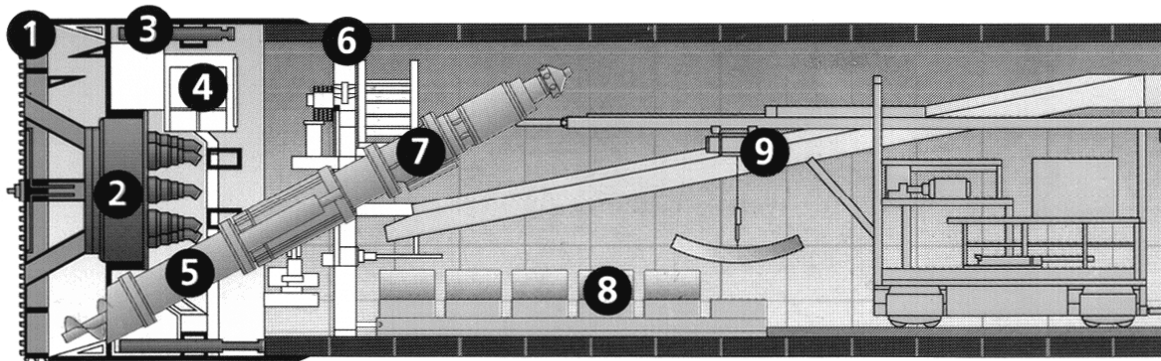


Рис. 7.3. ЕРВ-щит (earth pressure balance): 1 – планшайба; 2 – привод; 3 – щитовий гідроциліндр; 4 – кесонна камера; 5 – шнековий транспортер; 6 – кріпленнявкладальник; 7 – шнекова засувка; 8 – транспортер для елементів оправи; 9 – кран для елементів оправи

4. Для порід міцністю $f=2\ldots6$ (8) – щит із фрезерним робочим органом (рис. 7.4).

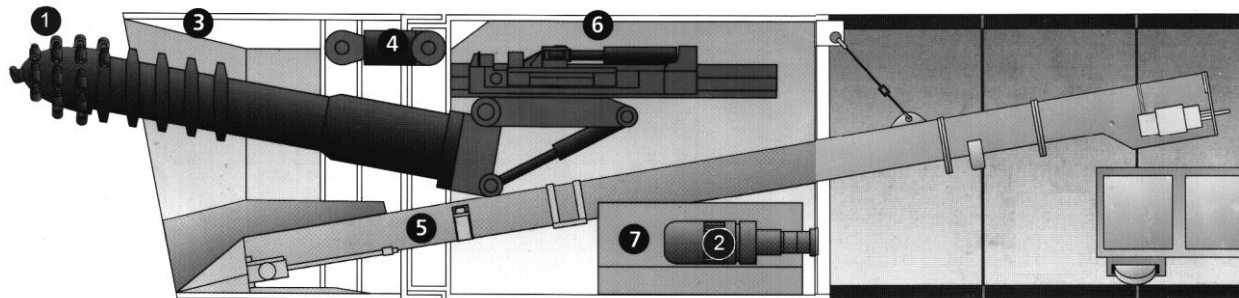


Рис. 7.4. Щит із фрезерним робочим органом: 1 – фрезерний робочий орган; 2 – щитовий гідроциліндр; 3 – ножове кільце; 4 – гідроциліндр управління; 5 – транспортер; 6 – оболонка щита; 7 – гідроагрегат

5. Для порід міцністю $f=6\ldots10$ – тунелепрохідницька машина (Tunnel Boring Machine) (рис. 7.5).

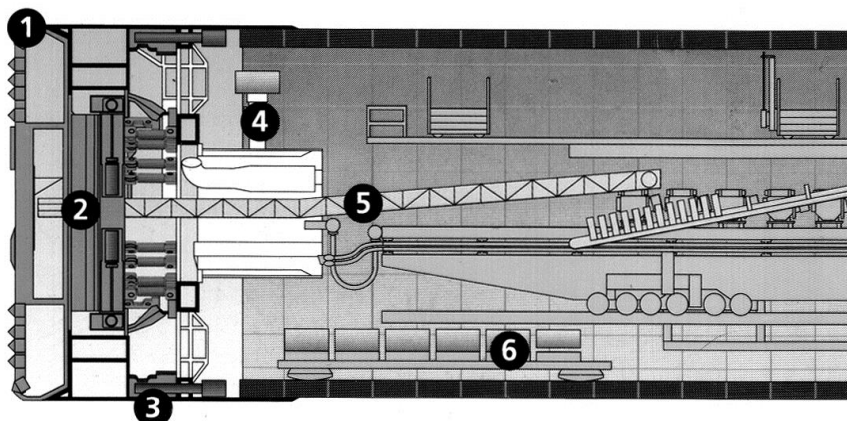


Рис. 7.5. Тунелепрохідницька машина (Tunnel Boring Machine): 1 – робочий орган із шарошками; 2 – привод; 3 – щитовий гідроциліндр; 4 – кріпленнявкладальник; 5 – транспортер I; 6 – тьюбінговий транспортер; 7 – силовий агрегат; 8 – транспортер II

Визначення основних розмірів щита виконують наступним чином.

1. Повна довжина щита $L_{\text{щ}}$ складає

$$L_{\text{щ}} = L_{\text{нч}} + L_{\text{ок}} + L_{\text{хо}}, \quad (7.1)$$

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

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

3. Довжину опорного кільця $L_{\text{ок}}$ знаходять з умови:

$$L_{\text{ок}} = 2b, \quad (7.2)$$

де b – ширина кільця оправи.

4. Довжина хвостової оболонки щита складає:

$$L_{\text{хо}} = l_1 + l_2 + l_3, \quad (7.3)$$

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.

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

Зовнішній діаметр щита $D_{\text{щ}}$ складає:

$$D_{\text{щ}} = 1,008D_{\text{зн}} + 2\delta, \quad (7.4)$$

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

6. Відношення $L_{\text{щ}}/D_{\text{щ}}$ 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.

7. Приблизна вага щита $G_{\text{щ}}$, кН:

$$G_{\text{щ}} = 85D_{\text{щ}}^2 - 250. \quad (7.5)$$

8. Величина необхідного повного зусилля щитових гідроциліндрів F :

$$F \geq (1,1...1,3)R, \quad (7.6)$$

де R – загальна сила граничного опору.

9. Загальну силу граничного опору R знаходять за формулою:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \quad (7.7)$$

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.

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

$$R_1 = Sq_{\Gamma}^p, \quad (7.8)$$

де S – площа поперечного перерізу щита за зовнішнім діаметром.

9.2. Опір щиту породи по зовнішній поверхні R_2 знаходять за формулою:

$$R_2 = f_{T1} \left[\left(q_B^p + P + q_{\Gamma}^3 + q_{\Gamma}^n \right) L_{\text{щ}} D_{\text{щ}} + G_{\text{щ}} \right] + 1000 \pi C L_{\text{щ}} D_{\text{щ}} + 0,05 f_{T1} k_D \Delta L_{\text{щ}} D_{\text{щ}}, \quad (7.9)$$

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, напівскельних та скельних ґрунтів $C=0$; для глинястих – $C=5 \dots 10$ кН/м³); $k_D = \frac{D_0}{D_{\text{щ}}} k$ – наведений кое-

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

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

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

$$R_3 = f_{T2}(1,2 \dots 2,2) G_K, \quad (7.10)$$

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

9.4. Опір щиту частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом R_4 :

$$R_4 = k_M f_{T2} G_{\text{щк}}, \quad (7.11)$$

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

10. Зусилля одного гідроциліндра дорівнює:

$$P_o = \frac{(1,3...1,5)F}{n}, \quad (7.12)$$

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

7.2 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, характеристики яких наведені в табл. 10 і 11 Додатка.

1. Визначаємо кількість вагонеток z_B^{3p} , які може потягти електровоз за умови зрушення:

$$z_B^{3p} (G + G_o) \leq \frac{1000 F_T}{\omega_{3p} + \omega_i + 110 a_{3p}} - P_c, \quad (7.13)$$

де $G = 0,9 \frac{V_{\text{ваг}} \gamma}{k_p}$ – маса породи у вагонетці, т; G_o – маса порожньої вагонетки, т; F_T – сила тяги електровоза, т; ω_{3p} – опір зрушення вагонеток з місця (дорівнює $\omega_{3p}=8...5$ кг/т при вазі породи $G=6...15$ т, $\omega_{3p}=11...9$ кг/т при вазі породи $G=3...5$ т та $\omega_{3p}=13...12$ кг/т при вазі породи $G=1...2$ т); ω_i – опір уклону перегінного тунелю (збігається зі значенням уклону в проміле); a_{3p} – опір руху потяга із ґрунтом при зрушенні з місця ($a_{3p}=$

0,04...0,05 м/с²); P_c – загальна маса електровоза, т.

Кількість отриманих вагонеток округлюється в меншу сторону.

2. Визначаємо кількість вагонеток $z_B^{\Gamma M}$, які може зупинити електровоз за умови руху вниз та гальмування:

$$z_B^{\Gamma M}(G + G_o) \leq \frac{F'_T}{110a_{\Gamma M} + \omega_i - \omega_{\Gamma M}} - P_c, \quad (7.14)$$

де $a_{\Gamma M}$ – коефіцієнт опору за умови руху вниз ($a_{\Gamma M}=0,39$ м/с², тобто при екстреному гальмуванні максимальний шлях потяга дорівнює 10 м при швидкості руху 10 км/год); $F'_T = 1000\psi P_c$ – скоригована сила тяги електровоза (ψ – коефіцієнт зчеплення ведучих коліс з рейками, який дорівнює 0,24); $\omega_{\Gamma M}$ – опір руху потяга із ґрунтом за умови руху вниз (дорівнює $\omega_{\Gamma M}=9...8$ кг/т при вазі породи $G=1...2$ т, $\omega_{\Gamma M}=7...6$ кг/т при вазі породи $G=3...5$ т та $\omega_{\Gamma M}=5...3$ кг/т при вазі породи $G=6...15$ т).

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

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

$$T_p = T_{руху} + T_M. \quad (7.15)$$

Тривалість руху потяга $T_{руху}$, год, визначається як:

$$T_{руху} = \frac{2L}{0,75V}, \quad (7.16)$$

де L – довжина відкатки, км, приймається рівною половині довжини тунелю; V – швидкість руху потяга, км/год (приймається за табл. 10 Додатка, але не більше 10 км/год із умови безпеки руху в підземних виробках).

Необхідна кількість електровозів по відкатці породи визначається за формулою

$$N = \frac{mn_0}{n_p}, \quad (7.17)$$

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

$n_0 = \frac{G_{\text{цикл}}}{ZG}$ ($G_{\text{цикл}}$ – маса породи, яка розробляється за цикл); n_p – можлива кількість рейсів одного потяга з породою за цикл $n_p = T/T_p$ (T – час, протягом якого проводиться розробка й відкатка породи (визначають за циклограмою)). Необхідна кількість електровозів округлюється в більшу сторону до цілого числа.

8 Побудова циклограми виконання робіт

Під час щитової проходки тунелів комплексна механізація робіт передбачає неперервне й одночасне виконання механізованим способом усіх основних і допоміжних операцій від забою до ділянки тунелю, яку вже споруджено.

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 й 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 з таких міркувань:

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

2. Усі операції циклу повинні бути узгоджені таким чином, щоб усі члени ланки протягом зміни були задіяні в технологічному процесі. Для перевірки кількість працівників у кожній годині 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 на відстані не ближче 10...15 м від хвостової оболонки щита.

4. Тривалість циклу всіх робіт необхідно приймати кратною числу години робочої зміни (табл. 8.1 і 8.2).

Таблиця 8.1

Приклад побудови циклограми (для розробки ґрунту за одну подачу робочого органа)

№	Назва роботи	Одиниця вимірювання	Об'єм роботи	Трудовитрати на одиницю, люд.-год	Трудовитрати на об'єм, люд.-год	Склад ланки, чоловік	Тривалість виконання роботи, год	1 зміна, год					
								1	2	3	4	5	6
1	Розробка і прибирання ґрунту	м ³	V_H	a_1	$V_H a_1$	n_1	$\frac{V_H a_1}{n_1}$	n_1					
2	Профілактичний огляд і переміщення щита	год	—	—	—	n_1	0,5	n_1					
3	Монтаж оправи	м ³ (т)	$V_K (G_K)$	a_2	$V_K (G_K) a_2$	n_2	$\frac{V_K a_2}{n_2} \left(\frac{G_K a_2}{n_2} \right)$					n_2	
4	Первинне нагнітання	м ²	S_K	a_3	$S_K a_3$	n_3	S_K	n_3				n_3	
5	Чекавання швів	м	$L_{ч.ш.}$	a_4	$L_{ч.ш.}$	n_4	$\frac{L_{ч.ш.} a_4}{n_4}$	n_4				n_4	
6	Нарощування копії	м	L	a_5	$L a_5$	n_5	$\frac{L a_5}{n_5}$					n_5	
7	Допоміжні роботи		V_D	a	V_D	n	$\frac{V_D a}{n}$					n	

Таблиця 8.2

Приклад побудови циклограми (для розробки ґрунту за дві подачі робочого органа)

№	Назва роботи	Одиниця вимірювання	Об'єм роботи	Трудовитрати на одиницю, люд.-год	Трудовитрати на об'єм, люд.-год	Склад ланки, чоловік	Тривалість виконання роботи, год	1 зміна, год					
								1	2	3	4	5	6
1	Розробка і прибирання ґрунту	м ³	V_H	a_1	$V_H a_1$	n_1	$\frac{V_H a_1}{n_1}$	n_1				n_1	
2	Профілактичний огляд і переміщення щита	год	–	–	–	n_1	0,5			n_1			n_1
3	Монтаж оправи	м ³ (т)	$V_K (G_K)$	a_2	$V_K (G_K) a_2$	n_2	$\frac{V_K a_2}{n_2} \left(\frac{G_K a_2}{n_2} \right)$	n_2					
4	Первинне нагнітання	м ²	S_K	a_3	$S_K a_3$	n_3	S_K	n_3			n_3		
5	Чекання швів	м	$L_{ч.ш.}$	a_4	$L_{ч.ш.}$	n_4	$\frac{L_{ч.ш.} a_4}{n_4}$				n_4		
6	Нарощування копії	м	L	a_5	$L a_5$	n_5	$\frac{L a_5}{n_5}$					n_5	
7	Допоміжні роботи		V_D	a	V_D	n	$\frac{V_D a}{n}$					n	

9 Проектування вентиляції під час виконання робіт

Штучну вентиляцію підземних виробок слід застосовувати на всіх стадіях тунельних та будівельно-монтажних робіт, а також у 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 $6 \text{ м}^3/\text{хв}$ на людину за формулою:

$$Q = \frac{6N}{60}, \quad (9.1)$$

де $6 \text{ (м}^3/\text{хв)}$ – норма подачі свіжого повітря на одну людину; N – найбільша кількість людей, які знаходяться в тупиковій виробці.

Отриману за формулою (9.1) кількість повітря перевіряють за швидкістю його руху по підземній виробці, яка повинна становити $0,25 < V < 6 \text{ м/с}$:

$$V = \frac{Q}{S}, \quad (9.2)$$

де S – площа перерізу виробки, що вентилюється.

Якщо швидкість руху повітря менше $0,25 \text{ м/с}$, то кількість повітря ($\text{м}^3/\text{с}$) для вентиляції визначається

$$Q = 0,25S. \quad (9.3)$$

Розрахункова продуктивність вентилятора ($\text{м}^3/\text{с}$) буде дещо більше через компенсацію втрати повітря через нещільності трубопроводу:

$$Q_v = pQ, \quad (9.4)$$

де p – емпіричний коефіцієнт доставки, який знаходять за формулою:

$$p = \left(\frac{\beta d L}{3m} \sqrt{R} + 1 \right)^2, \quad (9.5)$$

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

Аеродинамічний опір трубопроводу R (у кіломюрах) складає:

$$R = 6,5\alpha \frac{L}{d^5}, \quad (9.6)$$

де α – 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 $h_{\text{ст}}$ (мм вод. ст.) у вентиляційному трубопроводі:

$$h_{\text{ст}} = RQ Q_{\text{в}}. \quad (9.7)$$

Після розрахунку коефіцієнта доставки p і статичного напору h вибирають значення максимального коефіцієнта корисної дії η та знаходять швидкість повітря через вихідний отвір вентилятора $V_{\text{в}}$ (рис. 9.1).

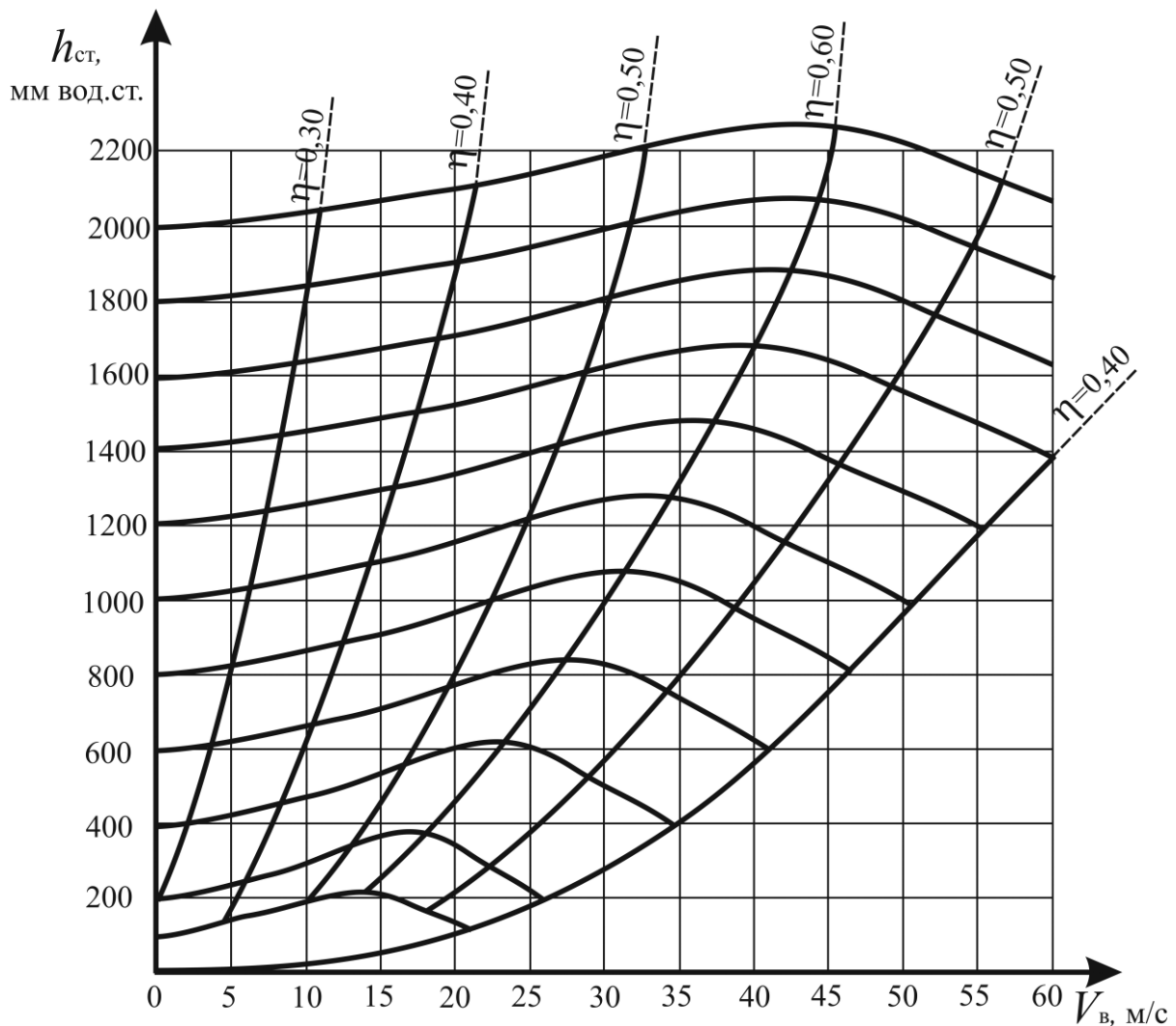


Рис. 9.1. Номограма для визначення швидкості повітря через вихідний отвір вентилятора $V_{\text{в}}$

Площа вихідного отвору вентилятору F_B дорівнює:

$$F_B = \frac{Q_B}{V_B}. \quad (9.8)$$

Знайшовши площу вихідного отвору вентилятора F_B , підбирають його назву і параметри за табл. 12 додатка.

Додаток

Таблиця 1

Мінімальні класи бетону оправ за міцністю на стиск

Вид конструкції	Клас бетону
Високоточні залізобетонні блоки оправ із водонепроникного бетону для тунелів закритого способу робіт	C40/50
Залізобетонні елементи оправ для закритого способу робіт	C30/35
Залізобетонні елементи оправ для відкритого способу робіт	C25/30
Портили, оголовки, набризкбетонні оправы, внутрішні монолітні залізобетонні конструкції, бетонні підготовки під гідроізоляцію	C20/25
Дорожній бетонний шар верхньої будови колії, бетон внутрішніх конструкцій	C16/20
Жорстка основа колії, бетонна основа під підлогою ніш, камер та притунельних споруд, бетон для водовідвідних і кабельних лотків	C12/15

Таблиця 2

Характеристики матеріалів для підземного будівництва

Назва матеріалу	Розрахунковий опір, МПа		Питома вага γ , кН/м ³
	Стиску	Розтягу	
Бетони	$f_{cd} (R_b)$	$f_{cd} (R_{bt})$	
Бетон класу C20/25 (B25)	14,5	1,5	24,0
Бетон класу C25/30 (B30)	17,0	1,80	24,0
Бетон класу C30/35 (B35)	19,5	2,00	24,0
Бетон класу C32/40 (B40)	22,0	2,10	24,0
Бетон класу C35/45 (B45)	25,0	2,20	24,0
Бетон класу C40/50 (B50)	27,5	2,50	24,0
Арматура (стержнева)	R_s	R_{sc}	
Клас A240C (A-I)) діаметром 6...40 мм	225 (225)	225 (225)	78,5
Клас (A-II)) діаметром 10...40 мм	280	280	78,5
Клас A400C (A-III) діаметром 6...8 мм	365 (355)	365 (355)	78,5
Клас A400C (A-III) діаметром 10...40 мм	375 (365)	375 (365)	78,5
Чавуни	R_c	R_u	
СЧ-21-40	1800	600	72,0
МСЧ 28-90, МСЧ 38-120	3400	1000	72,0

Примітка. В дужках наведені старі назви класів бетону та арматури.

Таблиця 3

Характеристики гірських порід за категоріями

Категорія порід	Коефіцієнт міцності f за М. М. Протод'яконовим	Коефіцієнт розрихлення k_p	Коефіцієнт пружного відпору k , кН/м ³
I	0,4...0,6	1,1	$0,1 \cdot 10^4 \dots 0,5 \cdot 10^4$
II	0,7...1	1,2	$0,5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$
III	1,1...1,5	1,3	$5 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$
IV	1,6...2	1,4	$1 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^5$
V	2,1...3	1,8	$2 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5$
VI	4...5	2,0	$4 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5$
VII	5,1...6	2,0	$6 \cdot 10^5 \dots 8 \cdot 10^5$
VIII	7...9	2,0	$8 \cdot 10^5 \dots 10 \cdot 10^5$
IX	10...14	2,0	$10 \cdot 10^5 \dots 100 \cdot 10^6$
X	15...18	2,2	$100 \cdot 10^6 \dots 150 \cdot 10^6$
XI	19...20	2,2	$100 \cdot 10^6 \dots 150 \cdot 10^6$

Таблиця 4

Розрахунок трудовитрат для I категорії порід

№ пор.	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, люд.-год	
					На одиницю	На об'єм
1	Розробка породи	29-80-7	м ³		3,86	
2	Навантаження породи	29-94-1	м ³		0,41	
3.1	Монтаж оправи (з/б)	29-126-4	м ³		5,15	
3.2	Монтаж оправи (чавун)	29-128-4	т		6,42	
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-137-12	м ²		2,01	
5	Чеканення швів	29-145-11	м		1,00	
					Всього:	

Таблиця 5

Розрахунок трудовитрат для II-III категорії порід

№ пор.	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, люд.-год	
					На одиницю	На об'єм
1	Розробка породи	29-80-8	м ³		4,26	
2	Навантаження породи	29-94-1	м ³		0,41	
3.1	Монтаж оправи (з/б)	29-126-4	м ³		5,15	
3.2	Монтаж оправи (чавун)	29-128-4	т		6,42	
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-137-12	м ²		2,01	
5	Чеканення швів	29-145-11	м		1,00	
					Всього:	

Таблиця 6

Розрахунок трудовитрат для IV-V категорії порід

№ пор.	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, люд.-год	
					На одиницю	На об'єм
1	Розробка породи	29-80-7	м ³		5,96	
2	Навантаження породи	29-94-1	м ³		0,56	
3.1	Монтаж оправи (з/б)	29-126-4	м ³		5,15	
3.2	Монтаж оправи (чавун)	29-128-4	т		6,42	
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-137-12	м ²		2,01	
5	Чеканення швів	29-145-11	м		1,00	
					Всього:	

Таблиця 7

Розрахунок трудовитрат для V і вище категорії порід

№ пор.	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, люд.-год	
					На одиницю	На об'єм
1	Розробка породи	29-80-7	м ³		8,16	
2	Навантаження породи	29-94-1	м ³		0,75	
3.1	Монтаж оправи (з/б)	29-126-4	м ³		5,15	
3.2	Монтаж оправи (чавун)	29-128-4	т		6,42	
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-137-12	м ²		2,01	
5	Чеканення швів	29-145-11	м		1,00	
					Всього:	

Таблиця 8

Характеристики гірських порід

Характеристика	Назва породи	Коефіцієнт міцності f за М. М. Протод'яконовим	Питома вага γ , кН/м ³	Кут внутрішнього тертя φ , град
Дуже міцні	Виключно міцні кварцити, базальти, андезити, діабазы, діорити, сієніти, габро, гнейси	20...25	28...30	87...88
	Дуже міцний граніт. Дуже міцні сієніти, діорити та діабазы	16...19	26...27	86...87
	Міцний граніт. Міцні піщаники, діорити та діабазы	10...15	25...26	82...85
Міцні	Тріщинуватий граніт. Щільний піщаник. Міцний вапняк	7...9	25...26	75...80
	Піщаник середньої міцності. Міцний доломіт	6...7	24...26	72...75
	Сланцюваті піщаники	5,5...6	25...26	70...72
Середні	Міцний глинястий сланець. Неміцний вапняк. Тріщинуватий піщаник. Доломіт	4...5,5	25...26	65...70
	Неміцний сланець. Щільний мергель	3...3,5	25...26	60...65
	М'який вапняк. Звичайний мергель	2,5...3	22...24	50...60
	Міцна глина. Аргіліт. Алевроліт. М'який сланець. Тріщинуватий сланець	1,4...2,5	22...24	35...45
	Щільна міцна глина	1,1...1,5	18...20	30...35
	Глина	0,8...1,0	18...19	25...30
	Суглинок	0,8...0,9	16...18	25...28
Слабкі	Пісок щільний. Щільний супісок	0,6...0,8	15...17	30...35
	Пісок вологий. Супісок. Легкий суглинок. Лес	0,5...0,6	15...17	20...25
Нестійкі	Пісок, що осипається. Щойно насипана земля. Пливуні	0,4...0,5	16...17	15...20
	Болотистий ґрунт. Водонасичений лес та інші розріджені ґрунти	0,1...0,3	15...16	9...12

Таблиця 9

Коефіцієнти перевантаження для навантажень

Вид навантаження	Коефіцієнт перевантаження
Вертикальний тиск порід:	
а) від ваги всього масиву	1,1 (0,9)
б) менше ваги всього масиву	1,5
Горизонтальний активний тиск порід	1,2 (0,8)
Гідростатичний тиск підземної води	1,1 (0,9)
Власна вага збірної оправи	1,1

Примітка. Значення коефіцієнта перевантаження, який більше одиниці, застосовують у випадках, коли дане навантаження збільшує сумарний розрахунковий вплив (моменти і нормальні сили); у протилежних випадках застосовують значення, менші одиниці.

Таблиця 10

Характеристики електровозів для розрахунку відкатки

Назва	Тип живлення	Ширина колії, мм	Загальна маса електровоза P_c , т	Сила тяги F_T , т	Швидкість V , км/год
К-4	Контактний	600	4,25	0,90	5,5
		900			
К-7	Контактний	600	7,0	1,70	10,5
		750			
		900			
К-10	Контактний	600	10,0	1,70	10,5
		750			
		900			
АМ8Д	Акумуляторний	600	8,0	0,75	6,0
		900			
2АМ8Д	Акумуляторний	600	11,0	1,35	6,0
		900		1,15	

Таблиця 11

Характеристики вагонеток для розрахунку відкатки

Назва вагонетки	Тип	Колія, мм	Ємність ку- зова $V_{\text{ваг}}$, м^3	Маса G_0 , т
Главтунельметро- буду	3 глухим кузовом	600	1,50	0,76
ВНК-1,6	3 глухим кузовом	600	1,64	0,80
ВНА-1,6	3 глухим кузовом	600	1,64	0,90
УВГ-1,3	3 глухим кузовом	600	1,30	0,8
УВГ-2,2	3 глухим кузовом	900	2,20	1,70
УВГ-2,5	3 глухим кузовом	900	2,50	1,70
УВГ-3,3	3 глухим кузовом	900	3,30	2,7
ВКГ-200	Із режимом вільного розванта- жування з відкидним бортом	750	2,00	2,20
УВБ-2,5	Із режимом вільного розванта- жування з відкидним бортом	750	2,50	2,10
УВД-2,5	Із режимом вільного розванта- жування з відкидним днищем	900	2,50	1,70
УВД-3,3	Із режимом вільного розванта- жування з відкидним днищем	600	3,30	2,60

Таблиця 12

Характеристики вентиляторів місцевого провітрювання

Назва вентилятора	Продуктивність, $\text{м}^3/\text{хв}$	Площа вихідного отвору, м^2	Діаметр робочого колеса D , мм	Маса, кг
СВМ-4м	65...130	0,6	400	80
ВМ-4м	115...120	0,6	400	155
СВМ-5м	110...230	0,8	510	175
Проходка 500-2м	145...225	0,8	510	265
СВМ-6м	190...420	1,1	600	265
ВМ-6м	300...350	1,1	600	375

Бібліографічний список

1. Гайко Г. І. Конструкції кріплення підземних споруд : Навч. Посіб. Алчевськ : ДонДНУ, 2006. 133 с.
2. Айвазов Ю. М. Проектування метрополітенів : Навч. посіб. У 3-х ч. Київ : НТУ, 2006. Ч. 1. 166 с.
3. Айвазов Ю. М. Проектування метрополітенів : Навч. посіб. У 3-х ч. Київ : НТУ, 2009. Ч. 2. 216 с.
4. ДБН В.2.3-7:2018 Метрополітени. Основні положення. [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. 70 с.
5. ДБН В.2.3-6:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
6. Самедов А. М. Будівництво міських підземних споруд : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 400 с.
7. Тютькін О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій : монографія. Дніпро : Журфонд, 2020. 260 с.

Навчально-методичне видання

Тютькін Олексій Леонідович,
Купрій Володимир Павлович,
Мірошник Віталій Анатолійович

**ТУНЕЛІ І МЕТРОПОЛІТЕНИ
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДЛЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ
«СПОРУДЖЕННЯ ТУНЕЛІВ ЩИТОВИМ СПОСОБОМ»**

Редактор *А. В. Безверхня*
Комп'ютерна верстка *В. В. Бердо*

Формат 60×84 1/16.
Ум. друк. арк. 1,66. Обл.-вид. арк. 1,68.

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 1201, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010