

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

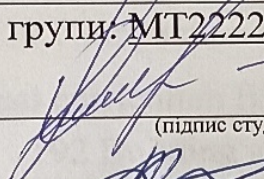
до кваліфікаційної роботи

ОС «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Обґрунтування конструкції шахтного ствола та технології його спорудження із застосуванням заморожування ґрунту за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»

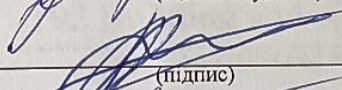
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: МТ2222

  
(підпис студента)

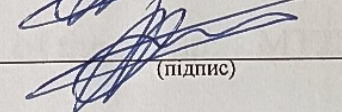
/ Анатолій ОНУК /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

  
(підпис)

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

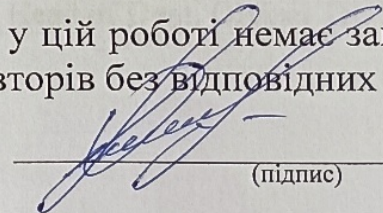
Нормоконтролер:

  
(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)

**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 design of the mine shaft  
and the technology of its construction using soil freezing  
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 / Anatolii ONUK /  
(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 Онуку Анатолію Сергійовичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування конструкції шахтного ствола та технології його спорудження із застосуванням заморожування ґрунту»

Керівник роботи: Тютькін 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 Київського метрополітену, конструкцій шахтного ствола з різних матеріалів та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

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

Вступ. Розділ 1. Розрахунок параметрів шахтного ствола. Розділ 2. Обґрунтування конструкції шахтного ствола під час чисельного аналізу методом скінченних елементів. Розділ 3. Обґрунтування технології спорудження шахтного ствола із застосуванням заморожування ґрунту. 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. Розрахунок параметрів шахтного ствола.	30.10.2023-19.11.2023	
2	Розділ 2. Обґрунтування конструкції шахтного ствола під час чисельного аналізу методом скінченних елементів.	20.11.2023-17.12.2023	
3	Розділ 3. Обґрунтування технології спорудження шахтного ствола із застосуванням заморожування ґрунту. 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)

Анатолій ОНУК

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олексій ТЮТЬКІН

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 стор., 19 рис., 7 табл., 14 літературних джерел.

Об'єкт розробки – шахтний ствол.

Мета роботи – обґрунтування конструкції шахтного ствола та технології його спорудження із застосуванням заморожування ґрунту.

Метод дослідження – метод скінченних елементів.

В магістерській роботі виконано розрахунок параметрів шахтного ствола на основі аналізу результатів інженерно-геологічних досліджень. Розроблені варіанти шахтного ствола, розраховано об'єми робіт для кожного з них та виконане техніко-економічне порівняння.

Створена скінченно-елементна модель шахтного ствола (просторова постановка). Проведений чисельний аналіз та отримано результати для оправи із чавунних тюрбінгів та залізобетонних тюрбінгів. Обґрунтована конструкція шахтного ствола та доцільність застосування залізобетону.

Обґрунтовано технологію спорудження шахтного ствола із застосуванням заморожування ґрунту.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, ШАХТНИЙ СТВОЛ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ТЕХНОЛОГІЯ СПОРУДЖЕННЯ

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШАХТНОГО СТВОЛА .....	9
1.1 Інженерно-геологічні дослідження .....	9
1.2 Розробка варіантів шахтного ствола .....	11
1.3 Розрахунок об'ємів робіт.....	17
1.4 Техніко-економічне порівняння варіантів.....	20
2 ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ШАХТНОГО СТВОЛА ПІД ЧАС ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	23
2.1 Створення скінченно-елементної моделі шахтного ствола.....	23
2.2 Результати чисельного аналізу моделі шахтного ствола із чавунною оправою .....	30
2.3 Результати чисельного аналізу моделі шахтного ствола із залізобетонною оправою та її обґрунтування .....	35
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СПОРУДЖЕННЯ ШАХТНОГО СТВОЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАМОРОЖУВАННЯ ҐРУНТУ .....	40
3.1 Спорудження шахтного ствола із застосуванням штучного заморожування ґрунту.....	40
3.2 Розрахунок параметрів штучного заморожування ґрунту.....	44
3.3 Спорудження шахтного ствола гірничим способом .....	49
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	59

## ВСТУП

Сьогодні транспортну проблему в мегаполісах (з населенням понад 1 млн. громадян) можливо вирішити лише шляхом будівництва метрополітенів, які є найбільш ефективним міським транспортом, що забезпечує комфортні і швидкісні масові перевезення пасажирів.

Спорудження тунелів і метрополітенів є найбільш технічно складним завданням транспортного будівництва, для здійснення якого необхідні висококваліфіковані фахівці із знаннями в області підземного будівництва, гірничої справи, проєктування і будівництва інженерних споруд.

Проходка шахтних стволів складає невелику долю в загальному об'ємі робіт при будівництві метрополітенів, проте швидке і успішне її проведення скорочує загальні терміни будівництва, оскільки через шахтні стволи здійснюється розгортання основних підземних робіт.

Ствол – вертикальна гірничка виробка з постійним кріпленням, призначена для технологічного зв'язку підземної споруди з поверхнею у період будівництва. Через ствол шахти здійснюється підйом на земну поверхню ґрунту, спуск і підйом людей, він також служить для цілей енергопостачання, вентиляції і водовідливу.

За призначенням розрізняють робочі шахтні стволи і вентиляційні. Робочі шахтні стволи служать лише для будівельних цілей. По закінченню будівництва їх забучують (заповнюють кладкою, засипають ґрунтом). Проте найдоцільніше використовувати шахтні стволи для постійної експлуатації метрополітенів або тунелів.

Місця розташування стволів обов'язково ув'язують з прийнятою системою вентиляції тунелів для раціонального їх використання як постійні споруди. При будівництві гірничих тунелів прагнуть використовувати майданчики із зручним підйомом, при будівництві метрополітенів вибирають місця, найбільш вільні від міської забудови.

Шахтні стволи розташовують, як правило, на відстані 10...20 м від осі

тунелю, що споруджується. Поперечний перетин стволів шахт при будівництві тунелів і метрополітенів зазвичай приймається круглим найчастіше з внутрішнім діаметром в світлі 5,1 або 5,6 м і в окремих випадках 7,9 м. Прямокутна форма перетину допускається для стволів шахт тимчасового призначення.

В даній випускній кваліфікаційній роботі виконане обґрунтування конструкції шахтного ствола та технології його спорудження із застосуванням заморожування ґрунту при будівництві Київського метрополітену в ґрунтах з різними фізико-механічними властивостями і з високим рівнем водонасиченості. Під час обґрунтування конструкції шахтного ствола прийнятий економічний варіант залізобетонної оправи.

# 1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШАХТНОГО СТВОЛА

## 1.1 Інженерно-геологічні дослідження

Важливим етапом на стадії проектування підземних споруд є інженерно-геологічні дослідження [1]. Основним їхнім завданням для обґрунтування проектування і будівництва шахтного ствола та метрополітену в цілому є вивчення інженерно-геологічних умов району, що дозволяє правильно і економічно запроектувати, побудувати і експлуатувати метрополітен. В результаті досліджень має бути отримана інформація про будову і склад гірського масиву, про гідрогеологічні умови.

Від точності інженерно-геологічних даних залежить безпека тих людей, що працюють та збереження міських наземних будівель і комунікацій. Тому до якості досліджень в метробудуванні пред'являють особливо високі вимоги. Дослідженнями мають бути встановлені наступні основні відомості:

- геологічна будова ділянки (види і склад гірських порід, характер залягання пластів, їх потужність і тріщинуватість);
- гідрогеологічні умови (наявність водоносних горизонтів, глибина залягання рівнів підземних вод, напрям і швидкість руху підземних вод, характеристика водопроникності порід, очікувані величини водопритоків, температура і хімічний склад підземних вод);
- фізико-механічні властивості порід;
- можливість прояву при будівництві негативних процесів (розвиток великого гірського тиску, утворення вивалів породи в забої, проривання пливунів).

Основним видом геологічної розвідки є буріння вертикальних розвідувальних свердловин з періодичним відбором проб ґрунту, по яким визначають потужність пластів, їх чергування та міцність [7]. Одночасно визначають водоносність шарів окремо для кожного шару. В процесі буріння свердловини опис ґрунтів, що зустрілися, та їх характеристики заносять в спеціальний буровий журнал. По даних записах складають геологічні колонки,

що є графічним зображенням розрізу свердловини. У колонках вказують чергування ґрунтів, зустрінутих при бурінні свердловини, потужність їх пластів і горизонти (рівні) ґрунтових вод. На підставі геологічних колонок, отриманих за результатами буріння свердловин, складають геологічний розріз, який представляє графічне зображення геологічних і гідрогеологічних умов, в яких вестиметься будівництво. Складені за результатами досліджень звіт і геологічний розріз є одним з основних документів для проектування.

За завданням: район будівництва – м. Київ, Київський метрополітен. Інженерно-геологічні умови ускладнюються наявністю ґрунтових вод і, як наслідок, високою водонасиченістю ґрунтового масиву, що вимагає використання спеціальних способів будівництва (заморожування).

Згідно з результатами інженерно-геологічних досліджень геологічний розріз ділянки спорудження шахтного стволу Київського метрополітену представлений наступними шарами ґрунтів:

- 1) ґрунтово-рослинний шар, що залягає на поверхні та має потужність 1 м,
- 2) пісок водонасичений, який має потужність 15 м,
- 3) супісок, потужністю 22 м,
- 4) глина спонділова тріщинувата.

Рівень ґрунтових вод високий, знаходиться на відмітці 99,0.

Фізико-механічні властивості ґрунтів надані у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості ґрунтів

№ п/п	Коефіцієнт пористості, e	Коефіцієнт міцності по Протод'яконову	Питома вага $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , град
1	0,70	0,70	15	15
2	0,65	0,65	17	19
3	0,60	0,80	18	21
4	0,60	1,0	18	18

## 1.2 Розробка варіантів шахтного ствола

Існує декілька варіантів оправи шахтних стволів метрополітенів [2, 7].

Матеріалом для оправи стволів шахт круглого поперечного перетину залежно від гірничо-геологічних умов може бути монолітний бетон, збірний залізобетон і у водонасичених умовах – чавунні тюрбінги. При прямокутному перетині використовують дерево, інколи збірний залізобетон.

Шахтні стволи, які використовуються при експлуатації метрополітенів як вентиляційні, знаходяться в умовах знакозмінних температур, і їх оправа вимагає особливо надійної гідроізоляції. Цим визначається переважне вживання для шахтних стволів оправ з чавунних тюрбінгів.

Шахтний ствол складається з верхньої частини – устя (форшахти) з коміром, основної частини – вертикальної протяжної закріпленої виробки, сполучення ствола з біляствольними виробками і нижньої частини – зумпфа.

Комір є конструкцією кругового контуру з бетону або залізобетону, яка надійно закріплює верхні кільця ствола в ґрунті і сприймає частину ваги оправи. У комірці інколи розміщують спеціальне устаткування, яке використовується при проходці ствола. Він захищає гирло ствола від стоку поверхневих вод.

Сполучення ствола з біляствольними виробками виконують у вигляді бетонного розтруба.

Зумпф ствола розташовують на 2...3 м нижче за рівень підосви біляствольного двору. Він служить тимчасовим або постійним водозбірником.

Комплекс розміщеного в стволі устаткування, необхідного для обслуговування підземних робіт впродовж всього періоду будівництва, і пристроїв, що підтримують його, називають постійним армуванням ствола. Перетин ствола розділяється на клітьове, сходове і лісоспускне відділення, а також відділення для розміщення трубопроводів і кабелів.

Шахтні стволи перетинають зазвичай різнорідні ґрунтові нашарування, у тому числі слабкі нестійкі і обводнені ґрунти. Тому при проходці стволів використовують різні способи і часто застосовують спеціальні способи робіт:

заморожування ґрунтів, цементацію і інші види закріплення ґрунтів, штучне водозниження.

В даній випускній кваліфікаційній роботі розглядається три варіанти конструкції оправи: з використанням залізобетонних тюбінгів, оправа з чавунних тюбінгів, монолітна бетонна оправа.

### **Варіант 1 (Оправа з залізобетонних тюбінгів)**

В першому варіанті розглядається влаштування збірної оправи з залізобетонних тюбінгів (бетон класу В40).

Залізобетонна тюбінгова оправа поєднує в собі високу несучу здатність з відносно невисокою вартістю і трудомісткістю зведення. Основні переваги обумовлені виготовленням тюбінгів в заводських умовах, що дозволяє досягнути високої міцності, водонепроникності і корозійної стійкості тюбінгів.

Для визначення висоти бортів тюбінгів користуються емпіричною формулою [10]:

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

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

$n=14$  – для блоків з бетону класу В30;

$n=13$  – для блоків з бетону класу В40;

$n=12$  – для блоків з бетону класу В50;

$n=10$  – для залізобетонних блоків з бетону класу В30;

$n=9$  – для залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу В40;

$n=7,5$  – для чавунних тюбінгів і залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу вище В50.

Виконавши підстановку даних, отримуємо:

$$h = 9\sqrt[3]{\frac{5,1^2}{0,7}} = 30 \text{ см}$$

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

Конструкція типового залізобетонного тюрбінга надана на рис. 1.1.

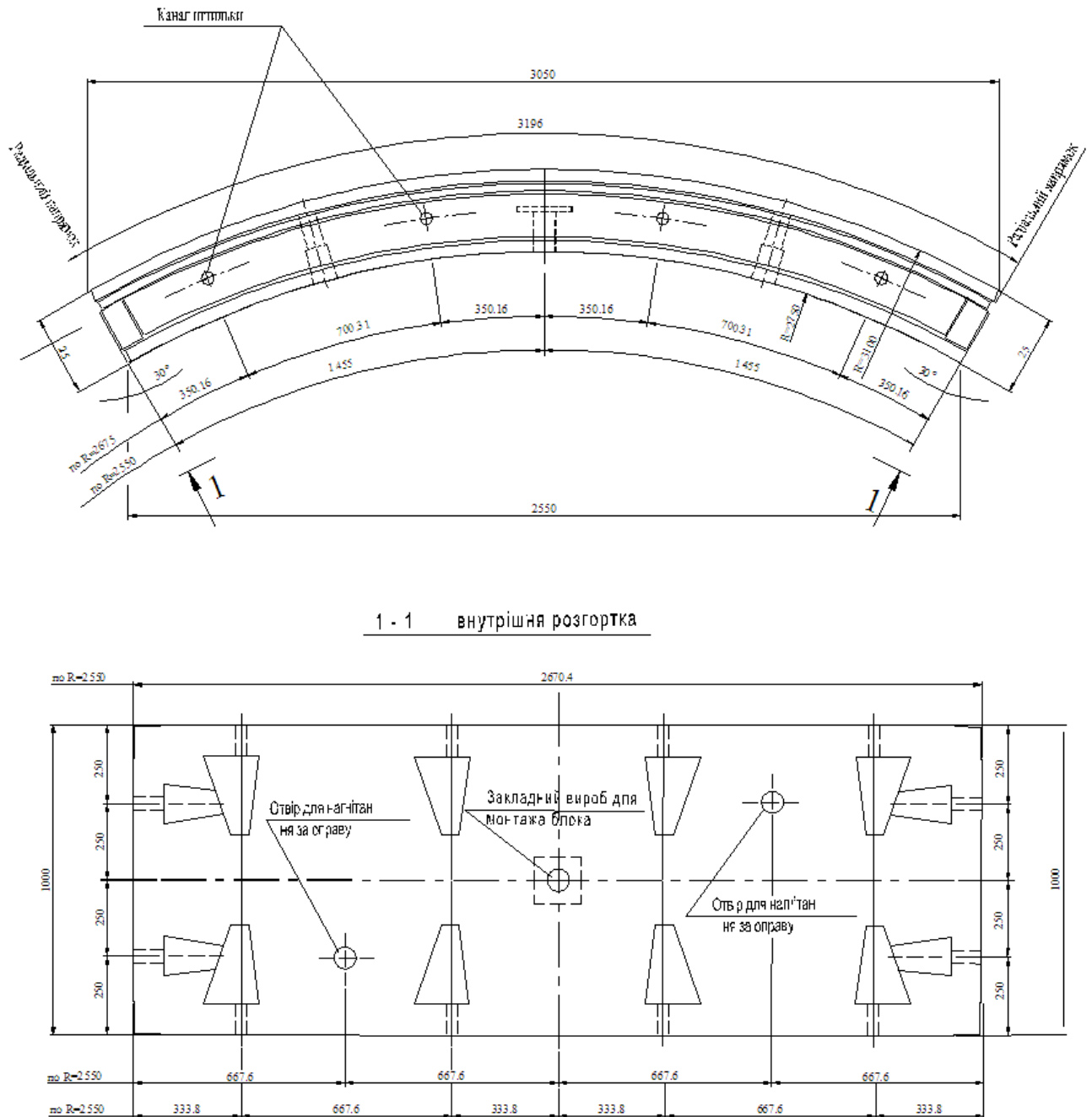


Рисунок 1.1 – Конструкція типового залізобетонного тюрбінга

## **Варіант 2 (Оправа з чавунних тюбінгів)**

В другому варіанті розглянемо збірну оправа з чавунних тюбінгів [2, 10].

Чавунні тюбінги відливають з чавуну марки СЧ-21-40.

Використання чавунних тюбінгів доцільне в складних інженерно-геологічних умовах з штучним заморожуванням ґрунту. Також чавунні тюбінги використовують, коли шахтні стволи планують після закінчення будівництва використовувати в якості вентиляційних, тобто в умовах знакозмінних температур.

Недоліком чавунної оправи є висока, порівняно з бетоном або залізобетоном, вартість.

Кільце чавунної оправи має три типорозміри тюбінгів:

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

Перевагами цієї оправи є мінімальне число типорозмірів тюбінгів, повна водонепроникність при будь-якому гідростатичному тиску і простота забезпечення перев'язки поздовжніх стиків у суміжних кільцях (простим зміщенням замкового елемента ліворуч і праворуч від вертикальної осі на 1...2 болтових кроки).

Тюбінги чавунної оправи з'єднуються між собою в поздовжніх і кільцевих бортах болтами з сталі СТ3, СТ5 діаметром 20...45 мм. Для полегшення монтажу діаметри болтових отворів приймаються на 3...4 мм більше діаметра болтів. Болтові отвори в кільцевих бортах розміщують в один ряд по середній лінії з однаковим кроком. Причому довжина тюбінга по середній лінії повинна бути кратна кроку болтових отворів, що забезпечує можливість перев'язки швів при монтажі (це відноситься і до залізобетонних тюбінгів). У поздовжніх бортах болтові отвори розміщують у два ряди. Болтовий отвір оздоблюють приливами, паралельними зовнішній грані бортів. Максимальна довжина чавунних тюбінгів (по зовнішній хорді) не повинна перевищувати 2 м.

Конструкція типового чавунного тубінга надана на рис. 1.2.

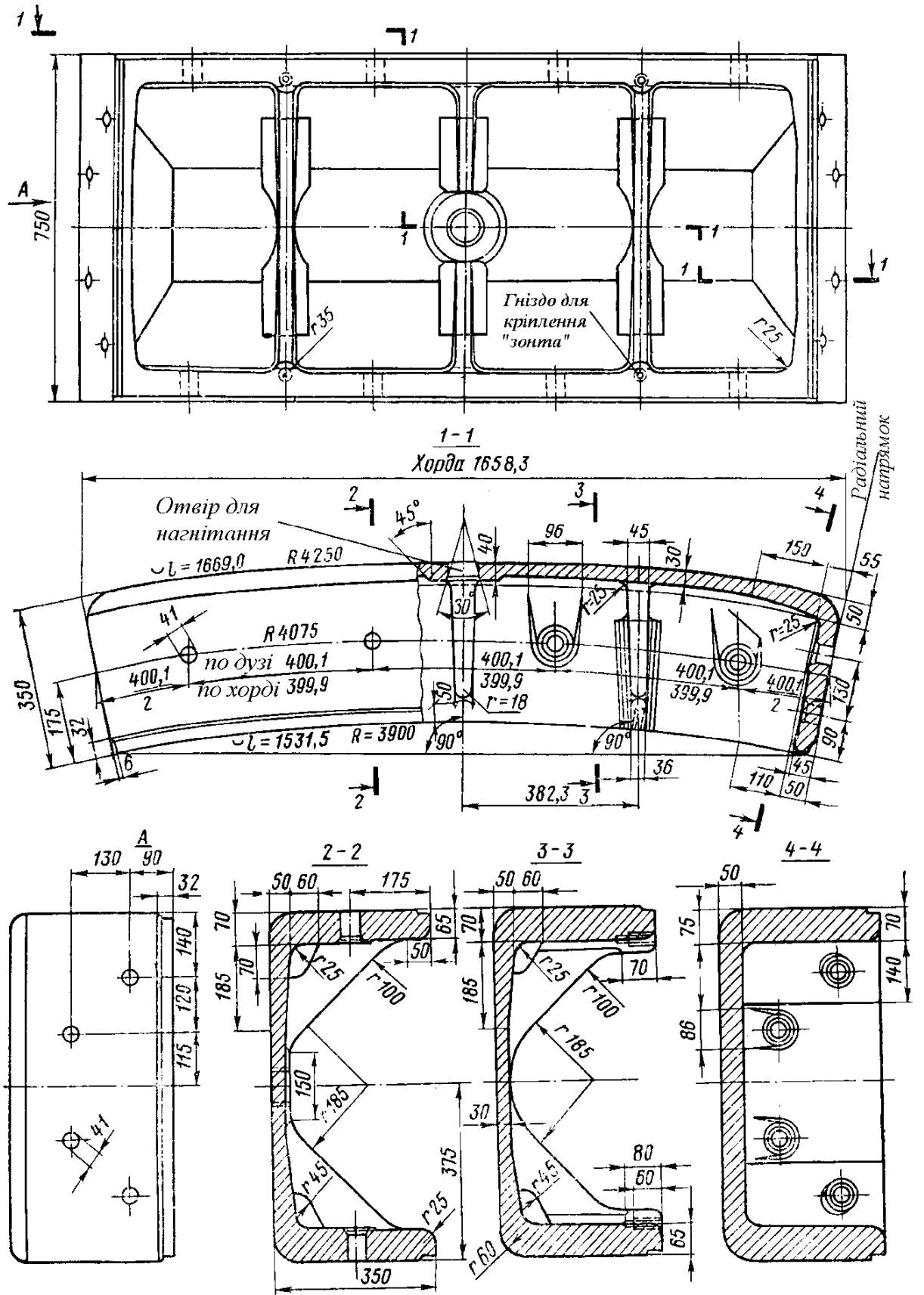


Рисунок 1.2 – Конструкція типового чавунного тубінга

### **Варіант 3 (Оправа з монолітного бетону)**

У третьому варіанті розглядається використання оправи з монолітного бетону [2, 10].

Оправа з монолітного бетону в даний час знову набуває значного поширення. До переваг бетонної оправи відносяться [9]:

- комплексна механізація робіт по зведенню і, як наслідок цього, висока продуктивність праці прохідників при кріпленні. При зведенні бетонної оправи в призабіній пересувній опалубці механізовані операції складають 84 % (при використанні залізобетонних тюбінгів – 46 %);
- низька вартість матеріалів. Вартість 1 м монолітної бетонної оправи, у порівнянні з залізобетонними тюбінгами, на 30...50 % нижче;
- хороше зчеплення з порідними стінками стволу;
- малий аеродинамічний опір;
- можливість використання місцевих матеріалів;
- великий термін служби і вогнестійкість.

При вірному підборі складу бетонної суміші і дотриманні технології зведення бетонна оправа має достатню для умов експлуатації стволів водонепроникність.

Згідно ДБН для кріплення стволів рекомендується приймати бетон марки не нижче В15. Для виготовлення бетонної суміші використовують портландцемент або шлакопортландцемент, пісок повинен бути крупністю від 0,14 до 5 мм з вмістом мулових часток не більше 3 %. Водоцементне відношення повинно бути рівним 0,5...0,6.

Міцність матеріалу крупного заповнювача (гравій, щебінь) повинна бути у 1,5...2 рази вища за міцність бетону. При спуску бетонної суміші по трубах крупність заповнювача не повинна перевищувати 40 мм.

Основними недоліками монолітної бетонної оправи є:

- низький рівень гідроізоляції, пов'язаний з великою кількістю «холодних швів» між шарами укладеного бетону;
- невелика несуча здатність через використання бетону низького класу.

### 1.3 Розрахунок об'ємів робіт

Для техніко-економічного порівняння варіантів проводимо визначення об'ємів основних видів робіт [3].

#### Варіант 1 (Оправа з залізобетонних тюбінгів)

1. Розробка котловану під устя форшахти:

$$V = F_k \cdot h_k$$

де:  $F_k$  – площа котловану з відкосами;

$h_k$  – глибина котловану.

$$V = 237,54 \cdot 4 = 950,16 \text{ м}^3$$

2. Проходка ствола (розробка ґрунту):

$$V = F_{cm} \cdot h_{cm}$$

$$V = \pi \cdot R_{cm}^2 \cdot h_{cm} = 3,14 \cdot 3,1^2 \cdot 38 = 1146,67 \text{ м}^3$$

де:  $R_{cm}$  – радіус ствола по зовнішньому контуру;

$h_{cm}$  – глибина ствола (без урахування глибини котловану).

3. Навантаження породи:

$$V = V_{cm} \cdot 1,3 = 1146,67 \cdot 1,3 = 1490,67 \text{ м}^3$$

де 1,3 – коефіцієнт розрихлення породи.

4. Влаштування збірної залізобетонної оправи:

$$V = \pi(R^2 - r^2) \cdot h$$

де:  $R$  – зовнішній радіус оправи;

$r$  – внутрішній радіус оправи;

$h$  – глибина шахтного ствола.

$$V = 3,14(3,1^2 - 2,8^2) \cdot 42 = 233,43 \text{ м}^3$$

5. Нагнітання цементно-піщаного розчину:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$$

$$F = 2 \cdot 3,14 \cdot 3,1 \cdot 42 = 817,65 \text{ м}^2$$

6. Чеканка швів:  $l = 1107 \text{ м}$

## Варіант 2 (Оправа з чавунних тюбінгів)

1. Розробка котловану під устя форшахти:

$$V = F_k \cdot h_k$$

$$V = 8,2^2 \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 4 \cdot 8,2 \cdot 2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 4 \cdot 20,2 \cdot 2 = 950,16 \text{ м}^3,$$

де:  $F_k$  – площа котловану з відкосами;

$h_k$  – глибина котловану.

2. Проходка ствола (розробка ґрунту):

$$V = F_{cm} \cdot h_{cm}$$

$$V = \pi \cdot R_{cm}^2 \cdot h_{cm} = 3,14 \cdot 3,05^2 \cdot 38 = 1109,97 \text{ м}^3,$$

де:  $R_{ст}$  – радіус ствола по зовнішньому контуру;

$h_{ст}$  – глибина ствола (без урахування глибини котловану).

3. Навантаження породи:

$$V = V_{cm} \cdot 1,3 = 1109,97 \cdot 1,3 = 1442,96 \text{ м}^3$$

4. Влаштування чавунної оправы:

$$V = \pi(R^2 - r^2) \cdot h$$

$$V = 3,14(3,05^2 - 2,8^2) \cdot 42 = 192,87 \text{ м}^3$$

5. Нагнітання цементно-піщаного розчину:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$$

$$F = 2 \cdot 3,14 \cdot 3,05 \cdot 42 = 804,47 \text{ м}^2$$

6. Чеканка швів:  $l = 1107 \text{ м}$

### Варіант 3 (Оправа з монолітного бетону)

1. Розробка котловану під устя форшахти:

$$V = F_k \cdot h_k$$

$$V = 8,2^2 \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 4 \cdot 8,2 \cdot 2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 4 \cdot 20,2 \cdot 2 = 950,16 \text{ м}^3,$$

де:  $F_k$  – площа котловану з відкосами;

$h_k$  – глибина котловану.

2. Проходка ствола (розробка ґрунту):

$$V_{cm} = F_{cm} \cdot h_{cm}$$

де:  $R_{ст}$  – радіус ствола по зовнішньому контуру;

$h_{ст}$  – глибина ствола (без урахування глибини котловану).

$$V_{cm} = \pi \cdot R_{cm}^2 \cdot h_{cm} = 3,14 \cdot 3,1^2 \cdot 38 = 1146,66 \text{ м}^3,$$

3. Навантаження породи:

$$V = V_{cm} \cdot 1,3 = 1146,66 \cdot 1,3 = 1490,66 \text{ м}^3$$

4. Влаштування монолітної оправы:

$$V = \pi(R^2 - r^2) \cdot h$$

$$V = 3,14(3,1^2 - 2,8^2) \cdot 42 = 233,43 \text{ м}^3$$

#### 1.4 Техніко-економічне порівняння варіантів

Трудовитрати на влаштування оправ варіантів 1-3 наведені у табл. 1.2-1.4.

Таблиця 1.2 – Розрахунок трудовитрат Варіанту №1

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, <i>чол.-год</i>	
					на одиницю	на об'єм
1.	Розробка котловану	1-11-1	м <sup>3</sup>	950,16	0,007	6,65
2.	Проходка ствола	29-16-4	м <sup>3</sup>	11146,67	2,82	3233,6
3.	Навантаження породи	29-94-2	м <sup>3</sup>	1490,67	1,04	1550,3
4.	Влаштування оправы	29-124-1	м <sup>3</sup>	233,43	10,68	2493,1
5.	Нагнітання розчину	29-135-1	м <sup>2</sup>	804,47	0,41	329,8
6.	Чеканка швів	29-145-14	м	1107	1,6	1771,2

Всього: 9384,65

Таблиця 1.3 – Розрахунок трудовитрат Варіанту №2

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, <i>чол.-год</i>	
					на одиницю	на об'єм
1.	Розробка котловану	1-11-1	м <sup>3</sup>	950,16	0,007	6,65
2.	Проходка ствола	29-16-4	м <sup>3</sup>	1109,97	2,82	3130,1
3.	Навантаження породи	29-94-2	м <sup>3</sup>	1442,96	1,04	1500,7
4.	Влаштування оправи	29-125-1	т	253,3	3,74	947,3
5.	Нагнітання розчину	29-135-1	м <sup>2</sup>	817,65	0,41	335,2
6.	Чеканка швів	29-145-7	м	1107	2,53	2800,7

Всього: 8720,66

Таблиця 1.4 – Розрахунок трудовитрат Варіанту №3

№ п/п	Найменування робіт	Шифр	Од. виміру	Об'єм робіт	Трудовитрати, <i>чол.-год</i>	
					на одиницю	на об'єм
1.	Розробка котловану	1-11-1	м <sup>3</sup>	950,16	0,007	6,65
2.	Проходка ствола	29-16-4	м <sup>3</sup>	1146,66	2,82	3233,6
3.	Навантаження породи	29-94-2	м <sup>3</sup>	1490,66	1,04	1550,3
4.	Влаштування оправи	29-104-1	м <sup>3</sup>	233,43	21,49	5016,4

Всього: 9806,95

Техніко-економічне порівняння варіантів та витрати матеріалів наведені у табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Техніко-економічне порівняння варіантів

№ варіанту	Загальні трудовитрати	Витрати матеріалів		
		Монолітний бетон, м <sup>3</sup>	Залізобетонні тубінги, м <sup>3</sup>	Чавун, т
Варіант 1	9384,65	–	163,4	–
Варіант 2	8720,66	–	–	253,3
Варіант 3	9806,95	233,43	–	–

На основі отриманих результатів по трудовитратам та витратам матеріалів, та враховуючи недоліки та переваги різних типів оправи, можна зробити висновок, що в даних інженерно-геологічних умовах найбільш доцільно використовувати оправу з залізобетонних тубінгів (варіант 1).

Спорудження залізобетонної тубінгової оправи менш трудомістке, ніж монолітної, вона добре працює в умовах зволоженості ґрунту, виготовлення тубінгів в заводських умовах забезпечує високу міцність, вартість залізобетонних виробів значно нижча за чавунні [7].

Але задля порівняння чавунної та залізобетонної оправи під дією робочого навантаження варто провести розрахунок з метою обґрунтування доцільності використання залізобетонної тубінгової оправи в даних умовах роботи.

## **2 ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ШАХТНОГО СТВОЛА ПІД ЧАС ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

### **2.1 Створення скінченно-елементної моделі шахтного ствола**

Метод скінченних елементів (МСЕ) – чисельний варіаційний метод, що дозволяє вирішувати широкий клас різних задач, пов'язаних з рішенням диференціальних рівнянь. Найбільше застосування МСЕ одержав у завданнях механіки тіла, що деформується, теплопровідності, гідродинаміки, а також інших завданнях [5, 10].

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 завдання.

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, названої скінченним елементом (СЕ). Внаслідок цього, у будь-якій точці досліджуваного тіла рішення визначається тільки декількома функціями із усього безлічі координатних функцій, використовуваних у рішенні завдання (функціями форми СЕ). Друга особливість полягає в тім, що в якості множників, що варіюються, приймають значення координатних функцій (а й іноді і їхніх похідних) у вузлах скінченно-елементної сітки.

Відповідно до цього для рішення завдання за допомогою МСЕ необхідно досліджуване тіло розділити на якусь (іноді досить велике) кількість 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 всім множникам. Остання умова часто вдається привести

до системи лінійних рівнянь відносної вузлових значень шуканих функцій. Лівою частиною такої системи є добуток так названої 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, що цікавлять.

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.

Компоненти об'ємного напруження визначаються для елементарного паралелепіпеда, який виділений навколо точки визначення напружень, визначаються нормативні напруження  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  та дотичні напруження  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yz}$ ,  $T_{yx}$ ,  $T_{zx}$ ,  $T_{zy}$ . Якщо враховувати закон парності дотичних напружень ( $T_{xy}=T_{yx}$ ,  $T_{xz}=T_{zx}$ ,  $T_{yz}=T_{zy}$ ), виводяться лише значення трьох із них:  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yz}$  [5, 10].

На рис. 2.1 показані додатні значення напрямків напружень і дані найменування глобальних осей, вздовж яких вони направлені, а також площестей, в котрих вони діють.

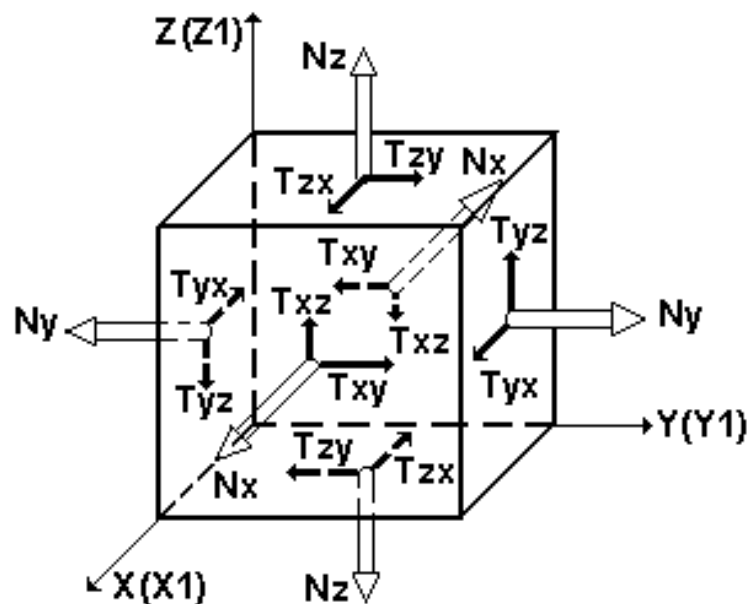




Рисунок 2.1 – Напрямок додатних значень напружень

Алгоритм побудови моделі за допомогою SCAD наступний [6, 11].

Відкриваємо SCAD → Створюємо новий проект → ОК → Записуємо ім'я проекту (Ствол Онук (чавун).SPR) → Зберегти.

Заходимо в Початкові дані → Розрахункова схема → Вузли й елементи → Вузли  → Генерація вузлів по дузі  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.2), отримуючи кільце з вузлів з діаметром 3,05 м (зовнішній) → ОК → Повторюємо операцію, змінюючи радіус на внутрішній.

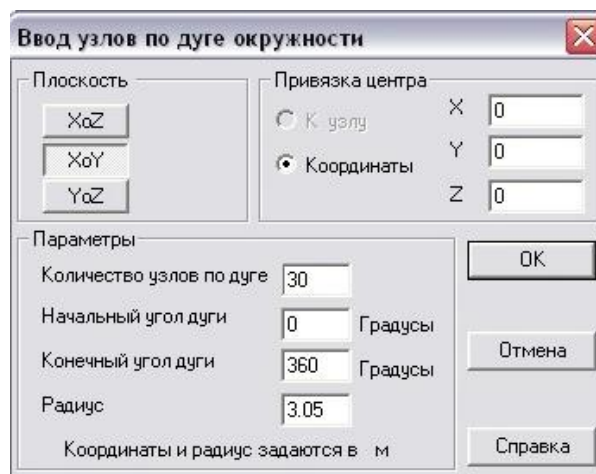




Рисунок 2.2 – Діалогове вікно Генерація вузлів по дузі

Вузли і елементи → Елементи → Додавання пластини  → Курсором  об'єднуємо вузли в елементи, при цьому кількість вузлів повинна бути 3 або 4. Після цих операцій утворюється кільце з СЕ типу 11 – плита з розташуванням в площині XY (рис. 2.3).

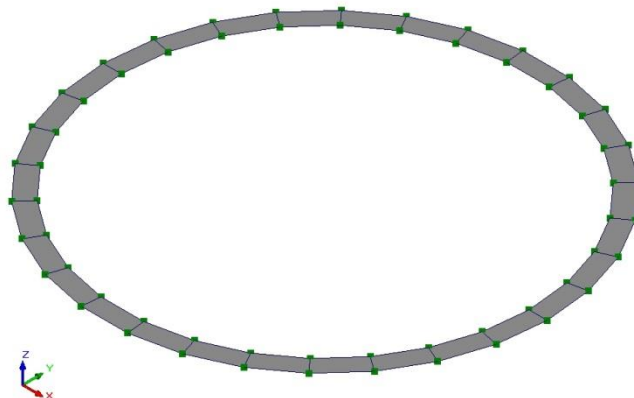







Рисунок 2.3 – Результат поєднання вузлів у СЕ за допомогою дії Додавання пластини

Для того щоб в ручному режимі змоделювати масив навколо отриманого кільця, яке є прототипом стовбура, слід виконати таку операцію.

Вузли і елементи → Вузли  → Ввести вузли на заданій відстані від відмічених  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося → ОК.

У цьому вікні проводимо генерацію сітки вузлів, яку потім об'єднуємо в елементи. Після того як кількість вузлів, потрібна для моделювання масиву, уведена через діалогове вікно , виконується алгоритм додавання пластини. Результатом цієї частини алгоритму є побудова пластинчастого прототипу стовбура.

Для того щоб отримати просторову модель стовбура на основі об'ємних елементів, слід виконати таку частину алгоритму.

Вузли й елементи → Елементи  → Відмітка елементів  → Курсором  відмічаємо елементи утвореної пластини → Схема → Копіювання схеми  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.4) → ОК → Підтверджуємо копіювання.

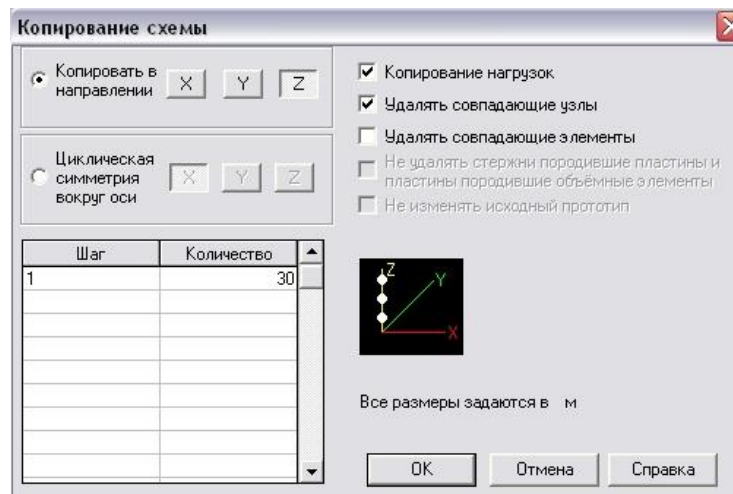


Рисунок 2.4 – Діалогове вікно Копіювання схеми

Результатом копіювання є просторова модель на основі об'ємних елементів, що побудована на основі реальних геометричних розмірів і результатів лабораторних досліджень (рис. 2.5).

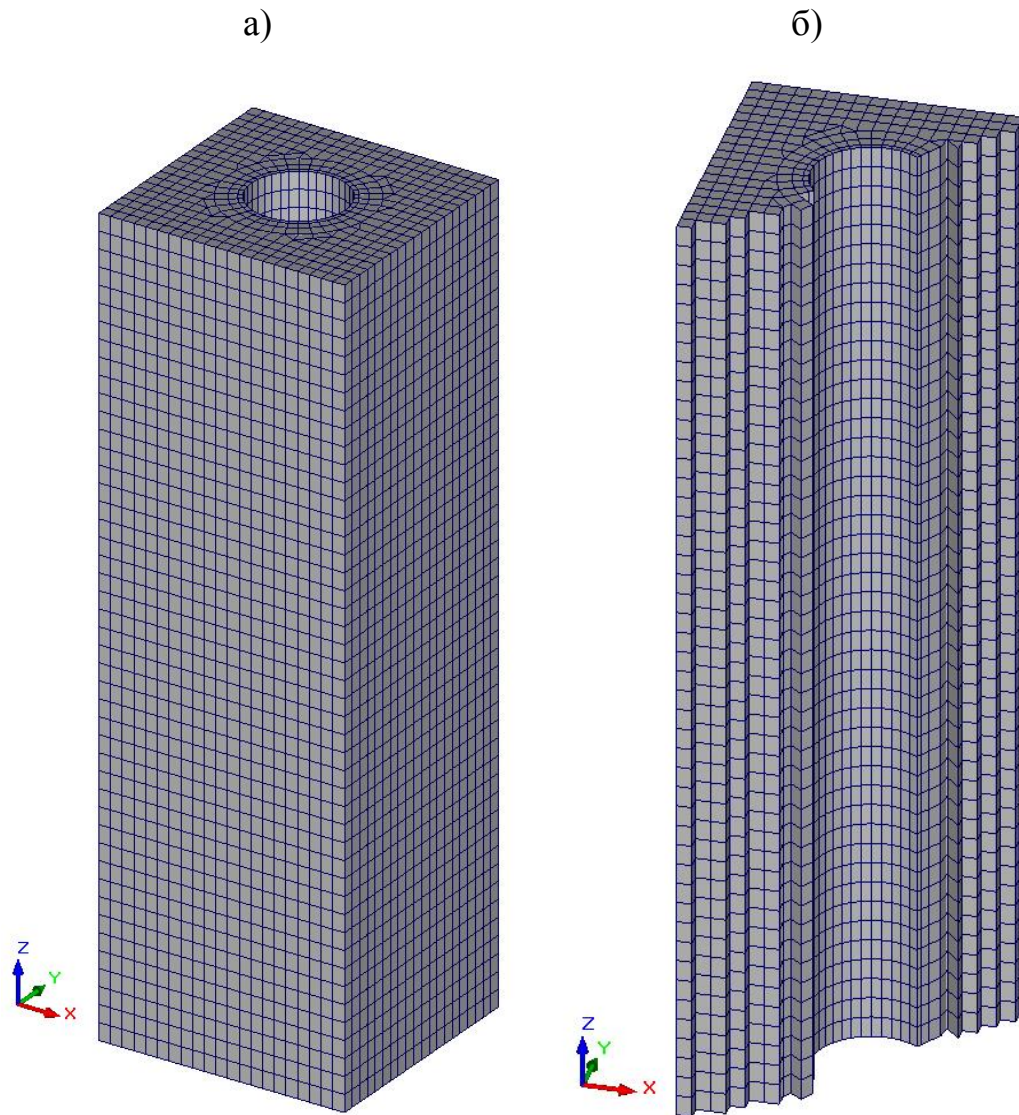




Рисунок 2.5 – Скінченно-елементна модель ствола:

а) загальний вигляд; б) фрагмент

Модель основана на об'ємних скінченних елементах (22372 вузлів, 19596 скінченних елементів), і більш повно відображає статичну роботу ствола із оточуючим масивом.

Після створення геометрії моделі слід надати їй деформаційних властивостей.

Призначення → Призначення жорсткості об'ємних елементів  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.6) → ОК → Курсором  вибираємо об'ємні елементи, яким ми хочемо задати жорсткість.

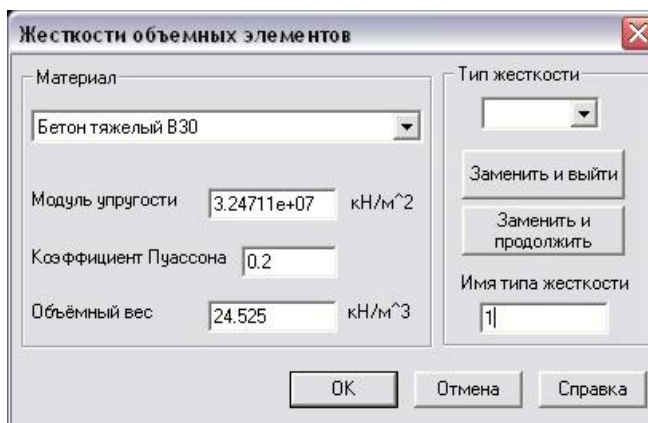


Рисунок 2.6 – Діалогове вікно Призначення жорсткості об’ємних елементів

У діалоговому вікні задаються деформаційні характеристики усіх об’ємних елементів (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона), причому для ґрунтів та залізобетону вони задавалися окремо.

На рис. 2.7 наведена карти жорсткості моделі та її фрагмента (конструкція ствола) із прийнятими жорсткостями.

Під номерами, які вказані на рис. 2.7, вказано деформаційні характеристики моделі (узяті із інженерно-геологічних досліджень):

Жорсткість 1 (верхній шар землі – супісок легкий, товщина  $h=1$  м, на рис. 2.7, а – червоний колір) – модуль пружності  $E=17$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0,3$ , щільність  $\gamma=1,6$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 2 (пісок, товщина  $h=15$  м, на рис. 2.7, а – помаранчевий колір) – модуль пружності  $E=38$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0,2$ , щільність  $\gamma=1,7$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 3 (глина спонділова, тріщинувата, загальна товщина  $h=3$  м, на рис. 2.7, а – жовтий колір) – модуль пружності  $E=40$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0,3$ , щільність  $\gamma=2,0$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 4 (шар льодогрунтової огорожі, на рис. 2.7, б – синій колір) – модуль пружності  $E=20\,000$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu=0,2$ , щільність  $\gamma=2,0$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 5 (чавун, на рис. 2.7, б – бузковий колір) – приведений модуль пружності  $E=100\,000$  МПа, приведений коефіцієнт Пуасона  $\mu=0,2$ , щільність  $\gamma=7,2$  т/м<sup>3</sup>.

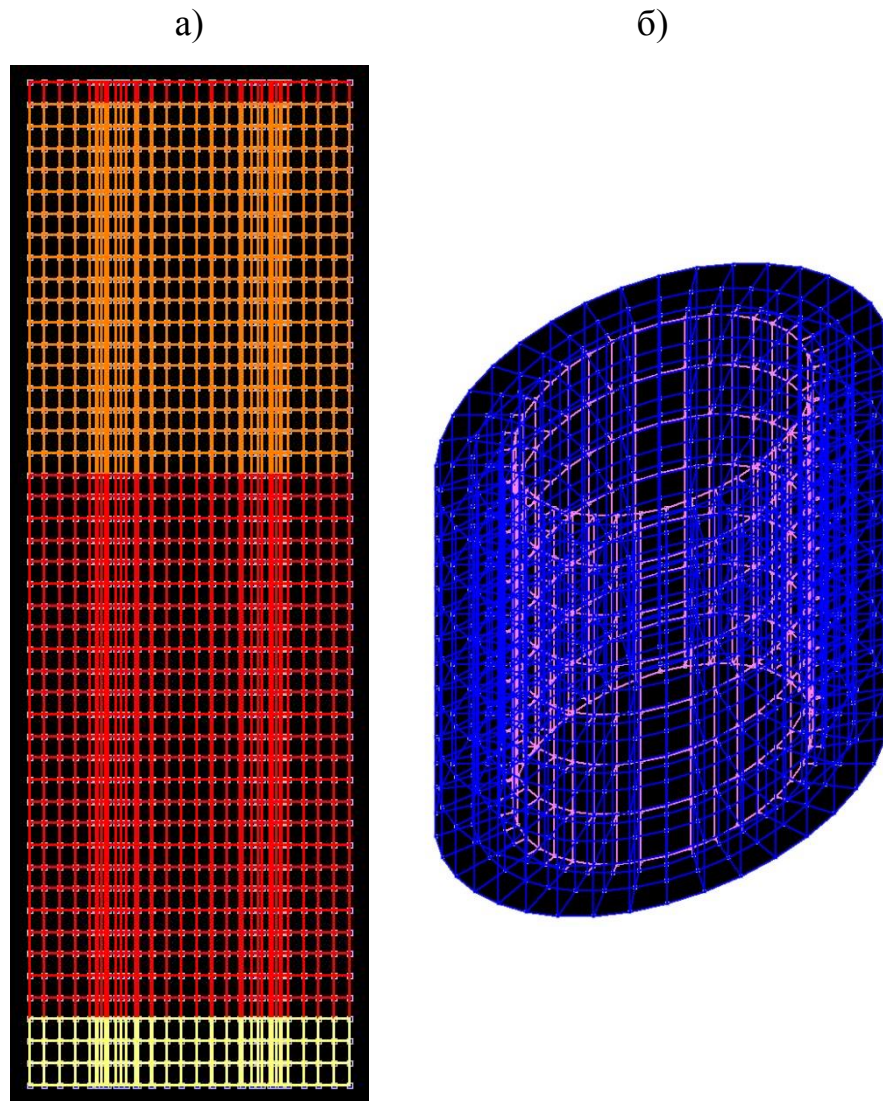



Рисунок 2.7 – Карта жорсткості моделі:  
а) ґрунтовий масив; б) фрагмент оправи

Деформаційні характеристики надавалися скінченно-елементній моделі в режимі фрагментації, тобто визначалися області, яким присвоювалися вказані вище дані. Такий режим було заплановано для того, щоб можна було провести варіювання властивостей оправи, що і надає змоги її обґрунтування [12, 13].

Після надання деформаційних характеристик на модель накладалися граничні умови: Призначення → Встановлення зв'язків у вузлах  → Заповнюємо діалогове вікно, яке з'явилося (рис. 2.8) → ОК.

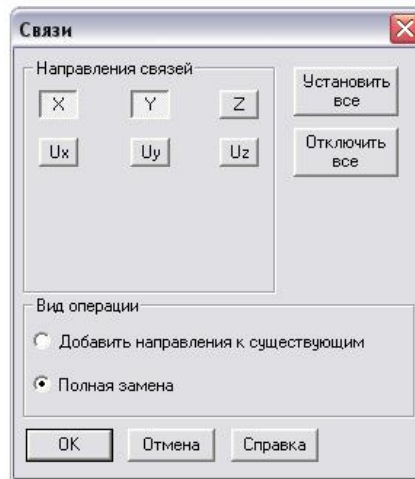




Рисунок 2.8 – Діалогове вікно Зв'язки

Зв'язки наступні: 1) по нижній границі моделі – заборона по осях X; Y; Z; 2) по боках моделі (вздовж боків, які паралельні осі тунелю) – заборона по осях X та Y. Після закріплення моделі до неї прикладається завантаження у вигляді власної ваги: Завантаження → Власна вага  → Зберегти завантаження  (записується ім'я завантаження «Власна вага»).

Управління → Вийти в екран управління проектом → Розрахунок → Лінійний → У діалоговому вікні ставимо відмітку навпроти «Мультифронтальний метод» → ОК → Зберігаємо зміни.

Після виконання цих операцій починається розрахунок. Тривалість розрахунку залежить від властивостей утвореної схеми (кількості вузлів та елементів).

Після завершення розрахунку слід вийти в екран управління проектом. Виходимо в екран управління проектом → Результати → Графічний аналіз → У вікні графічного аналізу обираємо ті параметри, які необхідні нам для аналізу «Напруження» та «Деформації».

## 2.2 Результати чисельного аналізу моделі шахтного ствола із чавунною оправою

На рис. 2.9 та 2.10 надані параметри загального напружено-деформованого стану моделі шахтного ствола із чавунною оправою.

По горизонтальній осі

По вертикальній осі

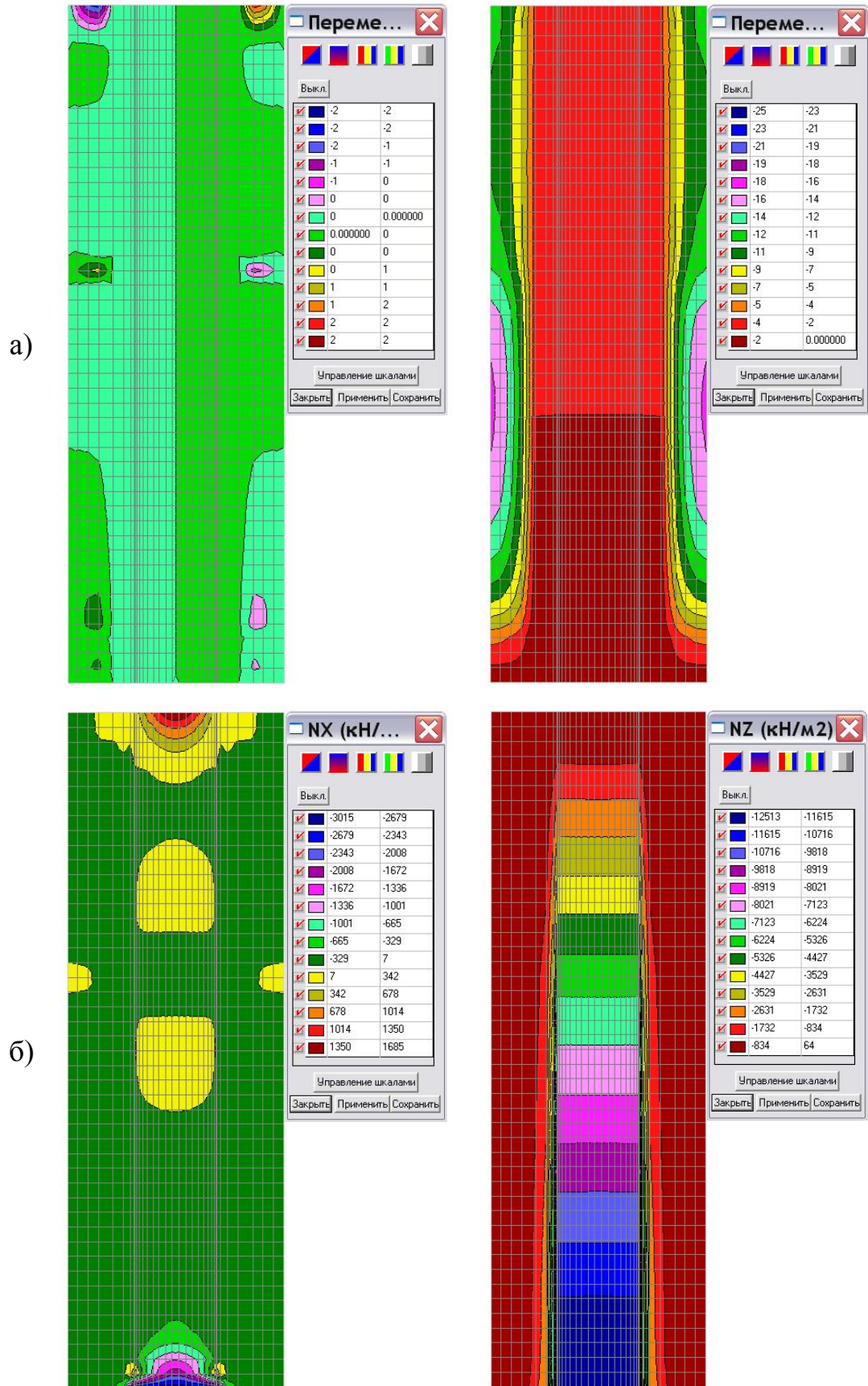
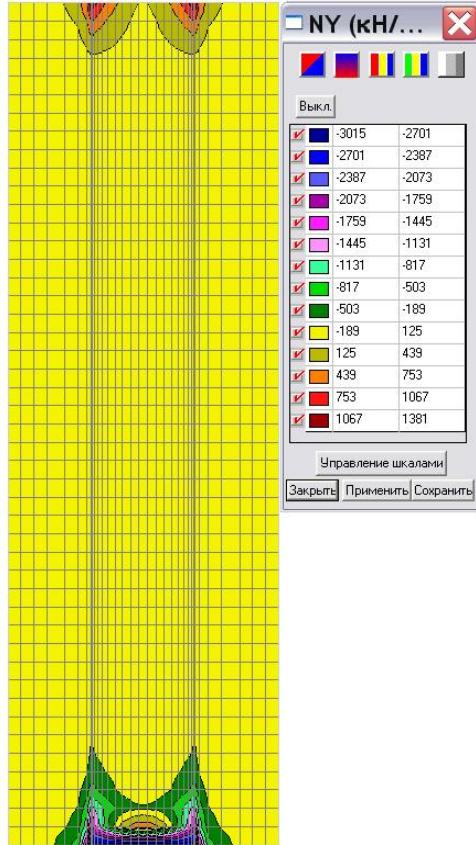
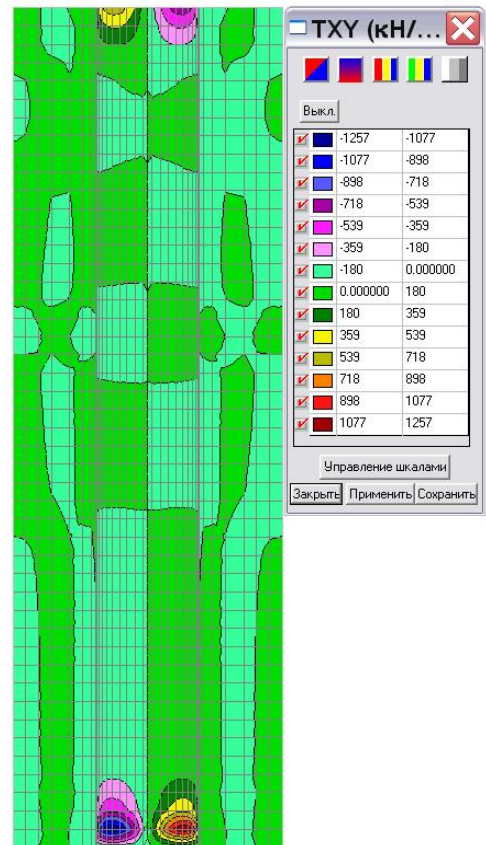


Рисунок 2.9 – Ізополя та ізолінії переміщень (а)  
та напружень (б) в моделі від власної ваги

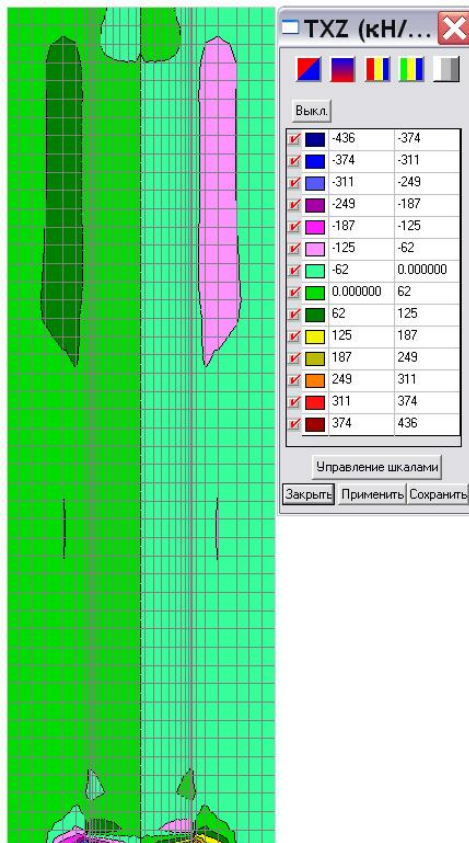
## Нормальні по осі Y



## Дотичні в площині XY



## Дотичні в площині XZ



## Дотичні в площині YZ

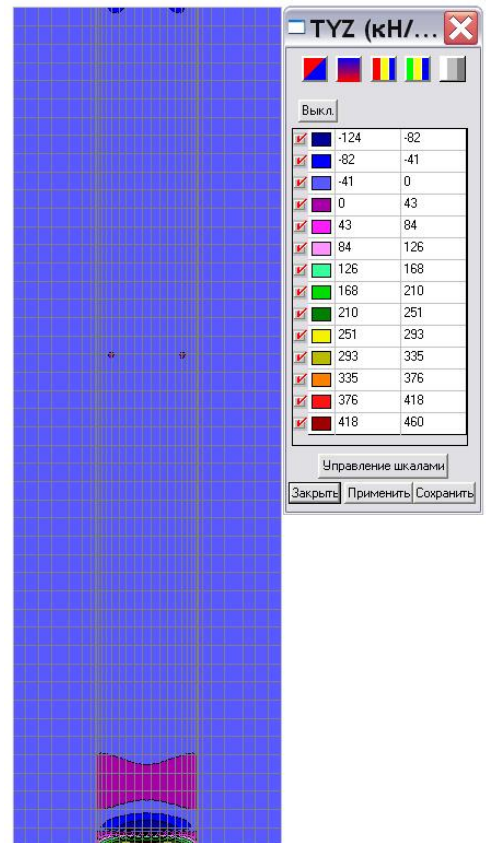


Рисунок 2.10 – Ізополя та ізолінії напружень в моделі від власної ваги

Аналіз рис. 2.9 та 2.10 свідчить про те, що наявність шаруватого масиву та шару льодогрунтової огорожі значно змінює класичну картину розподілу напружень і переміщень в оправі ствола та навколишньому масиві. Причому, слід відмітити, що прошарок піску товщиною 15 м (жорсткість 2 в моделі) значно вплинув на формування напружено-деформованого стану моделі, тому що значення модуля пружності для нього в 2 рази більше, ніж у інших шарів слабких ґрунтів. Збільшення модулю пружності цього шару змінила картину переміщень (рис. 2.9), як би не дозволивши їм розвиватися із-за великої жорсткості шару, причому на межах шару утворилися деякі зони підвищення переміщень, особливо горизонтальних. Значення переміщень ствола по осі X (горизонтальна) складають біля 3 мм, а по осі Z – до 25 мм, що свідчить про нормальну роботу конструкції. Аналіз всіх компонент напружень (рис. 2.4 та 2.10) також свідчить про значний вплив прошарку піску.

Для подальшого розрахунку конструкції на міцність, який буде проводитися лише по бетону, тобто на тріщиностійкість, застосуємо формулу четвертої теорії міцності (енергетична), виразом для якої є [10]:

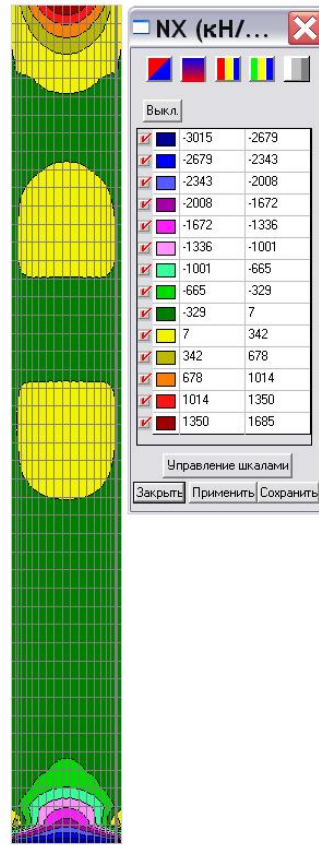
$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma],$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_z$  – компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Z;  $\tau_{xz}$  – дотична компонента в площині XZ;  $[\sigma]$  – граничний опір матеріалу, для чавуну  $[\sigma] = 210,0$  МПа.

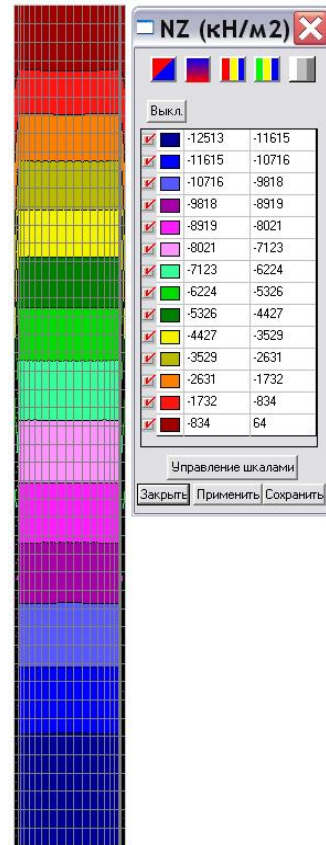
Застосування цієї теорії міцності є коректним, оскільки пошук питомої енергії чи значення ентропії є доволі складним процесом, який ще не в повному обсязі обґрунтовано теоретично, хоча і існує значна кількість теорій руйнування, заснованих на принципах термодинаміки.

Для розрахунку на міцність наведемо презентаційні дані лише по конструкції оправі (рис. 2.11). Як видно із аналізу рисунків перевірку на міцність слід провести в площинах верха та низу оправі ствола.

Нормальні по осі X



Нормальні по осі Z



Дотичні напруження в площині XZ

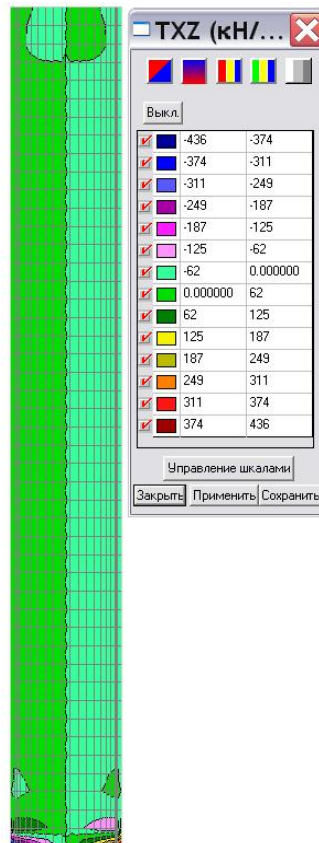


Рисунок 2.11 – Ізополя та ізолінії напружень в оправі стволу від власної ваги

Розрахунок за еквівалентними напруженнями проведемо у вигляді таблиці, яка наводиться нижче, для двох точок – верха та низу оправи ствола.

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

Напруження, МПа			Еквівалентне напруження $\sigma_e$ , МПа	Коефіцієнт запасу $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_e}$
Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ		
1,7	-0,8	-0,062	1,47	142,2
-3,0	-12,5	-0,46	14,2	14,7

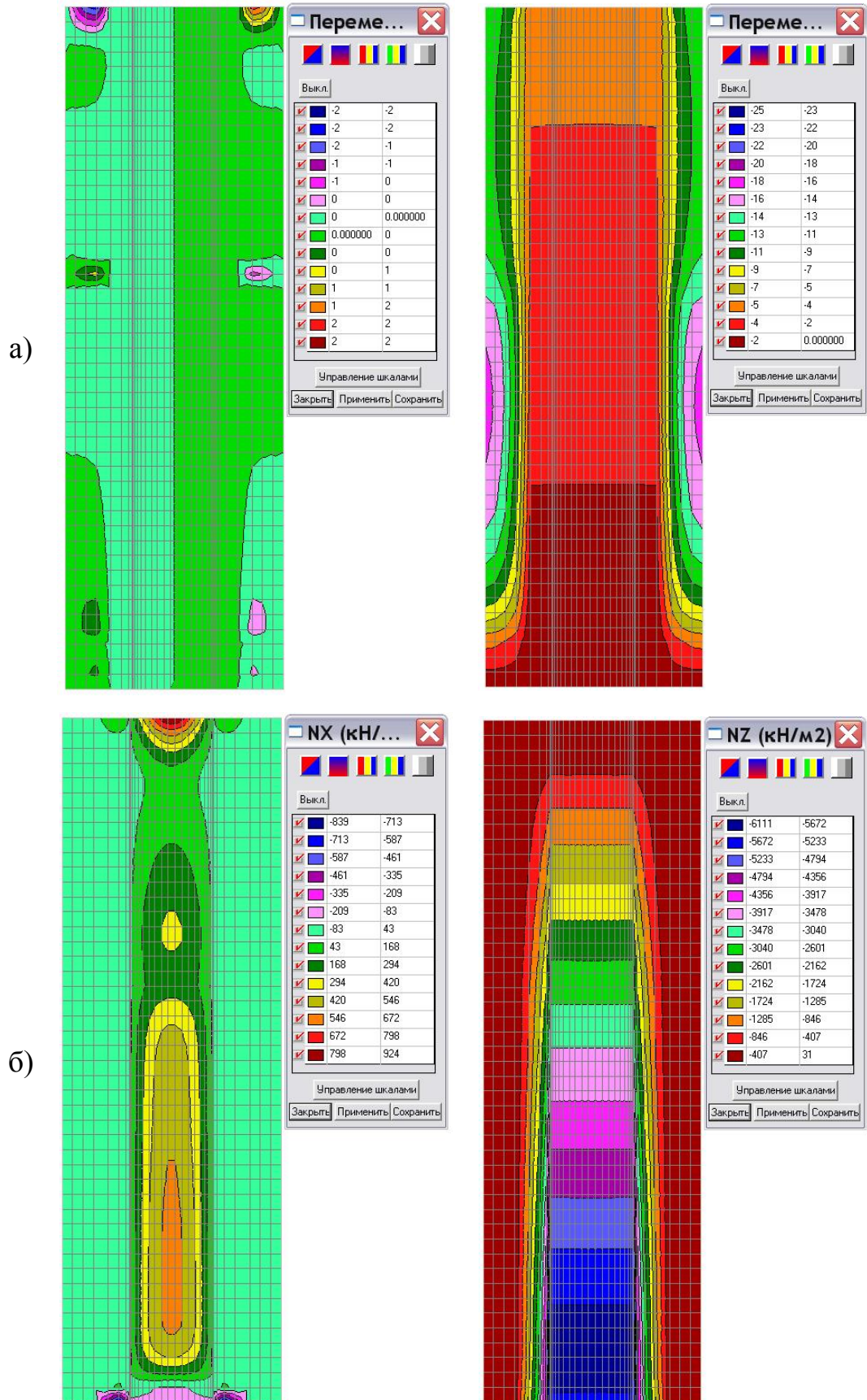
Як видно із наведеної таблиці, еквівалентні напруження не досягають до 15,0 МПа, що свідчить про те, що в чавуні оправи не виникає тріщин, а самі елементи мають значний запас міцності (до 14 разів). Із аналізу ствола при взаємодії із шаруватим оточуючим масивом можна зробити висновок, що наявність шарів, що менш деформуються, незначно ускладнює його роботу внаслідок стрибка модуля пружності між шарами, що призводить до дещо неоднорідного перерозподілу напружень і переміщень в масиві і в конструкції ствола.

### **2.3 Результати чисельного аналізу моделі шахтного ствола із залізобетонною оправою та її обґрунтування**

Метою чисельного аналізу моделі шахтного ствола із варіацією матеріалу є обґрунтування його конструкції шляхом заміни чавунної оправи ствола, яка була розрахована, на оправу із залізобетону. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної оправи надає змогу зробити висновок про доцільність її застосування із умов міцності [4, 12, 13].

По горизонтальній осі

По вертикальній осі



Для проведення такого дослідження змінимо деформаційні характеристики чавуну на залізобетон. Для цього у скінченно-елементній моделі замінимо жорсткість 7 (чавун) на наступну:

Жорсткість 7 (залізобетон) – приведений модуль пружності  $E=38\,500$  МПа, приведений коефіцієнт Пуасона  $\mu=0,02$ , щільність  $\gamma=2,5$  т/м<sup>3</sup>.

Усі інші параметри моделі залишаються такими ж, як і у моделі для розрахунку.

На рис. 2.7 надані параметри загального напружено-деформованого стану моделі. Його аналіз свідчить про те, що наявність шаруватого масиву та шару льодогрунтової огорожі і у випадку залізобетонної оправи також значно змінює картину розподілу напружень і переміщень.

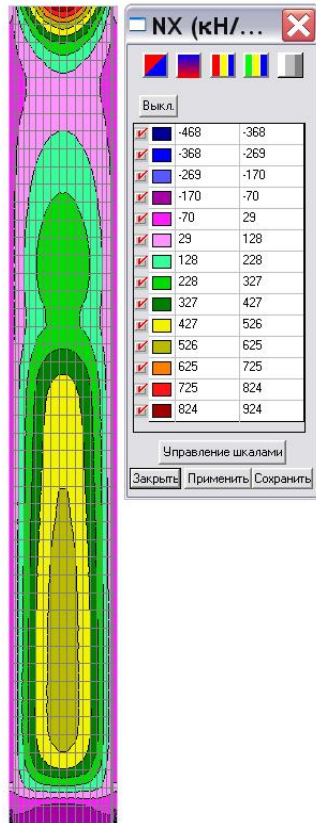
Зменшення модулю пружності оправи в 2,6 рази змінила картину переміщень, на межах шару утворилися деякі зони підвищення переміщень, особливо горизонтальних. Значення переміщень ствола по осі X (горизонтальна) складають біля 3 мм, а по осі Z – до 25 мм, причому кількісно переміщення залізобетонної оправи співпадають із переміщеннями чавунної.

Аналіз компонент напружень свідчить про незначний вплив прошарку піску, оскільки льодогрунтова огорожа згладжує картину напружень і робить її більш однорідною.

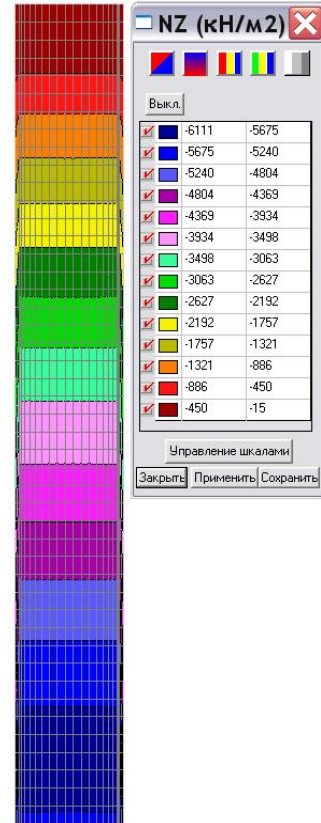
Для розрахунку на міцність за енергетичною теорією міцності наведемо презентаційні дані лише по конструкції оправи (рис. 2.13).

Як видно із аналізу рисунків перевірку на міцність слід провести в площині, в якій закінчується прошарок супіску, що можна визначити геометрично в моделі в місці із значним градієнтом напружень. Розрахунок за еквівалентними напруженнями проведемо у вигляді таблиці (бетон В30  $[\sigma]=17,0$  МПа), яка наводиться нижче.

Нормальні по осі X



Нормальні по осі Z



Дотичні напруження в площині XZ

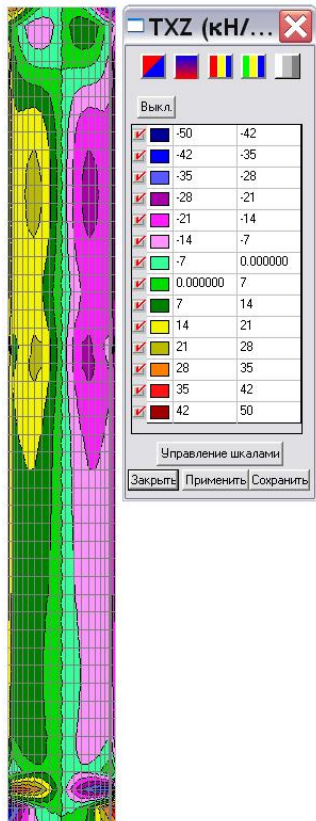


Рисунок 2.13 – Ізополя та ізолінії  
напружень в оправі  
СТВОЛУ  
від власної ваги

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

Напруження, МПа			Еквівалентне напруження $\sigma_e$ , МПа	Коефіцієнт запасу $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_e}$
Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ		
0,9	-0,45	-0,05	0,78	21,7
-0,17	-6,11	0,05	6,2	2,7

Як видно із наведеної таблиці, еквівалентні напруження не досягають до 7,0 МПа, що свідчить про те, що в бетоні оправи не виникає тріщин, а самі залізобетонні елементи мають значний запас міцності (2,7 рази тільки по бетону, а з урахуванням арматури він зростає в декілька разів). Зменшення напруженого стану в залізобетонних елементах на відміну від чавунних пояснюється більшими деформаційними характеристиками чавуну. Розрахунок залізобетонної оправи довів, що для стволу глибиною 42 метри застосування такого типу є обґрунтованим і доцільним.

### **3 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СПОРУДЖЕННЯ ШАХТНОГО СТВОЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАМОРОЖУВАННЯ ҐРУНТУ**

#### **3.1 Спорудження шахтного ствола із застосуванням штучного заморожування ґрунту**

Штучне заморожування ґрунтів при будівництві метрополітенів використовують під час проходки стволів шахт, ескалаторних тунелів, перегінних тунелів, спорудження станцій закритого типу, розробки котлованів під спорудження метрополітенів, що споруджуються відкритим способом [4].

Штучне заморожування ґрунтів дозволяє створити міцну огорожу кругового або прямокутного перерізу з заморожуваного ґрунту, яке перешкоджає проникненню у виробку, що споруджується, ґрунтової води або водонасичених нестійких ґрунтів. Така огорожа сприймає тиск ґрунту, що оточує виробку або котлован, а також гідростатичний тиск ґрунтових вод [8].

Для заморожування зазвичай використовують так званий холодильний агент (хладагент). В якості хладагенту використовують охолоджений розчин хлористого кальцію (розсіл), який має здатність залишатися в рідинному стані при від'ємних температурах. Розсіл, охолоджений на заморожувальній станції, по системі труб подають до заморожувальних колонок, які занурені в пробурені свердловини.

Для створення льодогрунтової огорожі попередньо по контуру майбутньої виробки через всю товщу водоносних ґрунтів пробурюють свердловини, заглиблюючи кінці на 3...5 м у водоупорний ґрунт (глини, щільні безводні сланці, мергелі). Відстань між цими свердловинами визначається за проектом з розрахунку, що радіус намороженого навкруги свердловини льодогрунтового циліндру складає 1,25...1,5 м.

У випадках, коли заглиблення контурних свердловин у водоупор є неможливим, ґрунтовий масив заморожують по всьому перерізу виробки, що споруджується, для чого заморожувальні свердловини пробурюють також

всередині контурних свердловин.

У пробурені свердловини занурюють заморожуючі труби – колонки з наглухо завареним нижнім кінцем (дном). В колонки, не доходячи до дна на 40...50 см, опускають труби меншого діаметру з відкритим нижнім кінцем – живлячі.

Заморожуючі колонки через спеціальні оголовки з'єднують у розташовану на поверхні загальну систему, яка складається з труби-розподільника, по котрій до живлячих труб подається охолоджений на заморожуючій станції розсіл, та труби-колектора, що відводить розсіл до тієї ж станції.

На заморожуючій станції монтують насосно-компресорні агрегати та пристрої, призначені для забезпечення роботи усієї системи заморожування. Холодний розсіл насосами нагнітається у розподільник, звідки він рівномірно розходить по живлячим трубам заморожуючих колонок. Дійшовши дна колонки, розсіл, тиск якого підтримується насосами на станції, підіймається вгору по кільцевому простору між живлячою трубою та заморожуючою колонкою, омиваючи її внутрішні стінки. При цьому відбувається теплообмін: розсіл віднімає тепло у ґрунту, що оточує колонку, та знижує його температуру, що приводить до заморожування. Після того розсіл потрапляє у колектор, а з нього – на заморожуючу станцію, де знову охолоджується.

На заморожуючій станції монтують дві системи машин та механізмів. Перша система (аміачна) призначена для охолодження розсолу аміаком і включає компресор, конденсатор та випарник, які з'єднані трубопроводами. Друга система (розсільна) призначена для забезпечення циркуляції розсолу і включає розсільний бак, насос, трубопроводи, розподільник, колектор та заморожуючі колонки.

Охолодження розсолу відбувається наступним чином [4, 8]. Компресор стискає пари рідкого аміаку до тиску 0,8...1,2 МПа, при цьому відбувається нагрівання парів аміаку. Стиснуті пари аміаку потрапляють по трубопроводу у конденсатор, що складається з труб, які постійно омиваються холодною водою, де пари аміаку охолоджуються, перетворюючись у рідину. Рідкий аміак

потрапляє у випаровувач. Секції випаровувача знаходяться у баку, який заповнений розсолем – водним розчином хлористого кальцію, який замерзає за температури  $-34$  град. Випаровуючись, рідкий аміак віднімає у розсолу значну кількість тепла, яке необхідне для пароутворення, при цьому розсіл охолоджується до температури  $-20\dots-26$  град. Потім за допомогою відцентрового насоса, охолоджуваний розсіл нагнітається у розподільник, з якого потрапляє в заморожуючі колонки, і, віддаючи частину холоду ґрунту, повертається по колектору в випарник для повторного охолодження. Далі цикл повторюється.

Поступово навколо кожної колонки утворюється масив замороженого ґрунту циліндричної форми. При подальшому заморожуванні об'єм заморожених циліндрів збільшується, і вони змерзаються в сполонний кільцевий масив.

Час, необхідний для утворення замороженого масиву, залежить від гідрогеологічних умов, кількості колонок, температури розсолу, що циркулює, проектної товщини замороженого масиву. Орієнтовний термін для утворення замороженого контуру при відстані між свердловинами  $1,25$  м знаходиться в межах від  $40$  до  $60$  діб при цілодобовій роботі заморожуючої станції. Цей процес називають активним заморожуванням. Для того, щоб масив підтримувався у замороженому стані, заморожуюча станція упродовж всього часу проходки в замороженій зоні працює за режимом, який визначається в проекті (в одну або дві зміни), – період підтримки заморожування.

Про утворення замкнутої льодогрунтової огорожі судять по підняттю рівня води у спеціально пробуреній контрольній гідрогеологічній свердловині. Коли утворення замкнутої огорожі на одному з водоносних горизонтів закінчується і починається його стовщення, вода всередині замороженого контуру стискається, й рівень її в контрольній свердловині підіймається.

Схема установки для заморожування ґрунтів наведена на рис. 3.1.

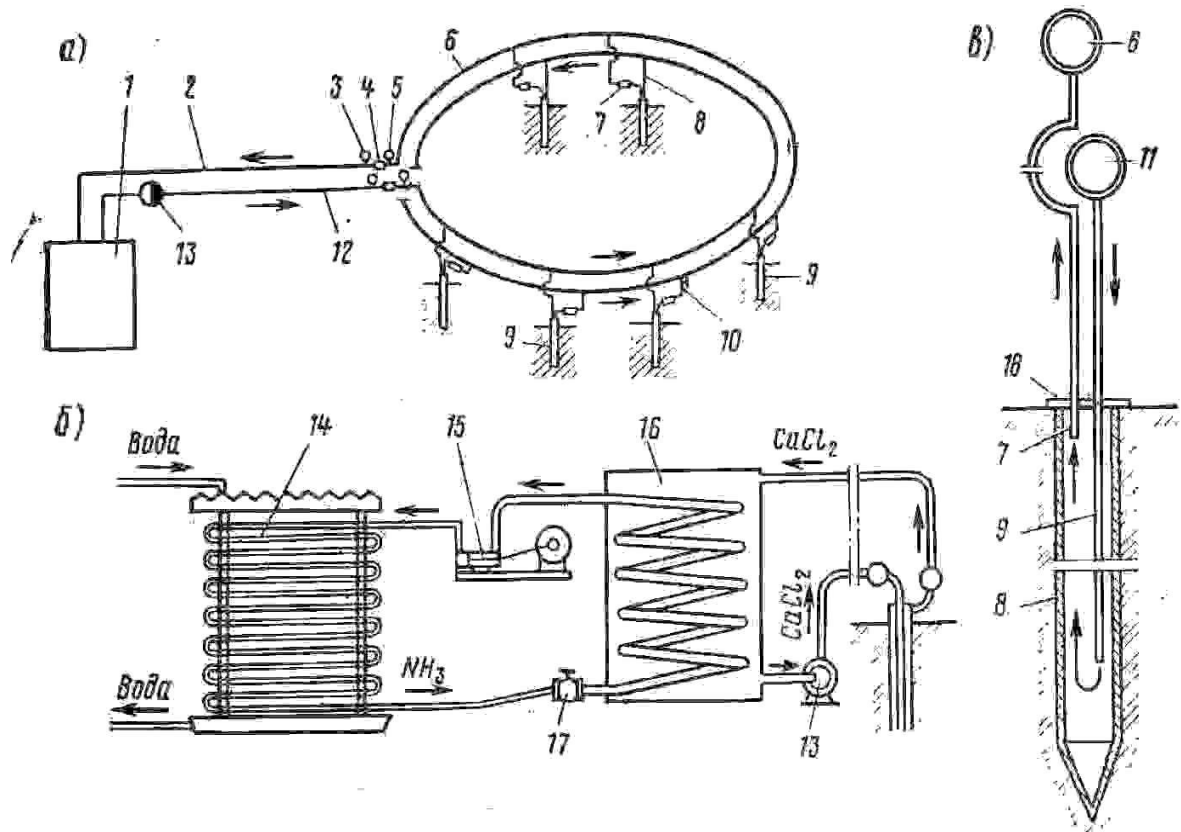


Рисунок 3.1 – Установка для заморозування ґрунтів:

- а) схема циркуляції розчину; б) схема заморозувальної станції;  
в) конструкція заморозуючої колонки;

- |                              |                                    |
|------------------------------|------------------------------------|
| 1 – розсільний бак;          | 10 – кран;                         |
| 2 – зворотній розсолوپровід; | 11 – розподільчий розсолوپровід;   |
| 3 – термометр;               | 12 – прямий розсолوپровід;         |
| 4 – водометр;                | 13 – насос;                        |
| 5 – манометр;                | 14 – конденсатор;                  |
| 6 – колекторне кільце;       | 15 – аміачний компресор;           |
| 8 – заморозуючі колонки;     | 16 – випарник;                     |
| 7 – відвідна труба;          | 17 – регулюючий вентиль;           |
| 9 – живляча труба;           | 18 – головка заморозуючої колонки. |

Після закінчення прохідницьких робіт й влаштування постійної оправи споруди приступають до відтавання заморожених ґрунтів, яке може відбуватися природнім шляхом або виконується штучно шляхом нагнітання у свердловини нагрітого розсолу або води.

### 3.2 Розрахунок параметрів штучного заморожування ґрунту

Штучне заморожування ґрунтів є одним з ефективних способів їх зміцнення при будівництві метрополітенів в складних інженерно-геологічних умовах [4].

Цей спосіб застосовується при проходці стволів шахт, похилих ескалаторних тунелів, станційних і перегінних тунелів метрополітенів, котлованів різного призначення, вестибюлів метро, підземних камер, перемичок тощо.

Способом штучного заморожування ґрунтів збудовано більше трьохсот підземних споруд при будівництві метрополітенів в складних гідрогеологічних умовах.

Майбутній значний об'єм робіт по будівництву метрополітенів вимагає вживання цього способу у великих об'ємах. Тому актуальним і своєчасним є узагальнення накопиченого практичного і теоретичного досвіду робіт по заморожуванню ґрунтів при будівництві метрополітенів.

Серед найбільших технічних проблем, вирішених будівельниками Московського метрополітену, одне з провідних місць належить штучному зміцненню ґрунтів способом заморожування.

Для заморожування ґрунтів необхідно відняти в них тепло, тобто понизити їх температуру. Розрахунок кількості холоду, необхідного для заморожування ґрунтів, виконується в наступній послідовності:

Визначаються об'єми ґрунту та ґрунтової води, що підлягають заморожуванню:

а) загальний об'єм ґрунту та ґрунтової води, що заморожуються, визначаються за формулами:

$$V_{0i} = f \cdot h_i$$

де  $f$  – площа перерізу льодоґрунтової огорожі,  $m^2$

$h_i$  – потужність окремих шарів, м.

$$V_{01} = f \cdot h_1 = 36,93 \cdot 12 = 443,16 \text{ м}^3$$

$$V_{02} = f \cdot h_2 = 36,93 \cdot 23 = 849,39 \text{ м}^3$$

$$V_{03} = f \cdot h_3 = 36,93 \cdot 4 = 147,72 \text{ м}^3$$

б) об'єм води в окремих шарах ґрунту визначається за формулою:

$$V_{Bi} = V_i \cdot W_i$$

де  $W$  – вологість окремих шарів ґрунту, %;

$$V_{B1} = V_1 \cdot W_1 = 443,16 \cdot 0,28 = 124,08 \text{ м}^3$$

$$V_{B2} = V_2 \cdot W_2 = 849,39 \cdot 0,16 = 135,9 \text{ м}^3$$

$$V_{B3} = V_3 \cdot W_3 = 147,72 \cdot 0,05 = 7,39 \text{ м}^3$$

$$V_B = \sum_{i=1}^3 V_i \cdot W_i = 124,08 + 135,9 + 7,39 = 267,37 \text{ м}^3$$

в) об'єм твердих часток ґрунту визначається за формулою:

$$V_{\Gamma i} = V_{0i} - V_{Bi}$$

$$V_{\Gamma 1} = V_{01} - V_{B1} = 443,16 - 124,08 = 319,08 \text{ м}^3$$

$$V_{\Gamma 2} = V_{02} - V_{B2} = 849,39 - 135,9 = 713,49 \text{ м}^3$$

$$V_{\Gamma} = \sum_{i=1}^3 (V_{0i} - V_{Bi}) = 319,08 + 713,49 + 140,33 = 1172,9 \text{ м}^3$$

Визначається кількість холоду:

а) кількість холоду, що необхідна для охолодження води, яка міститься в ґрунтах, від температури  $t_1$  ( $t_1 = +8^\circ \text{C}$ ) до температури замерзання води  $t_0$ , визначається за формулою:

$$q_1 = V_B \cdot \gamma_B \cdot C_B \cdot (t_0 - t_1)$$

$$q_1 = 267,37 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot (0 - 8) = 2138960 \text{ кал}$$

де:  $V_B$  – об'єм води, що міститься в ґрунті,  $\text{м}^3$ ;

$\gamma_B$  – питома вага води, рівна  $1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$C_B$  – теплоємність води,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

б) кількість холоду, що необхідна для льодоутворення визначається за формулою:

$$q_2 = V_B \cdot \gamma_B \cdot C$$

$$q_2 = 267,37 \cdot 1000 \cdot 80 = 21389600 \text{ кал},$$

де  $C$  – прихована теплота льодоутворення,  $336 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  ( $80 \frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ );

в) кількість холоду, що необхідна для охолодження льоду від температури замерзання води  $t_0$  до середньої температури заморожування  $t_2$ , визначається за формулою:

$$q_3 = V_B \cdot \gamma_B \cdot C_l \cdot (t_2 - t_0)$$

$$q_3 = 267,37 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot (-10 - 0) = 1336850 \text{ кал},$$

де  $C_l$  – теплоємність льоду, рівна  $0,5 \text{ кал/кг}$ ;

г) кількість холоду, що необхідна для охолодження ґрунтів (твердих часток) від початкової до заданої температури, визначається за формулою:

$$q_4 = V_G \cdot \gamma_G \cdot C_G \cdot (t_2 - t_1)$$

$$q_4 = 1172,9 \cdot 2600 \cdot 0,2 \cdot (-10 - 8) = 10978344 \text{ кал},$$

де:  $V_T$  – об'єм твердих часток ґрунту,  $m^3$ ;

$\gamma_T$  – питома вага ґрунту, рівна  $2600 \frac{kg}{m^3}$ ;

$C_T$  – теплоємність твердих часток ґрунту.

Сумарна кількість холоду, що передається породам (теоретична):

$$Q_T = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 2138960 + 21389600 + 1336850 + 10978344 = 35843754 \text{ кал}$$

Вказана величина  $Q$  підрахована, виходячи з припущення, що тепло віднімається від ґрунтів лише в межах товщини стіни льодогрунтового огороження рівній 1,2 м. В дійсності ґрунти, які знаходяться за межами 1,2 м стіни, також будуть охолоджуватись, збільшуючи витрату холоду. Додаткова витрата холоду на охолодження порід в цих зонах може бути прийнята рівною 20% від теоретичної кількості холоду. Тоді повна розрахункова кількість холоду, яка передається породам циліндру, що заморожується, буде рівною:

$$Q_{розр} = 1,2 \cdot Q_T = 1,2 \cdot 35843754 = 43012504,8 \text{ кал}$$

Час, в перебігу якого буде передано породам розрахункова кількість холоду, а також продуктивність холодильної установки залежить від інтенсивності холодовіддачі заморожуючих колонок.

На підставі даних практичних робіт по заморожуванню ґрунтів визначено, що  $1 m^2$  зовнішньої поверхні колонки передає оточуючому ґрунтовому масиву 200...250 кал холоду протягом 1 години.

Заморожуючі колонки монтуються зі сталевих труб діаметром 114 мм. Кількість колонок  $n=21$ . Довжина колонки складає  $l=39$  м.

Холодовіддача усіх колонок складає:

$$Q = \pi \cdot d \cdot l \cdot n \cdot \alpha_H = 3,14 \cdot 0,114 \cdot 39 \cdot 21 \cdot 250 = 73292,31 \text{ кал/год}$$

Розсіл, що циркулює по трубах (розчин  $\text{CaCl}_2$ ) подається до вертикальної виробки від холодильної установки по розсолопроводу, який складається з труб діаметром  $d_1=114$  мм, довжиною  $l_1=140$  м та далі по розподільнику, що складається з труб діаметром  $d_2=163$  мм, довжиною  $l_2=20$  м.

Схема розташування заморожувальних колонок наведена на рис. 3.2.

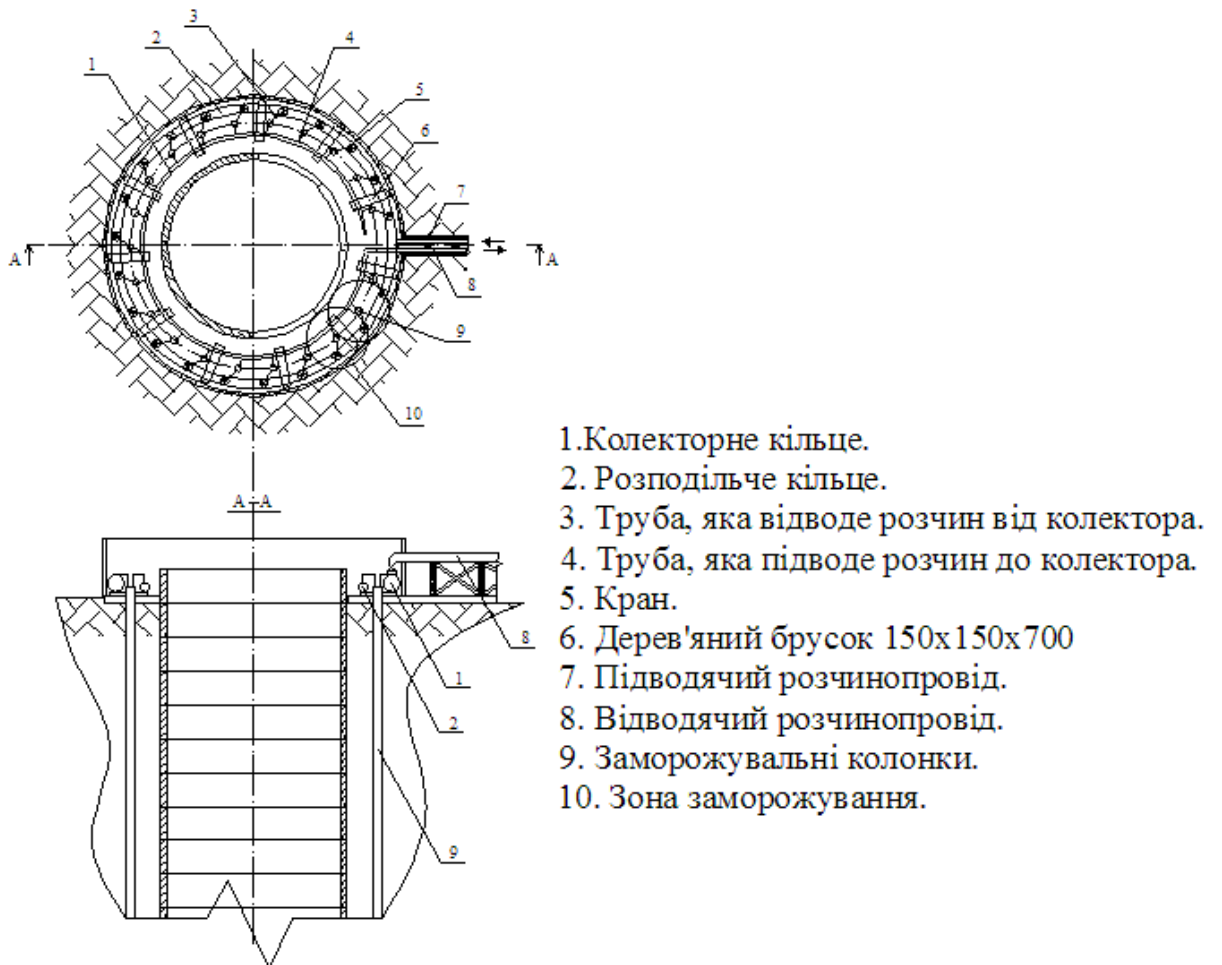


Рисунок 3.2 – Схема розташування заморожувальних колонок

Холодовіддача у розсолопроводі, розподільнику та колекторі через нашарування снігу, що на них утворюється, та поганій теплопровідності повітря менша, ніж холодовіддача колонок, і дорівнює  $\alpha_H = 100 \text{ кал} / \text{м}^2 \cdot \text{год}$ .

Витрати у розсолопроводі та колекторах дорівнюють:

$$Q_{II} = 2\pi \cdot \alpha_H \cdot (d_1 \cdot l_1 + d_2 \cdot l_2) = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot (0,114 \cdot 140 + 0,163 \cdot 20) = 12070,16 \text{ кал} / \text{год}$$

Таким чином, розрахункова потужність холодильної установки дорівнює:

$$Q_{уст} + Q_{П} = 73292,31 + 12070,16 = 85362,47 \text{ кал/год}$$

Час, необхідний для закінчення процесу заморожування та утворення льодогрунтової огорожі дорівнює:

$$\tau = \frac{Q_{розр}}{Q_T} = \frac{43012504,8}{73292,31} = 587 \text{ год} \approx 20 \text{ діб}$$

Після закінчення процесу активного заморожування, тобто після 20 діб, холодильна установка повинна бути переведена на підтримування циліндричної льодогрунтової огорожі (пасивне заморожування).

Для підтримки температури в замороженому ґрунті потужність холодильної установки повинна бути рівною 25 % холодовіддачі труб з урахуванням витрат, тобто:

$$Q_{уст} = 0,25Q_T + Q_{П} = 0,25 \cdot 73292,31 + 12070,16 = 30393,24 \text{ кал/год}.$$

### 3.3 Спорудження шахтного стволу гірничим способом

Дослідивши і проаналізувавши попередні розділи приймаємо технологію спорудження шахтного стволу гірничим способом [4, 14]. Технологічна послідовність проходки шахтного стволу гірничим способом має деякі особливості [8].

Спорудження ствола починається із зведення форшахти, яка виконує роль оголовка ствола. Спочатку відривається котлован на глибину 4 м. Для цього розробляють ґрунт за допомогою екскаватора ЕО-5363 або драглайном. Котлован споруджують без кріплення стінок – відкоси повинні забезпечувати їх стійкість. Розроблений ґрунт навантажують у автосамоскиди і вивозять,

залишаючи при цьому ґрунт для зворотної засипки, який розміщують у відвал. Після розробки ґрунту до необхідної відмітки котловану і вирівнювання його дна на бетонну підготовку товщиною 15 см встановлюють чотири кільця тубінгів ствола. Далі, задалегідь вставивши кондуктора під буріння заморожуючих свердловин, з труб діаметром 219 мм в затубінговий простір закачується бетон марки В25. Після твердіння бетону приступають до буріння заморожуючих свердловин діаметром 300 мм. Буріння здійснюється верстатом СБУ-150 з глинистим привантаженням. Заморожуючі свердловини заглиблюються у водоупор не менше чим на 4 метри. Бурові роботи проводяться в наступній послідовності:

- буріння заморожуючих, додаткових і термометричних свердловин;
- цементация затрубного простору заморожуючих і термометричних свердловин; перед опусканням в свердловину заморожуючої колонки її обов'язково промивають водою;
- після закінчення проходки ствола всі пробурені свердловини тампонується або цементуються.

Після того, як свердловини пробурені їх обладнують заморожуючими колонками і вмонтовують розсільну мережу. В якості колонок використовують безшовні суцільнотягнуті труби із зовнішнім діаметром 146 мм, насосно-компресорна труба діаметром 114 мм і живляча труба діаметром 33,5 мм. Під час монтажу всі заморожуючі труби перед опусканням піддаються гідравлічному випробуванню. Після цього вмонтовують колонку і опускають її в свердловину, потім виконують контрольне випробування на водонепроникність стиків і всієї системи в цілому. Колонку заливають водою і герметизують. Якщо рівень рідини протягом п'яти діб не знизиться більш ніж на два сантиметри на кожні п'ятдесят метрів глибини, то колонки готові до експлуатації. По закінченні монтажу заморожуючих колонок, обсадні труби витягуються, а простір між колоною і стінками свердловини забучується піском.

Після обладнання заморожуючих колонок приступають до монтажу

розсільної мережі. Для магістральних розсолопроводів застосовують сталеві труби діаметром 219 мм. Для зниження тепловитрат розсолопровід укладають на бруси в траншеї і ізолюють. Живлячі та відвідні труби, приєднують одним кінцем до голівки заморожуючої колонки, а іншим до розподільника і колектора. Після цього за паралельною схемою виконується включення заморожуючих колонок в розсільну мережу. Підключивши заморожуючу станцію до розсільної мережі виробляють пробне включення. Якщо жодних несправностей не виявлено, то приступають до активного заморожування.

За час роботи станції, здійснюються наступні види контролю:

- контроль за роботою заморожуючої станції;
- контроль за роботою заморожуючих колонок;
- контроль за процесом формування льодогрунтової огорожі, який виробляється за допомогою термо- та гідронаглядних свердловин.

В разі виявлення якихось неполадок в системі, всі непрацюючі елементи відразу ж замінюються або ремонтуються, щоб уникнути розморожування льодогрунтової огорожі, що створилася.

Після досягнення льодогрунтовою огорожею проектних розмірів заморожуючу станцію переводять на пасивний режим роботи і приступають до ведення гірничопрохідницьких робіт по спорудженню ствола.

Для монтажу кілець оправи і гідроізоляції швів, а також для розробки ґрунту, монтують прохідницький полок, який для переміщення підвішують до ручних редукторних лебідок, розташованих на перекритті устя ствола шахти.

На полку зазвичай встановлюють редукторну лебідку для монтажу оправи, вентилятор, висувну телескопічну драбину для спуску людей у забій, електрозбірну шафу.

До низу полка може бути прикріплений кільцева монорейка, а також спеціальний пристрій з поворотними балками і електричними таями для ґрейферного навантажувача при монтажі оправи.

З полка ведуть контрольне нагнітання і роботи по армуванню ствола. Конструкція підвісного механізованого полка надана на рис. 3.3.

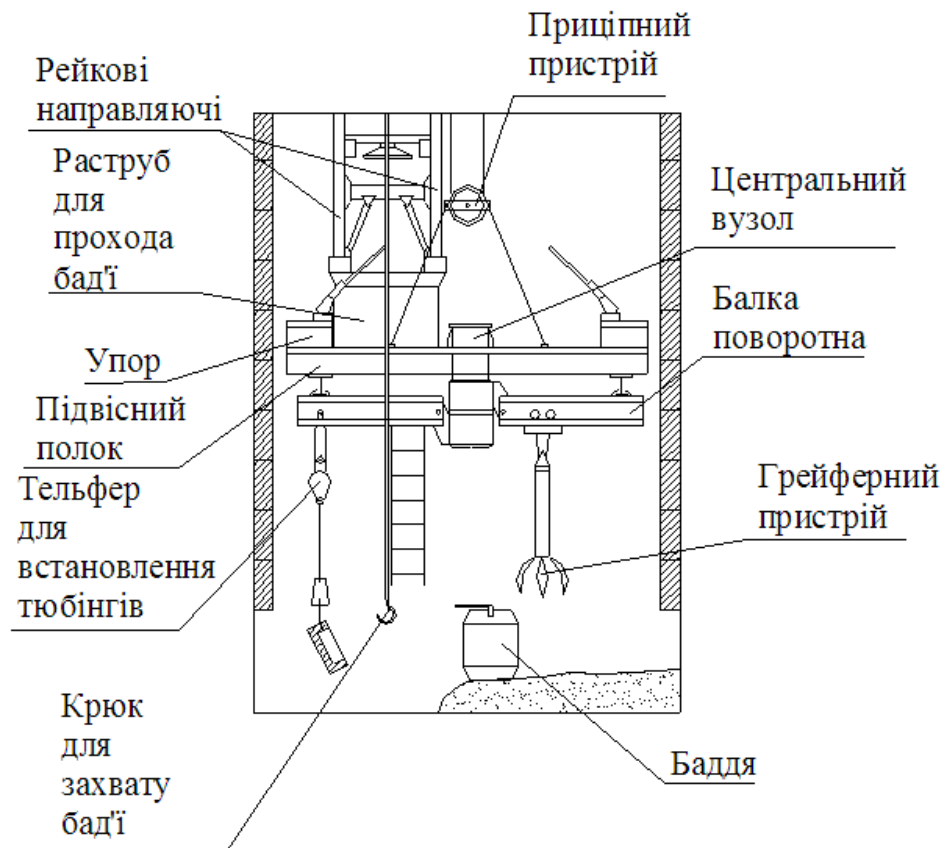


Рисунок 3.3 – Підвісний механізований полок

Закінчення підготовчих робіт і вірність монтажу оправи і обладнання фіксується актом прийомки виконаних підготовчих робіт і монтажу механізмів, які необхідні для виконання прохідницьких робіт. Після завершення цих робіт приступають безпосередньо до проходки ствола.

Проходка шахтних стволів в штучно заморожених ґрунтах має свої особливості, оскільки в замороженому стані водоносні піски змінюють свої фізико-механічні властивості і при їх розробці частки ґрунту мають форму лінз з гострими кутами.

Глинисті і піщані ґрунти розробляють відбійними молотками або спеціальними лопатами. Спочатку на глибину 1 м розробляють зону талих ґрунтів, а потім виконують відбій заморожених ґрунтів, просуваючись від центру до периферії ствола. Якщо проморожений весь перетин, то в центрі забою відбійними молотками роблять вруб завглибшки 0,5 м і далі продовжують відбій в тому ж порядку. При розробці ґрунту біля заморожуючих

колонок необхідно дотримуватися особливої обережності.

В сучасних умовах найбільш прогресивною є послідовна технологія проходки шахтного стволу з возведенням тюрінгової залізобетонної оправи. Розробка м'яких ґрунтів (коефіцієнт міцності за шкалою Протод'яконова до 1,5) при проходці стволів виконується грейфером або відбійними молотками, розробку якими виконують по одній з наведених нижче схем:

**1-а схема.** Роботи проводять в три фази. По-перше, заглиблюють на 0,5...0,6 м центральну частину забою і розробляють ґрунт по всій площі ствола, але по краях залишають берму шириною 0,4...0,5 м у внутрішніх граней оправи. Потім на таку ж глибину розробляють другий уступ до повної заходки в 1 м. Берму і ґрунт під оправою раніше встановленого зверху кільця розробляють одночасно з монтажем нового кільця.

**2-а схема.** Забій розробляють в дві фази – уступами по 0,5 м без залишення берми. Під блоками раніше змонтованого кільця оправи виконують виїмку ґрунту у визначеній послідовності. Блоки підвішують відразу ж по мірі розробки ґрунту. Після замикання кільця оправи розробляють площу забою, яка залишилася. Перебір ґрунту за зовнішнім контуром оправи не допускається.

**3-я схема.** Спочатку на всю довжину заходки (1,0 м) розробляють середню частину забою, але по краях залишають берму шириною 0,4...0,5 м у внутрішніх граней оправи та відкоси з уклоном 1:1. Після цього розробляють берму окремими ділянками з одночасним монтажем блоків наступного кільця. Берму починають розробляти з боку, протилежного замку оправи, і ведуть симетрично вбік до замка.

Розроблений таким чином ґрунт прибирають в баддю, яка розташовується в забої і підвішена до крану типу КС-5363. Після підйому на поверхню її розвантажують в автосамоскиди і ґрунт вивозять за межі будівельного майданчика.

Після прибирання ґрунту приступають до монтажу збірної оправи. Тюрінги опускають в забій на траверсі, яка підвішена до тросу крану типу КС-5363. У забої тюрінг звільняють і причіпляють до нижньої частини стволу за

допомогою траверси тельфера. Якщо при будівництві відсутній тельфер, то застосовують спеціальний пристрій для підвіски тьобінга, який складається із редукторної лебідки з крановою стрілою і поворотного кола, які знаходяться на підвісному полку. Тьобінг подають захватами до місця монтажу, центрують оправками та скріплюють між собою за допомогою штирів.

Паралельно з проходкою, на пройденій ділянці стволу шахти проводять комплекс гідроізоляційних робіт, який складається з первинного і контрольного нагнітання та чеканочних робіт.

Первинне нагнітання цементно-піщаним розчином у співвідношенні 1:2 та 1:3 виконують після проходки трьох або чотирьох кілець. Перед початком нагнітання ущільнюють торцевий зазор між ґрунтом та нижнім кільцем оправи. Для цього використовують клоччя, короткі дошки та клини. Нагнітання ведуть знизу вгору з застосуванням розчинонагнітачів періодичної дії. Контрольне нагнітання цементного молока виконують вслід за первинним з метою заповнення порожнин, які залишилися незаповненими при первинному нагнітанні. Контрольне нагнітання виконують під тиском до 1 МПа за допомогою поршневого насосу з відставанням від забою 8...10 кілець для того, щоб була забезпечена умова набирання міцності розчину первинного нагнітання. Апарати для нагнітання встановлюють на поверхні поблизу шахтного ствола. Первинне нагнітання виконують за перші два кільця від площини забою, а вище з підвісного полка. Контрольне нагнітання виконують з постійних полків, які влаштовують в стволі через кожні 3 м.

Вслід за контрольним нагнітанням з постійних полків виконують чеканочні роботи. Перед чеканкою шви очищують піскоструменевими апаратами, і тільки після цього приступають до чеканки з застосуванням спеціальних матеріалів і засобів (свинцевий шнур, БУС та інше).

За час проходки ствола шахти технічний нагляд зобов'язаний стежити за появою на стінах і в забої ствола темних плям, які можуть з'явитися в результаті проникнення розсолу із заморожуючих колонок, а також – за деформаціями заморожених ґрунтів. У загрозованих випадках людей виводять із

забою.

При появі в стволі води роботи зупиняють, виконують додаткове заморожування ґрунтів і після пробного відкачування води продовжують подальшу проходку ствола.

Для провітрювання забою на поверхні встановлюють вентиляторну установку, яка в подальшому використовується для повітряпостачання при проходці горизонтальних виробок. При цьому використовується нагнітальний спосіб і свіже повітря потрапляє до забою безпосередньо з поверхні. Для провітрювання можна застосовувати вентилятори типу СВМ або ВЦ. Схема провітрювання шахтного ствола зображена на рис. 3.4.

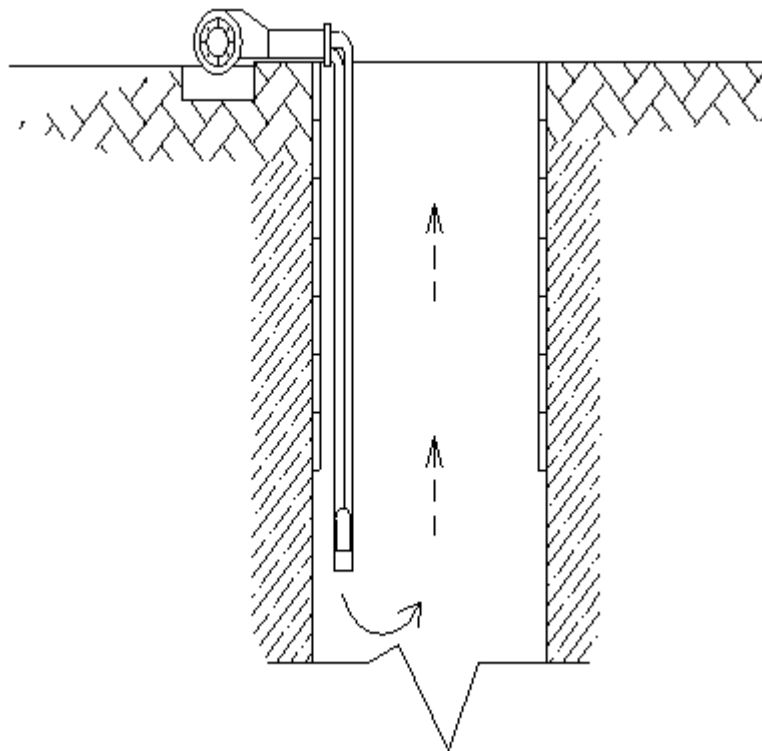


Рисунок 3.4 – Схема провітрювання ствола

Допоміжне обладнання призначено для забезпечення нормальної та безпечної роботи при виконанні основних гірничопрохідницьких робіт.

До допоміжного обладнання відносяться підвісні полки, прохідницькі тихоходні лебідки, освітлення, зв'язок, сигналізація та інше.

Підвісні полки призначені для оберігання людей, які знаходяться в забої від раптово впавших предметів, для кріплення направляючих канатів та

підвішування навантажуючих машин. На полках розміщують світильники, шланги стисненого повітря, кабелі та обладнання для вибухових робіт. Підвісні полки використовуються в якості робочої площадки при нарощуванні поставів труб, проведені тампонажу закріпленого простору та армування ствола. При проходці стволів за зміщеною та паралельною схемами з них ведеться встановлення постійної оправи.

Конструкція підвісних полків залежить від діаметру ствола та схеми розміщення гірничопрохідницького обладнання в стволі.

Розміщення гірничопрохідницького обладнання в стволі передбачає проходку центральних стволів з використанням постійних копрів та пересувного прохідницького обладнання. Усі трубопроводи підвішуються до оправи ствола. Водовідлив передбачається за допомогою бадей або підвісними насосами, для чого на полку передбачається бак ємністю 2...3 м<sup>3</sup>.

Направляючі канати бадей одночасно слугують для підвішування опалубки. Для навантаження породи використовують машини КС-2у/40 або 2КС-2у/40, підймання баддями типу БПСМ.

В даній випускній кваліфікаційній роботі доцільно використовувати двоярусний підвісний полок з робочим та запобіжним ярусами.

Прохідницькі тихохідні лебідки призначені для підвішування в стволі полків, опалубки, насосів, поставів труб, кабелів та на тяжіння направляючих канатів.

Прохідницькі лебідки мають велику (500...1400 м) канатоємність та вантажопідйомність (5...45 т), низьку (0,1 м/с) швидкість підйому.

Використовуються одно- та двобарабанні лебідки з електричними та пневматичними приводами. Основними вузлами лебідки є рама, барабан, редуктор. Електропривод з пусковою апаратурою, гальма – запобіжні та маневрові.

Згідно стандартам виготовляються п'ять типів однобарабанних електроприводних лебідок ЛПЕП, зі статичним на тяжінням канату 63, 100, 160, 250 та 450 кН, для підвішування рятовних драбин – ЛПЕРП з електричним

та ручним (резервним) приводом.

Прохідницькі тихохідні лебідки монтуються на поверхні землі біля копра. Кількість лебідок залежить від оснащення та параметрів ствола.

При розташуванні лебідок зберігаються наступні принципи: лебідки та канати розміщують таким чином, щоб зберегти вільний проїзд машин навкруги ствола; з боку розвантажуючої лотки лебідки слід встановлювати на відстані не менше 10 м від ноги копра; з боку розвантаження автосамоскида в прийомний бункер ця відстань повинна бути не менше 20 м; розміщення всіх лебідок та підймальних машин повинно забезпечувати рівномірне розподілення навантаження на копрі.

Рятувальні драбини призначені для підймання людей, які зайняті на проходці ствола, у випадку аварії основного підйому. На рятувальній драбині повинні розміститися одночасно усі робочі невеликої за чисельністю зміни.

Драбини підвішують до канату лебідки, що обладнана гальмами з комбінованим (механічним та ручним приводом). При проходці стволів використовують драбини ЛС-1 та ЛС-2. Рятувальні драбини ЛС-1 та ЛС-2 мають довжину відповідно 28,1 та 16,7 м, кількість секцій 6 та 4. На кожній драбині розміщується по 30 осіб.

## ВИСНОВКИ

1. В випускній кваліфікаційній роботі на здобуття освітнього ступеня «магістр» проведено аналіз результатів інженерно-геологічних досліджень, який став основою розрахунку параметрів шахтного ствола. Наявність шаруватого масиву (умови Київського метрополітену) та значних водопритоків свідчать про потребу застосування спеціального способу.

2. Розроблені три варіанти шахтного ствола (оправа із залізобетонних тюбінгів, оправа з чавунних тюбінгів, монолітна бетонна оправа) та розраховано об'єми робіт для кожного з них.

3. Виконане техніко-економічне порівняння, яке свідчить, що в даних інженерно-геологічних умовах найбільш доцільно використовувати оправу з залізобетонних тюбінгів, але слід провести розрахунок з метою обґрунтування доцільності її використання.

4. Створена скінченно-елементна модель шахтного ствола в просторовій постановці, проведений чисельний аналіз та отримано результати для оправи із чавунних тюбінгів та залізобетонних тюбінгів. На основі результатів обґрунтована конструкція шахтного ствола та доцільність застосування залізобетону.

5. Обґрунтовано технологію спорудження шахтного ствола із застосуванням заморожування ґрунту, проведено розрахунок його параметрів та основи проходки гірничим способом.

## 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. Гайко, Г. І. Конструкції кріплення підземних споруд: Навчальний посібник [Текст] / Г. І. Гайко. – Алчевськ: Дон ДНУ, 2006 – 133 с.
3. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
4. Мірошник, В. А. Керування напружено-деформованим станом вертикальних виробок при застосуванні різних видів кріплення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія [Текст] / В. А. Мірошник. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту, Дніпро, 2021. – 127 с
5. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
6. 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.
7. 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.
8. Тютюкін, О. Л. Порівняльний аналіз спеціальних способів під час проходки вертикальних виробок [Текст] / О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2020. – № 17. – С. 81-90. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205019>

9. Тютюкін, О. Л. Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену [Текст] / О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник, І. В. Гелетюк // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2021. – № 19. – С. 91-98.
10. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій [Текст] / О. Л. Тютюкін. – Дніпро : Журфонд, 2020. – 260 с.
11. SCAD для користувача [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Київ : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
12. Song, H. Physical model testing and numerical simulation for temperature distribution of mass concrete freezing shaft lining in deep alluvium [Текст] / H. Song, H. Cai, H. Cheng, Z. Yao // AIP Advances, 2018, 8, 075328. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5043454>
13. Tiutkin, O., Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology [Електронний ресурс] / O. Tiutkin, V. Miroshnyk, A. Radkevych, A. Alkhdour // International Conference ESSAYS OF MINING SCIENCE AND PRACTICE // E3S Web of Conferences 109, 00099 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900099>
14. Tiutkin, O. Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process [Текст] / O. Tiutkin, V. Petrenko, N. Petrosian, V. Miroshnyk, A. Alkhdour // Mining of Mineral Deposits. – 2018. – 12(4). – pp. 28-36. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.028>