

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

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

«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

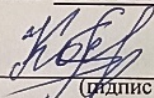
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

ОС «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Конструювання та спорудження колонної станції  
в породах середньої міцності  
за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»  
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: MT2227

  
(підпис студента)

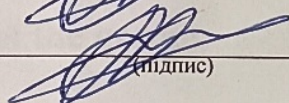
/ Руслан КОСАКІВСЬКИЙ /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

  
(підпис)

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

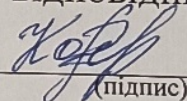
Нормоконтролер:

  
(підпис)

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

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

Студент

  
(підпис)

Дніпро – 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: Design and construction of a column station

in rocks of medium strength

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: MT2227 / Ruslan KOSAKIVSKYI /  
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /  
(position, name, surname)

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

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Мости і транспортні тунелі»

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

\_\_\_\_\_ **Олексій ТЮТЬКІН**

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата \_\_\_\_\_

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Косаківському Руслану Богдановичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Конструювання та спорудження колонної станції в породах середньої міцності»

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

(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 Дніпровського метрополітену, конструкцій колонної станції та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

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

Вступ. Розділ 1. Конструювання колонної станції в породах середньої міцності.

Розділ 2. Чисельний аналіз стержневої моделі колонної станції. Розділ 3.

Спорудження колонної станції в породах середньої міцності. Висновки.

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

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

## 6. Консультанти розділів роботи:

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Розділ 1. Конструювання колонної станції в породах середньої міцності.	30.10.2023-19.11.2023	
2	Розділ 2. Чисельний аналіз стержневої моделі колонної станції.	20.11.2023-17.12.2023	
3	Розділ 3. Спорудження колонної станції в породах середньої міцності. 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)

Руслан КОСАКІВСЬКИЙ

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олексій ТЮТЬКІН

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 стор., 25 рис., 5 табл., 14 літературних джерел.

Об'єкт розробки – колонна станція глибокого закладення, що споруджується в породах середньої міцності.

Мета роботи – конструювання та спорудження колонної станції.

Метод дослідження – метод скінченних елементів.

В магістерській роботі виконано аналіз конструктивних схем колонних станцій глибокого закладення, визначено основні розміри колонної станції та проведене техніко-економічне порівняння варіантів.

Побудована стержнева скінченно-елементна модель колонної станції. Проведений чисельний аналіз конструктивних елементів станційної конструкції методом скінченних елементів із варіацією товщини. Проаналізовано результати обґрунтування геометричних параметрів конструктивних елементів.

Розроблено основи спорудження колонної станції в породах середньої міцності, зокрема розраховані параметри буровибухових робіт.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, КОЛОННА СТАНЦІЯ, ПОРОДИ СЕРЕДНЬОЇ МІЦНОСТІ, СИЛОВІ ФАКТОРИ, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, БУРОВИБУХОВІ РОБОТИ

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 КОНСТРУЮВАННЯ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ В ПОРОДАХ СЕРЕДНЬОЇ МІЦНОСТІ.....	9
1.1 Аналіз конструктивних схем колонних станцій глибокого закладення.....	9
1.2 Визначення основних розмірів колонної станції.....	14
1.3 Техніко-економічне порівняння варіантів.....	15
2 ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТЕРЖНЕВОЇ МОДЕЛІ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ.....	19
2.1 Побудова стержневої моделі колонної станції .....	19
2.2 Результати обґрунтування геометричних параметрів конструктивних елементів .....	20
3 СПОРУДЖЕННЯ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ В ПОРОДАХ СЕРЕДНЬОЇ МІЦНОСТІ.....	33
3.1 Організація будівництва .....	33
3.2 Етапи спорудження колонної станції.....	34
3.3 Розрахунок параметрів буровибухових робіт .....	38
3.4 Нагнітання за оправу .....	52
3.5 Чеканка швів.....	54
3.6 Розрахунок вентиляції при БВР.....	54
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	59

## ВСТУП

Будівництво станцій метрополітену глибокого закладення завжди є складним комплексним процесом, який потребує повного взаємозв'язку між розробленими конструктивними рішеннями, обраним способом спорудження, обґрунтованим способом розробки породи та інших технологічних процесів. Відомо, що способи виробництва робіт, послідовність їх виконання і порядок спорудження підземної станції в цілому приймають в прямій залежності не тільки від інженерно-геологічних умов конструктивного типу станції, але і від матеріалів, з яких виконані елементи оправи, розмірів цих елементів, їх взаємного розташування в конструкції і характеру зв'язків між ними.

Починаючи з 2017 року до початку війни РФ проти України, Дніпровський метрополітен продовжував свою розбудову. Турецька компанія-підрядник LİMAK, спираючись на свій європейський досвід, застосовувала під час будівництва нові технології, що мають фундаментом Новоавстрійський метод (NATM) спорудження підземних об'єктів.

Стратегія NATM ґрунтується на створенні багат шарових (частіше усього, двошарових) оправ: спочатку тимчасового кріплення, що розвантажує оточуючий масив, потім – постійної оправи. NATM дуже добре зарекомендував себе в Україні при будівництві Бескидського тунелю, що побудований як двошаровий (із гідроізоляцією між шарами). Але застосування NATM для спорудження станцій глибокого закладення («Театральна», «Центральна» і «Музейна» Дніпровського метрополітену) викликає значну пересторогу.

Не викликає сумнівів, що поетапне розкриття великих виробок при їх спорудженні NATM є закономірним і вже відпрацьованим на Бескидському тунелі, але трисклепінчасті станції метрополітену (пілонні та колонні) мають більш складну внутрішню структуру, яка не може бути врахована при NATM.

Тому, за відсутності проектів спорудження трисклепінчастих станцій NATM, слід прийняти класичний спосіб спорудження – по частинах, із застосуванням пілот-тунелю, використовуючи в якості способу розробки ґрунту

буровибуховий. Організація робіт по спорудженню станції повинна відповідати сучасним нормам будівництва і передбачати будівництво всього станційного комплексу або окремих його споруд за потоковим методом, яким забезпечується:

- ритмічність, рівномірність і безперервність технологічного процесу;
- можливість збільшення фронту робіт з метою скорочення термінів будівництва;
- високий технічний рівень будівництва при найменшій трудомісткості робіт;
- індустриальні методи робіт на основі застосування комплексної механізації і автоматизації основних і допоміжних процесів;
- висока якість робіт при якнайменших трудових, матеріальних і фінансових витратах;
- повна безпека виконання всіх видів робіт на будівництві.

В випускній кваліфікаційній роботі за здобуття ОС «магістр» виконане конструювання та спорудження колонної станції в породах середньої міцності (міцність за проф. Протод'яконовим  $f=7$ ). Особливу увагу приділено обґрунтуванню геометричних параметрів конструктивних елементів, а також розрахунку параметрів буровибухових робіт для бокового та середнього тунелів.

# 1 КОНСТРУЮВАННЯ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ В ПОРОДАХ СЕРЕДНЬОЇ МІЦНОСТІ

## 1.1 Аналіз конструктивних схем колонних станцій глибокого закладення

Конструктивна схема колонної станції базується на ідеї об'єднання колійних тунелів і розподільного залу в одну конструкцію [1, 10, 12]. Тунелі в колонній станції зближені таким чином, що їх оправи перетинаються і спираються на спільні внутрішні несучі конструкції. Ці конструкції, як правило, виконують у вигляді поздовжньої колонади, що не впливає на пасажиропотік.

Залежно від кількості станційних залів може бути один ряд поздовжньої колонади (двосклепінчаста станція) або, частіше, два ряди (трисклепінчаста станція). Трисклепінчаста конструкція з проміжними опорами дозволяє навіть у нескельних ґрунтах побудувати станцію, у єдиному просторовому об'ємі якої розташовані колійні тунелі й острівна платформа шириною 16 м. Конфігурація поперечного перерізу трисклепінчастої виробки дає можливість знизити обсяг ґрунту, що розробляється, у порівнянні з однопрогоновою виробкою; наявність проміжних опор покращує статичну роботу конструкції, а розділення залу створює комфортні архітектурні форми споруди [8, 12].

Можливі два варіанти конструктивних схем колонних станцій [8, 11, 12]. За першою схемою склепіння оправ спираються на колони через поздовжні прогони. За другою схемою розімкнена оправа тунелів спирається на колони через стандартні тюрбінгові клинчасті перемички, що входять до складу кілець оправ тунелів, аналогічно пілонним станціям. Перша схема прийнятна для станцій як з чавунною, так і із залізобетонною оправами, друга – тільки з чавунною.

У разі чавунної тюрбінгової оправ у вузлі сполучення склепінь з колонами елементи пов'язані болтовими зв'язками (жорсткий вузол). Жорстким буде сполучення склепінь і в разі монолітної залізобетонної оправ станційних тунелів. Жорсткий вузол обмежує зсув верху колон, але в ньому виникають

значні згинальні моменти. У збірній залізобетонній оправі слід передбачити вільне спирання елементів у вузлі сполучення (шарнірний вузол). Таке рішення виключає появу згинальних моментів у вузлі, а це не тільки дозволяє застосовувати блокову оправу (без зв'язків розтягування в стиках), але й приводить до центрованої передачі навантаження на колони.

Оправа бокових тунелів і середнього склепіння станцій з чавунною оправою і залізобетонними прогонами складається зі стандартних чавунних тюрінгів для станційних тунелів зовнішнім діаметром 9,5 м (рис. 1.1).

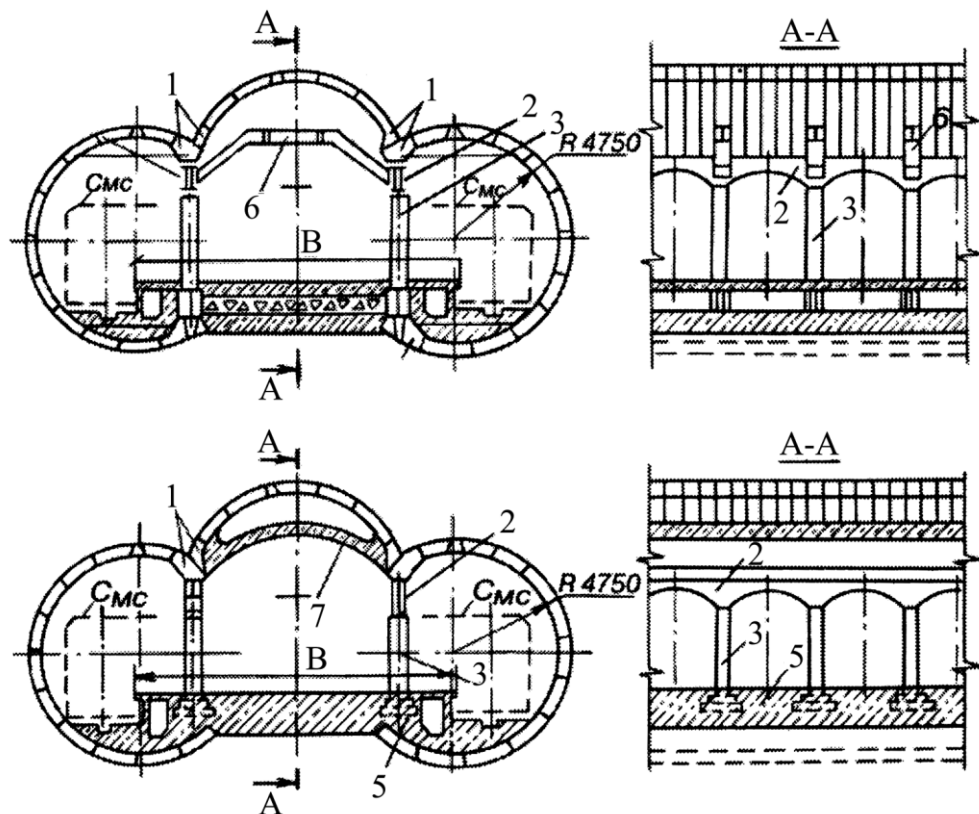


Рисунок 1.1 – Конструкції станцій колонного типу з чавунними тюрінгами й залізобетонними прогонами

Розімкнені кільця бокових тунелів і середнє склепіння станції через спеціальні фасонні тюрінги 1 жорстко спираються на два ряди сталевих аркових прогонів 2 зварної конструкції двотаврового перерізу. Прогони підтримуються сталевими колонами 3 тієї самої конструкції двотаврового або коробчастого перерізу, складеними з кутиків і листової сталі. Опорами колон служать або сталевий нижній прогін постійної висоти, сполучений з нижніми

опорними тюрінгами бокових тунелів 4, або залізобетонні ростверки, забетоновані на всю довжину цих тунелів 5. Розімкнені в нижній частині оправи бокових тунелів замикаються плоскою залізобетонною плитою.

Через великий прогін розподільного залу станції (ширина платформи  $B > 16$  м) для сприйняття рівнодіючої розпору розімкнених опор бокових тунелів і середнього склепіння встановлювалися криволінійні металеві балки 6 або залізобетонні склепіння 7.

У сучасних конструкціях колонних станцій з чавунною оправою та клинчастими перемичками використовується типова станційна оправа з чавунних тюрінгів діаметром 8,5 і 9,5 м (рис. 1.2) [8, 12].

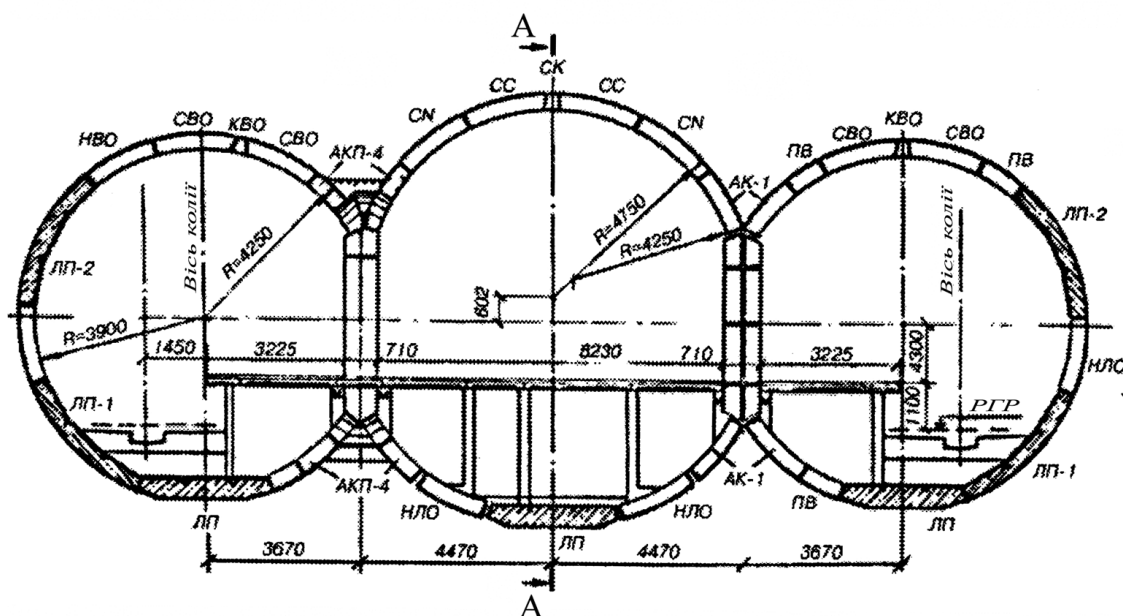


Рисунок 1.2 – Конструкція станцій колонного типу з чавунними тюрінгами і клинчастими перемичками

Внутрішні несучі конструкції складаються тільки з однотипних колон з опорними майданчиками для склепіння бокових тунелів і середнього склепіння станції. Башмаки, опорні балки, залізобетонні ростверки й плити в основі колон виключені повністю. Прогони замінені чавунними типовими клинчастими перемичками з фасонних тюрінгів, які під час проходки тунелів входять до складу кілець, які монтуються.

У ході розробки нових конструктивних рішень колонної станції з оправами

із збірного залізобетону за основу була прийнята традиційна схема станції колонного типу з розташуванням посадочних платформ у колійних тунелях. В умовах значних навантажень на конструкцію (до 1,5 МПа) і великого прогону колійних тунелів станції необхідно звести до мінімуму негативну дію згинальних моментів в опорних вузлах, де сполучаються залізобетонні елементи оправи, і знизити матеріаломісткість внутрішніх несучих конструкцій. Це завдання вирішується за рахунок улаштування шарнірного сполучення елементів у опорному вузлі, де з'єднуються склепіння оправ колійних тунелів і склепіння середнього залу (рис. 1.3) [8, 12, 13].

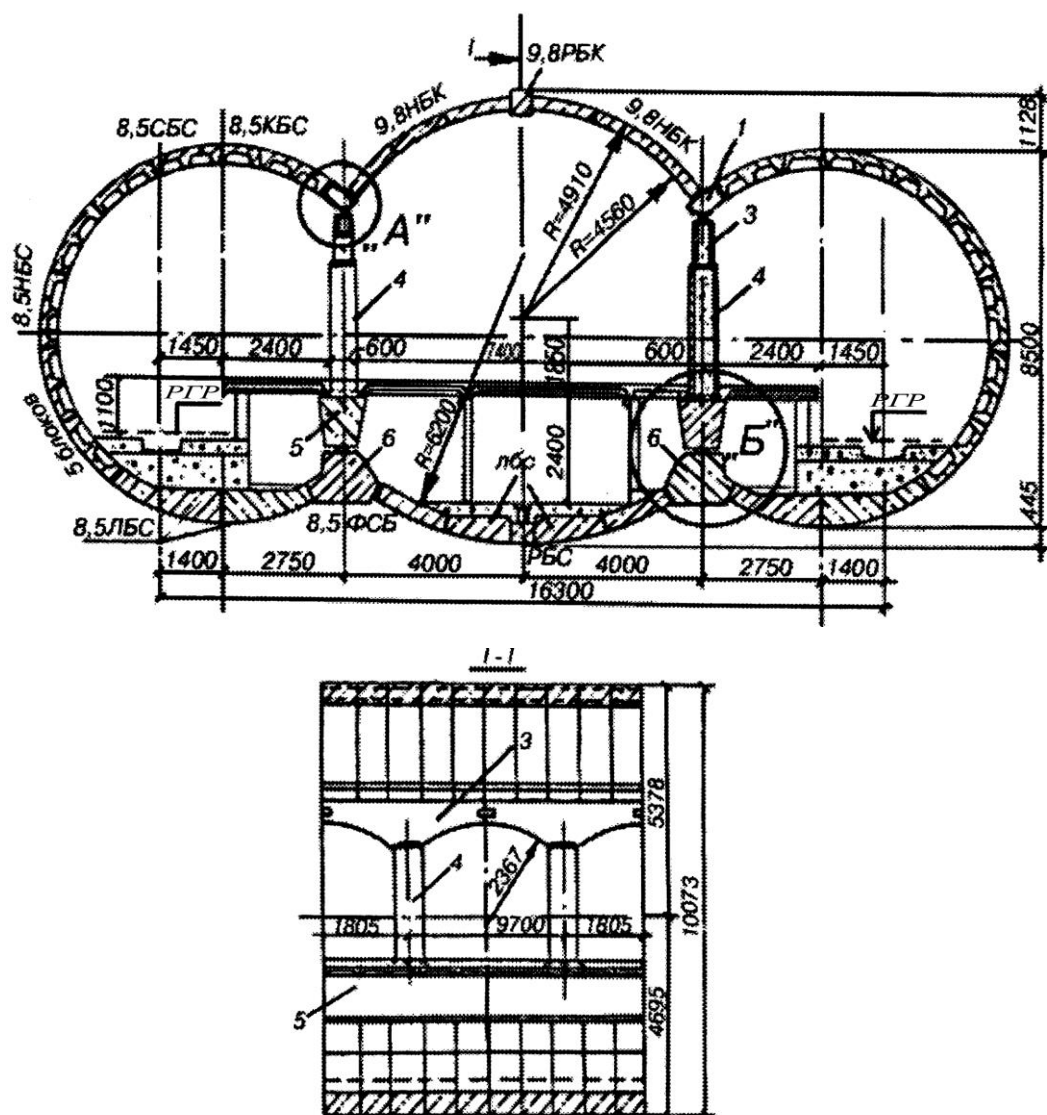


Рисунок 1.3 – Конструкція з оправою із залізобетонних елементів та фундаментними блоками (вузол «А» – фасонний тубінг, вузол «Б» – кріплення нижнього прогону)

Основним конструктивним елементом оправи колійних тунелів станції є типові кільця оправи зовнішнім діаметром 8,5 м із залізобетонних тубінгів. У кожне таке кільце (з боку осі станції) включені опорні чавунні тубінги 1 і залізобетонні фундаментні блоки 6. Лоткові тубінги замінені плоскими залізобетонними блоками. Розімкнені кільця колійних тунелів через чавунні опорні елементи вгорі й залізобетонні фундаментні блоки внизу спираються на систему внутрішніх несучих конструкцій. Ця система складається зі сталевих двоконсольних прогонів 3 коробчастого перерізу з криволінійним нижнім поясом, зі сталевих колон 4 коробчастого перерізу й нижнього прогону 5, виконаного з монолітного або збірною залізобетону.

Для виключення ексцентриситетів навантаження від тубінгових оправ передається на систему металокопструкцій: вгорі через циліндровий шарнір 2 на верхній пояс двоконсольного ригеля, а внизу через циліндровий шарнір і опорну частину – на залізобетонний прогін. Двоконсольний ригель і колона зварної коробчастої копструкції виготовлені з листів високоміцної низьколегованої сталі завтовшки 75...90 мм. Шарнірне обпирання розімкнених кілець оправи колійних тунелів на внутрішні несучі копструкції дозволило скоротити габаритні розміри цих копструкцій і розмістити їх повністю всередині бічних тунелів діаметром 8,5 м. При цьому відстань до краю платформи склала 2,4 м, а висота проходу – більше 3 м при кроці колон 3,79 м.

Склепіння середнього залу станції виконане з не пов'язаних одна з одною арок циркульного коптуру. Кожна арка складається із залізобетонних блоків суцільного перерізу. У замковий блок вмонтовані плоскі домкрати для обтискання склепіння на ґрунт. Для центрованої передачі нормальної сили між блоками встановлені вініпластові прокладки. Аналогічне за копструкцією зворотне склепіння середнього залу. Багатошарнірна схема склепінь середнього залу станції дозволила понизити армування залізобетонних елементів. Регульоване обтискання склепінь на породу дає можливість зафіксувати положення колон у вертикальній площині й зменшити осідання земної поверхні під час спорудження станції.

Внутрішні несучі конструкції станції, виконані з металу з розрахунку на сприйняття значних навантажень (до 4 000 т на колону), у сприятливих умовах роботи слід замінити більш економічними конструкціями. Такими конструкціями можуть бути залізобетонні ригелі й колони, виготовлені з високоміцних бетонів.

## 1.2 Визначення основних розмірів колонної станції

Основними розмірами станції є: довжина і ширина посадочних платформ, довжина і ширина середнього залу станції, висота станції у світу, ширина і висота проходів [2, 8].

Довжина пасажирської платформи станції приймається згідно з кількістю вагонів, які експлуатуються у поїздах, що проходять через станцію:

$$L_{nl} = l \cdot n + a ,$$

де  $l$  – довжина вагонів між зціпленнями, м;  $n$  – кількість вагонів у поїзді, шт.;  $a = 2$  м.

$$L_{nl} = 19,2 \cdot 5 + 2 = 98 \text{ м} .$$

Площа платформи визначається з урахуванням кількості пасажирів:

$$\omega = P_{nl} \cdot \eta ,$$

де  $P_{nl}$  – кількість пасажирів, які знаходяться на платформі, чол.;  $\eta$  – щільність заповнення платформи, м<sup>2</sup>/чол.

Кількість пасажирів, які знаходяться на платформі:

$$P_{nl} = A \cdot n \cdot k_{ng} ,$$

де  $A$  – розрахункова величина заповнення вагону,  $A=170$  чол.;  $k_{ng}$  – коефіцієнт посадки-висадки пасажирів (у відсотках відносно загальної кількості пасажирів у поїзді).

$$P_{nl} = 170 \cdot 5 \cdot 0,6 = 510 \text{ чол} . ,$$

$$\omega = 510 \cdot 0,55 = 280,5 \text{ м}^2 .$$

Розрахункова довжина платформи визначається з урахуванням відстані від початку поїзда до перших дверей і від останніх до кінця поїзда ( $\approx 7$  м) :

$$L_p = L - 7 \text{ м} .$$

$$L_p = 98 - 7 = 91 \text{ м} .$$

Ширина острівної платформи визначається за формулою:

$$B = 2b + b_0 + 2,5 \text{ м} ,$$

де  $b_0$  – додаткова ширина платформи, яка враховує переміщення пасажирів по платформі.

Незалежно від розрахунку згідно з ДБН «Метрополітени» [2] мінімальна ширина платформи для колонних станцій приймається рівною 12 м:

$$B = 2 \cdot 3,5 + 3 + 2,5 = 12,5 \text{ м} .$$

Важливим фактором, який визначає розміри станції, є число ескалаторів, яке залежить від годинного пасажиропотоку станції і пропускної можливості одного ескалатора:

$$n_э = \frac{2 \cdot n_n \cdot P_{пл}}{8500} ,$$

де  $n_n$  – число пар поїздів за годину;  $P_{пл}$  – кількість пасажирів, які одночасно знаходяться на платформі; 8500 – пропускна спроможність одного ескалатора.

$$n_э = \frac{2 \cdot 30 \cdot 510}{8500} = 3,6 \text{ шт} .$$

Приймаємо 4 шт.

### 1.3 Техніко-економічне порівняння варіантів

Техніко-економічне порівняння виконано за допомогою комплексу АВК-5 на спрощеному рівні [6]. Усі дані для двох варіантів (Варіант 1 – колонна станція із залізобетонними елементами; Варіант 2 – колонна станція із чавунними тюрінгами) наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Техніко-економічне порівняння варіантів

№ п/п	Найменування робіт	Од. вим.	Об'єми і трудовитрати					
			Варіант 1			Варіант 2		
			Об'єми робіт	Праце- витрати на од., чол·год	Праце- витрати на об'єм чол·год	Об'єми робіт	Праце- витрати на од., чол·год	Праце- витрати на об'єм чол·год
1.	Проходка лівого пілот-тунелю d=5,5 м	100 м <sup>3</sup>	23,27	35,55	827,25	23,27	35,55	827,25
2.	Проходка правого пілот- тунелю d=5,5 м	100 м <sup>3</sup>	23,27	35,55	827,25	23,27	35,55	827,25
3.	Монтаж оправи пілот-тунелю	100 м <sup>3</sup>	3,26	818,44	2668,11	3,26	818,44	2668,11
4.	Розкриття лівого станційного тунелю до 8,5 м	100 м <sup>3</sup>	32,31	595,66	19245,77	32,31	595,66	19245,77
5.	Зведення оправи лівого станційного тунелю	100 м <sup>3</sup>	5,58	1548,4	8640,07	–	–	–
6.	Первинне нагнітання за оправу	100м <sup>2</sup>	21,78	61,62	1342,08	21,78	61,62	1342,08
7.	Чеканка швів	100м	37,20	197,5	7347,00	37,20	197,5	7347,00
8.	Посилення проходів тюбінгами тимчасового заповнення	100м <sup>3</sup>	0,369	818,44	302,00	0,369	818,44	302,00
10.	Розкриття правого	100 м <sup>3</sup>	32,31	595,66	19245,77	32,31	595,66	19245,77

№ п/п	Найменування робіт	Од. вим.	Об'єми і трудовитрати					
			Варіант 1			Варіант 2		
			Об'єми робіт	Праце- витрати на од., чол·год	Праце- витрати на об'єм чол·год	Об'єми робіт	Праце- витрати на од., чол·год	Праце- витрати на об'єм чол·год
	станційного тунелю до 8,5 м							
11.	Зведення оправи правого станційного тунелю	100 м <sup>3</sup>	5,58	1548,4	8640,07	–	–	–
12.	Первинне нагнітання за оправу	100 м <sup>2</sup>	21,78	61,62	1342,08	21,78	61,62	1342,08
13.	Чеканка швів	100 м	37,20	197,5	7347	37,20	197,5	7347
14.	Проходка штолень	100 м <sup>3</sup>	2,36	914,82	2158,98	2,36	914,82	2158,98
15.	Розкриття калоти	100 м <sup>3</sup>	5,06	1188,16	6012,09	5,06	1188,16	6012,09
16.	Проходка середнього станційного тунелю	100м <sup>3</sup>	47,12	35,55	1675,12	47,12	35,55	1675,12
17.	Монтаж чавунної оправи станційних тунелів	т	–	–	–	13,38	1548,4	20717,59
18.	Первинне нагнітання за оправу	100 м <sup>2</sup>	17,42	61,62	1073,42	17,42	61,62	1073,42
19.	Чеканка швів	100 м	23,50	197,5	4641,25	23,50	197,5	4641,25
20.	Демонтаж тимчасового	1 т	189,4	4,68	886,39	236,8	4,68	1108,22

№ п/п	Найменування робіт	Од. вим.	Об'єми і трудовитрати					
			Варіант 1			Варіант 2		
			Об'єми робіт	Праце- витрати на од., чол·год	Праце- витрати на об'єм чол·год	Об'єми робіт	Праце- витрати на од., чол·год	Праце- витрати на об'єм чол·год
	заповнення							
21.	Металоізоляція оправи	100 м <sup>2</sup>	4,05	88,8	359,6	4,71	88,8	418,25
22.	Контрольне нагнітання за оправу	100 м <sup>2</sup>	66,3	56,41	3739,98	66,3	56,41	3739,98
23.	Влаштування станційних платформ	100 м <sup>3</sup>	3,96	1227,66	4861,53	3,96	1227,66	4861,53
24.	Приєм та вивантаження грунту на естакаді	100 м <sup>3</sup>	251,67	41,08	10338,60	251,94	41,08	10349,70
25.	Влаштування колії в станційних тунелях	1000 м	0,197	7268	1431,80	0,197	7268	1431,80
					<b>114953,21</b>			<b>118671,14</b>

Оскільки після проведеного техніко-економічного порівняння різниця між варіантами складає 3,23 %, то, враховуючи складну гідрогеологічну ситуацію спорудження Дніпровського метрополітену, для подальшого чисельного аналізу та розробки спорудження обирається Варіант 2 – колонна станція із чавунними тюрінгами.

## 2 ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТЕРЖНЕВОЇ МОДЕЛІ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ

### 2.1 Побудова стержневої моделі колонної станції

Для чисельного аналізу методом скінченних елементів побудовано модель колонної станції для розрахунку (комплекс SCAD, рис. 2.1) [5, 9, 14], до якої прикладене навантаження (рис. 2.2).

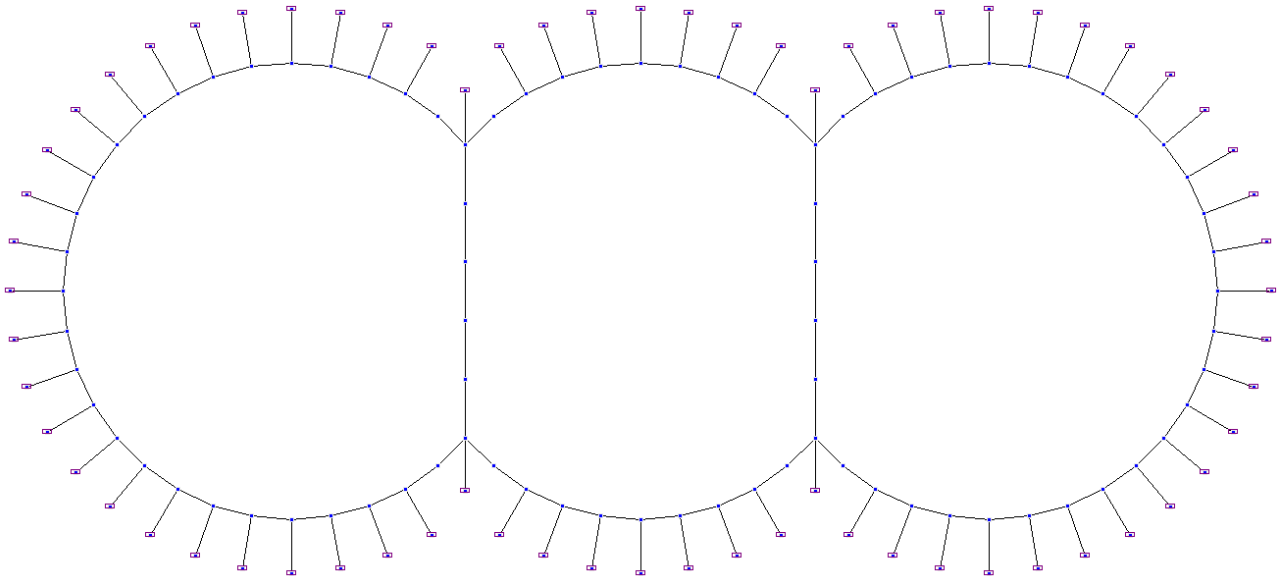


Рисунок 2.1 – Скінченно-елементна модель зі закріпленням

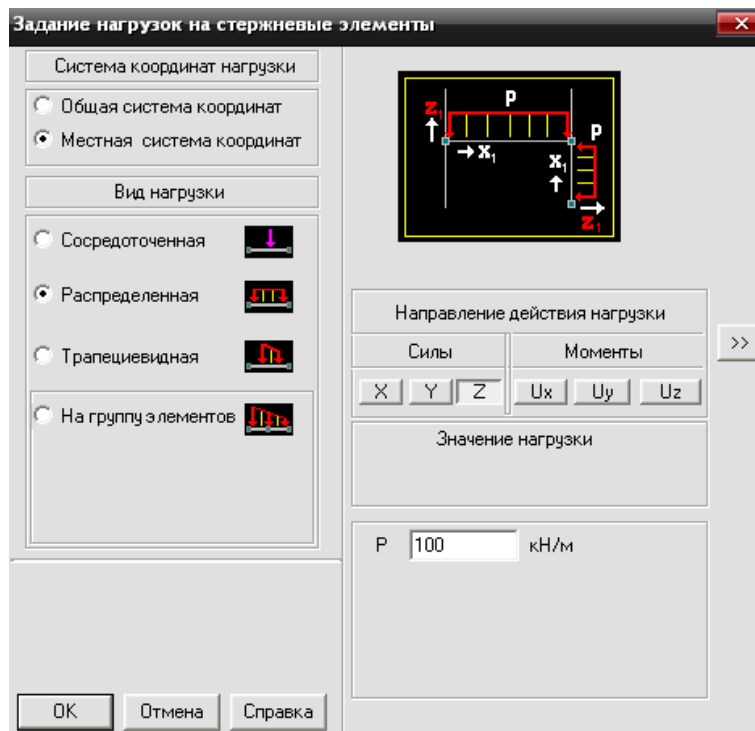


Рисунок 2.2 – Присвоєння навантаження на стержневі елементи

Після декількох ітерацій, під час яких уточнена кількість еквівалентних стержнів, отримано остаточну модель для розрахунку (рис. 2.3) [3, 4].

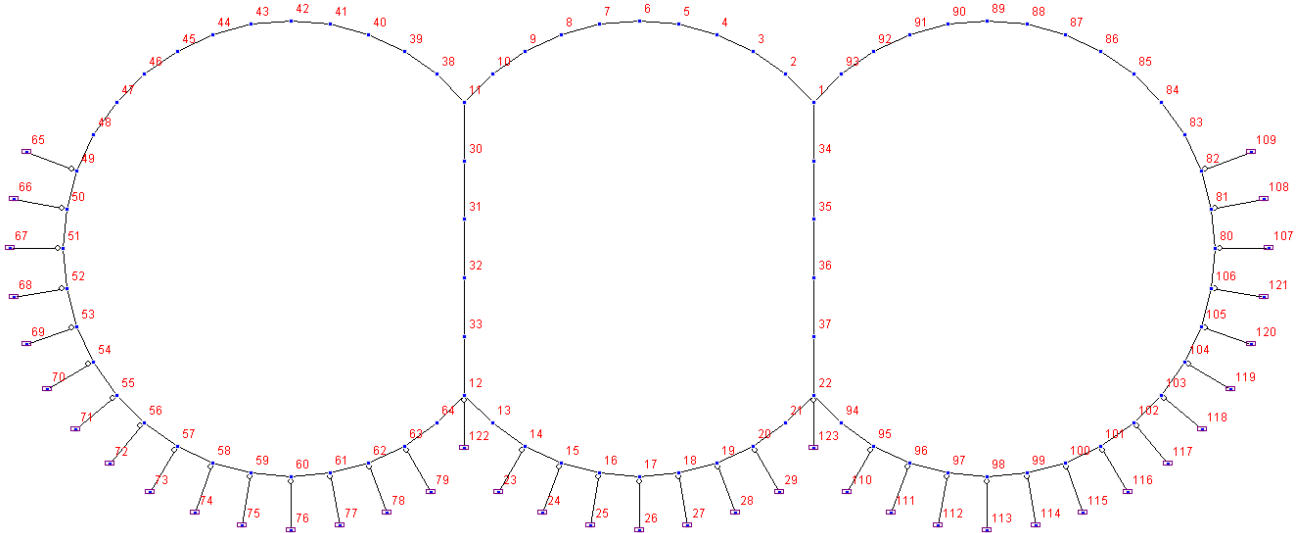


Рисунок 2.3 – Модель для розрахунку

Виконуємо розрахунок (рис. 2.4).

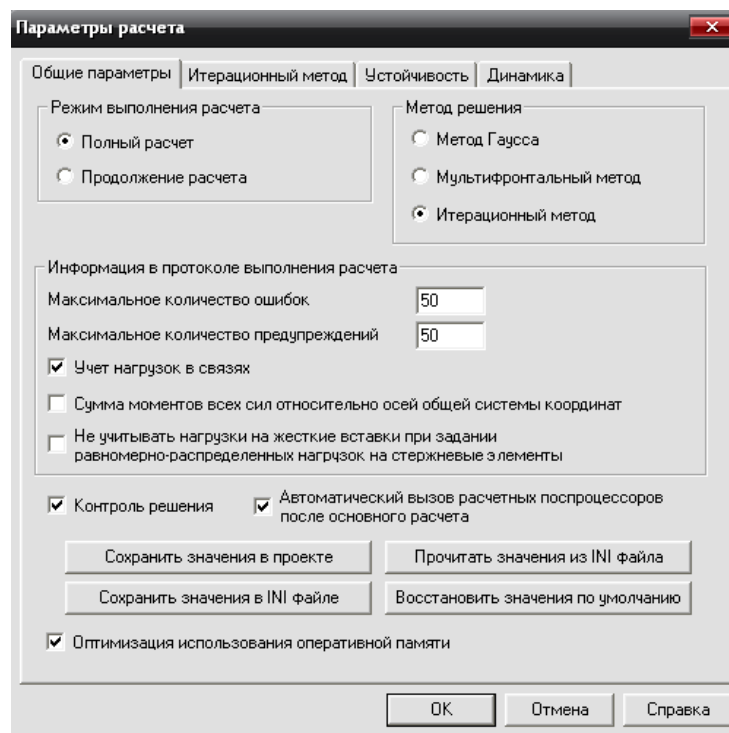


Рисунок 2.4 – Параметри розрахунку

## 2.2 Результати обґрунтування геометричних параметрів конструктивних елементів

Нижче наведені результати обґрунтування геометричних параметрів

конструктивних елементів (блоків) бокового та середнього тунелів станцій пілонного та колонного типу. Змінним параметром була товщина бокового та середнього тунелів. Проводилися розрахунки з товщинами  $h=200; 250; 300; 350; 400; 450; 500$  мм.

Для аналізу силових факторів обрано декілька характерних точок на оправі бокового та середнього тунелю (точка прилягання оправы до колони та до перемички; замок; точка на горизонтальній осі; точка, протилежна замкові та інші) (рис. 2.5).

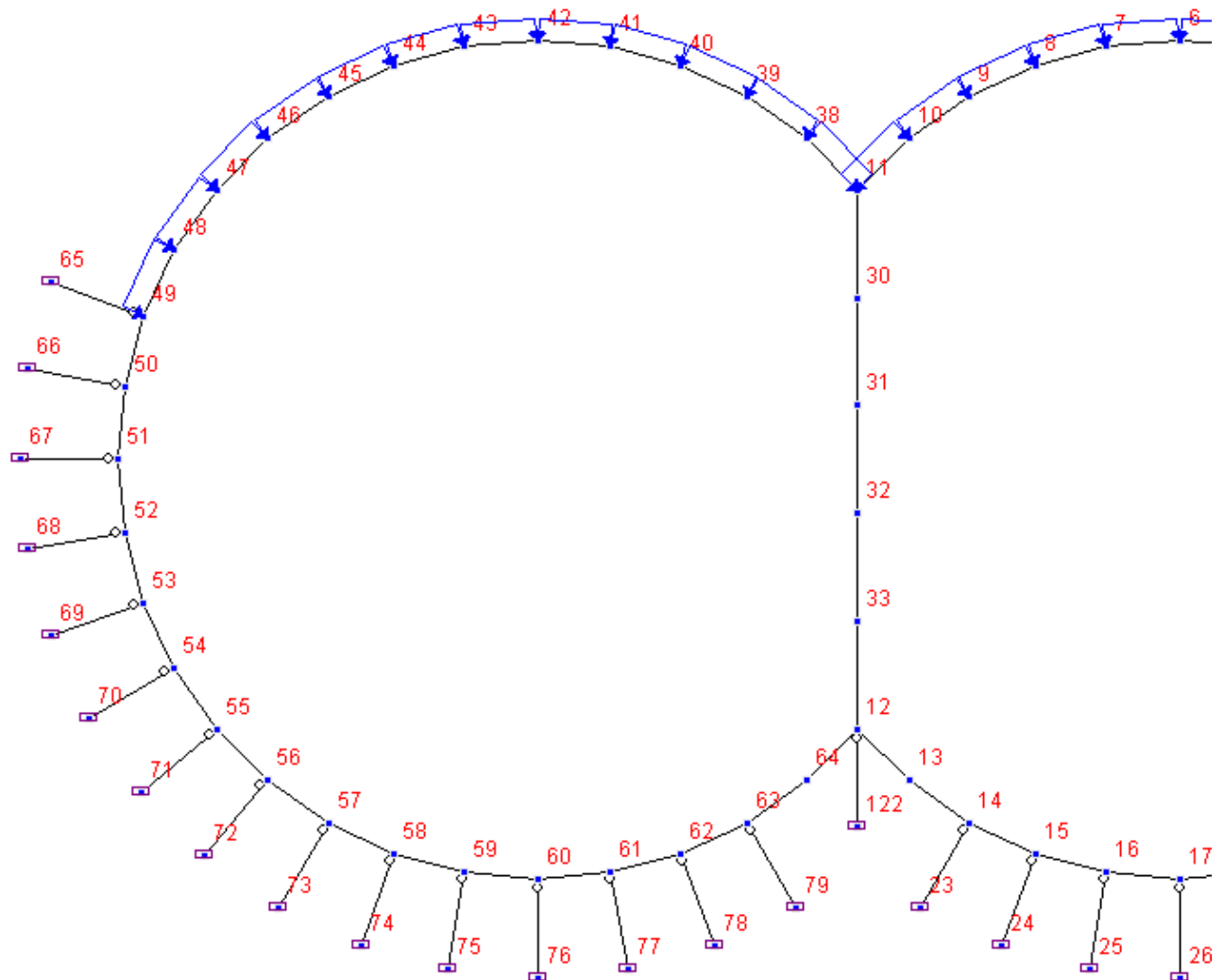


Рисунок 2.5 – Модель колонної станції із розташуванням точок

На рис. 2.6-2.12 наведені епюри силових факторів (нормальних сил та згинальних моментів) для конкретної товщини  $h$ . Алгоритм аналізу силових факторів викладено в науковій роботі [11].

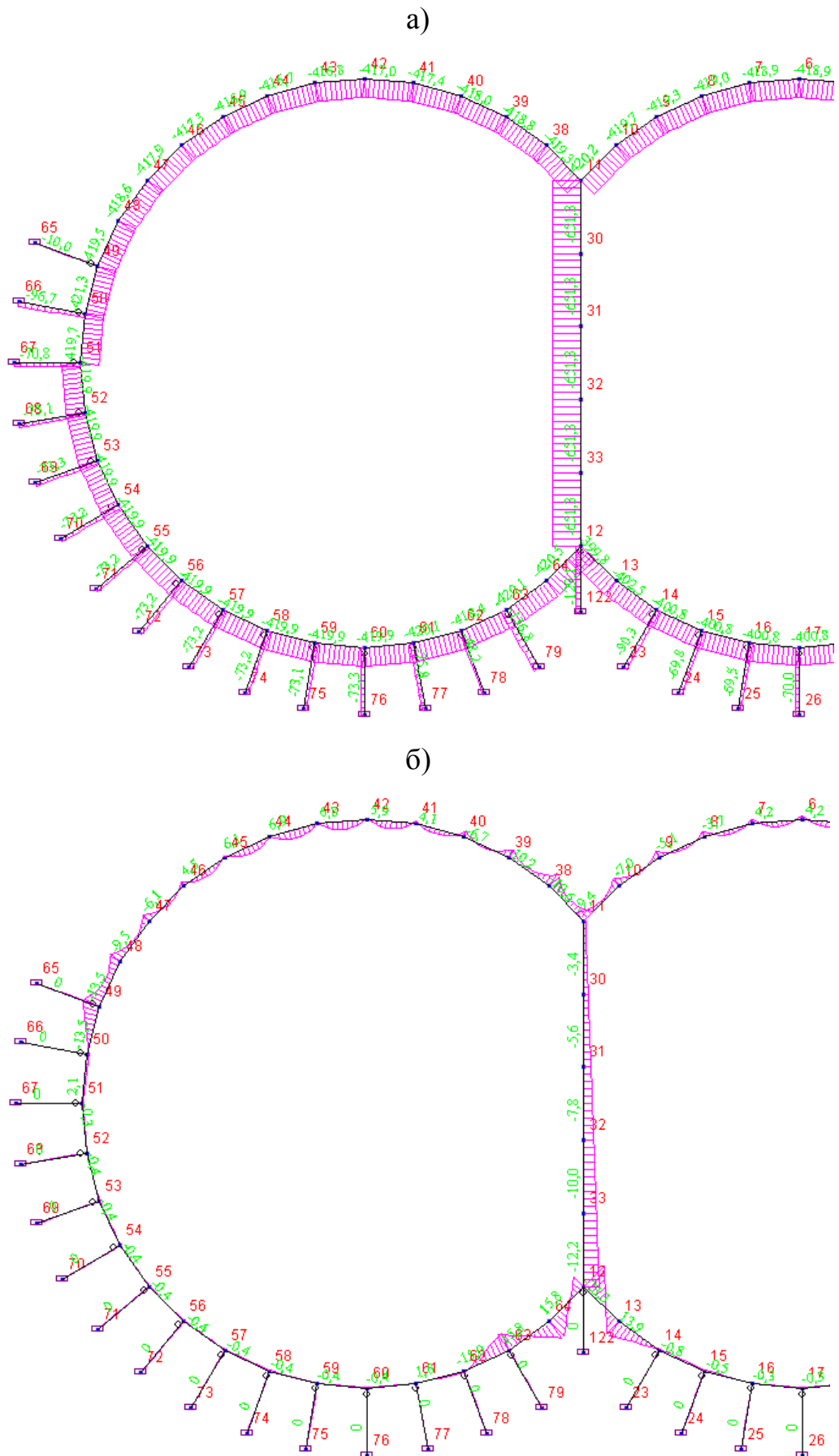


Рисунок 2.6 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=200$  мм)

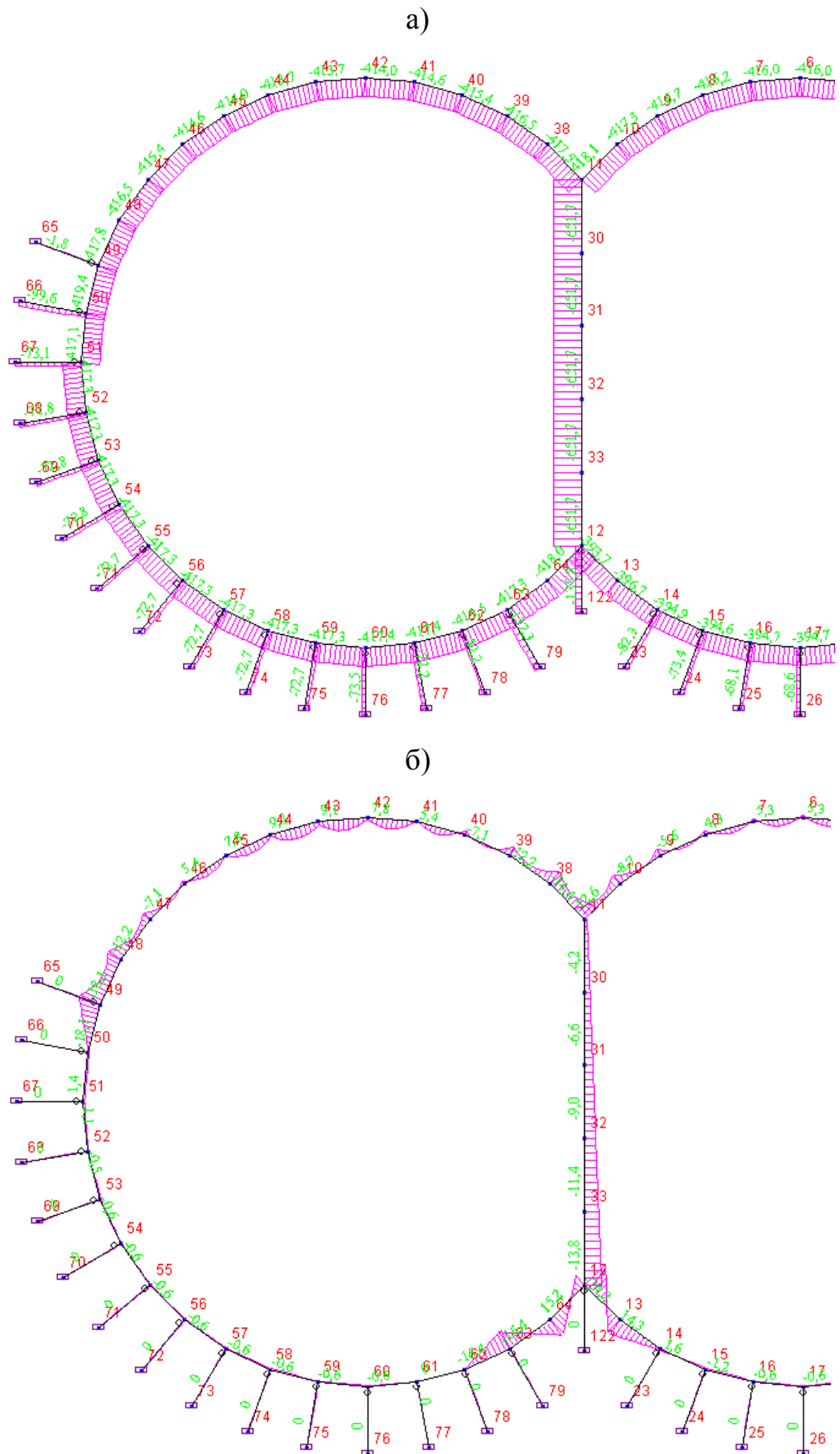


Рисунок 2.7 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=250$  мм)

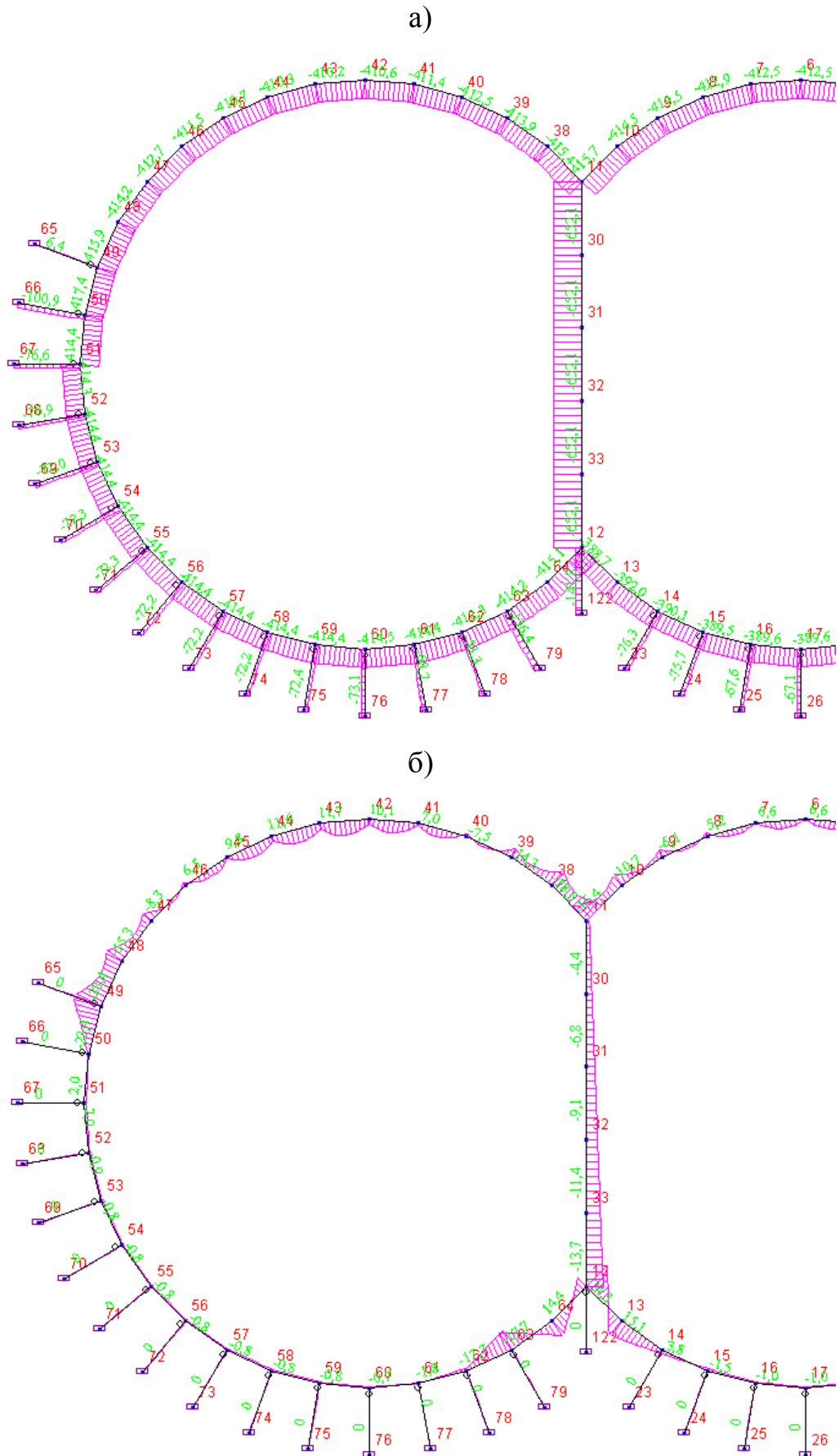


Рисунок 2.8 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=300$  мм)

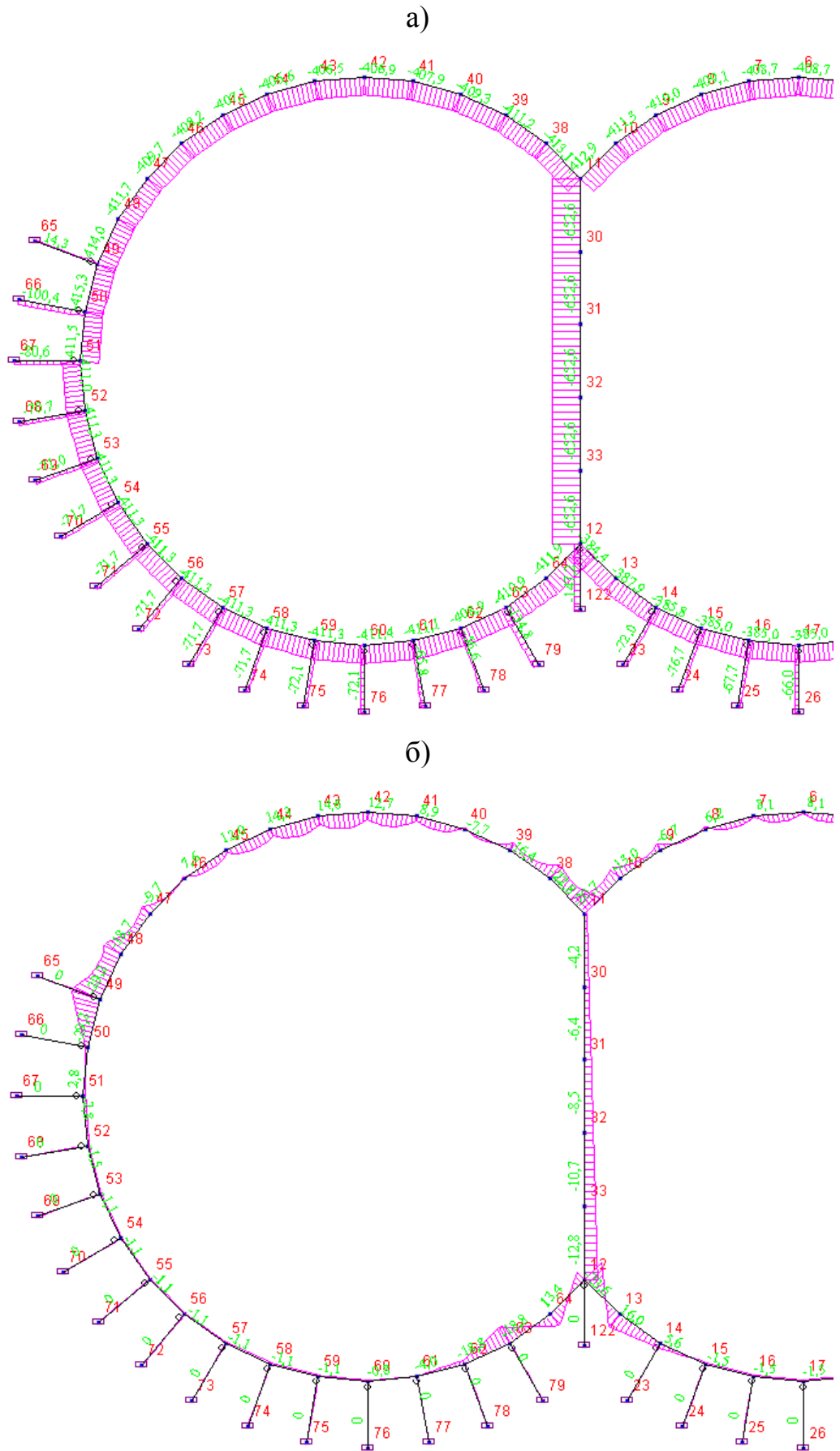


Рисунок 2.9 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=350$  мм)

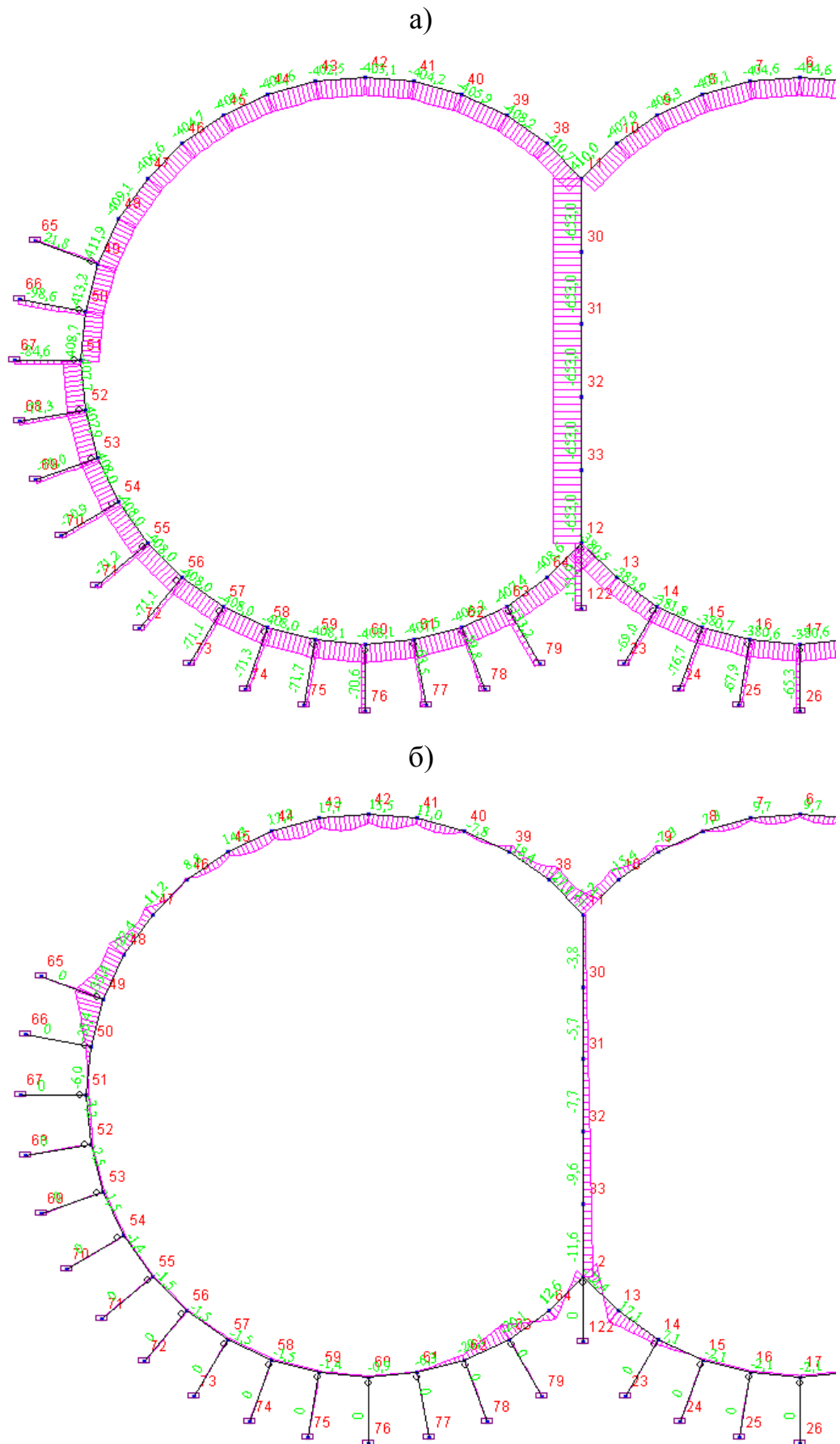
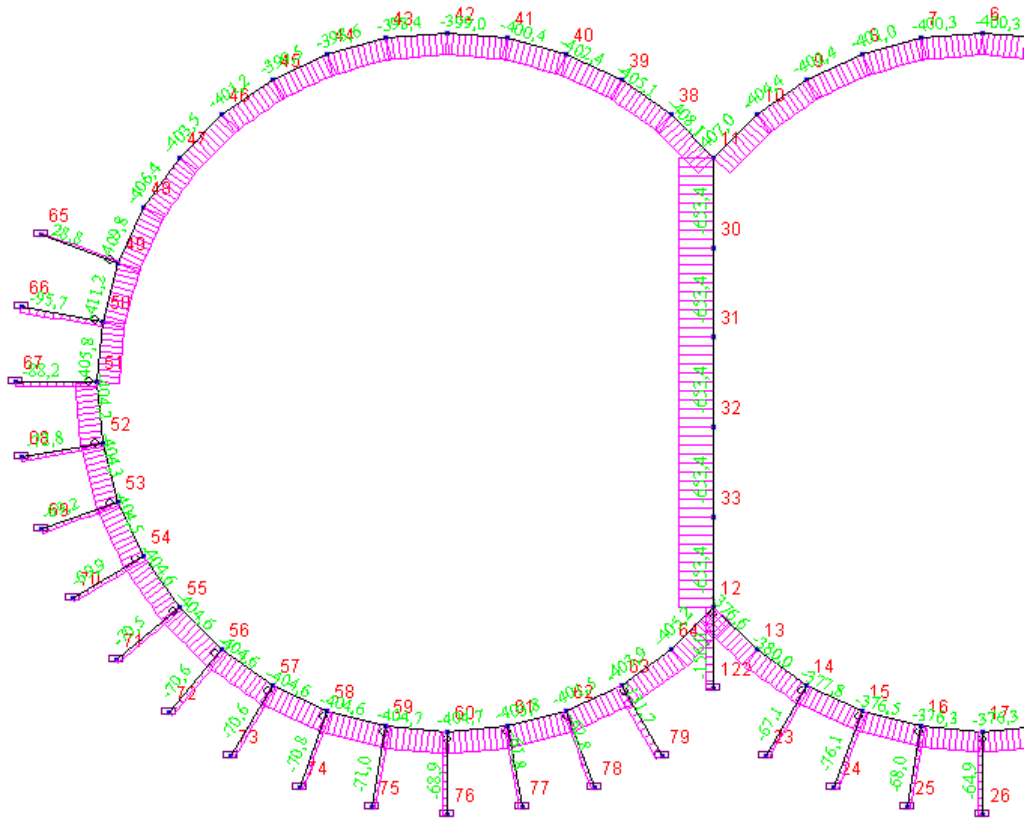


Рисунок 2.10 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=400$  мм)

а)



б)

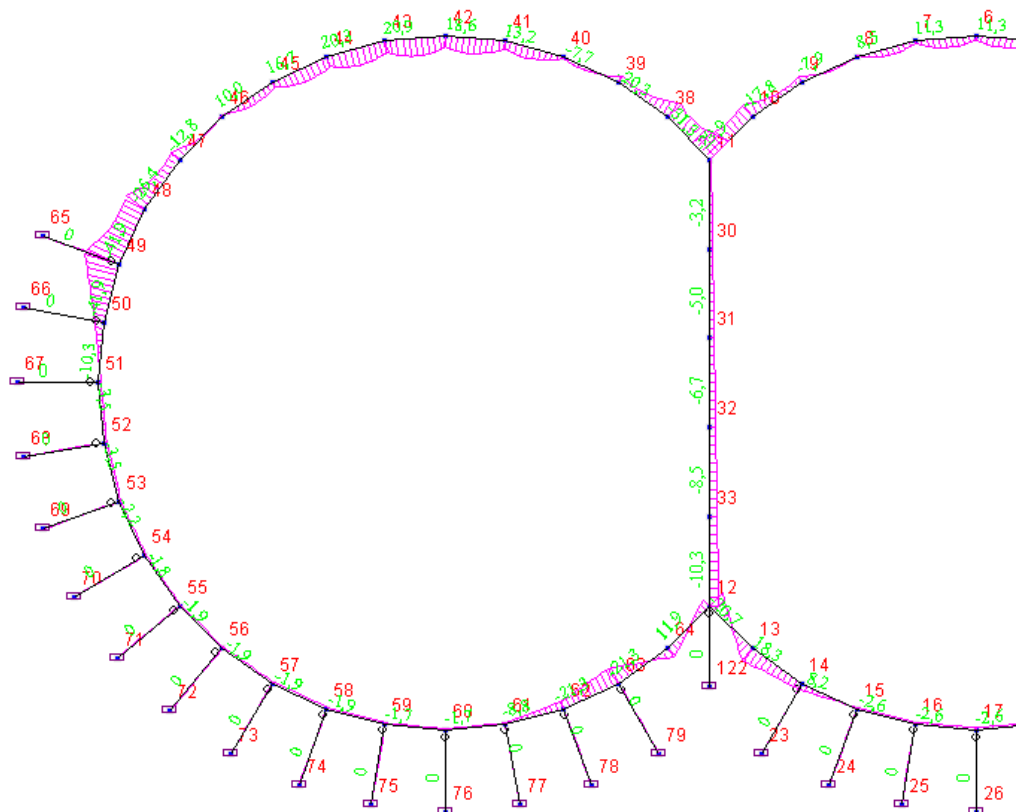


Рисунок 2.11 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=450$  мм)

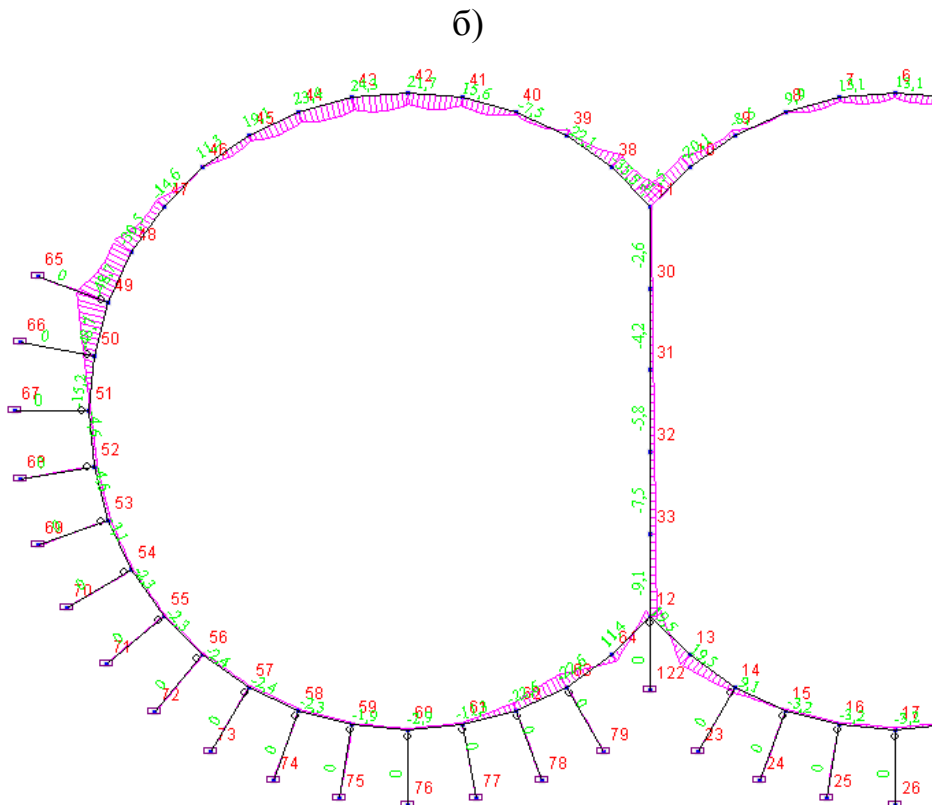
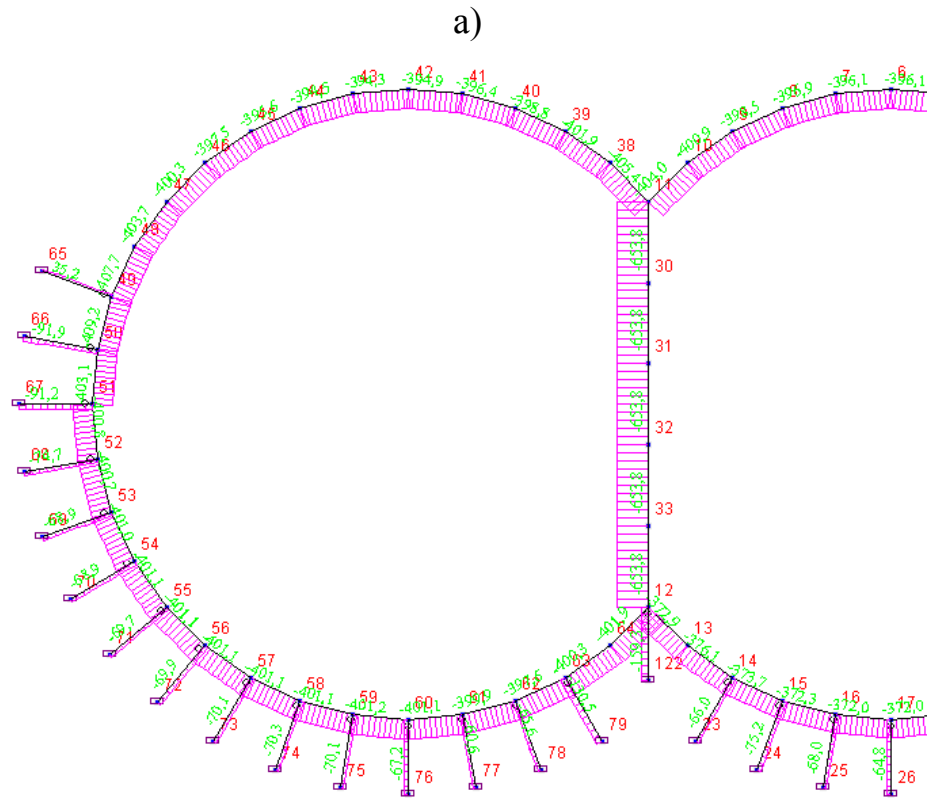


Рисунок 2.12 – Епюра нормальних сил (а)  
і згинальних моментів (б) (товщина  $h=500$  мм)

Для більшої наочності наведені діаграми моментів та нормальних сил у

характерних точках в залежності від варіації товщини (рис. 2.13-2.17).

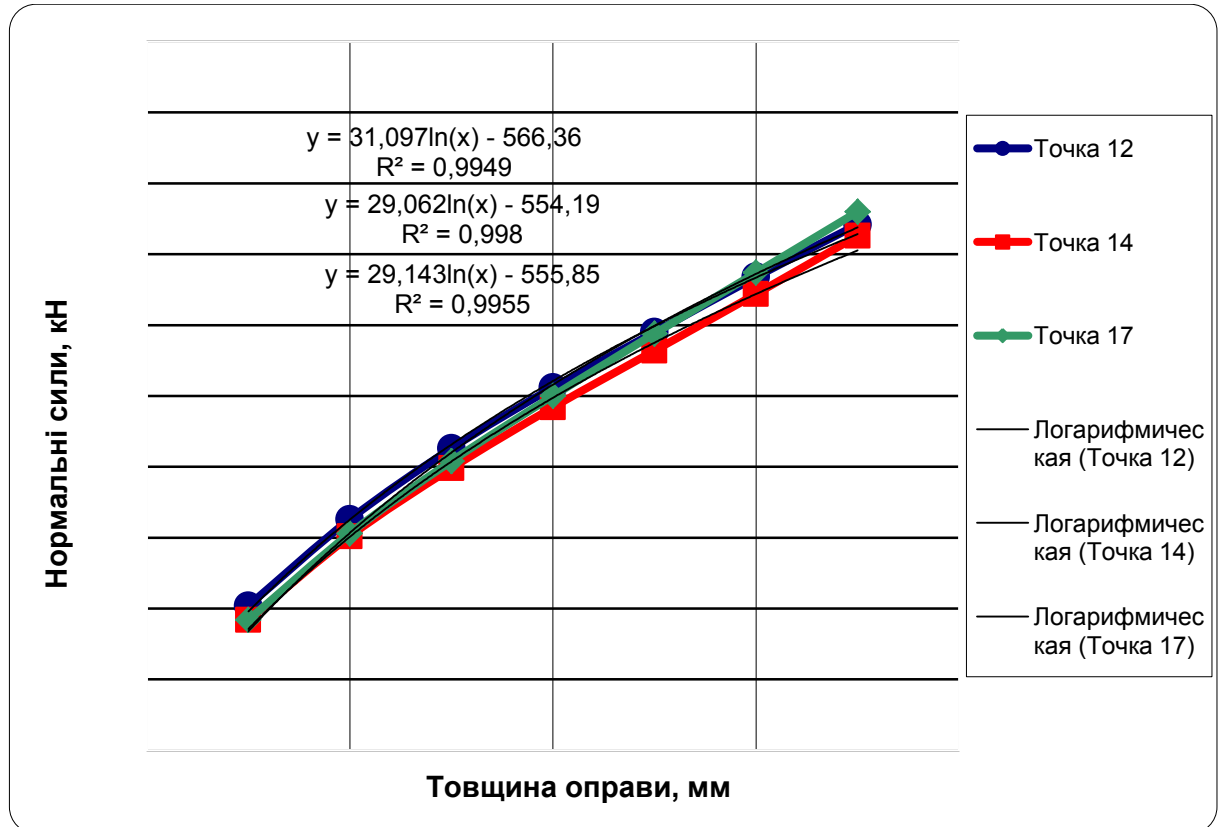
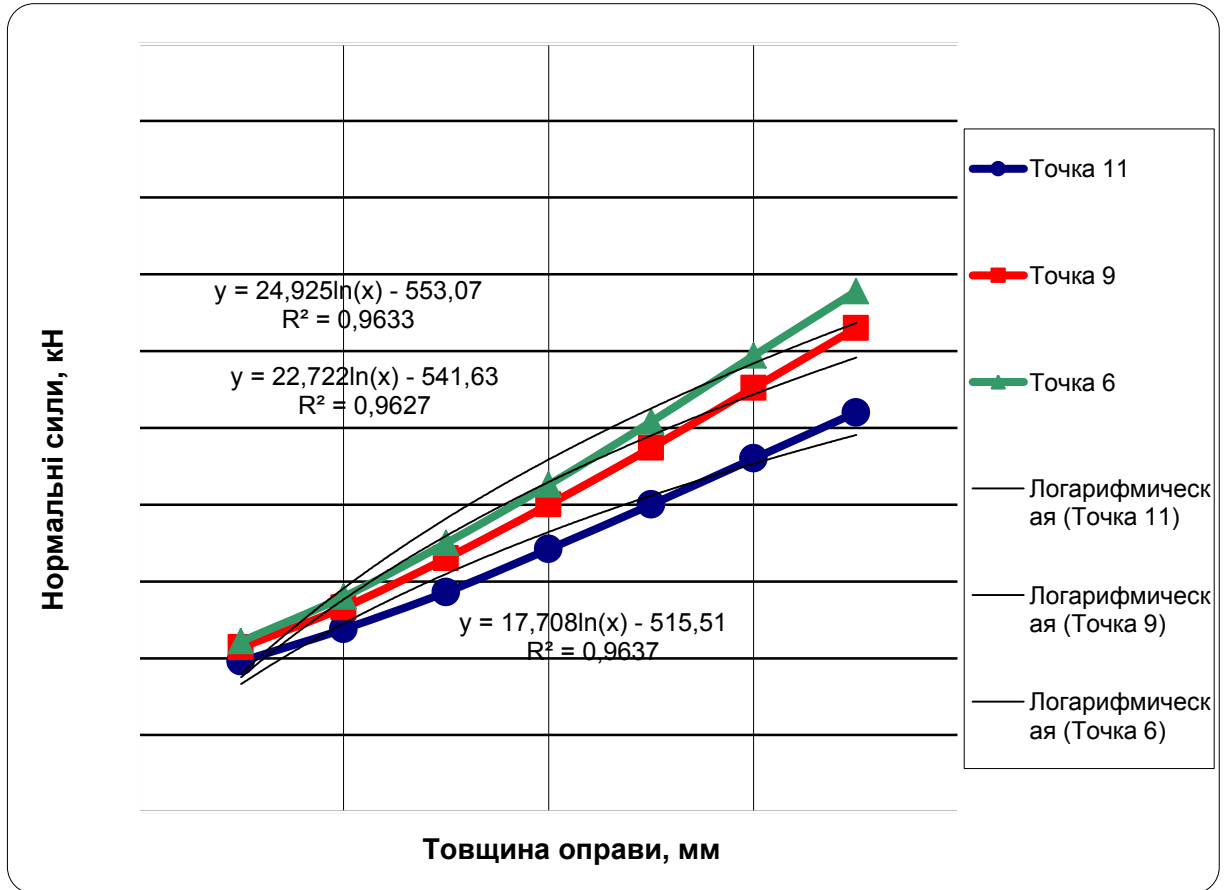


Рисунок 2.13 – Діаграми залежності нормальних сил від товщини у точках середнього тунелю колонної станції

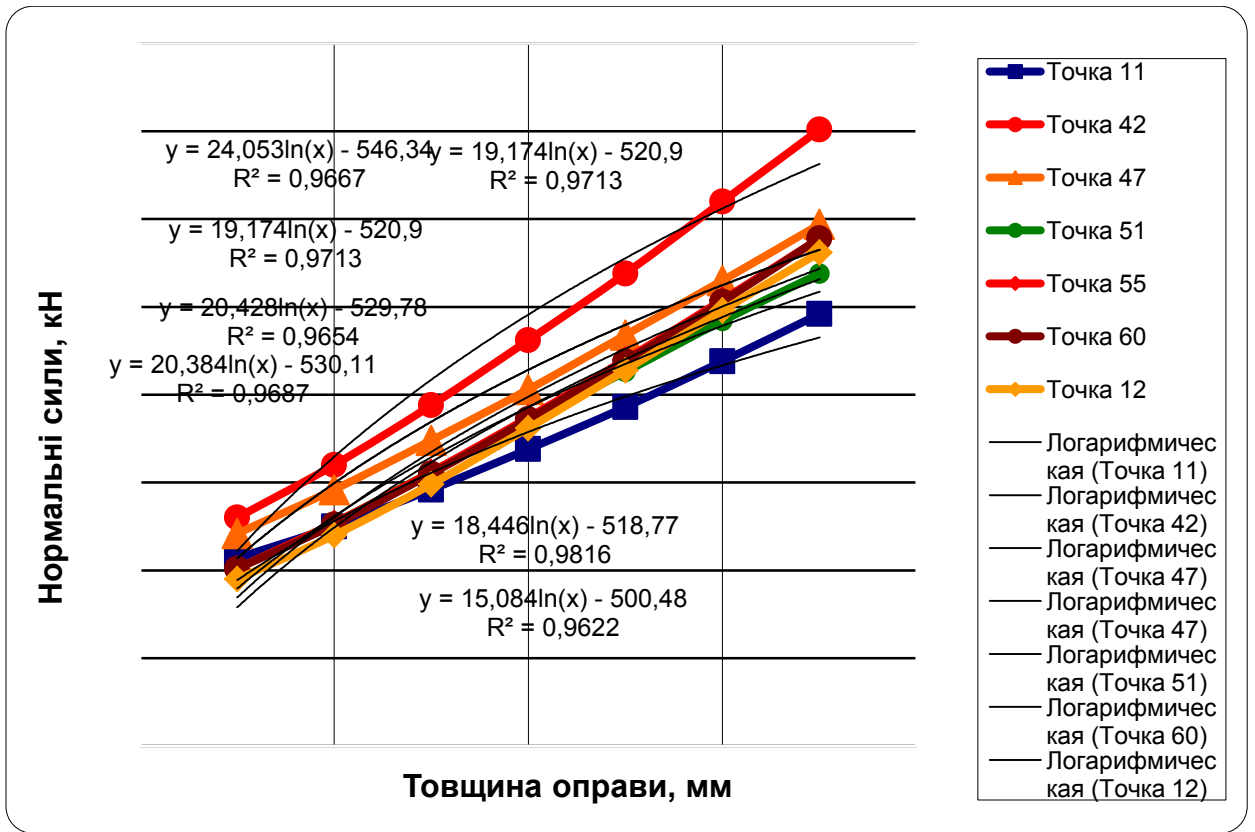


Рисунок 2.14 – Діаграми залежності нормальних сил від товщини у точках бокового тунелю колонної станції

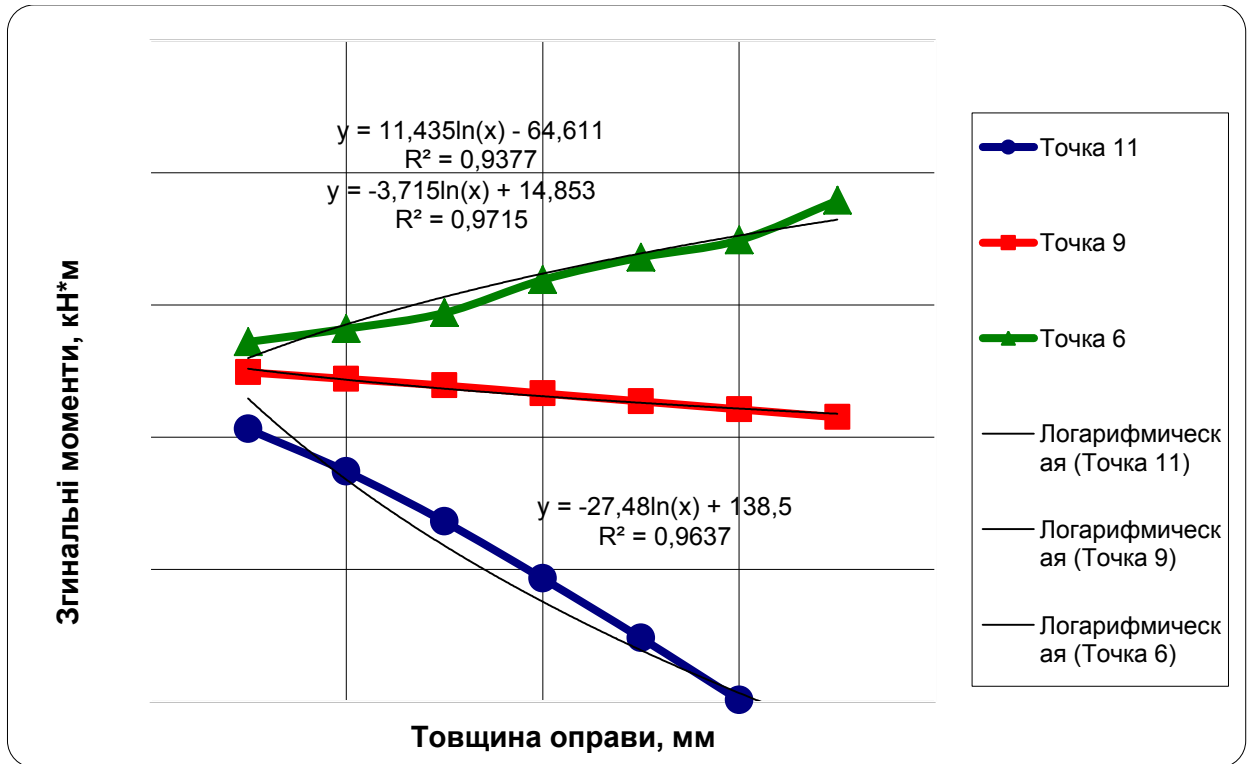


Рисунок 2.15 – Діаграми залежності згинальних моментів від товщини у точках середнього тунелю колонної станції

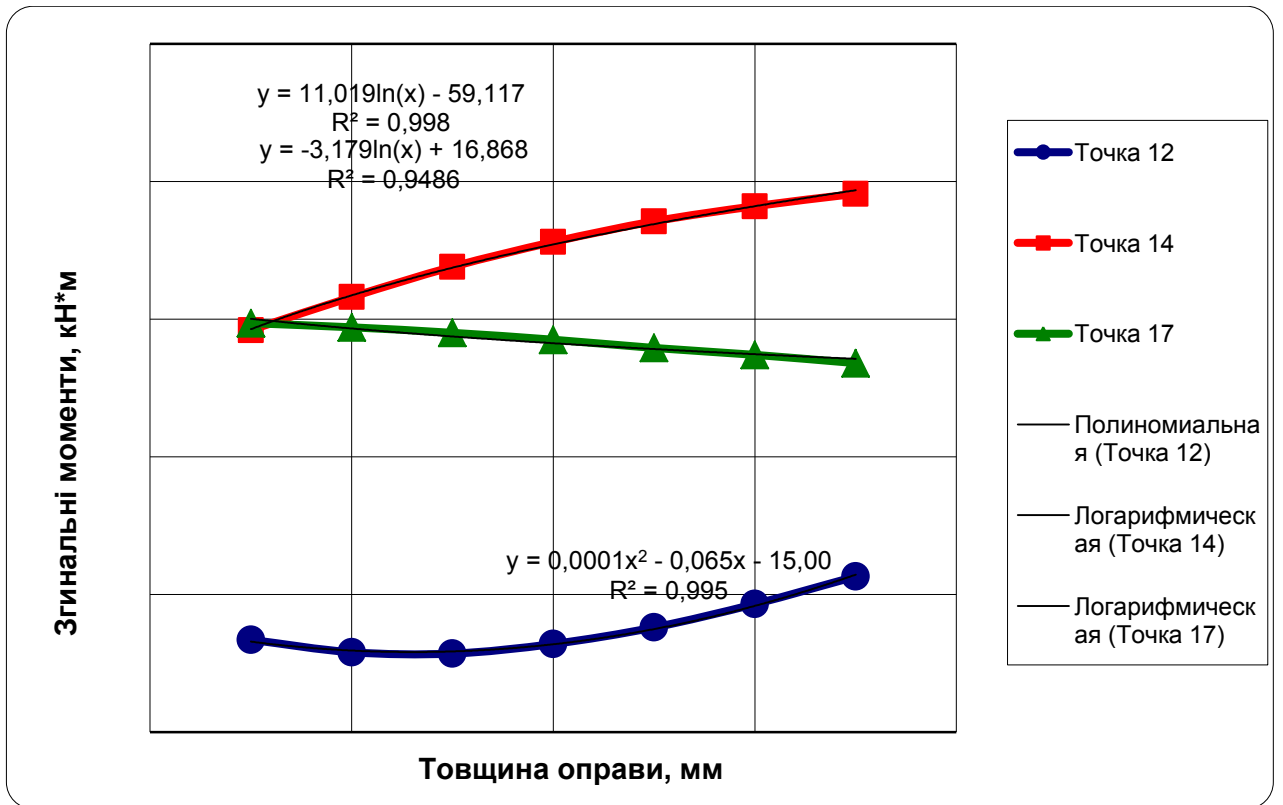


Рисунок 2.16 – Діаграми залежності згинальних моментів від товщини у точках середнього тунелю колонної станції

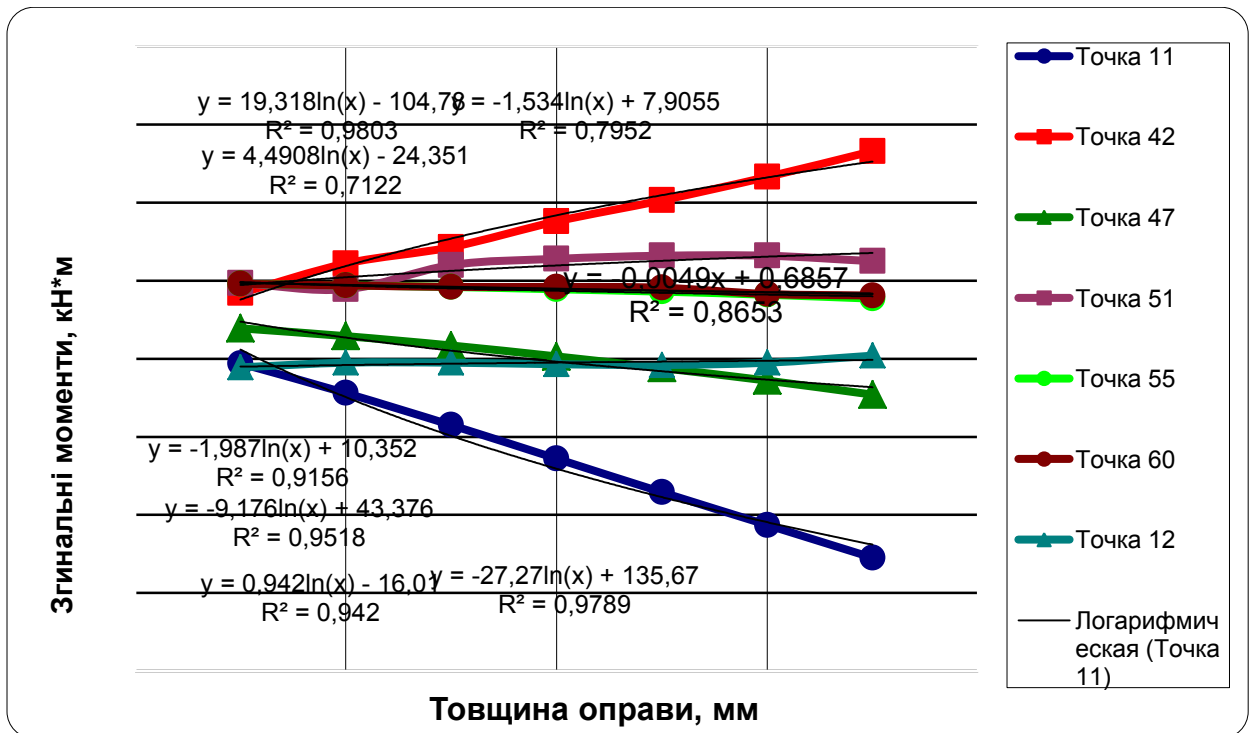


Рисунок 2.17 – Діаграми залежності згинальних моментів від товщини у точках бокового тунелю колонної станції

Основним висновком після аналізу діаграм залежності нормальних сил та згинальних моментів в конструкції колонної станції є наступне. Всі силові фактори були апроксимовані логарифмічним трендом, причому точність апроксимації свідчить про те, що вони є функціональними закономірностями ( $R^2=0,915\dots 0,98$  із дещо зменшеними значеннями  $0,712\dots 0,795$  в нижній частині середнього тунелю).

З цього випливає те, що зміна нормальних сил та згинальних моментів від збільшення товщини оправи є логарифмічною залежністю, тобто силові фактори, залежні від взаємодії оточуючого масиву, змінюються по закону логарифму. Причому, нормальні сили зменшують своє значення в залежності від товщини оправи по логарифмічному закону; тенденція зміни моментів не така явна і залежить від знаку моменту: якщо момент «+» його значення збільшуються; якщо момент «-» – зменшуються.

## **3 СПОРУДЖЕННЯ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ В ПОРОДАХ СЕРЕДНЬОЇ МІЦНОСТІ**

### **3.1 Організація будівництва**

Організацією будівельного процесу по спорудженні лінії метрополітену передбачають [6, 11]:

- інженерну підготовку до будівництва;
- виробництво гірничопрохідницьких робіт по будівництву тунелів і всіх підземних споруд, а також будівельно-монтажних робіт по зведенню наземних споруд;
- виконання в побудованих об'єктах робіт з монтажу постійних технологічних тунельних пристроїв, по укладанню шляхів, виробництво будівельних і архітектурно-оздоблювальних робіт;
- завершення будівництва, яке передбачає проведення робіт з наладки та пуску по всіх побудованих об'єктах, пробну поїздку потягів і здачу лінії в експлуатації.

Інженерна підготовка до будівництва передбачає виконання комплексу заходів, які забезпечують своєчасне розгортання і планомірні здійснення будівництва метрополітену в заданий планом термін. При цьому розрізняють організаційні заходи і підготовчі роботи.

Організаційні заходи виконують до початку робіт на будівельному майданчику. До них відноситься: затвердження проєкту будівництва; розробка і отримання робочої документації і кошторисів; розподіл об'ємів робіт і об'єктів між будівельними організаціями; оформлення фінансування і висновок договорів підряду на будівництво; відведення земельних ділянок для будівництва об'єктів метрополітену; узгодження з відповідними організаціями дозволів на підключення споруджуваних об'єктів до електричних, теплових, водопровідних, каналізаційних, телефонних і інших мереж; оформлення оренди на використання житлових і нежитлових приміщень для розміщення виробничих служб і побутових об'єктів; повідомлення інспекції гірського

нагляду, енергонагляду, пожежного і санітарного нагляду про терміни початок робіт на об'єкті.

Процеси підготовчих робіт виконується освоєння будівельних майданчиків: їх розчищення і планування; винесення підземних комунікацій із зони робіт; створення геодезичної розбивочної основи для будівництва об'єктів; влаштування під'їзних доріг і перенесення трамвайних колій; будівництво тимчасових виробничих і побутових будівель; прокладка мереж забезпечення повітрям та струмом, водопроводу, зв'язки тощо; монтаж гірських комплексів, установка механізмів для виробництва робіт. Для успішної інженерної підготовки велике значення має наявність повної проєктної документації з організації і виробництва робіт. Це документація складається з двох розділів: проєкту організація будівництва і проєкту виробництва робіт.

При виробництві будівельних робіт важливе значення має встановлення оптимальної послідовності зведення окремих об'єктів метрополітену. Процес будівництва повинен передбачати паралельне введення робіт по проходці тунелі, будівництву притунельних споруд, технологічних приміщень і об'єктів і призначення виконання шляхових, монтажних і оздоблювальних робіт, а також вузловий метод здачі об'єктів під роботи з наладки та пуску.

Організація і виробництво робіт базуються на основі побудованого лінійного або комплексного графіка будівництва, розробленого в проєкті організації будівництва, і календарних графіків виробництва робіт по спорудженню окремих об'єктів [11].

### **3.2 Етапи спорудження колонної станції**

Технологія спорудження колонних станцій з клинчастими перемичками з оправою з чавунних тьюбінгів, яка застосовується в наданій дипломній роботі, дещо змінена і базується на потоковій схемі, яка повністю виключає роботи з монтажу внутрішніх несучих конструкцій після проходки бокових тунелів [12].

Спорудження станції починають з проходки бокових тунелів на повний переріз або способом пілот-тунелю. На рис. 3.1 показана схема спорудження

бокового тунелю станції, розташованої в породах середньої міцності.

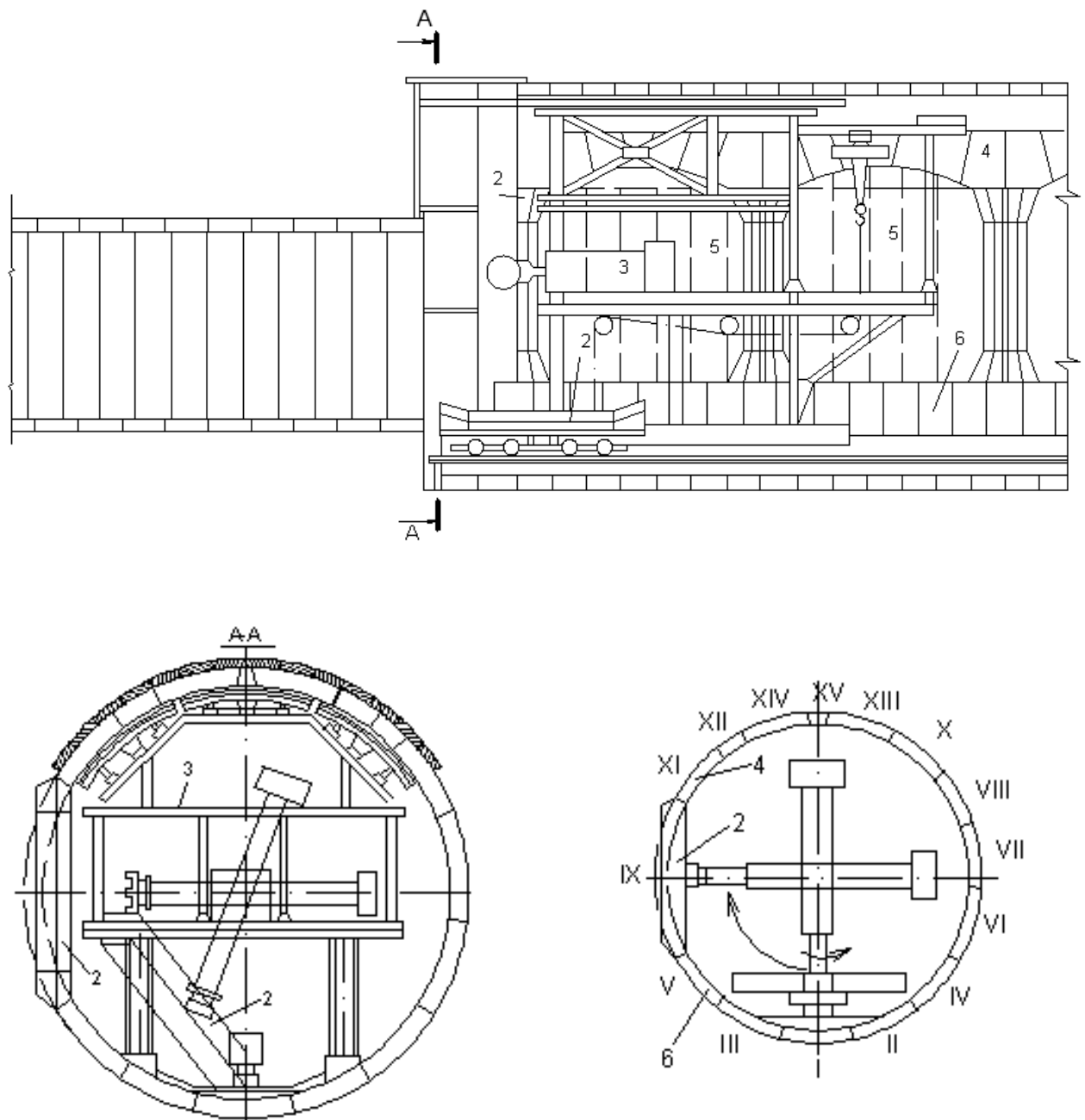


Рисунок 3.1 – Схема спорудження бокового тунелю колонної станції з клинчастими перемичками:

- 1 – горизонтальні труби; 2 – сталеві колони; 3 – тьюбінгоукладальник;  
 4 – фасонні тьюбінги; 5 – тьюбінги тимчасового заповнення;  
 6 – посиленні опорні тьюбінги

Ґрунт розробляють на повний переріз БВР заходками на два кільця (1,5 м). Лоб забою кріплять дошками, які розпирають на горизонтально встановлені

труби 1, розташовані в декілька ярусів. Монтаж оправи ведуть станційним тюрінгоукладальником 3. Тюрінги кілець проходів укладають від верху до низу симетрично осі тунелю. З боку середнього залу станції посилені опорні тюрінги нижнього ряду 6, які створюють основу проходу, зміщують уздовж осі станції на половину ширини кільця. Ці зміщені тюрінги утворюють і основу колон, рівномірно передаючи навантаження на розімкнені кільця. На них укладають тюрінги тимчасового заповнення 5, а потім фасонні тюрінги 4, які створюють верхню клинчасту перемичку. У місцях установки колон заходку збільшують до трьох кілець.

Сталеві колони 2, що складаються з двох гілок, встановлюють одночасно з монтажем оправи в цьому перерізі. Спочатку укладають п'ять тюрінгів лоткової частини кільця, до складу яких входить посилений опорний тюрінг 6, встановлений, як і всі тюрінги цього ряду, з випередженням на півкільця. На цей тюрінг встановлюють одну гілку колони 2 (маса 3,9...4,2 т), після чого кільце замикають, укладаючи тюрінги по черзі зліва і справа. При цьому на колону встановлюють опорний фасонний тюрінг 4 верхньої клинчастої перемички. Другу гілку колони встановлюють під час монтажу наступного кільця і скріплюють болтами з раніше встановленою. Посилені тюрінги, які створюють основу колони, входять до складу трьох суміжних кілець. Для зниження витрати чавуну в лоток можуть бути укладені плоскі залізобетонні блоки з чавунними плитами, заанкерованими в бетон блока.

Середній зал станції споруджують після проходки бокових тунелів (рис. 3.2). Ґрунт також розробляють буровибуховим способом. Проходку ведуть суцільним забоем заходками на одне-два кільця з кріпленням забою суцільними трубами 1. Для того щоб не пошкодити оправу бокових тунелів, ґрунт допрацьовують відбійними молотками. Після прибирання ґрунту станційним укладальником 3 монтують оправу тунелю. Спочатку монтують тюрінги зворотного склепіння від п'ят до центру. При цьому тюрінги, що примикають до оправи бокових тунелів і утворюють разом з нею основу колон, укладають із зсувом уздовж осі станції на половину ширини кільця.

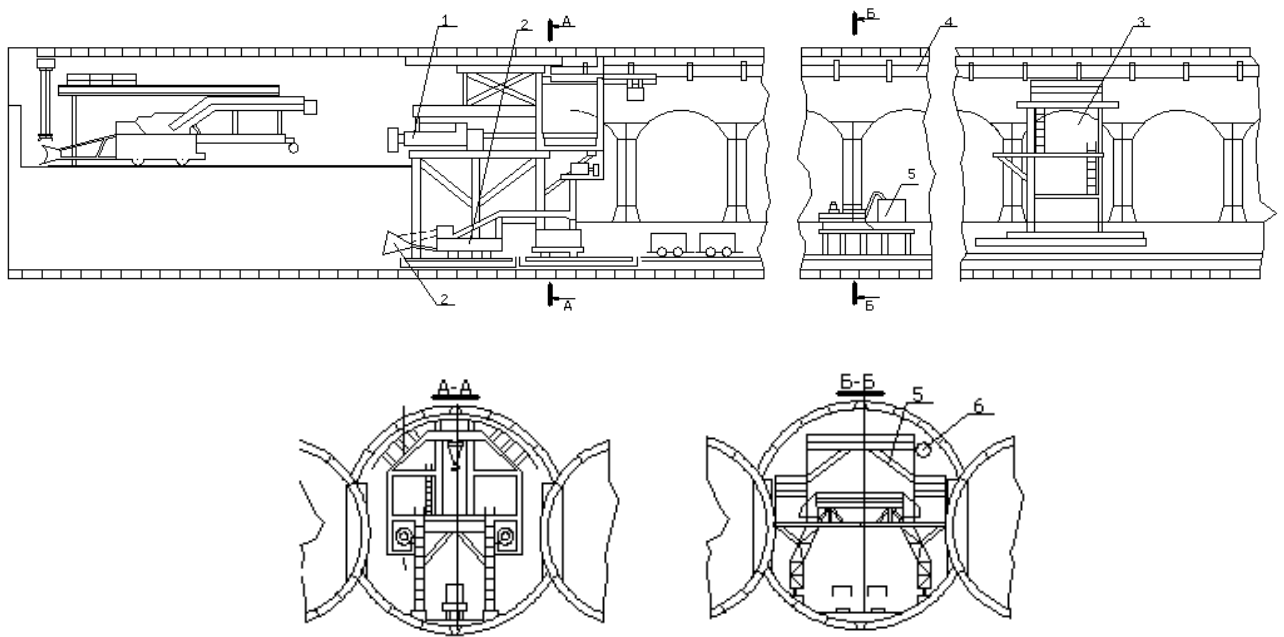


Рисунок 3.2 – Спорудження середнього тунелю колонної станції

- із клинчастими перемичками: 1 – сталеві труби;  
 2 – затяжки із дощок; 3 – станційний укладальник;  
 4 – породонавантажувальна машина; 5 – візок для чеканочних робіт;  
 6 – вентиляційна труба; 7 – апарат для контрольного нагнітання

Після замикання зворотного склепіння приступають до верхнього склепіння (рис. 3.3).

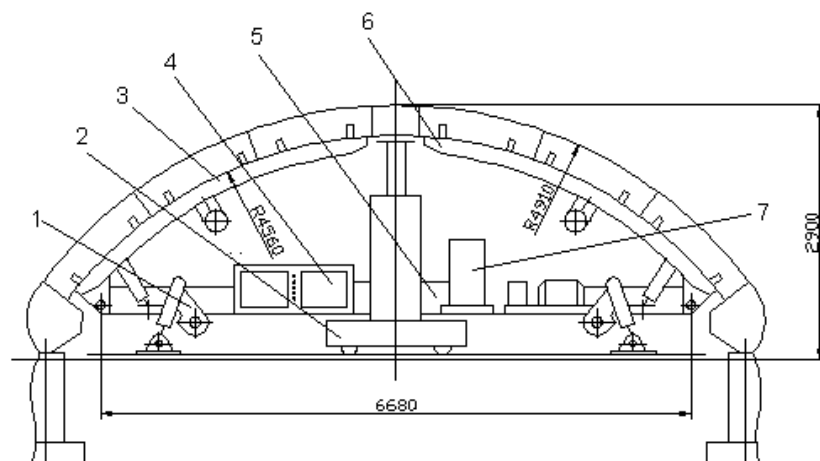


Рисунок 3.3 – Схема агрегату для вкладання верхнього склепіння:

- 1 – станційний блокоукладальник; 2 – породонавантажувальна машина;  
 3 – візок для чеканочних робіт; 4 – вентиляційна труба;  
 5 – апарат для контрольного нагнітання; 6 – металева ферма; 7 – бункер

Монтаж кожної його арки починають з установки в її основі фасонних тюбінгів, які створюють клинчасту перемичку. Після спорудження середнього тунелю станції демонтують тюбінги тимчасового заповнення бокових тунелів, звільняючи проходи. Зазори, що утворилися у верхній частині проходів між клинчастими перемичками середнього і бокових тунелів, перекривають сталевими листами, закріплюючи їх на ребрах торців фасонних тюбінгів перемички. З боку ґрунту до цих листів приварюють арматурні стрижні (анкери). У простір, що утворився, нагнітають цементно-піщаний розчин. У нижній частині проходу споруджують залізобетонну плиту, що об'єднує розімкнені кільця бокових і середнього тунелів.

### **3.3 Розрахунок параметрів буровибухових робіт**

Найбільш ефективним способом розробки скельних порід є їх підривання. Підривний спосіб достатньо дешевий, використовується у породах із широким діапазоном міцності та забезпечує високі швидкості проходки.

Цикл буровибухових робіт (БВР) являє собою ряд послідовних операцій, здійснених для зруйнування забою на деяку глибину, яка називається глибиною заходки [7]. Допоміжні роботи ведуться одночасно з основними і не впливають на тривалість циклу.

Вибір виду вибухової речовини та визначення її кількості, необхідної для підривання заходки, обумовлюються міцністю породи, вологістю виробки, глибиною заходки, необхідними розмірами кусків та економічними міркуваннями. В умовах даної випускної кваліфікаційної роботи доцільно використовувати амоніт скельний та амоніт №6ЖВ.

Це пояснюється їх невисокою вартістю та безпекою у використанні; вони мають високу працездатність і бризантність та у пресованому стані мають щільність, що перевищує щільність динаміту; крім цього ці вибухові речовини є водостійкими.

При будівництві тунелів використовується велика кількість методів підривання [7].

Найбільш ефективний в умовах даної випускної кваліфікаційної роботи буде шпуровий метод підривання з використанням центральних прямих врубів у передовій штольні та центральних клинових врубів в уступній частині тунелю. Такі вруби універсальні та забезпечують потрібний викид породи.

Існує декілька способів підривання.

Останнім часом широко використовується електричний спосіб підривання, який, пристосовується до даних умов будівництва, буде найбільш ефективним, оскільки перевага даного способу полягає у регулюванні черговості та необхідного уповільнення при великій кількості шпурів і значних розмірах виробки. Крім того, електричне підривання використовується, як більш безпечне. Для такого підривання використовуються електродетонатори миттєвої дії, такі як: ЕД-8-Ж, ЕД-8-Е, ЕД-8-ПС; короткоуповільненої дії: ЕДКЗ-ПМ-25, ЕДКЗ-ПМ-50, ЕДКЗ-ПМ-75 із уповільненням 25, 50, 75 мілісекунд відповідно.

Обравши спосіб підривання вираховуємо необхідні параметри ефективної проходки тунелю нижче приведеним чином.

Вірний вибір параметрів БВР забезпечує якісне руйнування породи при мінімальних об'ємах буріння, відповідність форм виробки проектним показникам із мінімальними переборами породи, рівномірне розташування породи з її мінімальними розкладаннями від забою.

Ефективність підривних робіт у значній мірі залежить від вірного визначення питомої витрати вибухової речовин [7].

#### 1. Боковий станційний тунель

$$q = (0,3\sqrt{f} + \frac{2}{\sqrt{S}})e\phi W \text{ кг/м}^3,$$

кількість вибухової речовини на цикл:

$$Q = qS\omega \text{ кг},$$

де  $f$  – коефіцієнт міцності породи,  $f=7$ ;

$S$  – проєктна площа перерізу,  $S=56,7 \text{ м}^2$ ;

$e$  – коефіцієнт працездатності вибухової речовини, згідно з таблицею 1 методичних вказівок [7]  $e=1$ ;

$\varphi$  – коефіцієнт впливу щільності зарядження  $\varphi=1,1$ ;

$\omega$  – прийнята глибина заходки на цикл  $\omega=1,5 \text{ м}$ ;

$W$  – коефіцієнт структури породи,  $W=1,4$ .

Знаючи необхідні для розрахунку дані визначаємо питому витрату та кількість вибухової речовини на цикл:

$$q = \left(0,3\sqrt{f} + \frac{2}{\sqrt{S}}\right)e\varphi W = \left(0,3\sqrt{7} + \frac{2}{\sqrt{56,7}}\right) \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,4 = 1,42 \text{ кг/м}^3,$$

$$Q = 1,41 \cdot 38,72 \cdot 1,5 = 82,41 \text{ кг.}$$

Оскільки порода руйнується не по всій довжині шпуру, треба визначити необхідну довжину комплекту відбійних і контурних шпурів  $l_k$ . Для цього скористаємось формулою:

$$l_k = \frac{\omega}{\eta} = \frac{1,5}{0,9} = 1,7 \text{ м,}$$

де:  $\eta$  – коефіцієнт використання шпуру, який у горизонтальних виробках складає  $\eta=0,9$ .

Для складання схеми розташування шпурів визначаємо кількість шпурових зарядів. Загальна кількість шпурів визначається із виразу:

$$N = N_v + N_{від} + N_k + N_n \text{ шт.}$$

де  $N_v$ ,  $N_{від}$ ,  $N_k$ ,  $N_n$  – кількість врубових, відбійних, контурних і підшовових

шпурів відповідно.

Згідно з прийнятими нормами кількість контурних шпурів можна визначити за формулами:

$$N_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{a_{\kappa}} \text{ шт.},$$

де  $P_{\kappa}$  – периметр виробки по лінії розташування контурних шпурів,

$$P_{\kappa} = 2\pi R - b = 2 \cdot 3,14 \cdot 4,25 - 4,8 = 21,89$$

$a_{\kappa}$  – відстань між контурними шпурами,  $a_{\kappa} = 0,6$  м.

Тоді:

$$N_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{a_{\kappa}} = \frac{21,89}{0,6} = 37 \text{ шт.}$$

Користуючись формулою Покровського визначимо врубіві та відбійні шпури:

$$N_{\sigma} + N_{\text{від}} = \frac{12,7qS}{d^2 K_3 \Delta K_{\Delta}} + \sqrt{S'} \text{ шт.},$$

де:  $d$  – діаметр патрона вибухової речовини,  $d=3,6$  см;

$K_3$  – коефіцієнт заповнення шпуру,  $K_3=0,6$ ;

$\Delta$  – щільність заряджання вибухової речовини,  $\Delta=1,45$ ;

$K_{\Delta}$  – коефіцієнт ущільнення заряду,  $K_{\Delta}=1,05$ ;

$S'$  – площа ядра перерізу тунелю.

Для визначення площі ядра тунелю визначимо площу, що необхідно підірвати контурними зарядами, скориставшись формулою:

$$S_{\kappa} = (N_{\kappa} - 1) \cdot a_{\kappa} \cdot (\omega_{\kappa} + 0,1) \text{ м}^2,$$

де:  $\omega_{\kappa} = \frac{a_{\kappa}}{m}$  – лінія найменшого опору контурних зарядів;

$m$  – коефіцієнт зближення зарядів,  $m=0,8$ ;

тоді:

$$\omega_{\kappa} = \frac{a_{\kappa}}{m} = \frac{0,6}{0,8} = 0,75 \text{ м},$$

$$S_{\kappa} = (N_{\kappa} - 1) \cdot a_{\kappa} \cdot (\omega_{\kappa} + 0,1) = (37 - 1) \cdot 0,5 \cdot (0,75 + 0,1) = 15,3 \text{ м}^2.$$

Визначаємо площу ядра перерізу тунелю:

$$S' = S - S_{\kappa} = 38,72 - 15,3 = 23,42 \text{ м}^2.$$

Знаючи необхідні показники, визначаємо суму врубових та відбійних шпурів:

$$N_{\epsilon} + N_{\text{від}} = \frac{12,7 \cdot 1,42 \cdot 23,42}{3,6^2 \cdot 0,6 \cdot 1,45 \cdot 1,05} + \sqrt{23,42} = 40 \text{ шт.}$$

Кількість врубових шпурів становить 4 шт., звідси кількість відбійних шпурів буде становити:

$$N_{\text{від}} = (N_{\epsilon} + N_{\text{від}}) - N_{\epsilon} = 40 - 4 = 36 \text{ шт.}$$

Тоді загальна кількість становить:

$$N = N_{\epsilon} + N_{\text{від}} + N_{\kappa} = 4 + 36 + 37 = 77 \text{ шт.}$$

Оскільки заряд складається з патронів масою 200 г, розрахункову масу одного заряду округляють до 0,1 кг.

Масу контурного заряду визначають із виразу:

$$q_k = k_3 \cdot l_{uu} = 0,6 \cdot 1,5 = 0,9 \text{ кг},$$

масу всіх контурних зарядів:

$$Q_k = q_k \cdot N_k = 0,9 \cdot 37 = 33,3 \text{ кг},$$

середня маса заряду інших шпурів:

$$q_{cp} = \frac{Q - Q_k}{N - N_k} = \frac{82,41 - 33,3}{77 - 37} = 1,23 \text{ кг},$$

маса заряду врубового шпуру:

$$q_e = 1,2 \cdot q_{cp} = 1,2 \cdot 1,23 = 1,47 \text{ кг},$$

маса всіх врубових зарядів:

$$Q_e = q_e \cdot N_e = 1,47 \cdot 4 = 5,89 \text{ кг},$$

маса зарядів відбійних шпурів:

$$Q_{від} = q_{cp} \cdot N_{від} = 1,23 \cdot 36 = 44,28 \text{ кг}.$$

Загальна маса вибухової речовини на цикл:

$$Q_{ep} = Q_{\kappa} + Q_e + Q_{vid} = 33,3 + 5,89 + 44,28 = 83,47 \text{ кг},$$

уточнена питома витрата вибухової речовини:

$$q_o = \frac{Q_{ep}}{S \cdot \omega} = \frac{83,47}{38,72 \cdot 1,5} = 1,44 \text{ кг/м}^3,$$

вихід породи за вибух (у масиві):

$$V = S\omega = 56,7 \cdot 1,5 = 71,3 \text{ м}^3,$$

Загальна кількість шпурометрів на цикл:

$$L_m = N \cdot l_{ш} = \cdot 1,5 = 115,5 \text{ м.}$$

Виконаємо розрахунок для середнього станційного тунелю:

$$q = (0,3\sqrt{f} + \frac{2}{\sqrt{S}})e\phi W \text{ кг/м}^3,$$

кількість вибухової речовини на цикл:

$$Q = qS\omega \text{ кг},$$

де:  $f$  – коефіцієнт міцності породи,  $f=7$ ;

$S$  – проєктна площа перерізу,  $S=50,44 \text{ м}^2$ ;

$e$  – коефіцієнт працездатності вибухової речовини, згідно з таблицею 1 методичних вказівок [7]  $e=1$ ;

$\phi$  – коефіцієнт впливу щільності зарядження  $\phi=1,1$ ;

$\omega$  – прийнята глибина заходки на цикл  $\omega=1,5$  м;

$W$  – коефіцієнт структури породи,  $W=1,4$ .

Знаючи необхідні для розрахунку дані визначаємо питому витрату та кількість вибухової речовини на цикл:

$$q = (0,3\sqrt{f} + \frac{2}{\sqrt{S}})e\phi W = (0,3\sqrt{7} + \frac{2}{\sqrt{50,44}}) \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,4 = 1,36 \text{ кг/м}^3,$$

$$Q = 1,36 \cdot 50,44 \cdot 1,5 = 102,72 \text{ кг.}$$

Оскільки порода руйнується не по всій довжині шпуру, треба визначити необхідну довжину комплекту відбійних і контурних шпурів  $l_k$ . Для цього скористаємось формулою:

$$l_k = \frac{\omega}{\eta} = \frac{1,5}{0,9} = 1,7 \text{ м,}$$

де:  $\eta$  – коефіцієнт використання шпуру, який у горизонтальних виробках складає  $\eta=0,9$ .

Для складання схеми розташування шпурів визначаємо кількість шпурових зарядів. Загальна кількість шпурів визначається із виразу:

$$N = N_g + N_{\text{від}} + N_k + N_n \text{ шт.}$$

де:  $N_g$ ,  $N_{\text{від}}$ ,  $N_k$ ,  $N_n$  – кількість врубових, відбійних, контурних і підшовових шпурів відповідно .

Згідно з прийнятими нормами кількість контурних шпурів можна визначити за формулами:

$$N_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{a_{\kappa}} \text{ шт.},$$

де:  $P_{\kappa}$  – периметр виробки по лінії розташування контурних шпурів,

$$P_{\kappa} = 2\pi R - b = 2 \cdot 3,14 \cdot 4,75 - 4,8 = 25,03$$

$a_{\kappa}$  – відстань між контурними шпурами,  $a_{\kappa} = 0,6$  м.

Тоді:

$$N_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{a_{\kappa}} = \frac{25,03}{0,6} = 42 \text{ шт.}$$

Користуючись формулою Покровського визначимо врубіві та відбійні шпури:

$$N_{\epsilon} + N_{\text{від}} = \frac{12,7qS}{d^2 K_3 \Delta K_{\Delta}} + \sqrt{S'} \text{ шт.},$$

де:  $d$  – діаметр патрона вибухової речовини,  $d=3,6$  см;

$K_3$  – коефіцієнт заповнення шпуру,  $K_3=0,6$ ;

$\Delta$  – щільність заряджання вибухової речовини,  $\Delta = 1,45$ ;

$K_{\Delta}$  – коефіцієнт ущільнення заряду,  $K_{\Delta}=1,05$ ;

$S'$  – площа ядра перерізу тунелю.

Для визначення площі ядра тунелю визначимо площу, що необхідно підірвати контурними зарядами, скориставшись формулою:

$$S_{\kappa} = (N_{\kappa} - 1) \cdot a_{\kappa} \cdot (\omega_{\kappa} + 0,1) \text{ м}^2,$$

де:  $\omega_{\kappa} = \frac{a_{\kappa}}{m}$  – лінія найменшого опору контурних зарядів;

$m$  – коефіцієнт зближення зарядів,  $m=0,8$ ;

тоді:

$$\omega_{\kappa} = \frac{a_{\kappa}}{m} = \frac{0,6}{0,8} = 0,75 \text{ м,}$$

$$S_{\kappa} = (N_{\kappa} - 1) \cdot a_{\kappa} \cdot (\omega_{\kappa} + 0,1) = (42 - 1) \cdot 0,5 \cdot (0,75 + 0,1) = 17,425 \text{ м}^2.$$

Визначаємо площу ядра перерізу тунелю:

$$S' = S - S_{\kappa} = 50,44 - 17,425 = 33,02 \text{ м}^2.$$

Знаючи необхідні показники, визначаємо суму врубових та відбійних шпурів:

$$N_{\epsilon} + N_{\text{від}} = \frac{12,7 \cdot 1,36 \cdot 33,02}{3,6^2 \cdot 0,6 \cdot 1,45 \cdot 1,05} + \sqrt{33,02} = 54 \text{ шт.}$$

Кількість врубових шпурів становить 4 шт., звідси кількість відбійних шпурів буде становити:

$$N_{\text{від}} = (N_{\epsilon} + N_{\text{від}}) - N_{\epsilon} = 54 - 4 = 50 \text{ шт.}$$

Тоді загальна кількість становить:

$$N = N_{\epsilon} + N_{\text{від}} + N_{\kappa} = 4 + 50 + 42 = 96 \text{ шт.}$$

Оскільки заряд складається з патронів вагою 200 г, розрахункову масу одного заряду округляють до 0,1 кг.

Масу контурного заряду визначають із виразу:

$$q_{\kappa} = k_3 \cdot l_{\text{ш}} = 0,6 \cdot 1,5 = 0,9 \text{ кг},$$

масу всіх контурних зарядів:

$$Q_{\kappa} = q_{\kappa} \cdot N_{\kappa} = 0,9 \cdot 42 = 37,8 \text{ кг},$$

середня маса заряду інших шпурів:

$$q_{\text{ср}} = \frac{Q - Q_{\kappa}}{N - N_{\kappa}} = \frac{102,72 - 37,8}{96 - 42} = 1,2 \text{ кг},$$

масу заряду врубового шпуру:

$$q_{\text{в}} = 1,2 \cdot q_{\text{ср}} = 1,2 \cdot 1,2 = 1,44 \text{ кг},$$

масу всіх врубових зарядів:

$$Q_{\text{в}} = q_{\text{в}} \cdot N_{\text{в}} = 1,44 \cdot 4 = 5,76 \text{ кг},$$

масу зарядів відбійних шпурів:

$$Q_{\text{від}} = q_{\text{ср}} \cdot N_{\text{від}} = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ кг}.$$

Загальна маса вибухової речовини на цикл:

$$Q_{\text{вс}} = Q_{\kappa} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{від}} = 37,8 + 5,76 + 60 = 103,56 \text{ кг},$$

уточнена питома витрата вибухової речовини:

$$q_o = \frac{Q_{ep}}{S \cdot \omega} = \frac{103,56}{50,44 \cdot 1,5} = 1,36 \text{ кг/м}^3,$$

вихід породи за вибух (у масиві):

$$V = S\omega = 50,44 \cdot 1,5 = 75,66 \text{ м}^3,$$

загальна кількість шпурометрів на цикл:

$$L_m = N \cdot l_{ш} = 96 \cdot 1,5 = 144 \text{ м.}$$

Всі ці дані приводяться в вигляді наступних схем для бокового тунелю (рис. 3.4 і 3.5) і таблиць 3.1-3.4.

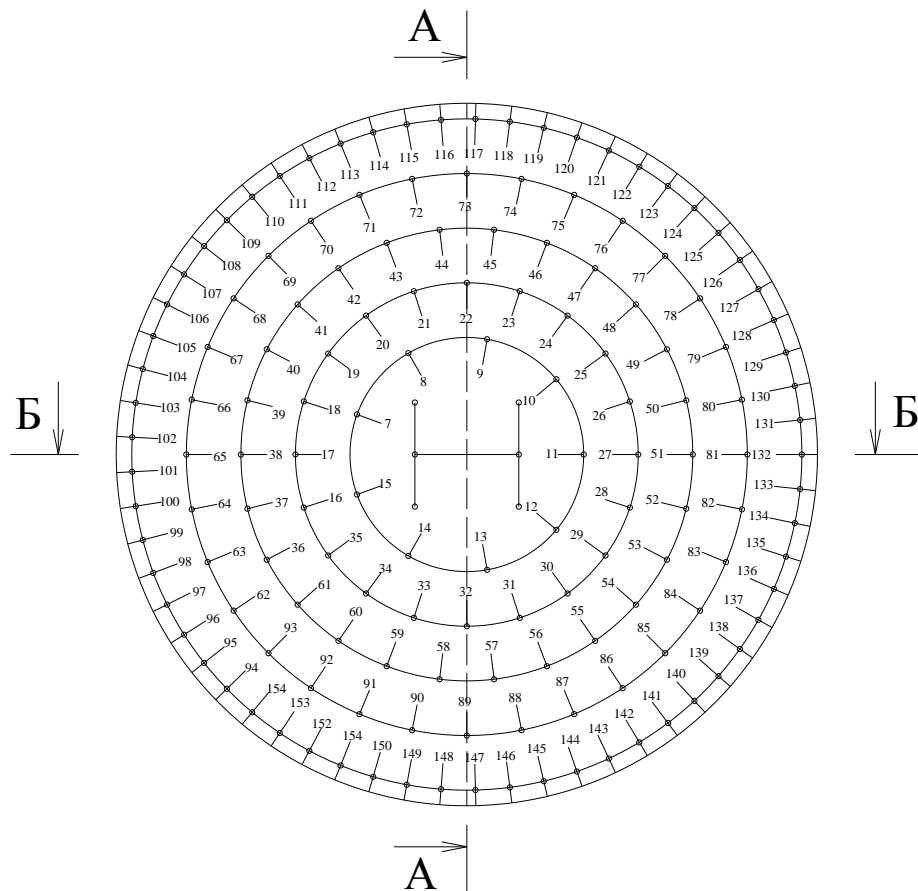


Рисунок 3.4 – Розміщення шпурів (переріз)

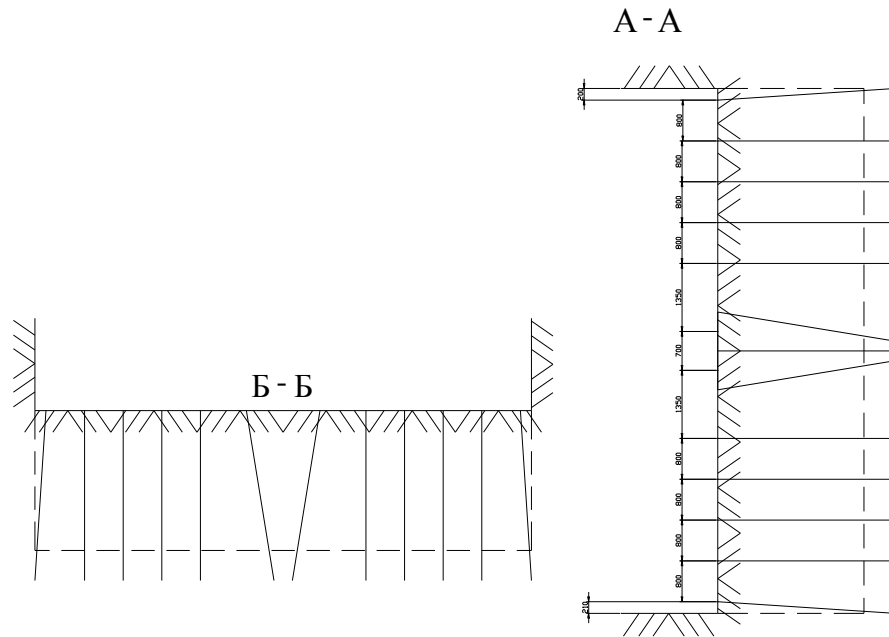


Рисунок 3.5 – Розміщення шпурів (проекції)

Таблиця 3.1 – Параметри БВР (боковий)

Умови і показники вибуху	Одиниці виміру	Кількість
Площа поперечного перерізу виробки	м <sup>2</sup>	56,7
Коефіцієнт міцності породи	–	7
Глибина заходки	м	1,5
Коефіцієнт використання шпуру	–	0,9
Глибина комплексу шпурів	м	1,7
Загальна кількість шпурів в забої	шт.	77
В тому числі: врубових	шт.	4
відбійних	шт.	36
контурних	шт.	37
Питома витрата вибухової речовини	кг/м <sup>3</sup>	1,44
Витрати вибухової речовини на заходку	кг	83,47
Вихід породи за 1 вибух (в масиві)	м <sup>3</sup>	71,3
Загальна кількість шпурометрів за цикл	м	115,5
Вихід шпурометрів на 1 м <sup>3</sup> породи	м	1,62

Таблиця 3.2 – Таблиця шпурових зарядів (боковий)

Номери шпурів	Назва шпурів	Довжина, м	Кут нахилу, град	Кількість шпурів	Величина заряду		Черговість підривання
					один	група	
1-4	Врубіві	1,9	63	4	1,47	5,88	миттєво
5-11	Відбійні	1,7	90	7	1,23	13,8	25 мс
10-18	Відбійні	1,7	90	9	1,23	35,5	50 мс
19-28	Відбійні	1,7	90	10	1,23	35,5	75 мс
29-40	Відбійні	1,7	90	10	1,23	35,5	100 мс
40-77	Контурні	1,7	5	37	0,9	33,3	125 мс

Таблиця 3.3 – Параметри БВР (середній)

Умови і показники вибуху	Одиниці виміру	Кількість
Площа поперечного перерізу виробки	м <sup>2</sup>	50,44
Коефіцієнт міцності породи	–	7
Глибина заходки	м	1,5
Коефіцієнт використання шпуру	–	0,9
Глибина комплекту шпурів	м	1,7
Загальна кількість шпурів в забої	шт.	96
В тому числі: врубівих	шт.	4
відбійних	шт.	50
контурних	шт.	42
Питома витрата вибухової речовини	кг/м <sup>3</sup>	1,36
Витрати вибухової речовини на заходку	кг	103,56
Вихід породи за 1 вибух (в масиві)	м <sup>3</sup>	75,66
Загальна кількість шпурометрів за цикл	м	144,0
Вихід шпурометрів на 1 м <sup>3</sup> породи	м	1,9

Таблиця 3.4 – Таблиця шпурових зарядів (середній)

Номери шпурів	Назва шпурів	Довжина, м	Кут нахилу, град	Кількість шпурів	Величина заряду		Черговість підривання
					один	група	
1-4	Врубові	1,9	63	4	1,44	5,76	миттєво
5-12	Відбійні	1,7	90	8	1,2	9,6	25 мс
13-23	Відбійні	1,7	90	11	1,2	13,2	50 мс
24-36	Відбійні	1,7	90	13	1,2	15,6	75 мс
37-54	Відбійні	1,7	90	18	1,2	21,6	100 мс
55-96	Контурні	1,7	5	42	0,9	37,8	125 мс

### 3.4 Нагнітання за оправу

Для забезпечення спільної роботи оправи і ґрунту і запобігання його просадки, всі пустоти за оправою 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 поділяється на первинне, повторне і контрольне. Для первинного нагнітання можна застосовувати цементно-піщані розчини. Повторне і контрольне нагнітання при заповненні порожнин за оправою здійснюють цементним молоком.

Нагнітання виконується у два прийоми: первинне (цементно-піщані розчини) і контрольне (цементний розчин). Цілю 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 оправи з ґрунтом. Первинне нагнітання виконується цементно-піщаним розчином у такому співвідношенні 1:2.

Первинне нагнітання виконується під тиском, який не перевищує 0,4 МПа, пневматичними апаратами з безперервним перемішуванням розчину.

Нагнітання виконується знизу-вгору по кільцю у всі отвори та спинки блоків, тюбінгів з обох сторін вертикальної осі оправи тунелю. Після закінчення робіт з нагнітання та одне-дводобової витримки контролюють якість виконаних робіт ретельним оглядом і перевіркою всіх отворів для нагнітання й ведуть їхній облік у спеціальному журналі.

При монтажі оправи в граніті первинне нагнітання можна виконувати до рівня горизонтального діаметру останнього кільця, яке збирається, а на всю висоту кільця з відставанням не більше трьох кілець. Нагнітання за збірні оправи здійснюють одночасно з обох сторін вертикальної осі оправи в два симетрично розташованих отвори, переставляючи ін'єктори знизу-вгору.

Пневматичний розчинонагнітальник 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, 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 нагнітати 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 застосовується двохплунжерний насос, який працює в комплексі зі спеціальним розчинозмішувачем місткістю 500 л і який забезпечує тиск до 1,5 МПа, що регулюється в широких межах. Подача насоса досягає  $4 \text{ м}^3/\text{год}$ . Нагнітання виконується доки не припиниться поглинання розчину при граничному тиску, заміряному в усті свердловини.

Нагнітаючий розчин подається по гумових шлангах діаметром не менше 50 мм до отворів, які залишаються в оправі при бетонуванні або які прорублені після її розкруження. Ін'єктор кріпиться на різьбі до сталевих трубок, які закладені в оправу при бетонуванні і які виступають всередину тунелю на 5...8 см, при відсутності трубок – обжиманням гумового кільця в шпурі, який

пробурений в оправі.

Якість робіт по нагнітання перевіряється нагнітанням цементного розчину через додатково пробурені шпури, які не повинні приймати його при граничному тиску. При спорудженні оправы по частинам допускається нагнітання за частини оправы до її повного спорудження.

Після закінчення всіх робіт з нагнітання, отвори в оправі повинні бути щільно закриті за допомогою металевих пробок з азбестоцементними шайбами. Для цього свердловини необхідно очистити від розчину на глибину не менше 50 мм, продуті, промити водою, а потім зачеканити ущільнювальною сполукою.

### **3.5 Чеканка швів**

При значному напорі ґрунтової води для гідроізоляції швів використовується спеціальний розчин (замазка із БУС). Його розміщують в чеканочну канавку і розплющують чеканочними молотками.

Канавка чавунних тубінгів перед заповненням очищується до металевого блиску пісконапірним пристроєм з наступною продувкою стисненим повітрям. Ущільнюючу замазку готують невеликими порціями (по 2...3 кг) для того, щоб можна було використовувати її на протязі 10 хв.

Вкладання її канавку здійснюється вручну або пневматичним цементоукладацьником і ущільнюється (чеканиться) пневматичними молотками РМ-1 або РМ-3 з набором чеканочних наконечників. Матеріал вкладається в канавку і чеканиться в два-три шари ділянками довжиною по 3-4 м зверху вниз по кільцю: спочатку чеканяться поздовжні шви і місця сполучення їх з кільцевими, а потім кільцеві шви.

### **3.6 Розрахунок вентиляції при БВР**

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. Система вентиляції повинна забезпечувати реверсування повітряного струменя. Об'єм повітря, що проходить по виробкам у реверсивному режимі провітрювання, повинен складати не менше 60 % об'єму повітря, який проходить по них у нормальному режимі.

Схеми вентиляції для всіх стадій спорудження тунелю визначаються проєктом. У випадку надходження у виробку шкідливих газів, не виявлених у процесі розвідувань, зміна схем вентиляції проводиться проєктною організацією.

Вміст шкідливих і отруйних газів та пилу у повітрі підземних виробок (у місцях, де знаходяться або можуть знаходитись люди) не повинен перевищувати гранично допустимих величин для робочої зони.

Вентиляція підземних споруд метрополітенів при виконанні будівельно-монтажних робіт в тунелях переважно повинна здійснюватися з використанням вентиляційних установок, призначених для постійної експлуатації.

Вентиляційні агрегати, повітроводи та інші елементи тимчасових вентиляційних схем слід приймати з урахуванням їх використання протягом усього періоду будівництва.

Забруднене повітря видаляють безпосередньо на поверхню або у вихідний струмінь головного вентилятора. При розрахунку викиду повітря із вентиляційних систем в атмосферу повинні дотримуватися ГДК шкідливих речовин в атмосферному повітрі населених пунктів.

Головна вентиляційна установка на поверхні повинна розташовуватися на відстані не менше 15 м від повітроподавального ствола шахти.

При виконанні БВР приймається схема приточно-витяжної вентиляції, яка розраховується за формулою А.І. Ксенофонтової. Кількість повітря, необхідного для подачі в забій, визначається по допустимості концентрації окису вуглецю (0,008 %) через 30 хв. після вибуху.

Необхідна кількість повітря:

$$Q = \frac{6}{t} \cdot \sqrt{A \cdot S \cdot (75 + A)} \quad \text{м}^3 / \text{хв};$$

де  $t$  – час провітрювання;  $A$  – витрати вибухової речовини за один вибух (див. розрахунок параметрів БВР для уступу середнього тунелю – 103,56 кг);  $S$  – площа забою (для середнього тунелю – 50,44 м<sup>2</sup>).

$$Q = \frac{6}{30} \cdot \sqrt{96,5 \cdot 50,44 \cdot (75 + 103,56)} = 186,5 \quad \text{м}^3 / \text{хв};$$

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

$$Q = \frac{6N}{60} = \frac{6 \cdot 12}{60} = 1,2 \quad (\text{м}^3/\text{с}),$$

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

Із двох значень потреби в повітрі (в м<sup>3</sup>/хв), а саме 186,5 (за результатами вибуху) та 72 (за результатами максимальної кількості людей) обираємо більшу і перевіряємо за швидкістю його руху по підземній виробці, яка повинна становити  $0,25 < V < 6$  м/с:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{186,5}{50,44} = 3,7 \quad \text{м/с}.$$

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

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

$$Q_{\text{в}} = pQ = 1,052 \cdot 186,5 = 196,2 \quad (\text{м}^3/\text{с}),$$

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

$$p = \left( \frac{\beta d L}{3m} \sqrt{R} + 1 \right)^2 = \left( \frac{0,001 \cdot 0,6 \cdot 200}{3 \cdot 3,5} \sqrt{5,02} + 1 \right)^2 = 1,052,$$

де  $\beta$  – 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  $m=2,5$  м при  $d \leq 0,6$  м та  $m=3,5$  м при  $d > 0,6$  м;  $R$  – аеродинамічний опір трубопроводу.

Аеродинамічний опір трубопроводу  $R$  (у кілоджоргах) складає:

$$R = 6,5\alpha \frac{L}{d^5} = 6,5 \cdot 0,0003 \frac{200}{0,6^5} = 5,02 \text{ кілоджоргов,}$$

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

Статичний напір  $h_{\text{ст}}$  (мм вод. ст.) у вентиляційному трубопроводі:

$$h_{\text{ст}} = RQ_{\text{в}} = 5,01 \cdot 196,2 = 982,9.$$

Після розрахунку коефіцієнта доставки  $p$  і статичного напору  $h_{\text{ст}}$  вибирають значення максимального коефіцієнта корисної дії  $\eta$  та знаходять швидкість повітря через вихідний отвір вентилятора  $V_{\text{в}}=22,5$  м/с.

Площа вихідного отвору вентилятора  $F_{\text{в}}$  дорівнює:

$$F_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}}{V_{\text{в}}} = \frac{196,2}{22,5} = 8,7 \text{ м}^2.$$

Знайшовши площу вихідного отвору вентилятора  $F_{\text{в}}$ , підбирають його назву і параметри. Це вентилятор ВМ-6м із площею вихідного отвору  $1,1 \text{ м}^2$ , тобто для якісного провітрювання потрібно 8 вентиляторів.

## ВИСНОВКИ

1. В магістерській роботі виконано аналіз конструктивних схем колонних станцій глибокого закладення, зокрема варіанту із залізобетонних блоків та варіанту із чавунних тюбінгів з клинчастими перемичками. Визначено основні розміри колонної станції та проведене техніко-економічне порівняння варіантів. Враховуючи складну гідрогеологічну ситуацію спорудження Дніпровського метрополітену, для подальшого чисельного аналізу та розробки спорудження обирається варіант із чавунними тюбінгами.

2. Побудована стержнева скінченно-елементна модель колонної станції за допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD for Windows. Проведений чисельний аналіз конструктивних елементів станційної конструкції методом скінченних елементів із варіацією товщини оправи  $h=200; 250; 300; 350; 400; 450; 500$  мм.

3. Проаналізовано результати обґрунтування геометричних параметрів конструктивних елементів. Всі силові фактори в залежності від товщини оправи були апроксимовані логарифмічним трендом, причому точність апроксимації свідчить про те, що вони є функціональними закономірностями ( $R^2=0,915\dots 0,98$  із дещо зменшеними значеннями  $0,712\dots 0,795$  в нижній частині середнього тунелю).

4. Розраховані параметри буровибухових робіт для проходки бокового та середнього тунелів, побудовані паспорти БВР та таблиці параметрів БВР при електричному виді ініціювання.

5. Розроблено основи спорудження колонної станції в породах середньої міцності, зокрема спосіб проходки бокового та середнього тунелів, нагнітання за оправу, чеканка швів, вентиляція під час проведення буровибухових робіт.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Начальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ: НТУ, 2006. – 166 с.
2. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
3. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану колонної станції метрополітену з двома видами колон [Текст] / В. Д. Петренко, В. Л. Сєдін, О. Л. Тютюкін, І. В. Старостенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 6/2004 (29). – С. 108-112.
4. Петренко, В. Д. Числовий аналіз залізобетонної конструкції колонної станції метрополітену із змінним кроком колон [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, Д. С. Кавун. // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2007. – № 71(94). – С. 27-33.
5. 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.
6. Петренко, В. Д. Методичні вказівки для курсового та дипломного проектування «Організація, управління і планування тунельного виробництва» Тунелі і метрополітени [Текст]: / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, М. А. Лісневський. – Д. : Вид-во «Нова ідеологія», 2011. – 33 с.
7. Петренко, В. Д. Методичні вказівки для курсового та дипломного проектування «Проектування буровибухових робіт під час будівництва тунелів» Тунелі і метрополітени [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін. – Д. : Вид-во «Нова ідеологія», 2011. – 29 с.

8. Петренко, В. Д. Методичні вказівки до курсового й дипломного проектування «Станція метрополітену глибокого закладення (конструкції та спорудження)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютькін, Д. В. Тютькін. – Д.: Нова ідеологія, 2015. – 30 с.

9. Петренко, В. І. Урахування взаємодії системи кріплення-масив у розрахунках трьохсклепінчастих станцій метрополітену [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін // Вісник Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут», серія «Гірництво». – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2002. – Вип. 7. – С. 22-26.

10. Петренко, В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. – 252 с.

11. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004. – 176 с.

12. Петренко, В. И. Станції метрополітену: конструкції та спорудження. Навчальний посібник [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2012. – 164 с.

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

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