

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

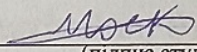
ОС «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: Обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю
під час щитової проходки

за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»


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

Виконав: студент групи: МТ2222


(підпис студента)

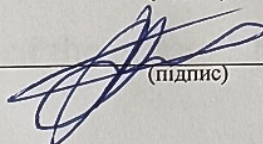
/ Олександр МОСКВИЧ /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/ доцент Володимир КУПРІЙ /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

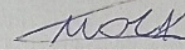
Нормоконтролер:


(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 – 2024 рік

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

Building, architecture and infrastructure
(faculty)

Transport infrastructure
(department)

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

on the topic: Substantiation of the parameters of the tunnel lining
of the running tunnel during shield penetration
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: MT2222 / Oleksandr MOSKVYCH /
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Associate Prof. Volodymyr KUPRII /
(position, name, surname)

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

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Мости і транспортні тунелі»

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ПЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Москвичу Олександром Романовичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю під час щитової проходки»

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

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

затверджені наказом від «13» лютого 2023 р. № 156ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2024 р.

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

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

Вступ. Розділ 1. Варіантне проектування оправи перегінного тунелю, що споруджується щитовим способом. Розділ 2. Обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю. Розділ 3. Обґрунтування параметрів технології щитової проходки перегінного тунелю. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 10...12 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи:

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Варіантне проектування оправи перегінного тунелю, що споруджується щитовим способом.	30.10.2023-19.11.2023	
2	Розділ 2. Обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю.	20.11.2023-17.12.2023	
3	Розділ 3. Обґрунтування параметрів технології щитової проходки перегінного тунелю. Висновки. Оформлення ВКР.	18.12.2023-07.01.2024	
4	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	08.01.2024-14.01.2024	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2024	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	Згідно з планом ЕК	

Студент

_____ (підпис)

Олександр МОСКВИЧ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Володимир КУПРІЙ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 стор., 17 рис., 5 табл., 12 літературних джерел.

Об'єкт розробки – перегінний тунель.

Мета роботи – обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю під час щитової проходки.

Метод дослідження – метод О. Ю. Бугаєвої, метод скінченних елементів.

В магістерській роботі виконано варіантне проєктування оправи перегінного тунелю, що споруджується щитовим способом. Проведене техніко-економічне обґрунтування конструкції оправи.

Проведене обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю. Визначено параметри оправи за методом О. Ю. Бугаєвої. Розроблена скінченно-елементна модель перегінного тунелю (просторова постановка). Визначено параметри напружено-деформованого стану перегінного тунелю.

Обґрунтовано параметри технології щитової проходки перегінного тунелю (цикли проходки, монтажу, первинного нагнітання, чеканки швів). Виконано розрахунок параметрів механізованого щиту. Розраховано електровозну відкатку та параметри вентиляції під час щитової проходки.

Ключові слова: ЩИТОВА ПРОХОДКА, ПЕРЕГІННИЙ ТУНЕЛЬ, ТУНЕЛЬНА ОПРАВА, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ТЕХНОЛОГІЯ СПОРУДЖЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ВАРІАНТНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ, ЩО СПОРУДЖУЄТЬСЯ ЩИТОВИМ СПОСОБОМ	9
1.1 Вибір типів оправи перегінних тунелів та його обґрунтування.....	9
1.2 Варіанти оправи перегінних тунелів.....	10
1.3 Визначення параметрів кільця оправи.....	12
1.4 Техніко-економічне обґрунтування конструкції оправи	14
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТУНЕЛЬНОЇ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ.....	21
2.1 Розрахунок навантажень на перегінний тунель.....	21
2.2 Визначення параметрів оправи за методом О. Ю. Бугаєвої	22
2.3 Перевірка оправи на міцність	27
2.4 Обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю методом скінчених елементів.....	30
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ЩИТОВОЇ ПРОХОДКИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ	39
3.1 Цикл проходки перегінного тунелю механізованим щитом	39
3.2 Розрахунок параметрів механізованого щиту.....	42
3.3 Цикл монтажу оправи.....	46
3.4 Цикл первинного нагнітання	47
3.5 Цикл чеканки швів	49
3.6 Облаштування будівельного майданчика.....	50
3.7 Розрахунок електровозної відкатки	51
3.8 Обґрунтування параметрів вентиляції під час виконання робіт	54

ВСТУП

Тунелі займають важливе місце в загальному комплексі транспортних споруд [3]. Вони відіграють значну роль в покращенні експлуатаційних показників транспортних шляхів в районах гір та раціональному вирішенні проблем міського транспорту. Тунель є ефективним засобом розширення можливостей трасування транспортного шляху в важких умовах, що дозволяє долати перешкоди замість їх обходу.

Перегінний тунель метрополітену є найдовшою інженерною спорудою в загальному комплексі підземних виробок [1, 2]. Велика довжина підкреслює те, що перегінні тунелі проходять різні інженерно-геологічні умови, а оправа тунелів прямо залежить від властивостей ґрунтів.

Тунельні конструкції повністю знаходяться в ґрунті, властивостями і станом якого визначається тип конструкції та технології її будівництва, глибина закладання тунелю, а також положення його в плані та профілі [9].

Значний технічний прогрес, покращення організації виробництва та застосування комплексної механізації дозволили знизити трудомісткість і вартість робіт, досягнути високих темпів спорудження перегінних тунелів.

Процес спорудження тунелю складається з двох основних операцій: прохідка виробки – видалення ґрунту з простору, що призначений для розташування тунелю, та зведення тунельної конструкції – оправи [8].

Щитова проходка є основним способом спорудження тунелів у м'яких і нестійких породах, у складних геологічних умовах, а також при будівництві міських і підводних тунелів.

Щитовий спосіб спорудження тунелів базується на використанні в забої тунелю спеціального агрегату – щиту. Щит представляє собою рухоме металічне кріплення, що надійно захищає зону забою від масиву ґрунту. Одна з найбільш тяжких та трудомістких операцій – розробка ґрунту в забої – може бути механізована. До особливостей щитового способу спорудження тунелів можливо віднести вузькість фронту основних робіт по проходці.

Щитовий спосіб проходки не потребує використання тимчасового кріплення контуру оправи. До того ж, контур оправи більш надійно закріплений щитом, не має необхідності у витратах матеріалів та трудових ресурсів на спорудження тимчасового кріплення. Це дає змогу забезпечити більшу безпеку виконання робіт та дозволяє досягнути більш швидкої проходки, підвищує її економічну ефективність.

При щитовій проходці для кожного перерізу час від моменту розкриття виробки до спорудження оправи та її гарантованого контакту з ґрунтовим масивом відлічується годинами або при використанні механізованих щитів – десятками хвилин. Завдяки цьому можливо досягнути уповільнення розвитку області непружних деформацій в масиві ґрунту.

Щит дозволяє отримати достатньо точний обрис оправи, яка максимально наближена до кола. Це дозволяє широко використовувати збірні оправи індустріального виробництва, що в свою чергу призводить до підвищення якості тунельних конструкцій та швидкості проходки тунелів.

Значною перевагою щитового способу проходки є його універсальність та можливість ефективного застосування в широкому діапазоні геологічних та гідрогеологічних умов – від міцних до нестійких насичених водою при значному гідростатичному тиску. У міських умовах щитова проходка може бути єдиним можливим способом виконання робіт, оскільки вона може виконуватись постійно без порушення поверхні та руху транспорту. Однак обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю під час щитової проходки є важливою і актуальною задачею, яка вирішується в цій кваліфікаційній роботі.

1 ВАРІАНТНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ, ЩО СПОРУДЖУЄТЬСЯ ЩИТОВИМ СПОСОБОМ

1.1 Вибір типів оправи перегінних тунелів та його обґрунтування

На вибір типу оправи і визначення основних параметрів вирішальний вплив мають інженерно-геологічні умови розташування тунелю. Конструкцію оправи обирають в залежності від характеру породи. Чим слабша порода і більше діаметр тунелю, тим більшу жорсткість повинно мати кільце. А при збільшенні діаметру важче забезпечити необхідну жорсткість [11].

У даній випускній кваліфікаційній роботі (ВКР, ОС «магістр») неоднозначні інженерно-геологічні умови, тобто перегінний тунель залягає як у піску (коефіцієнт f за М. М. Протод'яконовим складає 0,8), так і в міцній глині по типу спондилової ($f=1,2$).

У слабостійких породах природної вологості з невисоким коефіцієнтом міцності $f > (0,5 \div 2,0)$ застосовують, у залежності від діаметра тунелю, оправи із залізобетонних тюбінгів, блоків ребристого або суцільного поперечного перерізу та чавунні тюбінги.

Збірні залізобетонні тунельні оправи отримали в даний час переваги розповсюдження. Їх використання забезпечує вирішення однієї із важливих задач – економію металу, дозволяє індустріалізувати тунельне будівництво, скоротити його строки і збільшити виробництво праці. Збірні залізобетонні оправи можуть бути класифіковані по типу поздовжнього стику між елементами (плоский стик з монтажними шпильками, з циліндричними вкладишами, з болтовою в'язю, циліндричний стик); по типу елемента кільця, який визначається видом його робочого перерізу (тюбінги, блоки суцільного перерізу, ребристі блоки); по характеру включення в спільну роботу з ґрунтовим масивом (нагнітанням розчину, обжиманням в ґрунт). В конкретних конструкціях оправ ці признаки можуть сполучатися в різних комбінаціях.

У ВКР порівнюємо оправу із залізобетонних блоків, із залізобетонних ребристих блоків і чавунних тюбінгів.

1.2 Варіанти оправи перегінних тунелів

Варіант 1.

Варіант №1 – оправа з залізобетонних блоків (бетон класу В40). В першому варіанті використовуємо оправа із залізобетонних блоків товщиною $h = 20\text{см}$; товщину оправи визначаємо за емпіричною формулою [11]:

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_B^2}{f}} = 9 \sqrt[3]{\frac{2,55^2}{0,8}} = 18,1 \text{ см},$$

де $R_B = 2,55 \text{ м}$ – внутрішній радіус оправи; $f = 0,8$ – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією М.М. Протод'яконова (приймаємо найменший за f за умов, що у більшому оправа буде мати підвищену міцність); $n = 9$ – для залізобетонних блоків з бетону класу В40.

Варіант 2.

У даному варіанті використовуємо оправа із залізобетонних ребристих блоків. Залізобетонні оправи із блоків ребристого або суцільного поперечного перетину відрізняються по характеру в'язей між кільцями, типу повздовжніх стиків, числу типорозмірів блоків в кільці [1, 11].

Оправи із ребристих блоків відрізняються від тубінгових більшою товщиною спинки і бортів кожного елемента кільця і відсутності болтових в'язей в повздовжніх стиках. Зв'язок між кільцями болтова, постійна або тільки на період монтажу. В оправах із ребристих блоків число болтових отворів по поперечному борту блока 2-4, які розміщуються з постійним шагом 500-850мм по окружності. Постійний шаг забезпечує просту можливість улаштування перев'язки повздовжніх стиків. Число елементів в оправах із залізобетонних блоків залежить від діаметра кільця і визначається масою елемента, яка по умовам монтажу в стиснених підземних умовах не повинна перевищувати 2 – 2.5т, і довжиною дуги по зовнішній стороні, яка по умовам транспортування не

повинна бути більше 2...3 м.

В даній дипломній роботі використовуємо оправу із ребристих блоків. Кільце оправи шириною 1м складається із 10 нормальних, 2 суміжних і ключового блока. Висота поперечного борта блока 200мм, а висота поздовжнього борта зменшена.

Завдяки зменшеній висоті поздовжнього борту стик може розглядатися як шарнірний, що призводить до роботи блоків практично тільки на стиснення. Поперечні стики між кільцями передбачені з монтажними болтовими в'язями. Після завершення монтажу кільця і проведення контрольного нагнітання болти замінюють на короткі сталі шпильки [11].

$$h=n \sqrt[3]{\frac{R_B^2}{f}} = 10 \sqrt[3]{\frac{2,55^2}{0,8}}=12,0 \text{ см}$$

де $R_B=2,55$ м – внутрішній радіус оправи; $f=0,8$ – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією М.М. Протодьяконова; $n= 10$ – для залізобетонних блоків з бетону класу В40;

Товщина оправи з залізобетонних блоків повинна бути не менше 15 см, тому приймаємо товщину оправи рівну $h = 20\text{см}$;

Варіант 3.

Кільця оправи складаються із елементів-сегментів коробчастого перерізу – тюбінгів. Для їх виготовлення відливкою в опоки найбільш широко використовується сірий чавун марки СЧ-20, якому властиві висока стійкість проти корозії і, який має розрахункові опори: стиск – 180 МПа, розтяг – 60 МПа. Останнім часом розглядають можливість використання високоміцного чавуна марки ВЧ. Такий чавун має підвищені міцнісні характеристики завдяки використанню графітуючих присадок (наприклад, феросиліцій в кількості 0,1...0,6 %), який створює його мілкозернисту структуру.

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_B^2}{f}} = 7,5 \sqrt[3]{\frac{2,55^2}{0,8}} = 15,0 \text{ см}$$

де $R_B=2,55$ м – внутрішній радіус оправи; $f=0,8$ – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією М.М. Протод'яконова; $n=7,5$ – для чавунних тюбінгів (сірий чавун СЧ21-40) [11].

В даному варіанті загальне число тюбінгів – 11, маса чавуну – 5,48 т, найбільша довжина – 1,67 м, площа перерізу – 0,0363 м², товщина борта – 25,0 мм, висота борта – 200 мм. Болти по поздовжнім бортам розміщуємо в два ряди. Вони являються робочими і не допускають розкриття стику між тюбінгами в середину і на зовні кільця під дією згинальних моментів перемінного знака.

З'єднання лоткового блоку з тюбінгами болтове. Для цього в поздовжніх торцях блока передбачено два отвори, армованими сталевими шестигранными трубками. В трубку поміщена гайка, повздовжнє переміщення якої виключено її анкеровкою в тілі блока.

1.3 Визначення параметрів кільця оправи

Ширина кільця визначає (при фіксованому числі елементів в кільці) масу елемента, а отже, і вантажопідйомність механізму для монтажу оправи. Але чим більше ширина кільця, тим менший цей показник і тим менші витрати на будівництво тунелю [10, 11].

З урахуванням викладених вимог ширину кільця можна призначати: 0,75...1 м.

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

Загальну кількість елементів в кільці можна прийняти рівним: 7 елементів – при $D_{вн} = 4,5...6,0$ м;

Число елементів у кільці для зниження трудовитрат на монтаж і гідроізоляцію поздовжніх стиків повинно бути по можливості мінімальним. Але вага 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.

Завданням розбивки кільця на елементи є визначення розмірів та положення всіх типорозмірів елементів в 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 наступних міркувань:

1. Усі нормальні елементи («н») мають однаковий центральний кут α_n .
2. Центральний кут замкового елемента («з») α_z рівним 6...10°, в даній дипломній роботі кут замкового елемента дорівнює 6°.
3. Центральний кут лоткового елемента («л») α_l рівний 0°, . 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_z складає центральний кут нормального елемента («н») α_n , тобто

$$\alpha_n = \alpha_c + \frac{\alpha_z}{2}$$

$$\alpha_c = \alpha_n - \frac{\alpha_z}{2} = 48 - \frac{6}{2} = 45 \quad .(1)$$
5. Перед розбивкою кільця на елементи, в залежності від діаметру оправи обирають кількість елементів в кільці та перевіряють довжину та вагу нормального елемента l_n . Якщо довжина та вага відповідає вимогам, задаються кутом замкового елемента $\alpha_z = 6$.
6. Перев'язку поздовжніх стиків проводять таким чином, що суміжні кільця повертаються одне відносно одного на половину куту нормального елемента.

$$\frac{\alpha_n}{2} = \frac{48}{2} = 24$$

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

$$\alpha_{n/2} = \frac{360^\circ - \alpha_n}{n} = \frac{360 - 50}{13} = 24,$$

де n – кількість половин нормальних елементів («н»/2).

Розбивку кільця на кресленні починають після того, як вже намічено лотковий елемент і відкладають кількість половин від нормального елемента

Потім симетрично в обидва боки відкладаються значення кутів нормального елемента α_n шляхом подвоєння куту $\frac{\alpha_n}{2}$. 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 половинному нормальному елементу («н»/2) відпадає.

8. Визначення значень кутів ведуть з точністю до 1 хвилини.

1.4 Техніко-економічне обґрунтування конструкції оправи

Після визначення параметрів трьох варіантів оправи проводимо їх техніко-економічне обґрунтування з метою визначення найбільш економічного за трудовитратами варіанту, який далі приймається для статичного розрахунку. Для цього для кожного з них проводимо розрахунок об'ємів робіт по спорудженню одного погонного метру тунелю [11].

Варіант 1

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

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_{zn}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 5.5^2}{4} = 23,75 \text{ м}^3$$

де D_{zn} – зовнішній діаметр оправи.

Навантаження породи (m^3):

$$V_H = k_p V_p = 1,2 \cdot 23,75 = 28,5 \text{ м}^3;$$

де k_p – коефіцієнт розпушення.

Монтаж залізобетонної оправи (m^3):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{zn}^2 - D_{вн}^2) = 1 \frac{3.14}{4} (2.75^2 - 2.55^2) = 0,832 \text{ м}^3;$$

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

Вагу l пог. м залізобетонної оправи для визначення ваги одного елемента і подальшого використання у статичному розрахунку можна визначити за формулою:

$$G_k = \gamma V_k = 2.5 \cdot 0.832 = 2.08 \text{ Т},$$

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

Нагнітання за оправу (m^2):

$$S_k = L_k \cdot 1 = \pi D_{3H} = 3.14 \cdot 2.75 = 8.635 \text{ м}^2,$$

де L_k – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

Чеканка швів (пог. м):

$$L_{ч.ш.} = L_{вн} + n \cdot 1 = \pi D_{вн} + n = 3.14 \cdot 2.55 + 2 = 10,$$

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

Розрахунок трудовитрат заноситься у таблицю [5].

Таблиця 1.1. Трудовитрати Варіанту 1

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Одиниця виміру	Об'єм на цикл	Витрати праці на одиницю, люд. · год.	Витрати праці на об'єм, люд. · год.
1	Розробка породи	28-80-10	м ³	23,75	42,03	998,21
2	Навантаження породи	29-94-1	м ³	28,5	41,08	1170,8
3	Монтаж оправи	29-126-4	м ³	0,832	515,08	428,55
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-138-7	м ²	8,635	77,26	667,14
5	Чеканка швів	29-145- 11	м	10,0	10,03	100,3

Σ= **3364,98**

Варіант 2

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

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_{zn}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,5^2}{4} = 23,75 \text{ м}^3$$

де D_{zn} – зовнішній діаметр оправи.

Навантаження породи (m^3):

$$V_H = k_p V_p = 1,2 \cdot 23,75 = 28,5 \text{ м}^3,$$

де k_p – коефіцієнт розпушення.

Монтаж залізобетонної оправи (m^3):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{zn}^2 - D_{вн}^2) = 1 \frac{3,14}{4} (2,75^2 - 2,55^2) = 0,832 \text{ м}^3;$$

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

Вагу l пог. м залізобетонної оправи для визначення ваги одного елемента і подальшого використання у статичному розрахунку можна визначити за формулою:

$$G_k = \gamma V_k = 2,5 \cdot 0,618 = 1,545 \text{ т},$$

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

Нагнітання за оправу (m^2):

$$S_k = L_k \cdot 1 = \pi D_{zn} = 3.14 \cdot 2.75 = 8.635 \text{ } m^2,$$

де L_k – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

Чеканка швів (пог. м):

$$L_{ч.ш.} = L_{вн} + n \cdot 1 = \pi D_{вн} + n = 3.14 \cdot 2.55 + 2 = 10,$$

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

Розрахунок трудовитрат заноситься у таблицю [5].

Таблиця 1.2 Трудовитрати Варіанту 2

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Одиниця виміру	Об'єм на цикл	Витрати праці на одиницю, люд. · год.	Витрати праці на об'єм, люд. · год.
1	Розробка породи	28-80-10	m^3	23,75	42,03	998,21
2	Навантаження породи	29-94-1	m^3	28,5	41,08	1170,8
3	Монтаж оправу	29-126-4	m^3	1,55	515,08	798,4
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-138-7	m^2	8,635	77,26	667,14
5	Чеканка швів	29-145- 11	м	10,0	10,03	100,3

$\Sigma =$ **4515,3**

Варіант 3

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

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_{zn}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 5.5^2}{4} = 23.75 \text{ м}^3$$

де D_{zn} – зовнішній діаметр оправи.

Навантаження породи (m^3):

$$V_H = k_p V_p = 1.2 \cdot 23.75 = 28.5 \text{ м}^3;$$

де k_p – коефіцієнт розпушення.

Монтаж чавунної оправи (m^3):

$$V_k = \lambda \frac{\pi}{4} (D_{zn}^2 - D_{вн}^2) = 1 \frac{3.14}{4} (2.75^2 - 2.55^2) = 0.832 \text{ м}^3;$$

де $D_{вн}$ – внутрішній діаметр оправи; λ – коефіцієнт, який враховує наявність порожнин в залізобетонному елементі (для блоків $\lambda=1$, для чавунних тюбінгів $\lambda=0,3$). Вага кільця дорівнює $0,3 \times 0,832 \times 7,2 = 1,79$ т.

Нагнітання за оправу (m^2):

$$S_k = L_k \cdot l = \pi D_{zn} = 3.14 \cdot 2.75 = 8.635 \text{ м}^2,$$

де L_k – довжина дуги кільця по зовнішньому діаметру.

Чеканка швів (пог. м):

$$L_{ч.ш.} = L_{вн} + n \cdot 1 = \pi D_{вн} + n = 3.14 \cdot 2.55 + 2 = 10,$$

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

Розрахунок трудовитрат заноситься у таблицю [5].

Таблиця 1.3 Трудовитрати Варіанту 3

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Одиниця виміру	Об'єм на цикл	Витрати праці на одиницю, люд. · год.	Витрати праці на об'єм, люд. · год.
1	Розробка породи	28-80-10	м ³	23,75	42,03	998,21
2	Навантаження породи	29-94-1	м ³	28,5	41,08	1170,8
3	Монтаж оправи	29-126-7	т	1,79	1115,2	1996,21
4	Нагнітання цементно-піщаного розчину за оправу	29-138-7	м ²	8,635	77,26	667,14
5	Чеканка швів	29-145- 11	м	10,0	10,03	100,3
					Σ=	4932,66

На основі техніко-економічного порівняння для подальших розрахунків слід прийняти варіант із залізобетонних ребристих блоків, варіант №2, оскільки цей варіант є економічно ефективнішим. Проте, умови роботи механізованого комплексу, а саме тиск гідроциліндрів, може локально зруйнувати ребристий блок, тому для подальшого обґрунтування обирається варіант №1 з блоків.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТУНЕЛЬНОЇ ОПРАВИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ

2.1 Розрахунок навантажень на перегінний тунель

Статичний розрахунок оправи проводимо для можливих несприятливих основних та додаткових навантажень [4, 11].

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);

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

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

Відповідно до цього статичний розрахунок збірної оправи проводиться по двох стадіях її роботи: в експлуатаційній і в будівельній.

Нормативна власна вага оправи:

$$p^H = \frac{G_k}{2\pi r},$$

де G_k – вага кільця оправи (приймається за проектним об'ємом, який визначено при проєктуванні варіантів);

$$r = \frac{R_{вн} + R_{зн}}{2}$$

– середній радіус оправи.

$$G_k = \gamma \cdot V_k = 2.5 \cdot 0.832 = 2.08 \text{ т},$$

$$r = \frac{R_{вн} + R_{зн}}{2} = \frac{2.55 + 2.75}{2} = 2.65 \text{ м}$$

$$p^H = \frac{G_k}{2\pi r} = \frac{20.80}{2 \cdot 3.14 \cdot 2.65} = 1.25 \text{ кН/м}.$$

$$q_H = 0.6 \cdot \gamma \cdot B \text{ кН/м}^2;$$

де γ – питома вага ґрунту; B – діаметр виробки, м. $B=5,5$ м.

$$q_H = 0.6 \cdot \gamma \cdot B = 0.6 \cdot 26 \cdot 5.5 = 85,8 \text{ кН/м}^2$$

Вертикальний гірський тиск [4]:

$$q_p = q_H \cdot k \text{ кН/м}^2$$

$$q_p = q_H \cdot k = 85,8 \cdot 1,4 = 120,12 \text{ кН/м}^2.$$

2.2 Визначення параметрів оправи за методом О. Ю. Бугасвої

Оправу тунелю, яка закладена в міцній глині (умови Київського метрополітену, $f=1,2$), слід визначати з урахуванням пружного відпору порід. У цьому випадку використовуємо метод О. Ю. Бугасвої як найбільш простий, але за точністю результатів він не поступається іншим методам розрахунку [10, 11].

Суть метода О. Ю. Бугасвої полягає у тому, що епюра пружного відпору передбачається відомою. Передбачувана епюра описується тригонометричними кривими, які виходять із нульових точок. Вигляд тригонометричних кривих наступний (рис. 2.1):

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

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

де k – коефіцієнт пружного відпору породи; δ – радіальне переміщення оправи в перетині, нахиленому під кутом до вертикалі; δ_A , δ_B – невідомі переміщення перетинів А і В оправи відповідно (визначаються в процесі розрахунку).

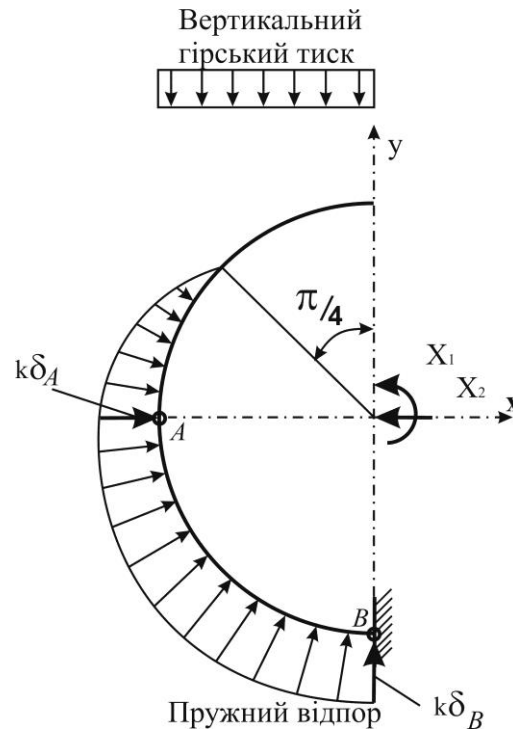


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема для розрахунку оправи методом О. Ю. Бугаєвої

Канонічними рівняннями деформації такої системи є такі:

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

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

$$\sum Y = 0:$$

$$\delta_a = \delta_{a1} \cdot X_1 + \delta_{a2} \cdot X_2 + \Delta_{ap}$$

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1p} + \beta_p}{\delta_{11} + \beta_1};$$

$$X_1 = -\frac{\Delta_{2p} + \beta_p \cdot y_c}{\delta_{22} + \beta \cdot y_c^2};$$

$$\Delta_{1p} = \frac{1}{E} \int_0^{s/2} \frac{M_p}{J} \cdot ds;$$

$$\Delta_{2p} = \frac{1}{E} \int_0^{s/2} \frac{M_p \cdot y}{J} \cdot ds;$$

$$\delta_{1p} = \frac{1}{E} \int_0^{s/2} \frac{1}{J} \cdot ds;$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{E} \int_0^{s/2} \frac{y^2}{J} \cdot ds;$$

де M_p – згинаючі моменти в перерізі основних систем; y – ординати, які відраховуються від осі x , проведені через початок координат, розташованих на кінці консолі: $y_c = f_c - c$.

$$\beta_p = \frac{M_p^n}{I_n \cdot k_n};$$

де M_p^n – згинаючий момент у p 'яті основної системи.

Завдяки симетрії розрахункової схеми всі інтеграли Мора визначаються для напівсклепіння.

Згинальні моменти та нормальні сили в оправі знаходяться за формулами:

$$M = M_p + X_1 + X_2 \cdot y; (6)$$

$$N = N_p + X_2 \cdot \cos\alpha; (7)$$

де N_p – нормальна сила в перерізі основної системи; α – кут нахилу перерізу до вертикалі;

$$m = 2 - \frac{R_{3H}}{r} .$$

$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{EI}{r^3 R_{3H} kb}} .$$

де r – осьовий радіус, I – момент інерції.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1 \cdot 0.2^3}{12} = 0.0007 (10)$$

$$m = 2 - \frac{R_{3H}}{r} = 2 - \frac{2.7}{2.65} = 0.98 ;$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{0,06416 + \frac{EI}{r^3 R_{3H} kb}} = \frac{1}{0,06416 + \frac{E \cdot I}{r^3 \cdot R_{3H} \cdot k \cdot b}} = \frac{1}{0,06416 + \frac{36 \cdot 10^6 \cdot 0.0007}{2.65^3 \cdot 2.75 \cdot 10 \cdot 10^5 \cdot 1}} = \\ &= \frac{1}{0,06416 + \frac{25200}{51176468.75}} = 15.47 \end{aligned} ,$$

де EI – жорсткість оправы.

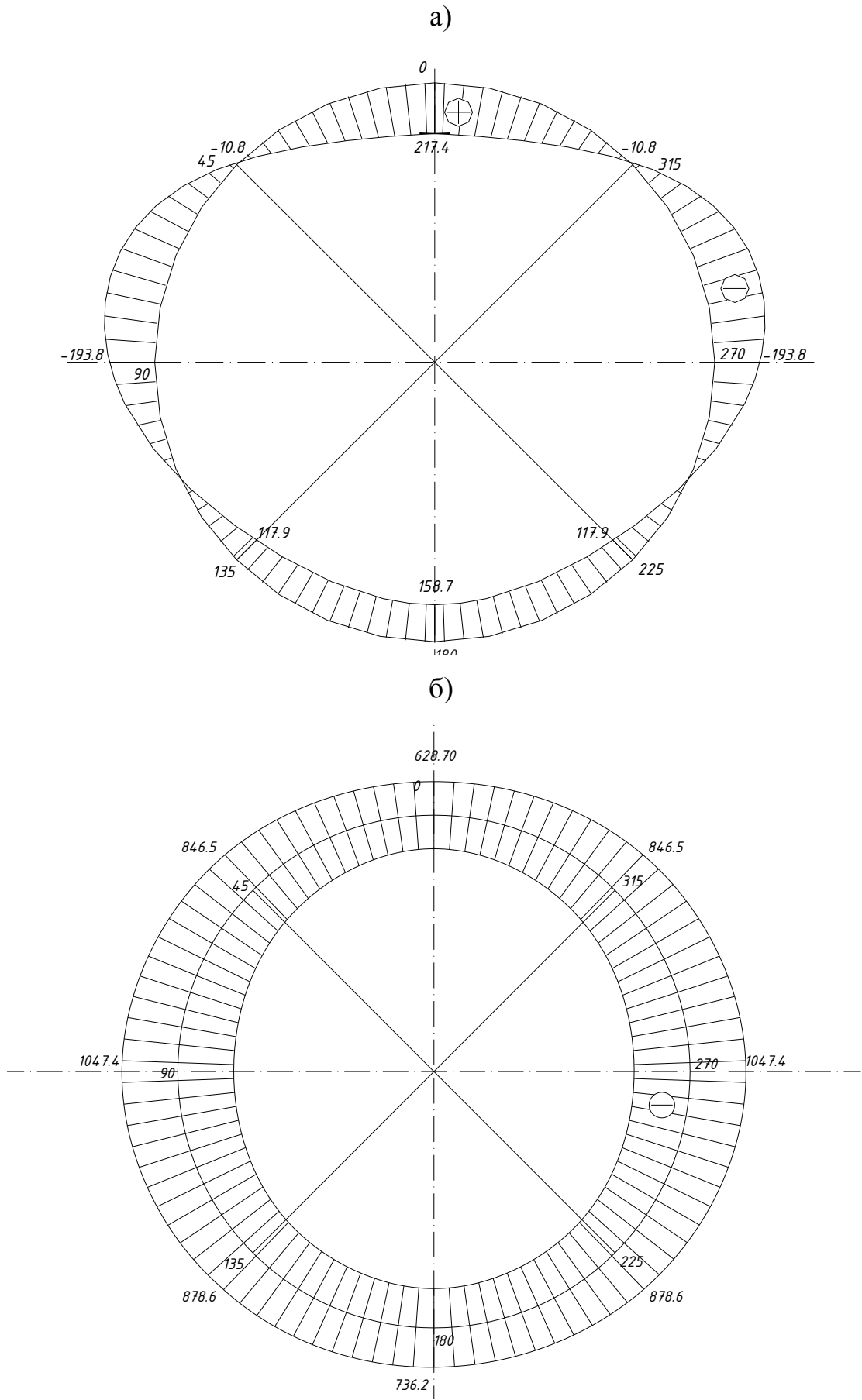


Рисунок 2.2 – Епюри моментів (а) і нормальних сил (б)

2.3 Перевірка оправи на міцність

Після визначення згинаючих моментів і нормальних сил у перерізах оправи із максимальним згинальним моментом проводять перевірку на міцність. Для цього проводять будову епюр моментів та нормальних сил із визначенням двох перерізів із максимальними згинаючими моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином [10, 11].

Перед проведенням перевірки оправи на міцність слід провести її армування, виходячи із правила симетричного армування блоку 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 в зоні від'ємних, так і в зоні додатних моментів.

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

Визначення площі поперечного перерізу блоку:

$$A_b = bh,$$

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

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

Попереднє визначення площі арматури:

$$A_s^{сум} = \mu A_b = 0,03 \cdot 0,2 = 0,006 \text{ м}^2.$$

Площа поперечного перерізу одного стержня становить:

$$A_{1ст} = \pi r_{ст}^2,$$

де r_{cm} – радіус стержня арматури;

$$A_{1cm} = \pi r_{cm}^2 = 3.14 \cdot 0.012^2 = 0.00045 \text{ м}^2;$$

Визначення кількості стержнів робочої арматури:

$$n = \frac{A_s^{сум}}{A_{1cm}} = \frac{0.003}{0.00045} = 6.67, \text{ стержнів.}$$

Приймаємо 8 стержнів.

Фактична площа арматури становить:

$$A_s^{факт} = A_s + A'_s = n A_{1cm} = 8 \cdot 0.00045 = 0.0036 \text{ м}^2;$$

Площа розтягнутої та стиснутої арматури (при симетричному армуванні блоку вони дорівнюють одна одній, рис. 2.3):

$$A_s = A'_s = \frac{A_s^{факт}}{2} = \frac{0.0036}{2} = 0.0018 \text{ м}^2;$$

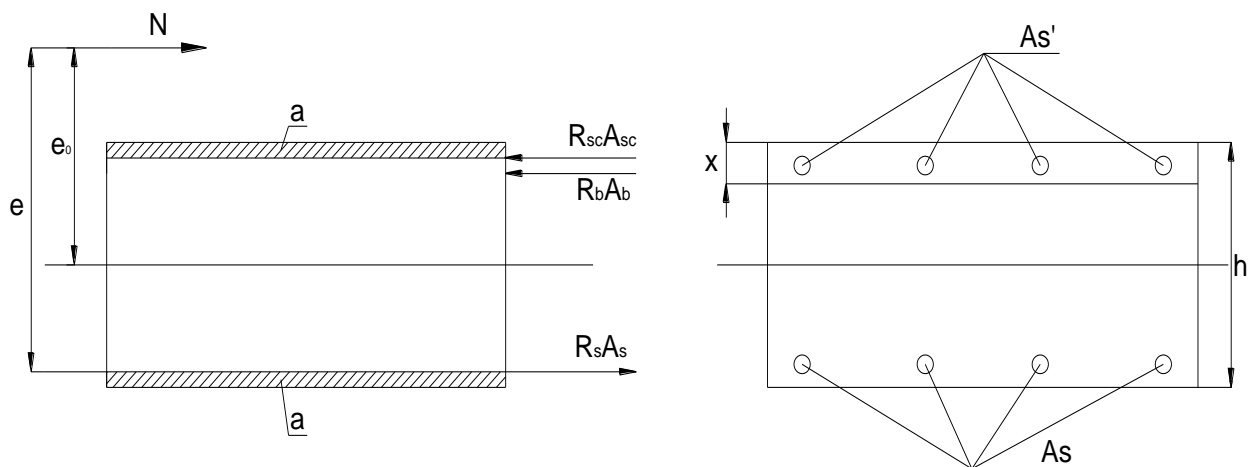


Рисунок 2.3 – Схема для визначення зусиль у блоці

Визначення ексцентриситету нормальної сили e_0 відносно геометричної осі центру ваги перерізу елементу:

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{217,4}{628,7} = 0,35 \text{ м.}$$

Перевірка блоків на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють в режимі позацентрального стиску.

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

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

$$e = e_0 + \frac{h}{2} - a = 0,35 + \frac{0,2}{2} - 0,03 = 0,42 \text{ м.}$$

$$R_b = 22 \text{ МПа} = 22000 \text{ кН/м}^2;$$

$$R_{sc} = 280 \text{ МПа} = 280000 \text{ кН/м}^2;$$

$$x = \frac{N}{R_b \cdot b} = \frac{628,7}{22000 \cdot 1} = 0,029 \text{ м};$$

$$h_0 = h - a = 0,2 - 0,03 = 0,17 \text{ м};$$

$$628,7 \cdot 0,42 \leq 22000 \cdot 1 \cdot 0,029(0,17 - 0,5 \cdot 0,029) + \\ + 280000 \cdot 0,003(0,17 - 0,03);$$

$$264,1 \leq 99,2 + 170,56;$$

$$264,1 < 269,76 - \text{умова виконана.}$$

2.4 Обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю методом скінченних елементів

Задачею дослідження є обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю [10], а саме знаходження оптимальної товщини оправи перегінного тунелю у заданих інженерно-геологічних умовах, а саме коли перегінний тунель залягає як у піску (коефіцієнт f за М. М. Протод'яконовим складає 0,8), так і в міцній глині по типу спондилової ($f=1,2$).

Пошук оптимальної товщини оправи дуже важливий при проектуванні перегінних тунелів. Вибір оптимальної товщини дозволяє значно зменшити витрати на матеріали при спорудженні, полегшує монтаж оправи та сприяє нормальній роботі оправи під час всього терміну експлуатації тунелю. Для цього була розроблена модель перегінного тунелю із взаємодією з оточуючим масивом. Причому модель розроблялась за допомогою метода скінченних елементів.

Метод скінченних елементів (МСЕ) – чисельний варіаційний метод, що дозволяє вирішувати широкий клас різних задач, пов'язаних з рішенням диференціальних рівнянь [6]. Найбільше застосування МСЕ одержав в задачах механіки тіла, що деформується, теплопровідності, гідродинаміки та інших.

Ідея будь-якого варіаційного методу полягає в тім, що функція, що відшукується (переміщення, напруження, температура тощо) апроксимується сумою добутків деяких функцій (їх називають координатними функціями) на множники, які варіюються. Залежно від різновиду методу до координатних функцій висувають різні вимоги. Для визначення цих множників використовують принцип мінімізації похибки рішення задачі.

Особливістю методу скінченних елементів, у порівнянні із традиційною формою, є те, що координатні функції вибирають таким чином, що кожна з них не дорівнює нулю тільки в невеликій області досліджуваного тіла, яка зветься скінченним елементом (СЕ). Внаслідок цього, у будь-якій точці досліджуваного тіла рішення визначається тільки декількома функціями із усієї безлічі координатних функцій, які використовуються при вирішенні задачі (функціями форми СЕ). Друга особливість полягає в тім, що в якості множників, які варіюються, приймають значення координатних функцій (а й іноді і їхніх похідних) у вузлах скінченно-елементної сітки [10].

Відповідно до цього для рішення задачі за допомогою МСЕ необхідно досліджуване тіло розділити на деяку кількість (іноді досить велику) малих зон (СЕ). У межах кожного елемента розподіл шуканих величин (переміщень, швидкостей, температур) описується певними залежностями, на основі яких формується деякий функціонал. Мінімум функціонала відповідає нульовим значенням похідних по всіх множниках. Остання умова — необхідно привести до системи лінійних рівнянь відносно вузлові значення шуканих функцій. Лівою частиною такої системи є добуток так званої матриці жорсткості на вектор шуканих вузлових переміщень, правою частиною — вектор вузлових сил. Розв'язуючи систему рівнянь отримують вузлові значення (наприклад переміщення вузлів), після чого можна знайти всі інші величини.

При вирішенні задачі необхідно враховувати правило знаків для переміщень і напружень. Правило знаків для переміщень прийнято таким чином, що лінійні переміщення додатні, якщо вони направлені в сторону зростання відповідної координати, а кути повороту додатні, якщо вони відповідають правилу правого

ГВИНТА.

Модель перегінного тунелю побудована на основі реальних геометричних розмірів, результатів лабораторних досліджень та застосування розрахункового професійного комплексу Structure CAD for Windows, version 7.31 R.3 (SCAD) (рис. 2.4) [7, 12].

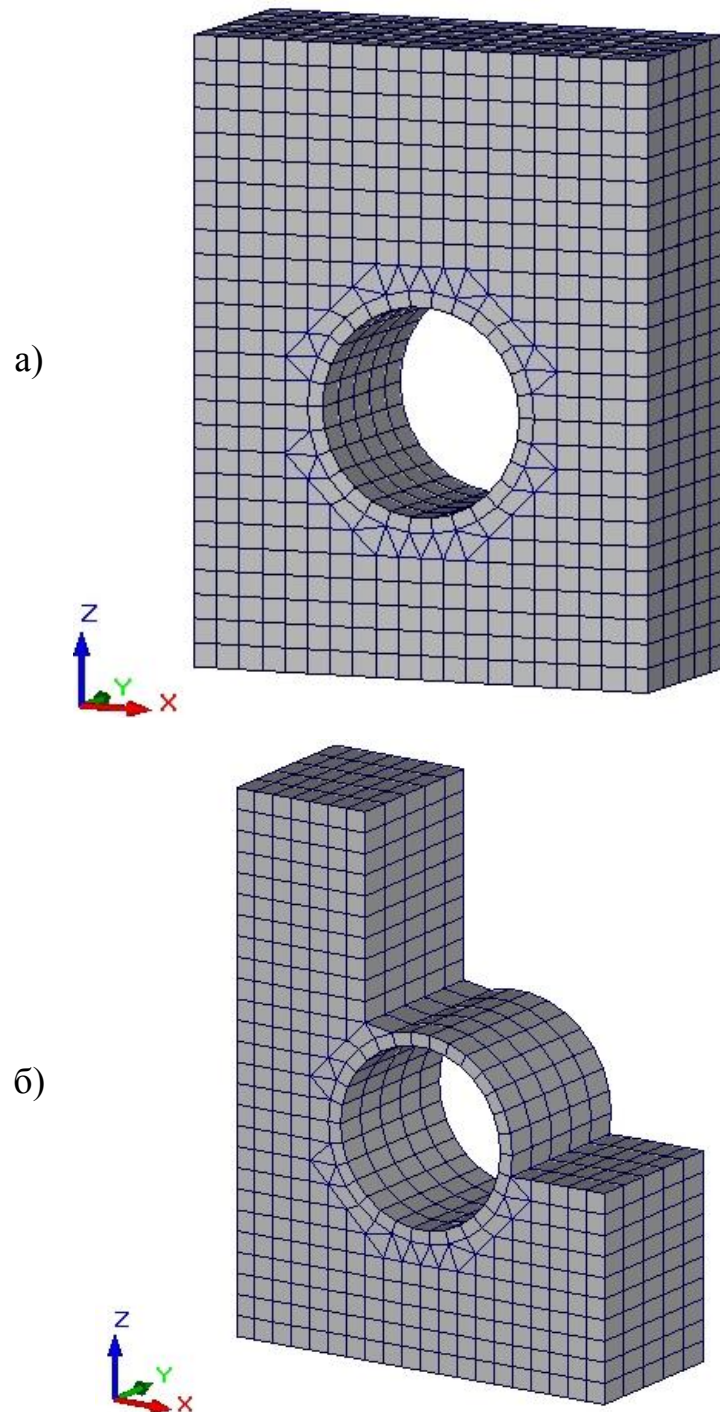


Рисунок 2.4 – Скінченно-елементна модель перегінного тунелю:

а) загальний вигляд; б) фрагмент

Модель заснована на об'ємних скінченних елементах (31800 вузлів, 24800 скінченних елементів), і більш повно відображає статичну роботу тунелю із оточуючим масивом. Після створення просторової моделі їй надавалися деформаційні характеристики (модуль пружності–деформації, коефіцієнт Пуассона), причому для ґрунтів та залізобетону вони задавалися окремо. Деформаційні характеристики моделі узяті із інженерно-геологічних досліджень:

Жорсткість 1 (пісок) – модуль пружності $E=55$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$, питома вага $\gamma=15$ кН/м³;

Жорсткість 2 (глина міцна) – модуль пружності $E=35$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$, питома вага $\gamma=15$ кН/м³;

Жорсткість 3 (залізобетон) – приведений модуль пружності $E=38500$ МПа, приведений коефіцієнт Пуассона $\mu=0,02$, питома вага $\gamma=25$ кН/м³.

Після надання деформаційних характеристик на модель накладалися граничні умови: по нижній границі (площина XOY) – заборона по осях X, Y та Z; по боках моделі (площина YOZ) – заборона по осях X та Y; по торцях моделі (площина XOZ) – заборона по осі Y.

Після побудови моделі виконувався розрахунок на власну вагу моделі і його результати піддавалися ґрунтовному аналізу. Для визначення оптимальної товщини далі будуть проведені розрахунки оправи на міцність, який буде виконуватися лише для бетону, тобто на тріщиностійкість. Для цього застосуємо четверту теорію міцності, формула якої має наступний вигляд [10]:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma],$$

де σ_x та σ_z — компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Y; τ_{xz} — дотична компонента в площині XY; $[\sigma]$ — межа міцності матеріалу; для бетону класу В30 межа міцності $[\sigma]=21,0$ МПа.

Дані для розрахунку визначимо з аналізу рис. 2.5 – 2.10.

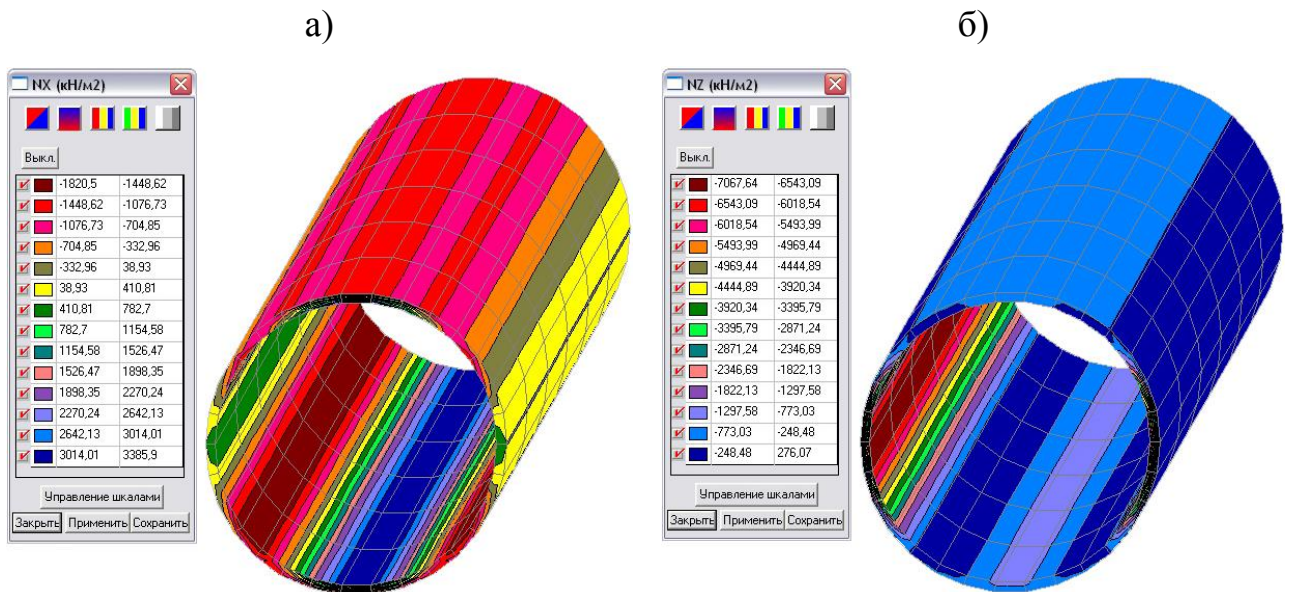


Рисунок 2.5 – Ізополя та ізолінії напружень в оправі від власної ваги (оточуючий масив – пісок): а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z

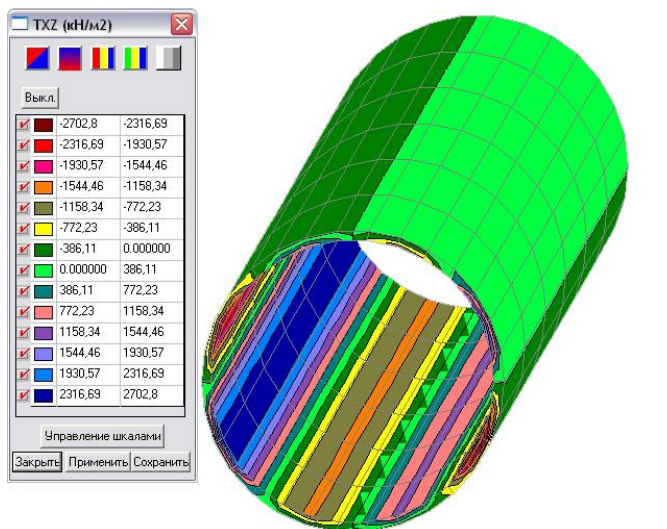


Рисунок 2.6 – Ізополя та ізолінії дотичних напружень в площині XZ в оправі від власної ваги (оточуючий масив – пісок)

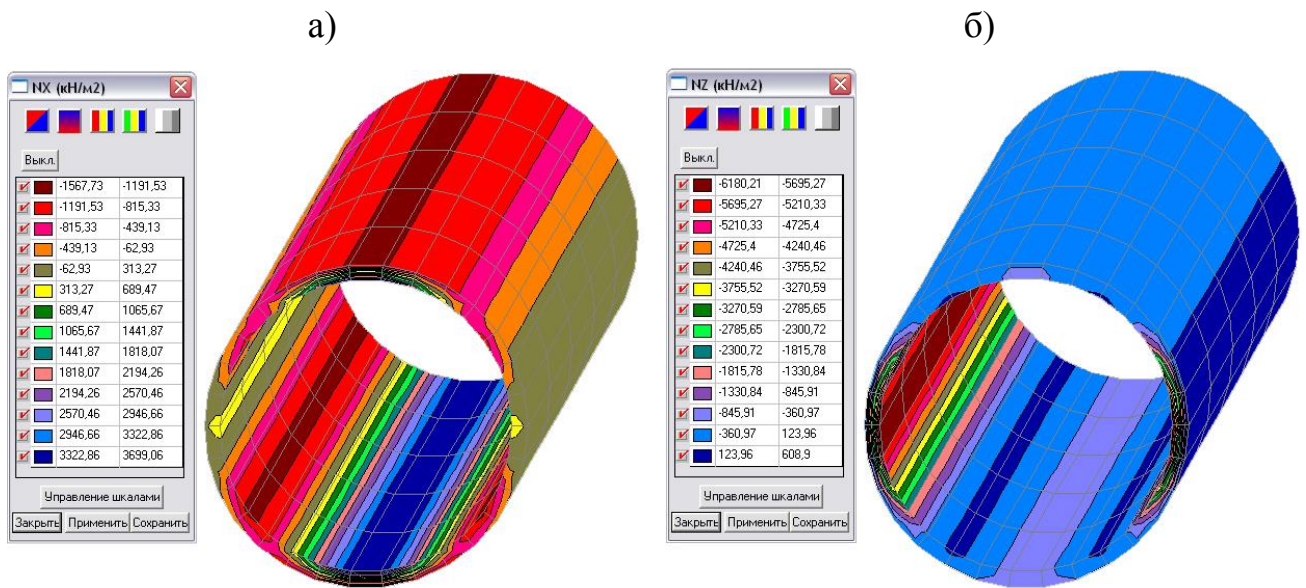


Рисунок 2.7 – Ізополя та ізолінії напружень в оправі від власної ваги (оточуючий масив – перехід з глини на пісок):
а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z

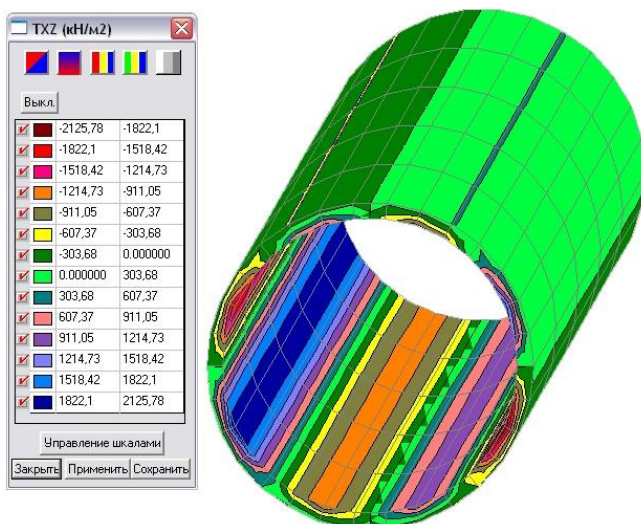


Рисунок 2.8 – Ізополя та ізолінії дотичних напружень в площині XZ в оправі від власної ваги (оточуючий масив – перехід з глини на пісок)

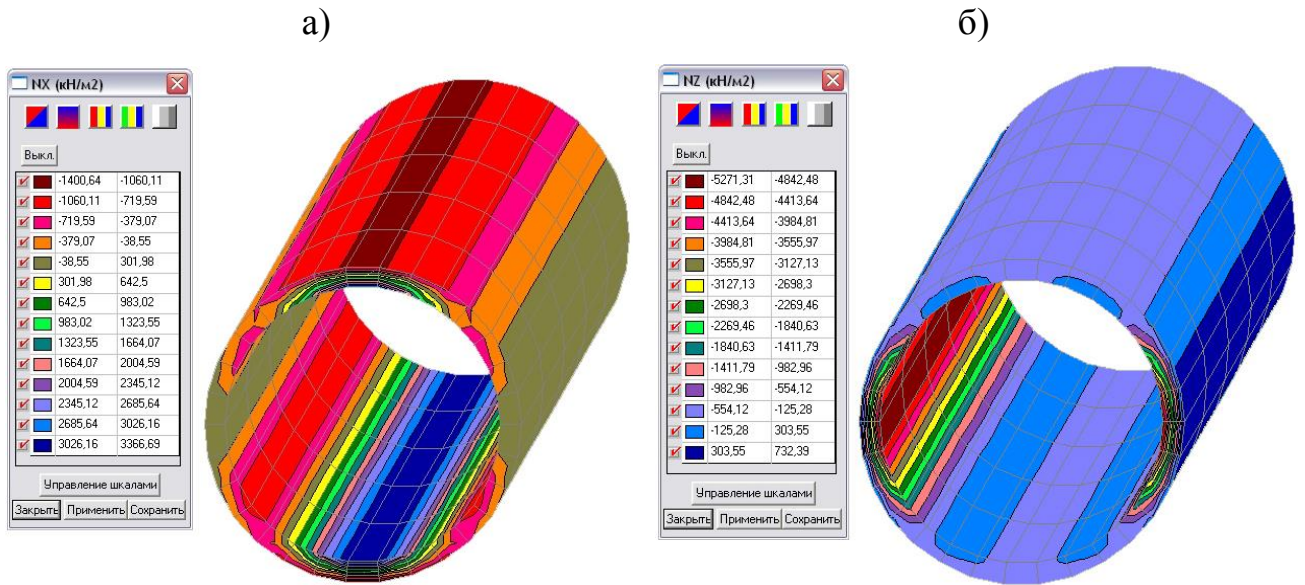


Рисунок 2.9 – Ізополя та ізолінії напружень в оправі від власної ваги (оточуючий масив – глина): а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z

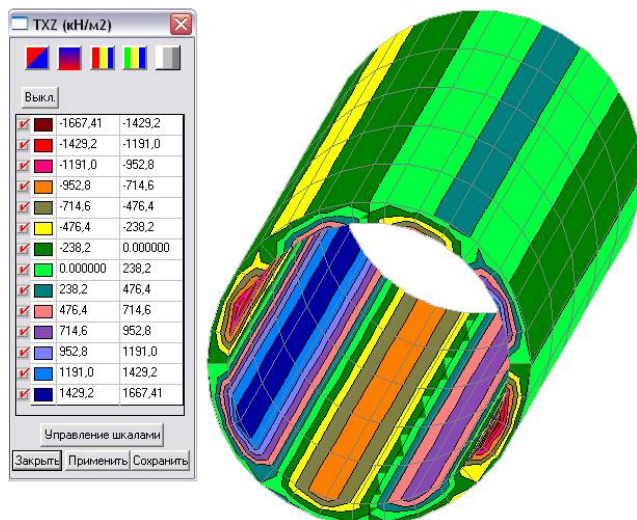


Рисунок 2.10 – Ізополя та ізолінії дотичних напружень в площині XZ в оправі від власної ваги (оточуючий масив – глина)

Розглянувши і проаналізувавши рис. 2.5 – 2.10, виконуємо перевірку на міцність оправы в точці 1 та точці 2 (рис. 2.11).

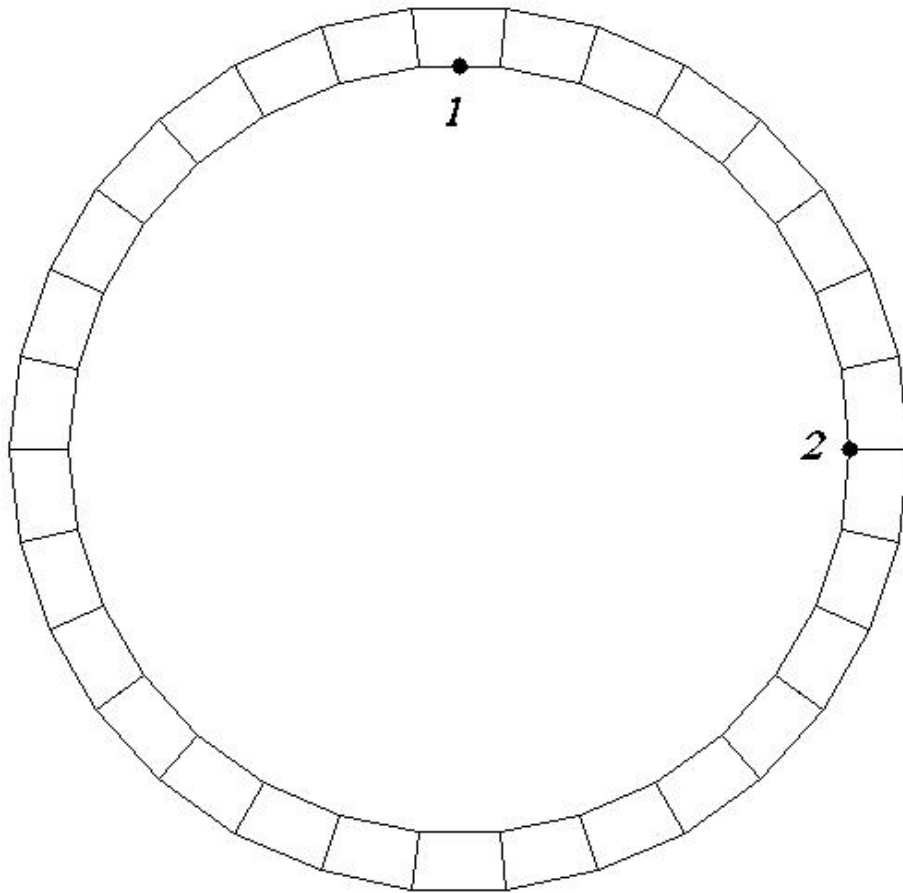


Рисунок 2.11 – Схема визначення напружень в оправі для розрахунку за четвертою теорією міцності

Розрахунок за еквівалентними напруженнями проведемо у вигляді таблиць, які наводяться нижче.

Таблиця 2.1 – Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності (точка 1)

№ моделей	Параметри розрахунку				
	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа	Коефіцієнт запасу
	σ_x	σ_z	τ_{xz}		
1	3,014	0,773	0,386	3,5297	5,9496
2	3,322	0,845	0,303	3,8513	5,4528
3	3,026	0,554	0,238	3,363	6,2444

Таблиця 2.2 – Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності (точка 2)

№ моделей	Параметри розрахунку				
	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа	Коефіцієнт запасу
	σ_x	σ_z	τ_{xz}		
1	0,782	7,067	0,386	7,5185	2,7931
2	0,689	6,18	0,303	6,5727	3,195
3	0,301	5,271	0,238	5,4434	3,8579

Як видно із наведеної таблиці, еквівалентні напруження в обох точках не досягають значення 8,0 МПа, що свідчить про те, що в бетоні оправи не виникає тріщин, а самі залізобетонні елементи мають значний запас міцності (від 2,8 раз до 6,25 раз тільки по бетону, а з урахуванням арматури він зростає в декілька разів). Проаналізувавши отримані дані з таблиці приходимо до висновку, що при заданих варіантах закладення оправи виконується перевірка на міцність за четвертою теорією міцності, що означає нормальну роботу конструкції.

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ЩИТОВОЇ ПРОХОДКИ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ

3.1 Цикл проходки перегінного тунелю механізованим щитом

Проходку перегінного тунелю здійснюється за допомогою механізованого щита Herrenknecht. Проектне рішення німецької фірми ґрунтується на новій концепції проходки тунелів з великою площею поперечного перерізу ($181,5 \text{ м}^2$) і полягає в наступному. Ріжуча головка розділена на дві частини, причому внутрішня головка обертається в напрямі, протилежному напрямку обертання внутрішньої головки, створюючи протидіючий момент. Внутрішній диск діаметром 5,5 м (площа $38,5 \text{ м}^2$) може переміщуватися вперед незалежно від внутрішнього диска, розроблюючи центральну частину забою і тим самим полегшуючи проходку периферійної частини забою внутрішнім колесом. В загальній важкості ріжуча головка обладнана 57 двійними дисковими ножами діаметром 17 дюймів (43 см), 24 скребками і одним центральним ріжучим інструментом.

Подвійна ріжуча головка вже використовувалася на інших машинах фірми Herrenknecht, але тільки з гідротранспортом породи. Вперше ця концепція була використана до ТПК з ґрунтовим привантаженням забою. Швидкість обертання внутрішньої частини ріжучої головки вища, ніж у зовнішньої, що знижує ризик забивання камери вийнятим ґрунтом. Робочі органи механізованих щитів діють на ґрунт в основному способами вдавлювання, різання або комбінованим способом.

Вдавлювання виконується головною частиною щита (ножовим кільцем), через різці або діафрагми ґрунт потрапляє всередину прохідницького щита.

Для різання використовуються в основному роторні і фрезерні робочі органи. Найчастіше використовуються роторні робочі органи, котрі різуть породу по круговій траєкторії за допомогою різців. Також прохідницькі щити оснащуються фрезерним робочим органом. В цьому випадку ґрунт розроблюється основним робочим органом – фрезою (рис. 3.1).

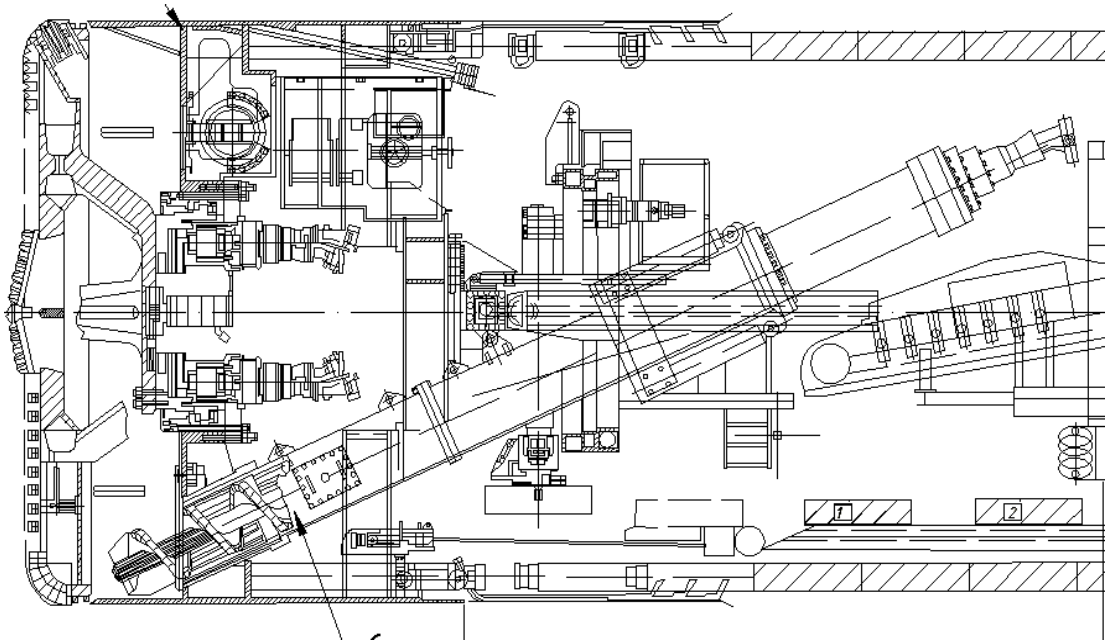


Рисунок 3.1 – Щит фірми Herrenknecht

У комбінованому способі розробки ґрунт у конструктивною відмінністю прохідницького щита є децентрований привід, завдяки якому з'явилась можливість роботи в різноманітних режимах. Засобом для транспортування виступає бентонітова суспензія. В сепараційній установці суміш із води, ґрунт у та бентоніту розділяється на тверду та рідку фракції (рис. 3.2).

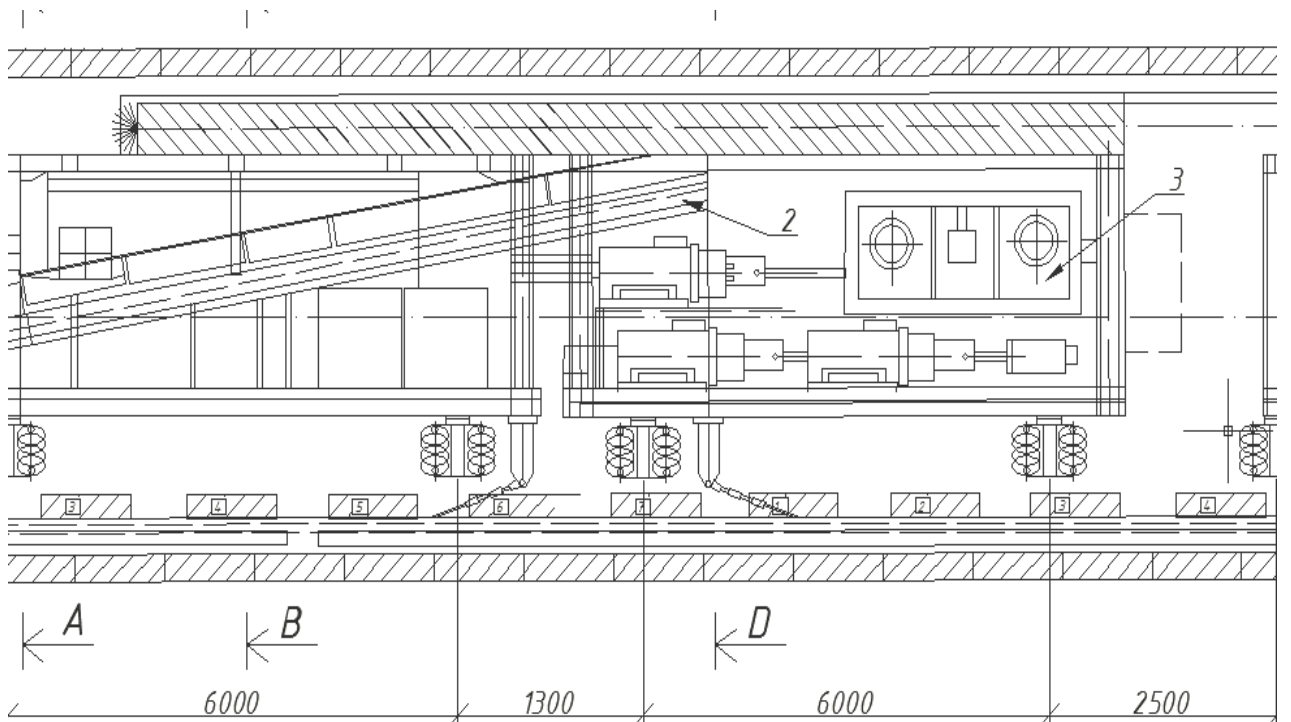


Рисунок 3.2 – Комплекс щиту фірми Herrenknecht (конверср)

Ріжуча головка обладнана повністю гідравлічним приводом. Внутрішній диск має 10 передач, а зовнішній – подвійне зубчате колесо з 24 внутрішніми і 32 зовнішніми вузлами привода. З врахуванням втрат потужності на гідравлічному обладнанні (близько 32 %), при встановленій потужності 15,8 МВт на ріжучу головку подається 10,7 МВт. Ця потужність забезпечує крутний момент 9600 т·м при 0,81 об/хв на зовнішньому диску і 8450 т·м при 1,5 об/хв на внутрішньому. Максимальний крутний момент складає 10890 т·м і 12527 т·м для зовнішнього і внутрішнього дисків відповідно.

Видалення розробленого ґрунту проводиться трьома гвинтовими конвеєрами : одним шнеком довжиною 700 мм в центральній частині і двома по 1200 мм з нижньої частини камери. Довжина щита складає 11,51 м без сполучень, а в його хвостовій частині знаходяться три ряди щіток.

Головною частиною комплексу являється механізований щит, породорозрушувачий орган якого оснащений різцями і сколювачами, які закріплені на чотирьох промінній хрестовині. Цикл проходки тунелю (після чергової передвижки щита) з розробки забою, висовуючи породорозроблюючий орган на перші 0,5 м. Розроблений ґрунт навантажувальними ковшами навантажується на щитовий транспортер, а з нього по стрічковому конвеєрі транспортного мосту – в бункер. Із бункера ґрунт навантажують у вагонетки, які подають нерозщепленими складом по двохшляховій пересувній платформі. Транспортний міст, на якому, крім стрічкового конвеєра, встановлено чітке і електричне оснащення (в тому числі, електрична таль) опирається з однієї сторони на щит, а з іншої на сповзаючу платформу.

Після розробки ґрунту у робочим органом, прохідницький щит переміщається у вільний простір. Переміщення щита відбувається за допомогою щитових гідроциліндрів, які спираються у останнє змонтоване кільце оправи і пересувають щит у вільний простір (рис. 3.3). Частково ґрунт при русі щита може зрізатись його ножовою частиною. Як тільки щит перемістився на довжину одного кільця оправи – монтують чергове кільце. Кількість гідроциліндрів, котрі переміщують щит залежить від кількості

елементів (тубінг або блок) у кільці оправи. Як правило приймається 2...3 гідроциліндра на один елемент. Гідроциліндри прохідницького щита розташовані по колу у опорному кільці.

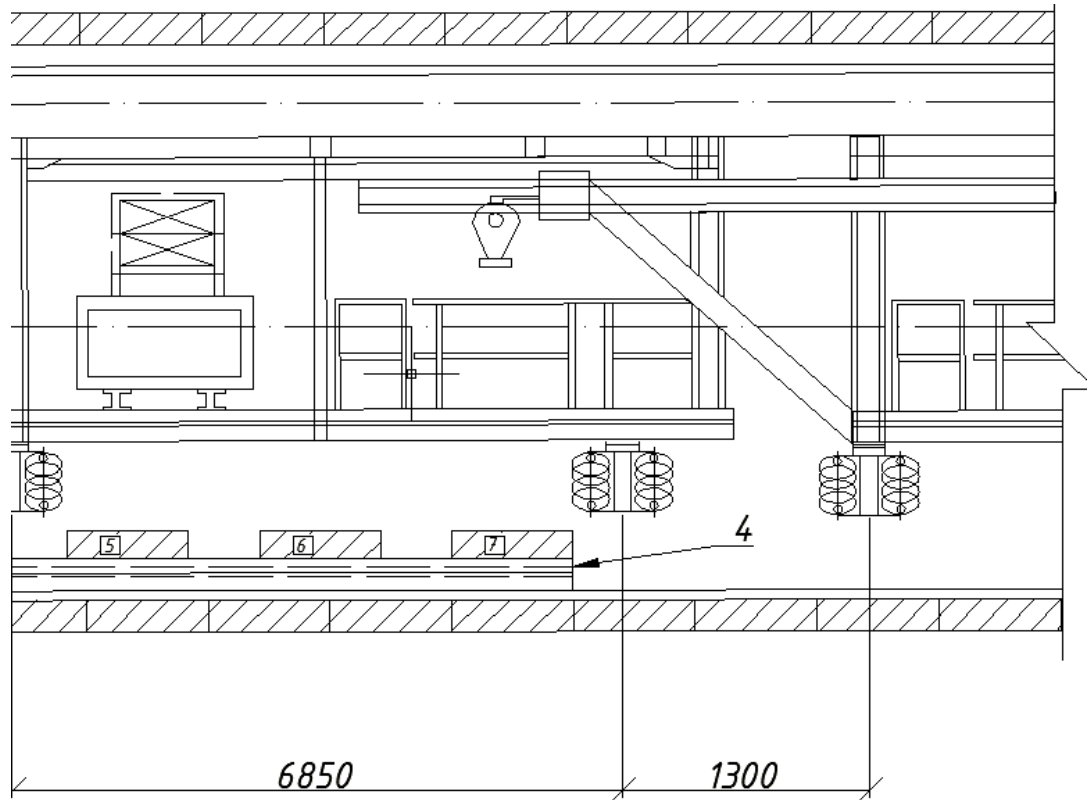


Рисунок 3.3 – Комплекс щиту фірми Herrenknecht (навантажувач)

3.2 Розрахунок параметрів механізованого щиту

Вибираючи прохідницький щит, слід керуватися результатами аналізу інженерно-геологічних умов. Для даного ґрунту (суглинок – $f=0,8$, умови Київського метрополітену) вибираємо щит комбінованого типу або з роторним робочим органом.

Визначаємо основні розміри щита:

Повна довжина щита $L_{щ}$:

$$L_{щ} = L_{нч} + L_{ок} + L_{хоб}$$

$L_{нч} = 1 \div 1,2 \text{ м}$ – довжина ножової частини кільця;

$L_{ок} = 2 \times b = 2 \times 1 = 2 м$ – довжина опорного кільця щита;

$L_{хоб} = l_1 + l_2 + l_3$ – довжина хвостової оболонки щита;

$l_1 = (1,2 \div 2,2) \times b = 2,2 \times 1 = 2,2 м$ – довжина перекриття кільцевої оправи;

$l_2 = 0,6 м$ – довжина виступаючої під оболонку щита частини гідроциліндра;

$l_3 = 0,15 м$ – величина зазору між опорною плитою щитового гідроциліндра

(рис. 3.4);

$$L_{щ} = 1 + 2 + (2,2 + 0,6 + 0,15) = 5,95 м$$

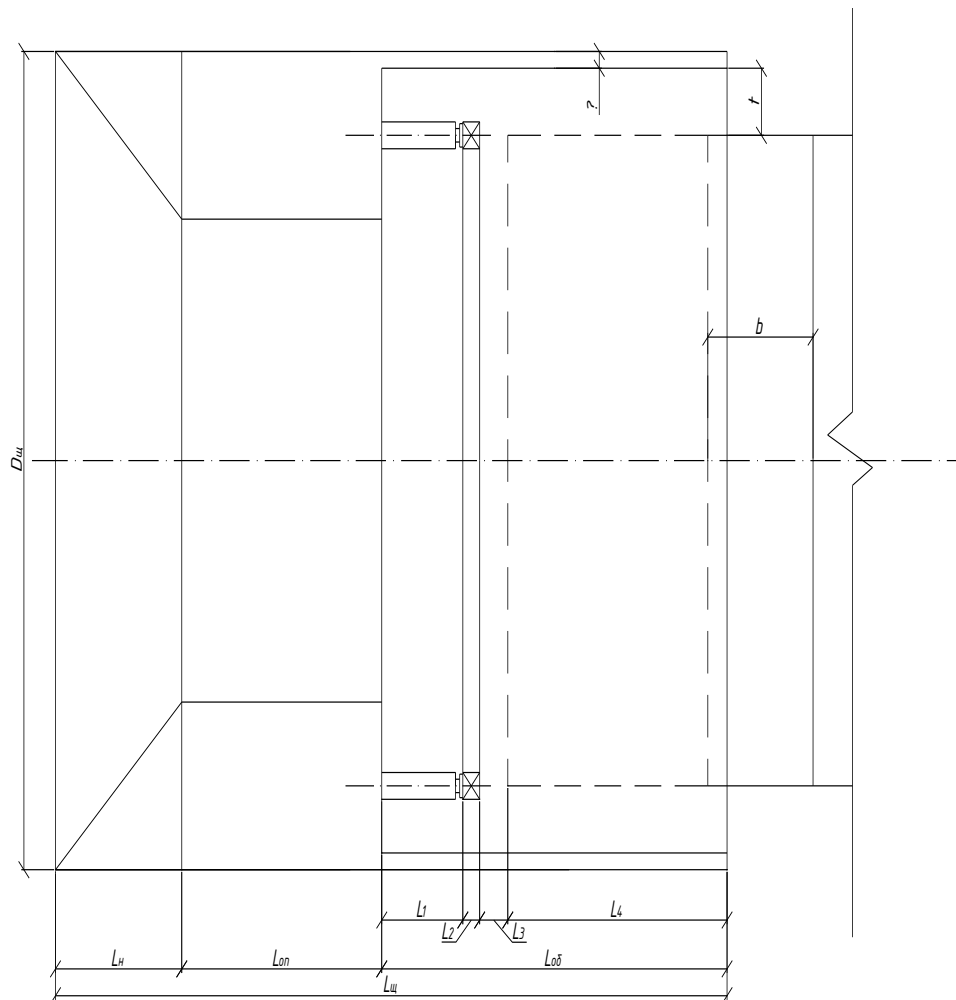


Рисунок 3.4 – Основні розміри щита

Внутрішній діаметр оболонки щита $D_{ц}$ повинен бути дещо більшим за зовнішній діаметр оправи для того, щоб врахувати можливі неточності при монтажі оправи й забезпечити можливість кута повороту щита відносно оправи на криволінійних ділянках траси.

Зовнішній діаметр щита складає:

$$D_{ц} = 1,008 \times D_{зн} + 2\delta = 1,008 \times 8,4 + 2 \times 0,03 = 8,53 \text{ м}$$

$\delta = 30 \text{ мм}$ – товщина оболонки щита.

Відношення $L_{ц} / D_{ц}$ називається коефіцієнтом маневреності щита. Величина цього коефіцієнта складає 0,4...0,75 для щитів великих діаметрів; 0,75...1,0 – щити середніх діаметрів і більше 1 – малих діаметрів:

$$\frac{L_{ц}}{D_{ц}} = \frac{5,95}{8,53} = 0,7$$

Щит відноситься до щитів великих діаметрів (рис. 3.5).

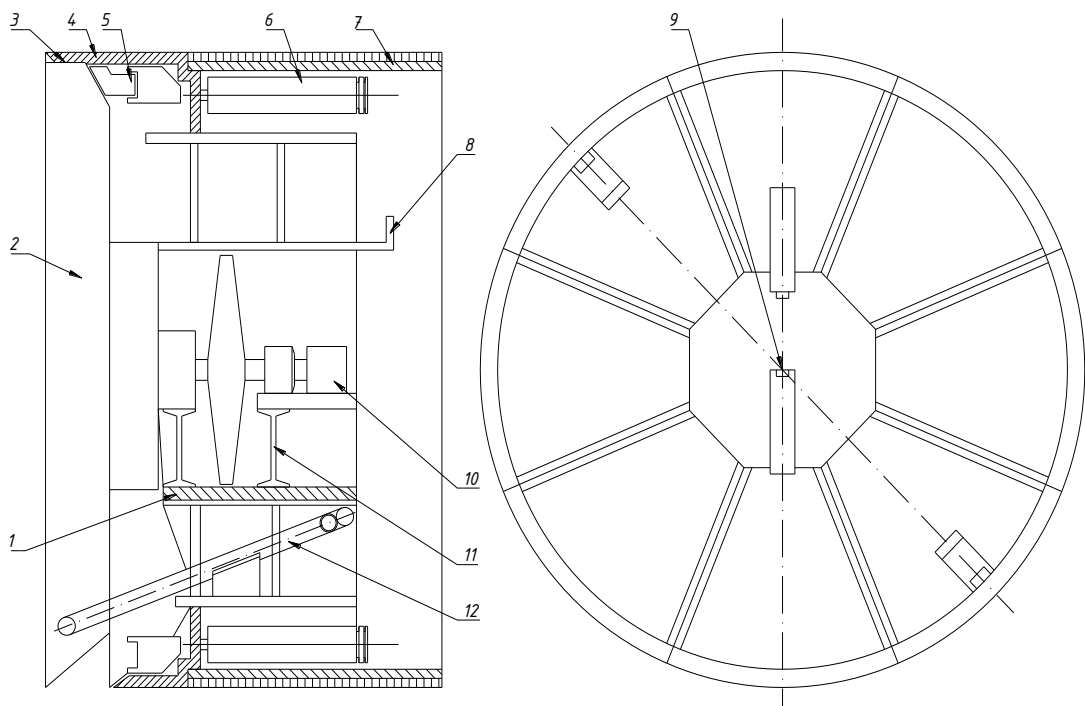


Рисунок 3.5 – Основні конструктивні елементи щита

Приблизна вага щита:

$$G = 85 \times D_{щ} - 250 = 85 \times 8,4^2 - 250 = 5747,6 \text{ кН}$$

Величина необхідного повного зусилля щитових гідроциліндрів визначається за формулою:

$$F \geq (1,1 \dots 1,3) \times R$$

де: R – загальна сила граничного опору:

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

$R_1 = S \times q_c^p = 55,4 \times 658,9 = 36503,1 \text{ кН} \cdot \text{м}$ – опір щиту породи по лобовій поверхні;

$$R_2 = f_{T1} \left[(q_B^p + P + q_G^3 + q_G^H) L_{щ} D_{щ} + G_{щ} \right] + 1000 \pi C L_{щ} D_{щ} + 0,05 f_{T1} k_D \Delta L_{щ} D_{щ} = 0,4 \left[(616 + 640,8 + 421,12 + 534,24) \times 5,95 \times 8,53 + 5747,6 \right] + 1000 \times 3,14 \times 6 \times 5,95 \times 8,53 + 0,05 \times 0,4 \times 2930,8 \times 0,037 \times 5,95 \times 8,53 = 1003514,9 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$f_{T1} = 0,4$ – коефіцієнт тертя сталі по ґрунту; $C = 6 \text{ кН} / \text{м}^3$ – питоме зчеплення між ґрунтом та сталлю щита;

$$k_D \frac{5}{D_{щ}} \times k = \frac{5}{8,53} \times 0,5 \times 10^4 = 2930,8 \text{ кН} \quad \text{– наведений коефіцієнт пружного відпору}$$

ґрунт у;

$$\Delta = \frac{1}{6 \times f + 4} - 0,077 = \frac{2}{6 \times 0,8 + 4} - 0,077 = 0,037 \quad \text{– обжимання ґрунт у боковою}$$

поверхнею;

$$R_3 = f_{T2} \times (1,2 \dots 2,2) \times G_k = 0,5 \times 2 \times 160 = 160 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad \text{– опір щиту частини кріплення,}$$

яке розміщене під хвостовою оболонкою.

$R_4 = k_M \times f_{T2} \times G_{щ} = 2 \times 0,5 \times 57,47,6 = 5747,6 \text{ Кн} \cdot \text{м}$ – опір щиту частини щитового комплексу, який переміщується разом з щитом.

$$R = 36503,1 + 1003514,9 + 160 + 5747,6 = 1045925,6 \text{ Кн} \cdot \text{м}$$

$$F = 1,1 \times R = 1,1 \times 1045925,6 = 1150518 \text{ Кн}$$

Зусилля одного гідроциліндра дорівнює:

$$P_o = \frac{1,3 \times F}{n} = \frac{1,3 \times 1150518}{21} = 71222,5 \text{ Кн}$$

3.3 Цикл монтажу оправи

Монтаж кільця блочної залізобетонної оправи виконується за допомогою блокоукладальників, які утримують блоки в стабільному положенні до замикання кільця. Послідовність монтажу кільця залежить в основному від конструкції блокоукладальника. Універсальні укладки кільцевого типів забезпечують збірку залізобетонної блочної оправи. В цьому випадку укладання блоків починаємо з лоткового блоку. Для закріплення блока захватом робочого органа використовуємо отвір для нагнітання розчину, петле подібні випуски арматури, або кармани в тілі блока з арматурної петлі. При укладці блоків верхньої половини кільця використовуємо висувні балки укладальника, упорами якого кожен блок піджимається до оболонки щита. В радіальних стиках влаштовуємо монтажні шпильки. Для блоків ребристого перерізу умови збірки трішки полегшуються можливістю постановки тимчасових болтових в'язей між кільцями.

Для збірної блочної оправи, у якої сусідні кільця не зв'язані між собою, додатково нормується розмір уступів між блоками в кругових і радіальних швах не (більше 10 мм).

При використанні дугових, в тому числі і касетних укладальників, укладка починається з подачі блоків в склепіння тунелю, а замикання кільця проводиться в лотку. Укладальники такого типу дозволяють монтувати кільця оправи з найменшими відхиленнями від проєктного кругового окреслення. В укладальниках з поворотними дугами і дугових укладальниках незамкнутої склепінчастої оправи збірка блоків ведеться в зворотному порядку: спочатку по дугам переміщуємо нижні блоки, а пізніше вище лежачі. Замковий елемент, як і в оправах, які монтуються важільним укладальником, встановлюються в склепінні останнім.

Важливою умовою якості при збірці блочної оправи є забезпечення збереження блоків при дії щитових гідроциліндрів. При високих зусиллях передвижки щита, нерівномірному тиску гідроциліндрів в залізобетонних елементах можливе утворення тріщин, виколів. Для попередження утворення такого роду дефектів на щитах використовуємо кільця, які встановлюються між торцем оправи і башмаками щитових гідроциліндрів.

3.4 Цикл первинного нагнітання

Для забезпечення спільної роботи оправи і ґрунту і запобігання його просадки всі порожнини за оправою, а також за залишеними елементами тимчасового кріплення потрібно ретельно заповнити. Це досягається нагнітанням за оправу цементно-піщаного розчину, шар якого одночасно сприяє більш рівномірному розподілу гірського тиску, зменшує водонепроникність оточуючих ґрунтів і захищає оправу від агресивних підземних вод.

Нагнітання виконуємо у два прийоми: первинне (цементно-піщані розчини) і контрольне (цементний розчин). Метою контрольного нагнітання, яке проводять під підвищеним тиском, є заповнення порожнин за оправою, які залишилися після первинного нагнітання, і тріщин (в тому числі усадкових) в затверділому розчині, а також забезпечення надійної спільної роботи системи оправа – ґрунт. Цемент для нагнітання вибираємо з урахуванням агресивності

підземних вод, його марки.

Первинне нагнітання за залізобетонну оправу виконуємо цементно-піщаним розчином у такому співвідношенні 1:2.

Первинне нагнітання виконуємо під тиском, яке не перевищує 0,4 МПа, пневматичними апаратами з неперервним перемішуванням розчину.

Пневматичний розчинонагнітач представляє собою сталевий горизонтальний циліндр, який має загрузочну воронку, яка закривається конусним затвором. Загрузка циліндра виконується сухою сумішшю (цемент і пісок), яка доставляється в закритих контейнерах. В середині циліндра знаходиться кругові лопаті 4, які перемішують суху суміш з водою протягом 5 хвилин. Потім розчин виштовхується в шланг під тиском стисненого повітря. Пневматичні апарати прості за конструкцією, не мають частин, які труться і можуть нагнати розчини порівняно густої консистенції, але насичують розчин стисненим повітрям, що відображається на водонепроникності заповнення за оправу. Їх подача не перевищує $2 \text{ м}^3/\text{год}$.

Для контрольного нагнітання застосовуємо двохплунжерний насос, який працює в комплексі зі спеціальним розчино змішувачем місткістю 500 л і який забезпечує тиск до 1,5 МПа, який регулюється в широких межах. Подача насоса досягає $4 \text{ м}^3/\text{год}$.

Нагнітаючий розчин подаємо по гумових шлангах діаметром не менше 50 мм до отворів, які залишаються в оправі при бетонуванні. Ін'єктор кріпиться на різьбі до сталевих трубок, які закладені в оправу при бетонуванні, і які виступають в середину тунелю на 5...8 см, при відсутності трубок – обтискуванням гумового кільця в шпурі, який пробурений в оправі (рис. 3.6). Якість робіт по нагнітання перевіряємо нагнітанням цементного розчину через додатково пробурені шпури, які не повинні приймати його при граничному тиску. При спорудженні оправу по частинам допускається нагнітання за частини оправу до її повного спорудження.

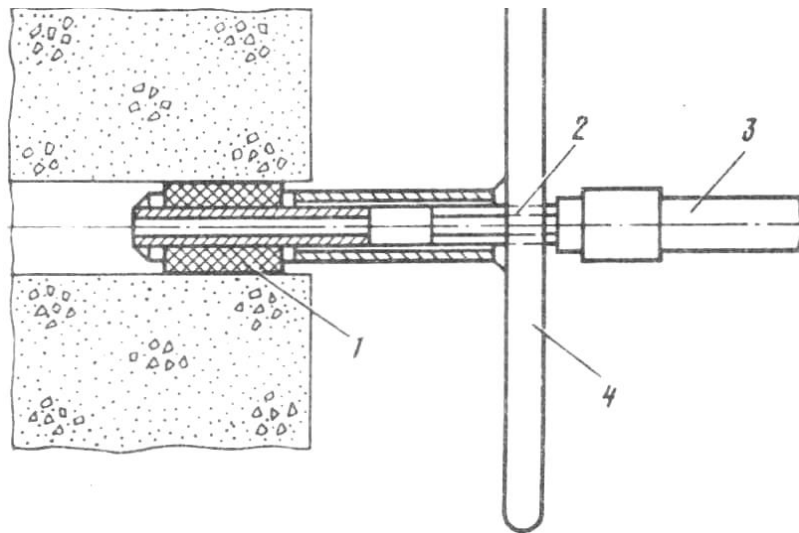


Рисунок 3.6 – Закріплення штуцера в шпурі:

1 – гума, 2 – різьба, 3 – шланг, 4 – рукоятка

3.5 Цикл чеканки швів

Ущільнення швів канавок – чеканку виконуємо спеціальним ущільнюючим матеріалом – замазкою із водо непроникаючого розширюючого цементу (ВРЦ), гіпсоглиноземистого ущільнюючого складу або спеціального безусадкового ущільнюючого складу (БУС). Цемент заливаємо водою в співвідношенні 1:10. Канавку перед заповненням очищаємо до металевому блиску пісконапірним пристроєм з наступною продувкою стисненим повітрям. Ущільнюючу замазку готуємо невеликими порціями (по 2-3 кг) для того, щоб можна було використовувати її на протязі 10 хв. Вкладаємо її канавку вручну або пневматичним цементоукладальником і ущільнюємо (чеканимо) пневматичними молотками РМ-1 або РМ-3 з набором чеканочних наконечників. Матеріал вкладаємо в канаву і чеканимо в два-три шари ділянками довжиною по 3...4 м зверху вниз по кільцю: спочатку поздовжні шви і місця спряження їх з кільцевими, а потім кільцеві шви.

При значному напорі ґрунтової води для гідроізоляції швів використовуємо свинцевий шнур. Його розміщуємо в чеканочну канавку і розплющуємо чеканочними молотками. Переконавшись в герметичності шва, поверх свинцю канавку розчеканюємо цементною замазкою.

3.6 Облаштування будівельного майданчика

Розмір будівельного майданчика залежить від кількості приміщень і складає 500...1000 м². Найчастіше використовують прямокутну форму будівельного майданчика.

Обов'язково на території будівельного майданчика повинна бути дорога, яка з'єднує всі приміщення. Для монтажних робіт використовують автомобільні, або козлові крани.

Навколо будівельного майданчика обов'язково встановлюється огорожа, два проїзди з охороною, та комплекс будівель, об'єм яких визначається за нормами в залежності від кількості людей (душ комбінат 150 чол. 40x10 м, склад ПММ з цегли – 5x8 м, майстерня для дерева – 4x7 м, склад для конструкцій – 15x10 м).

Якщо вздовж огорожі будівельного майданчика передбачається прохід людей і там проводяться будівельно-монтажні роботи, то для захисту людей влаштовують спеціальний козирок.

В темний період доби на будівельному майданчику повинно бути освітлення, а також обов'язково повинен бути телефон. Під час організації будівельного майданчика, розташування ділянок робіт, робочих місць, проїздів будівельних машин і транспортних засобів, проходів для людей на етапі розробки ПВР устанавлюються небезпечні для людей зони, у межах яких постійно діють або потенційно можуть діяти небезпечні виробничі фактори. На майданчику, де виконуються ремонтно-будівельні роботи, усі небезпечні зони повинні бути захищені або позначені знаками безпеки та написами. Пожежна безпека на будівельному майданчику, ділянках робіт і робочих місцях повинна відповідати вимогам Правил пожежної безпеки в Україні. Отвори в перекриттях, призначені для монтажу устаткування, ліфтів, сходових кліток тощо, до яких можливий доступ людей, повинні бути закриті суцільним надійним настилом. Лакофарбувальні, ізоляційні, захисні й інші матеріали, що виділяють вибухонебезпечні або шкідливі речовини, повинні зберігатися на робочих місцях у кількостях, що не перевищують змінної потреби.

У разі виділення етапів будівництва, які відрізняються сукупністю виробничих умов, відповідна підготовка майданчика здійснюється перед кожним етапом.

3.7 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.

1. Визначення кількості вагонеток, які електровоз зможе потягти з умови зрушення, кількість вагонеток округлюємо у меншу сторону:

$$z_6^{zp} \times (G + G_0) \leq \frac{1000 \times F_m}{\omega_{zp} + \omega_i + 110 \times a_{zp}} - P_c$$

де ω_{zp} – опір зрушенню вагонеток з місця;

ω_i – опір ухилу тунелю, приймається рівним максимальному ухилу в проміле;

G маса породи у вагонетці:

$$G = 0,9 \times \frac{V_{ваг} \times \gamma}{K_p} = 0,9 \times \frac{3,3 \times 18}{1,2} = 4,45t$$

Приймаємо вагонетки УВД-3,3 із режимом вільного розвантажування з відкидним днищем:

Ємність кузова – $V = 3,3m^3$;

Маса пустої вагонетки – $G_0 = 2,6t$

Ширина колії – 600 мм.

Для відкатки породи приймаємо електровоз К-7, з контактним типом живлення та шириною колії 600 мм:

Загальна маса електровоза – $P_c = 7m$;

Сила тяги – $F_m = 1,7m$;

Швидкість – $V = 10 \text{ км/год}$.

$a_{зр} = 0,05 \text{ м/с}^2$ – опір руху потяга з ґрунт ом при зрушенні з місця.

$$z_{г}^{зр} = \frac{1000 \times F_m}{(\omega_{зр} + \omega_i + 110 \times a_{зр}) \times (G + G_0)} - \frac{P_c}{(G + G_0)}$$

$$z_{г}^{зр} = \frac{1000 \times 1,7}{(10 + 9 + 110 \times 0,05) \times (4,45 + 2,6)} - \frac{7}{(4,45 + 2,6)} = 8,85 \approx 8 \text{ шт}$$

Отримуємо 8 вагонеток.

2. Визначення кількості вагонеток, які може зупинити електровоз за умови руху вниз та гальмування:

$$z_{г}^{зал} \times (G + G_0) \leq \frac{F_m'}{110 \times a_{зал} + \omega_i - \omega_{зал}} - P_c$$

Де: F_m' – скоригована сила тяги електровоза:

$$F_m' = 1000 \times \psi \times P_c = 1000 \times 0,24 \times 7 = 1680m$$

$a_{зал} = 0,39 \text{ м/с}^2$ – коефіцієнт опору за умови руху вниз;

$\omega_{зал} = 8 \text{ кг/м}$ – опір руху потягу із ґрунт ом за умови руху вниз.

$$z_{\text{в}}^{\text{зал}} = \frac{F'_m}{(110 \times a_{\text{зал}} + \omega_i - \omega_{\text{зал}}) \times (G + G_0)} - \frac{P_c}{(G + G_0)}$$

$$z_{\text{в}}^{\text{зал}} = \frac{1680}{(110 \times 0,39 + 9 - 8) \times (4,45 - 2,6)} - \frac{7}{(4,45 + 2,6)} = 4,43 \approx 4 \text{шт}$$

Остаточно приймаємо кількість вагонеток: 4 шт.

3. Визначаємо тривалість рейсу потягу:

$$T_p = T_{\text{рух}} + T_{\text{ман}}$$

де: $T_{\text{рух}}$ – тривалість руху потягу:

$$T_{\text{рух}} = \frac{2 \times L}{0,75 \times V}$$

L – довжина відкатки, км, приймається рівною половині довжини тунелю.

$$T_{\text{рух}} = \frac{2 \times 1,25}{0,75 \times 10} = 0,33 \text{год}$$

$T_{\text{м}} = 0,3 \text{год}$ – тривалість маневрів протягом рейсу.

$$T_p = 0,33 + 0,3 = 0,63 \approx 0,6 \text{год}$$

4. Визначаємо необхідну кількість електровозів для відкатки породи.

$$N = \frac{m \times n_0}{n_p}$$

де: $m = 0,5$ – коефіцієнт нерівномірності відкатки;

n_0 – кількість рейсів за цикл:

$$n_0 = \frac{G_{\text{цикл}}}{z \times G}$$

$G_{\text{цикл}} = V \times \gamma = 21,36 \times 18 = 384,48 \text{кН} = 38,45 \text{м}$ – маса розробленої породи за 1 цикл.

$$n_0 = \frac{38,45}{4 \times 4,45} = 2,16$$

n_p – можлива кількість рейсів 1 потяга з породою:

$$n_p = \frac{T}{T_p} = \frac{5,34}{0,6} = 8,9$$

$T = 5,34 \text{год}$ – час розробки та відкатки ґрунт у;

$$N = \frac{1,5 \times 2,16}{8,9} = 0,36 \approx 1$$

Необхідна кількість електровозів округлюється в більшу сторону, тому приймаємо 1 електровоз.

3.8 Обґрунтування параметрів вентиляції під час виконання робіт

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

Вміст шкідливих і отруйних газів та пилу у повітрі підземних виробок не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) для робочої

зони. 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 і проводиться за формулою:

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

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

$$Q = \frac{6N}{60} = \frac{6 \cdot 6}{60} = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$$

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

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

де S – площа перерізу виробки, що вентилюється.

$$S = \pi \cdot r^2 = 94,985 \text{ м}^2$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{0,6}{94,985} = 0,006 \text{ м/с}$$

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

$$Q = 0,25S = 0,25 \cdot 94,985 = 23,75 \text{ м}^3/\text{с}$$

Розрахункова продуктивність вентилятора (m^3/c) буде дещо менше через втрати повітря через нещільності трубопроводу:

$$Q_s = pQ = 0,0005 \cdot 0,6 = 0,0003 \text{ м}^3/\text{с},$$

де η – коефіцієнт доставки, який знаходиться:

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

β – коефіцієнт питомої стикової повітропроникливості, котрий для сталевих труб дорівнює 0,001; d – діаметр труб в м; L – довжина трубопроводу в м; m – довжина ланки труби в 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 кілоджоргах) складає:

$$R = 6,5 \cdot \alpha \frac{L}{d^5} = 6,5 \cdot 0,00035 \cdot \frac{200}{0,5^2} = 1,82,$$

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 $\alpha=0,00030$.

$$p = \left(\frac{\beta d L}{3m} \sqrt{R} + 1 \right)^2 = \left(\frac{0,001 \cdot 0,5 \cdot 200}{3 \cdot 3,5} \cdot \sqrt{1,82} + 1 \right)^2 = 0,0005$$

Статичний напір h_{cm} в вентиляційному трубопроводі:

$$h_{cm} = RQ Q_e = 1,82 \cdot 2375 \cdot 0,3 = 1296,75, \text{ мм вод. ст.}$$

Після розрахунку коефіцієнту доставки P та статичного напору h та задавшись значенням максимального коефіцієнту корисної дії η , застосовуючи номограму знаходимо швидкість повітря через вихідний отвір вентилятора V_e і підбираємо вентилятор СВМ-6.

ВИСНОВКИ

1. Виконано варіантне проєктування оправи перегінного тунелю, що споруджується щитовим способом, і визначено параметри для трьох варіантів (оправа із залізобетонних блоків, із залізобетонних ребристих блоків і чавунних тубінгів). Проведене техніко-економічне обґрунтування конструкції оправи, яке свідчить, що економічним варіантом є варіант № 1 (оправа із залізобетонних блоків).

2. Визначено параметри оправи, яка закладена в міцній глині (умови Київського метрополітену, $f=1,2$), за методом О. Ю. Бугаєвої. Після підбору арматури, проведена перевірка оправи, яка доводить достатній рівень міцності залізобетонного блока.

3. Проведене обґрунтування параметрів тунельної оправи перегінного тунелю (в двох грунтах). Розроблена скінченно-елементна модель перегінного тунелю (просторова постановка). Визначено, що рівень еквівалентних напружень не досягає значення 8,0 МПа, що свідчить про те, що в оправі не виникає тріщин, а самі залізобетонні елементи мають значний запас міцності (від 2,8 раз до 6,25 раз тільки по бетону).

4. Для слабкого ґрунту (суглинок – $f=0,8$, умови Київського метрополітену) обрано щит з роторним робочим органом. Обґрунтовано параметри технології щитової проходки перегінного тунелю (цикли проходки, монтажу, первинного нагнітання, чеканки швів).

5. Виконано розрахунок параметрів механізованого щиту. Розраховано електровозну відкатку та параметри вентиляції під час щитової проходки. Наведені дані щодо облаштування будівельного майданчика.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Навчальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – К.: 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 – 133с.
4. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
5. ДБН Д.2.2.-29-99 Ресурсні елементні кошторисні норми. Збірка 29. Тунелі та метрополітени [Текст]. – Київ: Держбуд України, 2006. – 271 с.
6. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
7. Петренко, В. Д. Методичні вказівки для курсового та дипломного проектування «Математичне моделювання підземних споруд на основі методу скінченних елементів. Ч. 1. Structure CAD for Windows (SCAD)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, В. П. Купрій. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2010. – 56 с.
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. – 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. Тютькін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 60 с.

12. SCAD для користувача [Текст] / В. С. Карпиловський, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Киев : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.