

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра геоінженерії

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Наталя ЗУЄВСЬКА
« ____ » _____ 2025 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Геоінженерія»
спеціальності 184 «Гірництво»
на тему: «Відновлення перегінного тунелю метрополітену в умовах
підвищених водопритоків»

Виконав:
студент IV курсу, групи ОС-11
Лук'янчук Матвій Андрійович _____

Керівник:
Професор, д.т.н., проф.,
Гайко Геннадій Іванович _____

Консультант з розрахунково-конструкторського розділу:
Старший викладач, к.т.н.,
Ган Олена Валеріївна _____

Рецензент:
Технічний директор,
ТОВ «ГЕОІНЖІНІРИНГ КОМПАНІ»
Матвійчук Іван Олександрович _____

Нормоконтроль:
Доцент, к.т.н., доц.,
Ган Анатолій Леонідович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	1698-с.ОС-11.007 ЗП	Пояснювальна записка	69	
3	A1	1698-с.ОС-11.007 ТК	Схема виконання робіт. Ситуаційний план. Геологічний розріз	1	
4	A1	1698-с.ОС-11.007 ТК	Хімічне закріплення ґрунтів	1	
5	A1	1698-с.ОС-11.007 ТК	Посилення правого перегінного тунелю	1	
6	A1	1698-с.ОС-11.007 ТК	Jet-grouting лоткової частини	1	
7	A1	1698-с.ОС-11.007 ТК	Плакат № 1	1	
8	A1	1698-с.ОС-11.007 ТК	Плакат № 2	1	

				1698-с.ОС-11.007		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Лук'янчук М.А.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Гайко Г.І.				1	1
Консулт.	Ган О.В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Кафедра геоінжеерії 184 Гірництво гр. ОС-11	
Н/контр.	Ган А.Л.					
Зав.каф.	Зуєвська Н.В.					

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра геоінженерії**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – **184 «Гірництво»**
Освітньо-професійна програма «Геоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

_____ Наталя Зуєвська

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Лук'янчуку Матвію Андрійовичу

1. Тема проєкту «**Відновлення перегінного тунелю метрополітену в умовах підвищених водопритоків**», керівник проєкту професор, д.т.н, проф., Гайко Генадій Іванович, затверджені наказом по університету від «25» травня 2025 р. № 1698-с
2. Термін подання студентом проєкту 16.06.2025 року
3. Вихідні дані до проєкту: ПОБ, РП, ЗПЗ.
4. Зміст пояснювальної записки: вивчити геологічні та гідрогеологічні параметри ділянки відновлення перегінного тунелю, обґрунтувати принцип роботи і технологію проєкту, обрати об'ємно-планувальні та конструктивні рішення, обґрунтувати організаційно-технологічну схему будівництва та методи виконання робіт, охорона праці та безпека, в розрахунково-конструкторському розділі виконати розрахунок і навести модель, розрахувати кошторисну вартість будівництва.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема виконання робіт, ситуаційний план,

геологічний розріз, хімічне закріплення ґрунтів, посилення правого перегінного тунелю, Jet-grouting лоткової частини, зміщення конструкції.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Кошторис будівництва	Зуєвська Н.В.		
Розрахунково-конструкторський розділ	Ган О.В.		
Нормоконтроль	Ган А.Л.		

7. Дата видачі завдання: 15.04.2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Характеристика об'єкта	21.05.25-24.05.25	
2	Технічна необхідність проведення ремонтних робіт	25.05.25-27.05.25	
3	Ремонтно-відновлювальні роботи на перегінному тунелі	28.05.25-01.06.25	
4	Моделювання перегінного тунелю за допомогою Plaxis 2D	02.06.25-08.06.25	
5	Кошторисний розрахунок та охорона праці	09.06.25-13.06.25	

Студент

Матвій Лук'ячук

Керівник

Генадій Гайко

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

**на тему: «Відновлення перегінного тунелю метрополітену в умовах
підвищених водопритоків»**

У контексті зазначених викликів, сучасна інженерна практика вимагає впровадження ефективних рішень, що поєднують класичні підходи до відновлення споруд з новітніми методами ґрунтоукріплення, ін'єктування та гідроізоляції. Особливу роль у цьому відіграє моделювання, яке дозволяє на етапі проєктування оцінити вплив запропонованих рішень на загальний стан споруди. Як зазначено, правильне врахування геологічних умов і поведінки ґрунтового середовища є ключовим чинником безпеки при реконструкції підземних об'єктів [2].

Проєкти капітального ремонту тунелів передбачають багаторівневий аналіз: оцінку гідрогеологічних характеристик, виявлення критичних зон деформацій, розробку схем гідроізоляції, визначення технологій закріплення ґрунтів (зокрема хімічного та струменевого), а також обґрунтування типу матеріалів й послідовності монтажу/ремонту. Однією з важливих тенденцій є використання комп'ютерного моделювання, наприклад в Plaxis 2D, яке дозволяє не лише оптимізувати інженерні рішення, а й прорахувати їх вплив на деформаційний стан конструкцій у реальному часі [3].

Враховуючи те, що Оболонсько–Теремківська лінія активно використовується щоденно тисячами пасажирів, відновлення її окремих ділянок є не лише інженерною, а й соціальною необхідністю. Капітальний ремонт тунелю між «Либідською» та «Деміївською» спрямований на продовження ресурсу об'єкта, забезпечення гідротехнічної стійкості, підвищення безпеки та створення умов для подальшої експлуатації об'єкта відповідно до сучасних вимог будівельних норм.

Відповідні матеріали надані ПП «Автострада»

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

1.ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА

1.1 Загальні відомості про об'єкт

Станція київського метрополітену «Либідська» була введена в експлуатацію 29 грудня 1984 року, а наступна за нею — «Деміївська» — відкрита 15 грудня 2010 року. Аварійна ділянка знаходиться біля центрального автовокзалу м.Києва (Рис. 1.2). 8 грудня 2023 року столична влада оголосила про зупинення руху поїздів на відрізьку між станціями «Либідська» та «Деміївська» Оболонсько-Теремківської лінії метро. За попередніми даними, вказані обставини виникли у зв'язку з розгерметизацією тунелю та появою тріщин у його стінах, що призвело до підтоплення тунелю на цій ділянці метрополітену [4]. Перегінний тунель, що з'єднує ці станції, належить до типу мілкового закладання, з глибиною від поверхні до верхньої частини конструкції в межах 5–16 метрів. Зведення тунелю здійснювалося щитовим методом із використанням проходницького щита. Щоб знизити рівень ґрунтових вод використовували глибинні насоси. Внутрішній діаметр правого перегінного тунелю на ділянці, що буде ремонтуватися 5400 мм, зовнішній 6000 мм. Товщина елементів оправи становить 300 мм, ширина 1000 мм, їх довжина змінюється 451 мм, 939 мм, 1453 мм, 1855 мм.

	Зам. інв.№
	Підпис і дата
Інв. № орг.	

							1698-с.ОС-11.007		
	Зм.	Кіль	Арк	№ док.	Підпис	Дата			
	Розробив		Лук'янчук М.А.				Стадія	Аркцш	Аркцшів
	Перевірів		Гаїко Г.І.				ТЕР	1	1
	Н. контр.		Ган А.Л.				Характеристика Об'єкта		
							КПІ ім. Ізгоря Сікорського НН ІЕЕ		

+39 °С. Середньорічна відносна вологість повітря становить близько 75 %, з коливаннями влітку до 65 % і взимку до 80–90 %. Річна сума опадів у середньому складає близько 617 мм .

1.4 Сейсмічність

У структурно-тектонічному плані досліджувана територія розташована на північно-східному схилі Українського щита, в зоні його переходу до Дніпровсько-Донецької западини. Межу між цими великими геоструктурними одиницями формує Дніпровський розлом — активна тектонічна зона, яка відіграє важливу роль у формуванні сучасного геологічного обриску регіону.

Тектонічна будова району є відносно простою. У геологічному розрізі виділяються два основні структурні рівні. Нижній структурний поверх представлений глибоко метаморфізованими і значно дислокованими породами архейського та нижньопротерозойського віку, що формують кристалічний фундамент. Верхній структурний поверх утворений слабо дислокованими осадовими відкладами мезозойсько-кайнозойського віку, які залягають майже горизонтально та складають осадовий чохол.

Сейсмічна характеристика району відповідає середньому рівню небезпеки для ґрунтів II категорії за сейсмічними властивостями. Відповідно до чинних нормативних документів, зокрема ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України» [7], розрахункова сейсмічна інтенсивність для м. Києва за шкалою MSK-64 визначається наступним чином:

1. За картою ОСР-2004-А — 5 балів із ймовірністю повторення один раз на 500 років;
2. За картою ОСР-2004-В — 5 балів із ймовірністю повторення один раз на 1000 років;

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

3. За картою ОСР-2004-С — 6 балів із ймовірністю повторення один раз на 5000 років.

1.5 Геологічні умови

Геологічний розріз досліджуваної території досягає глибини 30 метрів і охоплює сучасні алювіальні супіски та піски, перекриті насипними ґрунтами потужністю до 5 м. У нижній частині розрізу залягають мергельні глини еоценового віку (палеогенова система), нижче яких розташовані піски бучацького горизонту середнього еоцену.

Насипні техногенні ґрунти мають переважно піщано-глинистий склад, сформовані без чіткої структури, із включеннями будівельного сміття, щебеню та уламків великої фракції — до 35%. Поверхня насипу перекрита шарами асфальтобетонного покриття товщиною 0,2–0,4 м. Ці ґрунти відрізняються високою неоднорідністю як за складом, так і за щільністю. Їх потужність змінюється в межах 3,3–5,0 м, а абсолютні відмітки підшви шару складають 105,97–106,75 м.

Надалі залягає шар алювіальних супісків, пластичної або текучої консистенції, домішками піску пилюватої та мілкої фракції, іноді з прошарками суглинків. Колір відкладів варіюється від жовтого та світло-жовтого до бурожовтого та сіро-жовтого. Потужність шару становить 4,2–6,0 м, здебільшого 4,2–4,6 м, з підшовою на глибині 8,3–9,7 м (абсолютні відмітки 100,75–101,77 м).

Нижче розташовані піски середньої крупності з домішками дрібного піску, супіску, жорстви та гравію. Піски водонасичені, мають середню або високу щільність, з характерним сірувато-жовтим, світло-сірим або сіро-жовтим забарвленням. У підшві шару зустрічається тонкий прошарок суглинків (0,3–0,6 м), який розділяє алювіальні відклади та палеогенові утворення. Загальна

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

потужність нижнього алювіального шару — 4,0–6,6 м; глибина підосви — 13,9–15,9 м (відмітки 94,87–96,57 м).

Породи четвертинного віку залягають безпосередньо над палеогеновими відкладами. Верхню частину останніх формують мергельні глини кийвського горизонту, які мають напівтверду або тугопластичну консистенцію. У межах товщі спостерігаються дзеркала ковзання під кутом 25–55°, що свідчить про активні деформаційні процеси у минулому. Колір глин варіюється від блакитно-зеленого до сіро-зеленуватого. Потужність — 5,6–7,4 м; глибина підосви — 21,3–21,6 м (відмітки 88,65–89,72 м).

Далі простежується тонкий шар піщанистих суглинків із прошарками піску та супіску, включеннями гравію та окремими гальками. Відклади мають зеленувато-сіре або світло-зелене забарвлення, з потужністю до 1,6 м. Підосва — на глибинах, що відповідають абсолютним відміткам 87,67–88,72 м.

Найглибше залягають ґрунти бучацького горизонту, представлені переважно дрібними та середніми пісками кварц-глауконітового складу, з домішками супісків і пилюватих пісків. Спостерігаються прошарки жорстви й гравію кристалічних порід. Піски мають зелено-сіре або темно-зелене забарвлення, насичені водою, характеризуються щільною або середньощільною структурою. Розкрита потужність цього шару — до 8,6 м.

Ґрунтові шари подані в вигляді таких інженерно-геологічних елементів:

- 1) насипний ґрунт-пісок, супісок, суглинок з вмістом щебеню, будівельним сміттям, битою цеглою;
- 2) пісок жовтий і сірий, пилюватий та дрібний, місцями з прошарками суглинку та супіску, слабо глинистий, місцями замулений, мало вологий, вологий та насичений водою;
- 3) супісок жовтувато-сірий, з лінзами та прошарками піску, іноді з домішками органічних речовин, твердий пластичний;

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

- 4) супісок бурувато-сірий, темно-сірий з прошарками піску, з рослинними залишками, замулений, іноді заторфований, пластичний, текучий;
- 5) суглинки жовтувато-бурі, бурувато-коричневі, з прошарками піску, з залишками рослин, заторфовані, текучопластичні;
- 6) суглинок жовто-бурий, лесовидний, карбонатний, твердий, пластичний;
- 7) супісок блакитно-сірий, сірий, легкий з прошарками піску, з домішками органічних речовин, текучий;
- 8) пісок жовтувато-сірий, мілкий, середньої крупності, місцями глинистий, з включенням щебеню і гравію, середньої щільності, насичений водою;
- 9) глина блакитно-сіра, мергелиста, слюдяста, карбонатна, з тонкими прошарками мілкого піску, місцями сильно тріщинувата, водопроникна по тріщинах та піщаних прошарках;
- 10) глина блакитно-сіра мергелиста, сильно тріщинувата, порушена процесами розмиву та тектоніки, м'якопластична;
- 11) суглинок блакитно-сірий мергелистий, слюдястий з частими прошарками піску, з включеннями фосфоридних стяжінь, напівтверді та тверді;
- 12) пісок блакитно-сірий дрібний, мергелистий, слюдястий, мало вологий;
- 13) пісок сірий, зеленувато-сірий, дрібний.

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості ґрунтів

Номер п/п	Коефіцієнт ент пористості e	Коефіцієнт міцності по Протодьяконову	Щільність γ , кН/м ³	Кут внутрішнього тертя φ , град
1	0,5	0,7	15	28
2	0,5	0,7	15	32
3	0,65	0,6	16	30

4	0,6	0,6	15	30
5	0,55	0,4	18	35
6	0,55	0,6	18	35
7	0,55	0,65	16	30
8	0,65	0,8	18	37
9	0,65	1,0	18	50
10	0,5	0,8	17	40
11	0,5	0,8	16	35
12	0,55	0,6	20	27
13	0,55	0,5	19	25

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

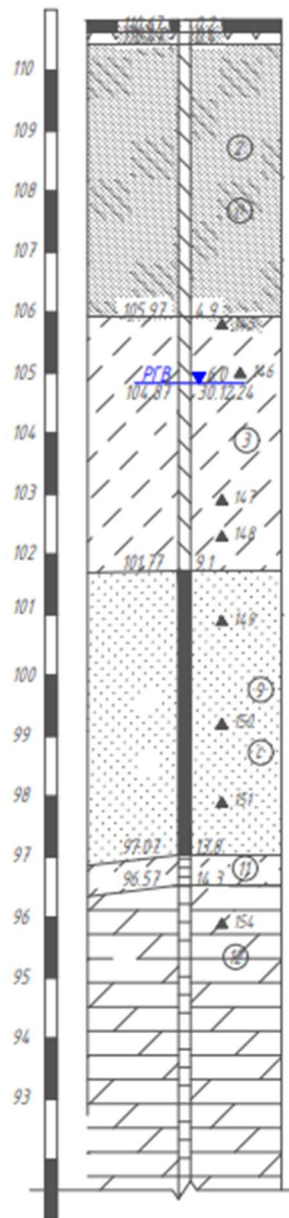


Рисунок 1.3 - Геологічний розділ «Свердловина №4»

1.6 Гідрогеологічні умови

З гідрогеологічної точки зору досліджувана територія розташована в північно-західному секторі Дніпровського артезіанського басейну. Гідрогеологічна

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

ситуація на глибинах до 30 м визначається наявністю двох основних водоносних горизонтів: четвертинного та бучацько-канівського.

Під час проведення інженерно-геологічних вишукувань у грудні 2023 — січні 2024 року, рівень ґрунтових вод четвертинного горизонту був зафіксований на глибинах від 5,2 до 6,0 м, що відповідає абсолютним відміткам 104,50–105,30 м. Цей горизонт приурочений до алювіальних відкладів. Основними джерелами живлення є атмосферні опади, води поверхневого стоку, інфільтрація з водогонів та підземних джерел на прилеглих територіях. Напрямок руху вод — у бік русла річки Либідь. Водотривким шаром виступають мергельні глини, які ізолюють горизонт. Водорозвантаження відбувається у долину р. Либідь та частково через інженерні системи водовідведення.

Нижче залягає другий водоносний горизонт — бучацько-канівський. Він відділений від поверхневих ґрунтових вод товщею мергельної глини київського горизонту середньопалеогенового віку, яка виконує функцію водотриву. Водонасиченими породами в межах комплексу є піски та алеврити. Знизу водоносний горизонт обмежується мергельно-крейдяною товщею туронського ярусу, яка також виконує роль водотривкого шару.

Цей горизонт має артезіанський характер, однак у межах міста напірний стан був порушений у 2000-х роках у результаті масштабного централізованого водозабору з інших водоносних горизонтів — сеноман-келловейського та байоського. Станом на час проведення останніх вишукувань встановлено, що бучацькі відклади є повністю насиченими водою.

Згідно з результатами лабораторного аналізу, вода має сульфатно-хлоридний натрієво-кальцієвий склад, слабопрісна, з мінералізацією на рівні 2342 мг/л. За стандартною методикою оцінки агресивності встановлено, що вода є слабоагресивною щодо бетону марки W4 за показниками *pH* та вмістом агресивної

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

CO₂, а також слабоагресивною до сталеві арматури залізобетонних конструкцій при періодичному зволоженні — через вміст хлоридів.

1.7 Фізико-механічні властивості ґрунтів

Розподіл ґрунтової товщі на інженерно-геологічні елементи було здійснено з урахуванням вікової приналежності, номенклатурних особливостей та комплексу фізико-механічних властивостей ґрунтів. Характеристика фізичних показників ІґЕ базується на статистичній обробці результатів лабораторних випробувань, а також на даних радіоізотопного каротажу. При цьому враховувались також матеріали попередніх вишукувань, виконаних у подібних інженерно-геологічних умовах.

Показники міцності були встановлені в результаті досліджень на приладах одноплощинного зрізу, при навантаженнях 0,1, 0,2 та 0,3 МПа відповідно до методики консолідовано-дренованого зсуву. Зразки ґрунтів випробовувалися у природному стані, попередньо ущільнюючись у відповідному ущільнювальному пристрої.

Деформаційні характеристики отримано під час досліджень в одометрах, які виключають бічне розширення зразків при дії вертикального навантаження. Дослідження проводилися до навантаження 0,3 МПа.

Щільність і вологість ґрунтів було визначено шляхом проведення радіоізотопного каротажу у 2 свердловинах та до глибини 17,0 м. Вимірювання виконувалися під час опускання зонда з інтервалом 0,5 м, у кожній точці знімали по два показники кількості імпульсів (експозиція 10 секунд).

Для розрахунку щільності ґрунтів (ρ) та об'ємної вологості ($W_{об}$) використовувалися результати польових вимірів разом із тарувальними кривими відповідного обладнання. Оскільки між ρ і $W_{об}$ існує функціональна залежність, це дозволило визначити також щільність у сухому стані (ρ_d) та вагову вологість (W).

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

За результатами досліджень у межах ділянки на глибину до 17 м було виокремлено дев'ять інженерно-геологічних елементів. Першим виступають голоценові техногенні відклади (тН), представлені на поверхні шарами асфальту та бетону.

Відповідно до фізико-механічних характеристик ґрунтів, наведених у таблиці 1.1 та згідно з вимогами ДБН В.1.1-12:2014 [7], ґрунти ділянки належать до **III** категорії за сейсмічними властивостями.

1.8 Фізико-геологічні процеси та явища

Згідно з класифікацією, наведеною в ДБН А.2.1-1 (додаток Ж) [8], умови досліджуваної ділянки відносяться до **III** категорії складності інженерно-геологічних умов — тобто складних. Через досліджувану територію пролягають перегінні тунелі київського метрополітену. Ділянка є впорядкованою, щільно забудованою торговими спорудами, розташована в межах перехрестя автомобільних артерій з інтенсивним трафіком, поблизу багаторівневої транспортної розв'язки.

До початку вишукувальних робіт на цій території було зафіксовано розвиток аварійних суфозійних процесів, спричинених вимиванням дрібнозернистих пісків ґрунтовими водами у напрямку до тунельної споруди. Це зумовило деформації на поверхні: утворення тріщин в асфальтовому покритті, просідання та часткове руйнування торгових павільйонів, а також появу суфозійної воронки під дорожнім покриттям.

Верхні шари розрізу представлені добре проникними алювіальними супісками та пісками, які в природних умовах перебувають у насиченому стані, що забезпечує їх стабільність. Водночас за наявності витоків з комунікацій або сезонного підвищення рівня підземних вод можливе прогнозне підняття вод до 1,5 м вище рівня, зафіксованого під час проведення вишукувань.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.0С-11.007

Присутність перегінних тунелів у водонасичених відкладах четвертинного горизонту може суттєво впливати на гідродинамічний режим. Зокрема, ймовірне формування баражного ефекту, який при порушенні гідроізоляції тунельної конструкції може активізувати подальше просування суфозійних процесів.

Додатковим ризиком виступають вібраційні навантаження, спричинені рухом транспорту та функціонуванням великогабаритної техніки. Вони здатні викликати зниження щільності та зміни у фізико-механічних параметрах ґрунтового масиву, що своєю чергою призводить до осідань.

При проведенні земляних робіт (зокрема розробки котлованів) деформації найчастіше локалізуються поблизу брівки котловану, де фіксуються максимальні переміщення денної поверхні. Зі збільшенням відстані від брівки амплітуда деформацій поступово зменшується. Для запобігання розвитку деформаційних і суфозійних явищ проектні рішення повинні враховувати реальні інженерно-геологічні умови, характер геологічного розрізу та особливості ґрунтів на майданчику.

1.9 Висновок до розділу

У результатах аналізу інженерно-геологічних, фізико-географічних гідротагеологічних умов, викладених у першому розділі, встановлено, що аварійна ділянка перегінного тунелю між станціями «Либідська» та «Деміївська» розташована в складній геологічних умовах з вираженою неоднорідністю ґрунтів, високим рівнем ґрунтових вод і визначеною сейсмічною активністю. Вивчення гірських порід, їх фільтраційної здатності, показників міцності та деформаційної чутливості дозволило створити основні ризики для підземної споруди, що експлуатується у водонасиченому середовищі. Присутність алювіальних відкладень, техногенних нашарувань, мергельних глин та нестабільних пісків є критичними з точки зору стійкості споруди. Ці умови обумовлюють необхідність

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.0С-11.007

глибокого технічного обґрунтування всіх подальших рішень, які приймаються в процесі проектування й реалізації ремонтно-відновлювальних заходів. Таким чином, розділ служить основою для розуміння технічного стану об'єкта та масштабів виявлених небезпек, які відображаються за рахунок інженерно-геологічних факторів.

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – Просідання ґрунту поблизу станції метро «Деміївська» [20]

Як зазначено у підрозділі 1.8 та зображено на Рис. 2.2, на поверхні фіксувались ознаки порушення структурної цілісності покриття (тріщини, просідання), а також деформації та часткове руйнування об'єктів забудови, зокрема торгових павільйонів. У зоні пошкодження також спостерігалось формування суфозійної воронки, що є характерною ознакою вимивання ґрунтового матеріалу під дією фільтраційних потоків.

Згідно з матеріалами інженерно-геологічних вишукувань (див. Розділ 1.2, 1.6), виявлено, що тунельна конструкція пролягає через водонасичені алювіальні відклади четвертинного віку, які мають високу фільтраційну здатність і низьку опірність до розущільнення під дією підземного водотоку. Встановлено, що в районі станції «Либідська» відмічається підвищена суфозійна активність, зокрема, внаслідок інфільтрації вод з технічних мереж і атмосферних опадів, а також через втрату герметичності окремих ділянок дренажної системи.

Додатковим чинником дестабілізації є техногенне навантаження, зумовлене високою транспортною активністю, розташуванням ділянки поблизу

						1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата			

багаторівневої розв'язки та щільною забудовою. Вібраційні коливання від руху транспорту та важкої техніки сприяють зміні щільності ґрунтів, зниженню їх несучої здатності, а в умовах підвищеної вологості — також розвитку осідань.

Певний вплив на формування аварійної ситуації має й морфологія території. Як вказано в підрозділі 1.3, майданчик розташований у межах Придніпровської височини, у зоні долини річки Либідь. Це обумовлює природну зосередженість ґрунтових вод у нижній частині схилу, що, своєю чергою, підвищує ризик накопичення води у зонах слабкої дренаваності, де і відбуваються локальні деформації.

Наявність тунельної споруди в умовах зазначених гідрогеологічних характеристик сприяє локальному змінненню напрямку підземного потоку. У разі часткової втрати гідроізоляційних властивостей конструкції, що можливо через старіння матеріалів або механічні пошкодження, виникає загроза подальшого вимивання дрібнозернистого піску, що перебуває у безпосередньому контакті з об'єктом.

Таким чином, зафіксовані деформації не є випадковими або поодинокими явищами — вони мають системний характер, зумовлений сукупністю природних і техногенних чинників. Без вжиття інженерних заходів ситуація мала б тенденцію до ускладнення, а зона ураження — до розширення.

2.2 Інженерно-геологічні умови як чинник ризику

Складні інженерно-геологічні умови є одним з головних факторів, що зумовили необхідність виконання ремонтно-укріплювальних робіт на перегінному тунелі. Як наведено в підрозділі 1.5, геологічний розріз району включає в себе неоднорідні за складом і фізико-механічними властивостями відклади — від насипних техногенних ґрунтів до водонасичених алювіальних пісків та глин

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата	1698-с.ОС-11.007				

палеогенової системи. Таке поєднання порід створює підвищений ризик розвитку нестабільних процесів у ґрунтовому масиві.

Особливу загрозу становить наявність потужного шару насипних ґрунтів з включеннями будівельного сміття, щебеню та крупнофракційних елементів, які не мають достатньої щільності укладання та структурної однорідності. Вони схильні до осідання, зниження міцності при зволоженні та неефективного передавання навантажень на нижні шари. Згідно з таблицею 1.1, коефіцієнт пористості для таких ґрунтів досягає 0,65, а кут внутрішнього тертя часто не перевищує 28–30°, що свідчить про низьку стійкість до зсувів.

Ще одним фактором ризику є наявність алювіальних водонасичених пісків, які мають високу проникність та можуть виступати середовищем для розвитку суфозійних процесів. У підрозділі 1.6 зазначено, що ці породи належать до четвертинного водоносного горизонту, що безпосередньо контактує з підшвою конструкції тунелю. Порушення природного гідрологічного балансу, зокрема внаслідок технічних витоків або зміни дренажного режиму, може спричинити втрату несучої здатності ґрунтів.

Гідрогеологічна ситуація в районі (підрозділ 1.6) також сприяє ускладненню умов експлуатації: ґрунтові води перебувають на глибинах 5,2–6,0 м, мають агресивний хімічний склад та високу фільтраційну активність. За результатами аналізів, вода класифікується як сульфатно-хлоридна, з мінералізацією 2342 мг/л, що є слабоагресивним середовищем до бетону марки W4. У разі порушення гідроізоляції тунелю можливе насичення матеріалу вологою та його поступове руйнування зсередини.

Крім того, досліджувана ділянка належить до III категорії складності інженерно-геологічних умов згідно з додатком Ж ДБН А.2.1-1, що передбачає підвищену відповідальність проектних рішень і необхідність додаткових заходів зі стабілізації ґрунтового середовища.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

Таким чином, у сукупності всі ці чинники — структурна неоднорідність ґрунтів, їх водонасиченість, фільтраційна нестійкість, хімічна агресивність середовища та складний геологічний профіль — створюють високий ризик розвитку негативних інженерно-геологічних процесів у зоні дії тунелю. Це обґрунтовує необхідність посилення конструкції та реалізації протисуфозійних заходів у рамках ремонтного проєкту.

2.3 Висновок до розділу

У результаті проведених інженерно-геологічних вишукувань, аналізу гідрогеологічних умов та фактичних проявів деформаційного впливу встановлено, що стан перегінного тунелю між станціями «Либідська» та «Деміївська» вимагає невідкладного технічного втручання. Виявлені процеси свідчать про наявність активної фази суфозії, що вже призвела до порушення цілісності як поверхневих, так і підземних споруд.

Досліджена ділянка характеризується поєднанням декількох несприятливих факторів: техногенне навантаження, складні гідрогеологічні умови, наявність слабких насипних і алювіальних порід, вплив підземних вод, порушення гідроізоляції та вібраційні навантаження від транспортної інфраструктури. За наявності таких умов тунельна споруда втрачає стабільність, а ризик прогресуючих деформацій значно зростає.

Подальше ігнорування ситуації здатне було призвести до:

- розширення зони просідань і деформацій на поверхні;
- порушення цілісності тунельної конструкції;
- аварійних ситуацій під час експлуатації метрополітену;
- обмеження або зупинки руху в перегінному тунелі;
- значного зростання вартості усунення наслідків у майбутньому.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

З огляду на викладене, обґрунтовано висновок про необхідність реалізації комплексу ремонтно-укріплювальних заходів, спрямованих на стабілізацію ґрунтового середовища, посилення гідроізоляції тунельної конструкції та усунення причин суфозійної активності. До таких заходів можуть належати ін'єктування закріплювальних розчинів у зону контакту тунелю з алювіальними ґрунтами, застосування струменевого закріплення (Jet Grouting), влаштування протифільтраційних екранів, а також оптимізація дренажної системи та усунення витоків з комунікацій.

Необхідність втручання була як інженерно обґрунтованою, так і соціально важливою, оскільки мова йдеться про безпеку критично важливого об'єкта транспортної інфраструктури міста Києва в умовах повномасштабного вторгнення.

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Особливу увагу приділено відновленню габаритів тунелю згідно ДСТУ Б ГОСТ 23961:2011 [9]. Набризк-бетон наносився в кілька шарів, з наступним зволоженням і маркшейдерським контролем.

Однією з ключових проблем, що потребували вирішення у межах ремонтно-відновлювальних робіт, стала нестабільність ґрунтового середовища, зумовлена поєднанням водонасичених алювіальних порід, наявністю техногенних включень та зниженими характеристиками щільності й міцності основи. З метою запобігання подальшому розвитку деформацій, а також для забезпечення просторової стабільності масиву, були застосовані дві сучасні технології закріплення ґрунтів: хімічне ін'єктування та струменеве закріплення (Jet Grouting).

3.2 Хімічне ін'єктування

Для того щоб влаштувати випереджаюче кріплення в нестійких ґрунтах застосовують струменеву цементацію: по контуру майбутнього тунелю з певним інтервалом в ґрунт занурюють монітори з насадками, через які під великим тиском подають воду і цементний розчин. Оточуючий свердловину ґрунт руйнується струменем води та інтенсивно переміщується з цементним розчином. Поступово витягуючи монітор зі свердловин, створюють області закріпленого ґрунту. У дрібнодисперсних глинах, які погано піддаються цементації, крім води і цементного розчину подають стиснене повітря [2].

Тунелі по його довжині знаходяться в ґрунтах з різними інженерно-геологічними елементами, то у місцях переходу тунелю із одного шару до іншого, в оправі тунелю виникають перерізаючі зусилля. Окрім того, запроєктовано нову ділянку тунелю, яка буде влаштована замість аварійної, має іншу геометричну форму, більшу площу обпирання на основу та нову основу з бетону. Тому, для «згладжування» переходу між різними типами тунелю та інженерно-геологічними

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

елементами необхідно підсилити основу, покращивши її фізико-механічні характеристики. Роботи виконувались у два етапи:

Перший етап – ін'єктування поліуретанової смоли SPT Resins®, яка швидко тужавіє та ефективно заповнює поровий простір, створюючи водонепроникну мембрану, як зображено на рисунках 3.1, 3.2.

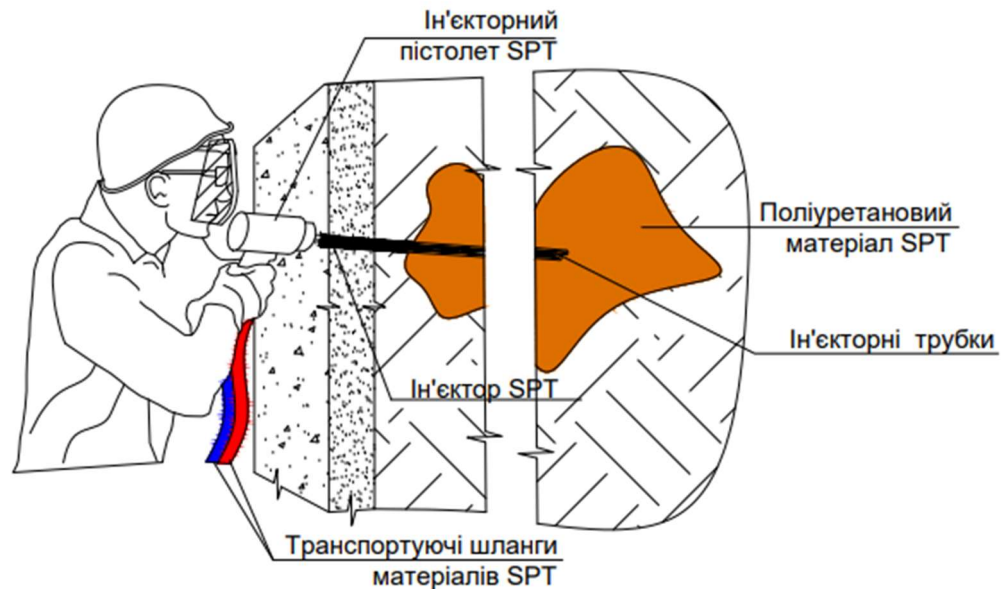


Рисунок 3.1 – Зображення виконання хімічного ін'єктування

Другий етап – ін'єктування мікроцементного розчину Microcem 12000, який після затвердіння формує монолітний ущільнений масив.

Ін'єктування проводиться за допомогою пакерів, що встановлювались у заздалегідь пробурені ін'єкційні шпури. Контроль за ефективністю ущільнення здійснювався через спостереження за тиском подачі розчину та витратою матеріалу.

						1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата			

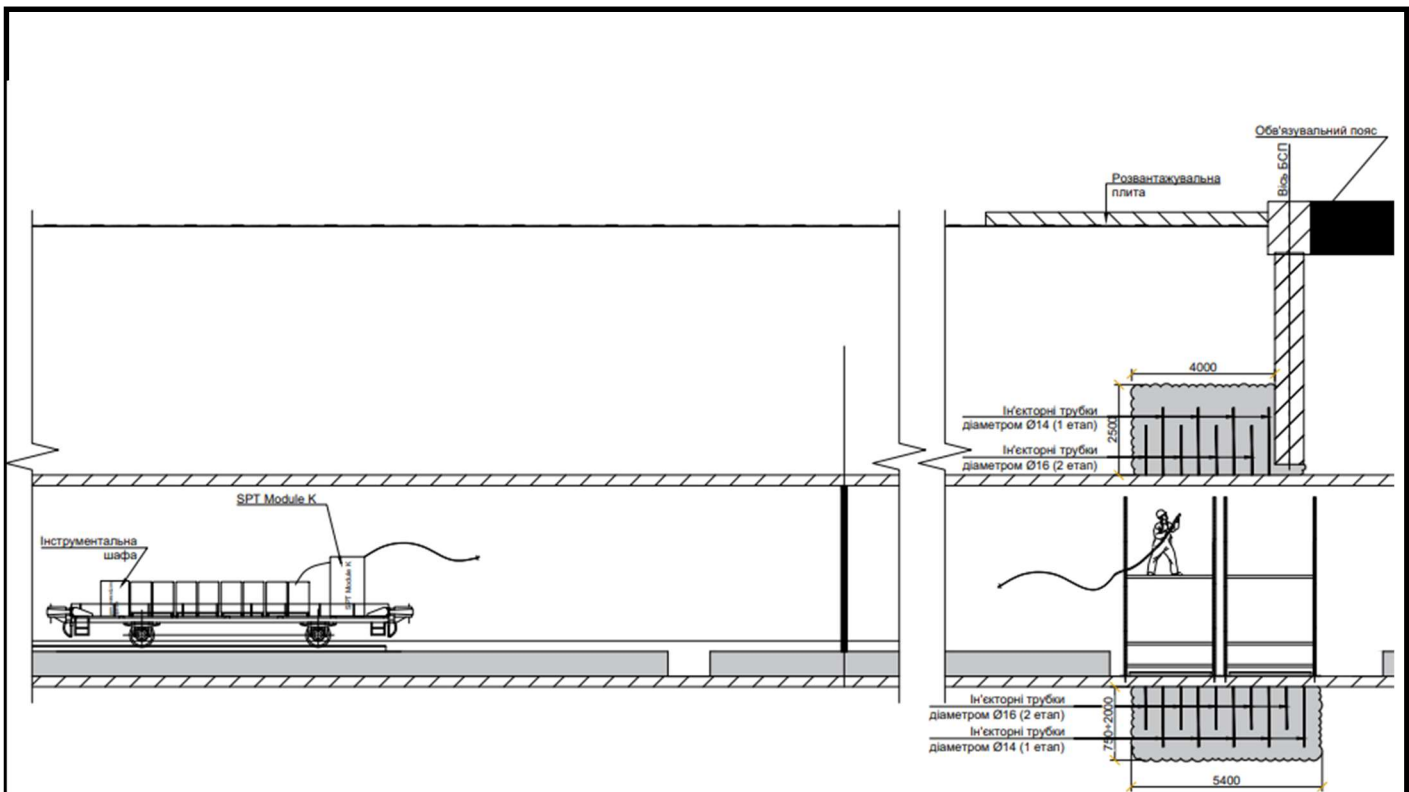


Рисунок 3.2 – Схема процесу виконання хімічного ін'єктування

3.3 Струменеве закріплення (Jet Grouting).

Технологія струменного цементування базується на високошвидкісному введенні однієї або кількох рідин (цементного розчину, повітря, води) в ґрунт. Рідини вводяться через сопла малого діаметра, розміщені на трубі, яка, як правило, спочатку просвердлюється в ґрунт, а потім піднімається до поверхні землі під час струминного введення. У більшості випадків струмені поширюються ортогонально до осі буріння, викликаючи складне механічне явище переформування та проникнення ґрунту з частковим видаленням ґрунту.

Введений водоцементний розчин твердне під землею, зрештою утворюючи тіло з цементованого ґрунту. У більшості випадків оброблений об'єм має квазіциліндричну форму і тому називається «струминно-цементована колона» або просто «струминна колона» [10].

У ділянках із найбільшою інтенсивністю деформацій, зокрема під лотковою частиною тунельної оправи, було впроваджено струменеве закріплення ґрунтів

										1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата							

методом Jet-2. Ця технологія дозволяє формувати ґрунтоцементні колони діаметром 600–1000 мм, що значно покращують міцнісні характеристики лотка тунеля.

Процес реалізовуватиметься шляхом подачі під високим тиском (до 40 МПа) струменів цементного розчину та повітря через спеціальний монітор подвійного струменя. У результаті відбувалося розпушення природного ґрунту і його змішування з цементом, що утворювало стійкий армований стовбур.

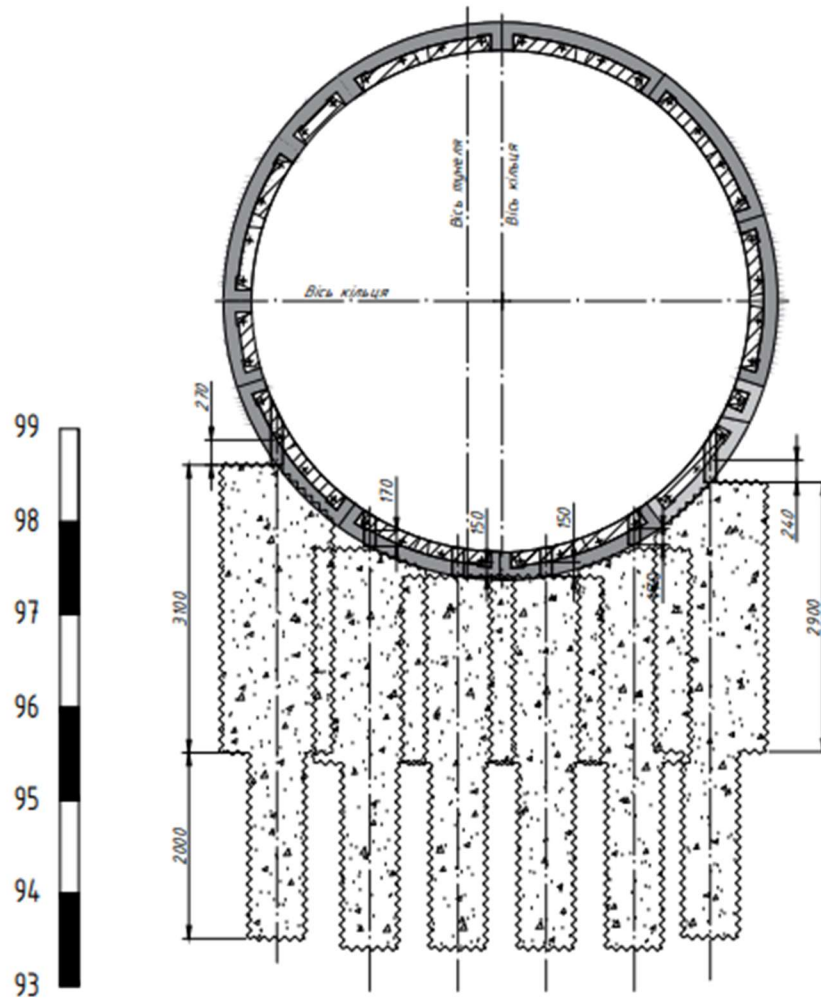


Рисунок 3.3 – Поперечний переріз одного з рядів ґрунто-цементних колон

Одним із можливих оцінювання витрат цементного розчину є метод розрахунку на основі коефіцієнта Канематцу. Необхідну кількість розчину визначають на основі емпіричної формули:

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \lambda \cdot (1 + \beta)$$

де Q – необхідна кількість розчину, D – проектний діаметр ґрунтоцementeної колони, H – довжина колони, λ – експериментальний параметр, прийнятий за рисунком 1, β – коефіцієнт витрат (приблизно 0.1). [11]



Рисунок 3.4 - Експериментальний коефіцієнт Канематцу (λ) [11]

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \lambda \cdot (1 + \beta) = \frac{3.47 \cdot 1.2^2}{4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot (1 + 0.1) = 1.24 \text{ м}^3$$

Розмив глин високонапірним струменем цементного розчину ускладнюється високими значеннями зчеплення часток ґрунту та пластичності матеріалу, що руйнується. І, як показує досвід виконання ґрунтоцementeних елементів в таких складних інженерно-геологічних умовах, на формування ґрунтоцementeних елементів в твердих глинах необхідно затратити на 65-85% більше цементного розчину ніж геометричний об'єм.

Витрати на 1 п.м. виконаного ґрунтоцementeного елемента середнього діаметру 0.6м в глинах та інших, більш зв'язних породах:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \lambda \cdot (1 + \beta) = \frac{3.47 \cdot 0.6^2}{4} \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot (1 + 0.1) = 0.4 \text{ м}^3 + 75\% = 0.7 \text{ м}^3$$

Роботи виконувались у суворій відповідності до виконавчого геодезичного контролю. За результатами лабораторного обстеження кернів, витягнутих з дослідних колон, середня міцність ґрунтоцементу після тужавіння становила 3,0–5,0 МПа, що є достатнім для захисту тунелю від деформацій з боку масиву.

Крім підсилення основи, колони виконували функцію протисуфозійного бар'єру, ізолюючи тунель від контактних зон із найбільш водопроникними шарами.

Таким чином, поєднання двох методів – хімічного та струменевого закріплення – дозволило: локально стабілізувати ослаблені зони; запобігти подальшому розвитку зсувних та просадочних процесів; забезпечити герметичність та конструктивну цілісність тунельної споруди в довгостроковій перспективі.

3.4 Підсилення тунельної оправи

Кріплення виробок набризкбетоном застосовують як для влаштування оправ тунелів, так і для виробок різного призначення в гірничодобувній промисловості.

Існує два основні способи набризкбетонування – «сухий» і «мокрый». При «мокрому» способі по трубопроводу до сопла подається звичайна бетонна суміш, при «сухому» – суха суміш, в яку вода подається на виході з сопла. Найпоширеніший – перший спосіб, що зумовлено простотою та зручністю виконання, проте «сухий» спосіб забезпечує більшу носійну спроможність кріплення, оскільки накладається більш жорстка суміш (водоцементне співвідношення складає тут 0,4–0,5, тоді як в «мокрому» способі – 0,7–0,8). [2]

Метод набризкбетону застосовують для зведення тонкостінних конструкцій, оправ тунелів, замонолічування швів, як елемент комбінованого кріплення, а також для виправлення дефектів бетонних оправ і на ремонтних роботах. При цьому способі бетонну суміш, яка містить цемент, пісок, гравій або щебінь крупністю до 25 мм, а також прискорювачі тужавіння, накладають на відслонену поверхню виробки під дією стисненого повітря. [2]

						1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата			

З метою відновлення просторової жорсткості та довговічності конструкції перегінного тунелю в зонах з найвищим ступенем пошкодження буде реалізовано комплекс заходів із підсилення тунельної оправи методом влаштування монолітної залізобетонної «сорочки».



Рисунок 3.5 – Нанесення «набриск-бетону» на тунельну оправу тунелю [25]

Ця технологія передбачає створення додаткової конструктивної оболонки з високою несучою здатністю, яка облягає наявну конструкцію з внутрішнього боку та забезпечує ефективне перерозподілення навантажень, герметизацію і збільшення габаритів тунелю відповідно до вимог.

Технологічна послідовність виконання робіт

1. Підготовчі операції:

- очищення внутрішньої поверхні від бруду, відшарованих частин бетону, залишків старих гідроізоляційних матеріалів;

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

- локальне видалення дефектних ділянок обробки (бетону) з наступним відновленням мінеральними ремонтними сумішами (Mapergout 430 або аналог).

2. Гідроізоляція існуючої оправи:

- нанесення двокомпонентної еластичної мембрани Mapelastic TU System;
- герметизація конструктивних швів та тріщин ін'єкційними поліуретановими матеріалами (Foamjet F, SPT Resin);
- встановлення гідроізолюючих стрічок (типу Idrostop) у стиках між сегментами.

3. Улаштування арматурного каркасу:

- монтаж арматурних сіток Ø12 мм із кроком 200×200 мм, закріплених анкерними елементами до поверхні тунельної обробки;
- в окремих зонах (в області п'ят та своду) виконуватиметься додаткова арматура з поперечним обв'язуванням.

4. Нанесення набризк-бетону:

- улаштування бетонної «сорочки» товщиною від 150 до 170 мм;
- застосовується набризк-бетон типу Renderoc HS Extra, армований поліпропіленовою фіброю;
- технологія нанесення — комбінована (вологий і сухий метод), із маркшейдерським контролем і нанесенням у кілька шарів.

5. Контроль і догляд:

- після тверднення бетон зволожуватиметься протягом 5 діб;
- проводиться перевірка габаритів тунелю, цілісності покриття та відсутності порожнин методом простукування й візуального огляду;
- фіксація контрольних реперів для подальшого моніторингу деформацій.

Результати підсилення

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.0С-11.007

Реалізація монолітної обійми дозволить: компенсувати втрати міцності основної конструкції; усунути наявні тріщини та зони просочування води; створити додатковий жорсткий контур, здатний витримувати гідростатичний тиск ґрунтових вод; зберегти необхідні габарити тунелю для безпечної експлуатації метрополітену.

Таким чином, влаштування бетонної «сорочки» стає завершальним і найбільш ресурсомістким етапом відновлювальних робіт, забезпечивши комплексне підсилення об'єкта у відповідності до сучасних нормативів та вимог експлуатаційної надійності.

3.4 Висновок до розділу

На основі викладених матеріалів у розділі встановлено, що ремонт перегінного тунелю на аварійній ділянці реалізовано як комплексну систему заходів, спрямованих на усунення вже існуючих пошкоджень та профілактику майбутніх деформацій. Описано впровадження багаторівневих технологій, зокрема: локальне ін'єктування, відновлення герметичності, хімічне та струменеве закріплення підстав, а також влаштування монолітної бетонної «сорочки» для підсилення конструкції тунелю.

Застосування сучасних матеріалів, таких як поліуретанові смоли, мікроцемент, набризк-бетон і антикорозійні покриття, дозволить досягти високої надійності конструкцій у складних геотехнічних умовах. Комплексний підхід забезпечення стабілізації ґрунтового середовища, покращення фізико-механічних характеристик основ та гарантії герметичності. Результати реалізації підтверджують відповідність ремонту нормативним вимогам і забезпечують ефективність сучасних технологій у відновленні підземних споруд.

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

4. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕГІННОГО ТУНЕЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ PLAXIS 2D

4.1 Вихідні дані та параметри моделі

Для виконання чисельного моделювання тунелю в умовах складної інженерно-геологічної ситуації було використано програмне забезпечення Plaxis 2D. У моделі враховано шарувату будову ґрунтів, реальні геометричні параметри конструкції та властивості матеріалів, що прийняті відповідно до рекомендованих значень для подібних інженерних умов.

Таблиця 4.1 – Геологічні параметри ґрунтів

Назва ґрунту	γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	E, кН/м ²	ν	c, кН/м ²	ϕ , °	k, м/добу
Насипний ґрунт	15	18	8000	0.3	0	28	1e-05
Супісок піщанистий	16	18.5	9000	0.3	5	30	1e-06
Пісок середньої крупності	18	20	20000	0.3	0	37	0.0001
Суглинок	16	19	12000	0.35	15	35	5e-06
Глина	18	20	18000	0.35	25	50	1e-06

γ_{unsat} , кН/м³ – об'ємна вага в сухому стані

γ_{sat} , кН/м³ – об'ємна вага в насиченому стані

E, кН/м² – модуль деформації (модуль пружності)

ν – коефіцієнт Пуассона

c, кН/м² – питоме зчеплення

ϕ , ° – кут внутрішнього тертя

1698-с.0С-11.007

Зам. інв.№	Підпис і дата	Інв. № орг.
------------	---------------	-------------

Зм.	Кіль	Арк	№ док.	Підпис	Дата	Моделювання перегінного тунелю за допомогою PLAXIS 2D	Стадія	Аркцш	Аркцшів
							ТЕР	1	1
							КПІ ім. Ізоря Сікорського НН ІЕЕ		

Розробив	Лук'яничук М.А.
Перевірів	Гаїко Г.І.
Н. контр.	Ган А.Л.

к, м/добу – коефіцієнт фільтрації

Параметри фізико-механічних характеристик ґрунтів прийнято згідно з результатами геотехнічних досліджень та з урахуванням типових значень для моделі Mohr-Coulomb відповідно до ДБН В.2.1-10:2018 [12].

4.2 Геометрія та побудова сітки

Для побудови геометрії тунелю в програмному середовищі Plaxis 2D було використано фактичні розміри тунельної конструкції, а також геологічні данні ґрунтів, отримані за результатами інженерно-геологічних вишукувань. Геометрична модель включає п'ять основних шарів ґрунту з відповідною потужністю та властивостями, а також тунельну оболонку круглого перерізу. Геометричні параметри тунелю:

- Зовнішній радіус оправи: 3 м
- Товщина оправи: 0,3 м
- Внутрішній радіус: 2,7 м

Потужність шарів ґрунту в моделі Plaxis подано в таблиці нижче:

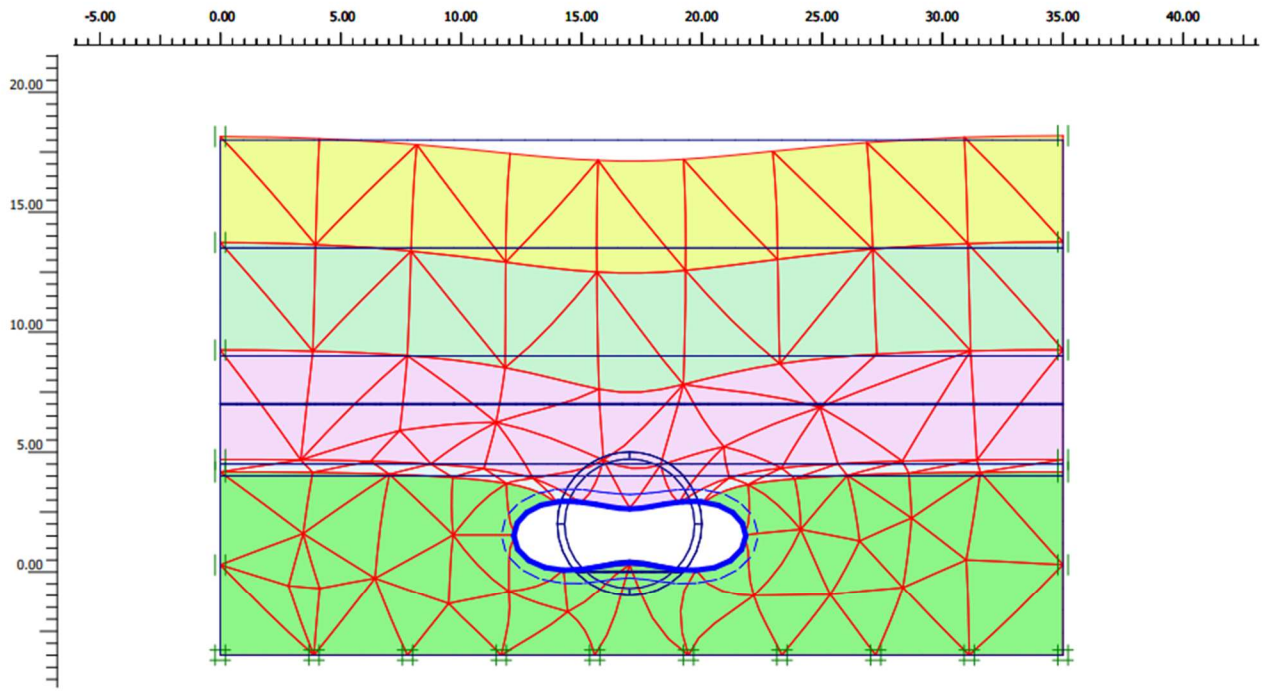
Таблиця 4.2 – Потужності шарів ґрунту

Назва ґрунту	Потужність шару, м
Насипний ґрунт	4.5
Супісок піщанистий	4.2
Пісок середньої крупності	4.7
Суглинок важкий піщанистий	0.5
Глина маргенальна	7.5

Побудова геометрії та геологічного розрізу здійснювалась згідно вихідних даних про геологічні вишукування на данній ділянці та з дотриманням

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата						

1698-с.ОС-11.007



Deformed mesh
 Extreme total displacement $11,85 \cdot 10^{-3}$ m
 (displacements scaled up 200,00 times)



<i>Project description</i>				Деформована сітка	
<i>Project name</i>		<i>Step</i>	<i>Date</i>	<i>User name</i>	
Модельовання т...		7	22.05.25	Koxhiyoki Kabuto, Japan	

Рисунок 4.2 – Деформована сітка

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

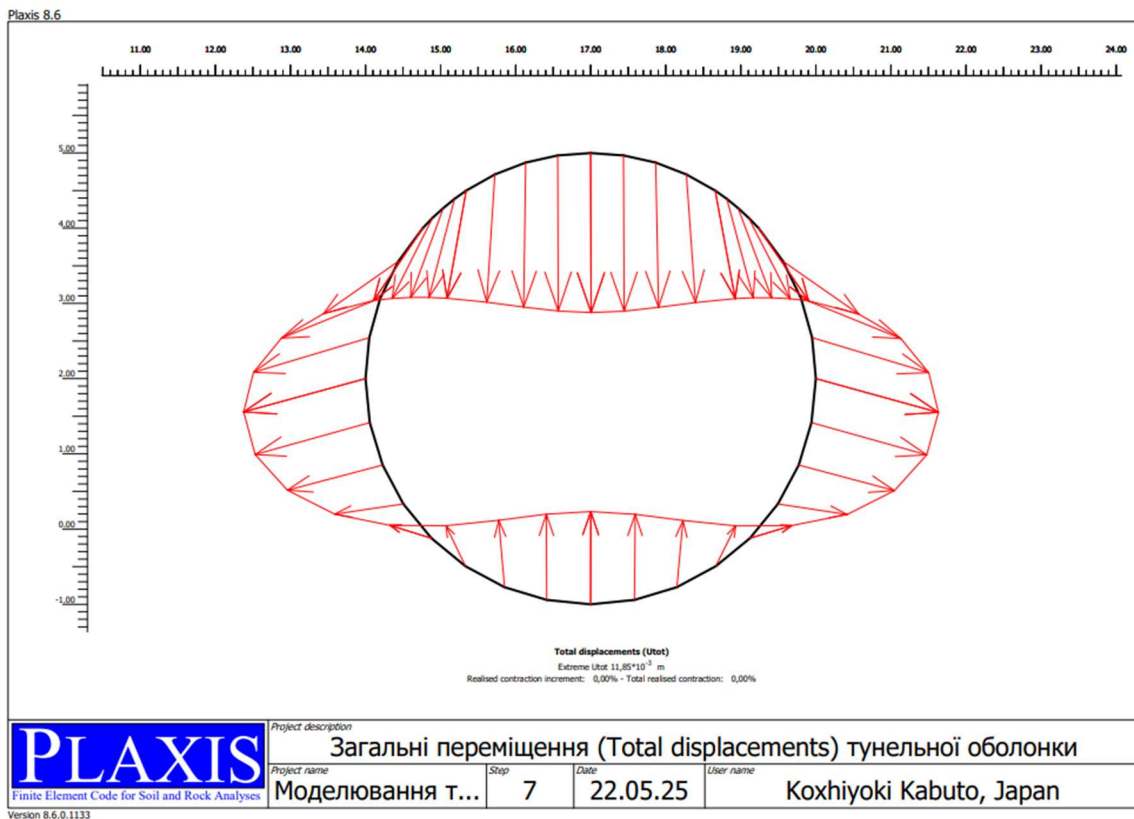


Рисунок 4.3 – Загальні переміщення (Total displacements) тунельної оболонки

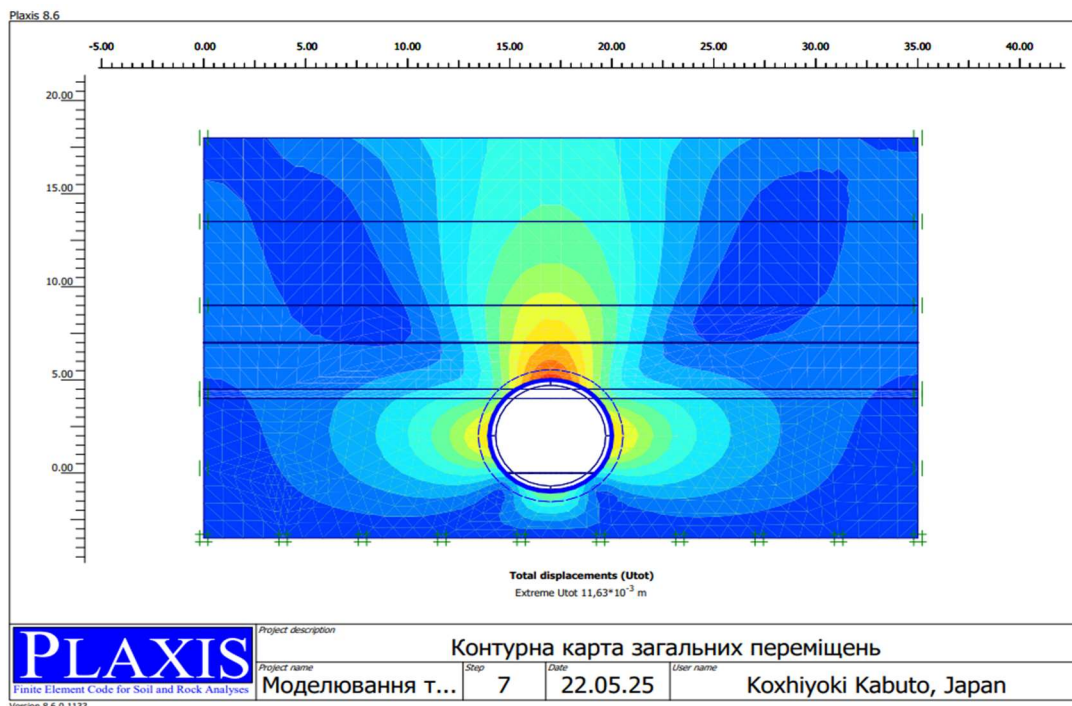
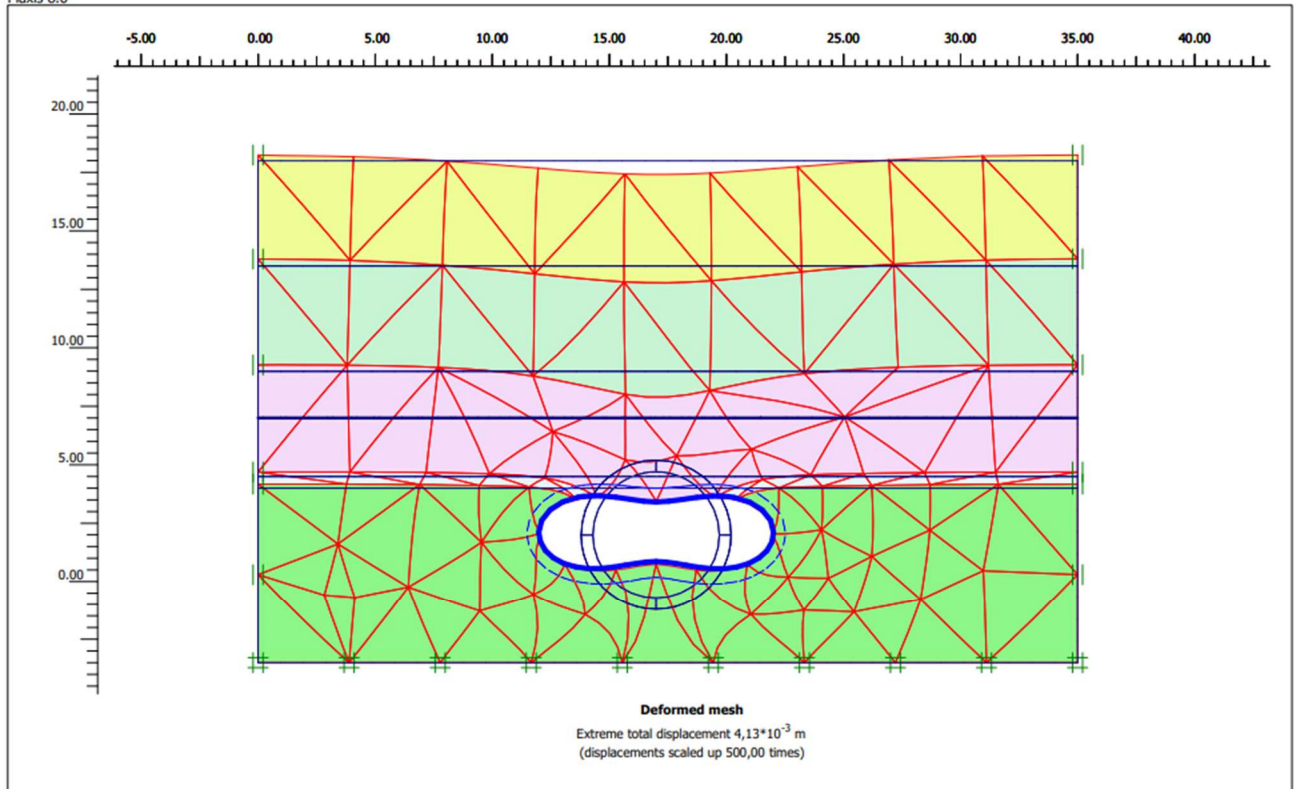


Рисунок 4.4 – Контурна карта загальних переміщень (Total Utot)

Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата

1698-с.ОС-11.007

Арк.



<i>Project description</i>				
Деформована сітка				
<i>Project name</i>	<i>Step</i>	<i>Date</i>	<i>User name</i>	
Модельовання з...	6	22.05.25	Koxhiyoki Kabuto, Japan	

Version 8.6.0.1133

Рисунок 4.6 – Деформована сітка (масштаб деформації збільшений в 500раз)

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

та хімічного закріплення, як методів покращення несучої здатності ґрунтового середовища та зниження деформацій конструкцій метрополітену.

4.6 Розрахункова модель із застосуванням струменного закріплення ґрунтів (Jet Grouting)

З метою зменшення деформацій та покращення взаємодії між тунельною конструкцією і ґрунтовим середовищем, було змодельовано розрахункову ситуацію із застосуванням струменного закріплення ґрунтів (Jet Grouting). Цей метод дозволяє формувати високожорсткі циліндричні елементи в масиві ґрунту навколо оправи тунелю, що підвищує стійкість зони контакту та зменшує горизонтальні переміщення.

У програмному середовищі Plaxis 2D для імітації впливу струменного закріплення було змодельовано область підвищеної жорсткості, що знаходиться в районі лотка тунелю. Радіус впливу елементів визначено за геометрією розташування колон Jet Grouting взятих з наданих матеріалів від «ПІ Автострада». Параметри ґрунту після закріплення прийнято на основі типових характеристик цементно-ґрунтових мас та наведено в таблиці нижче:

Таблиця 4.5 – Характеристики цементно-ґрунтових мас (Jet Grouting)

Параметр	Позначення	Значення
Об'ємна вага (суха/насичена)	$\gamma_{unsat} / \gamma_{sat}$	21,5 кН/м ³
Модуль деформації	E_{ref}	$5,000 \times 10^6$ кН/м ²
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,150
Питоме зчеплення	c_{ref}	1350,000 кН/м ²
Кут внутрішнього тертя	ϕ	32,5°
Коефіцієнт фільтрації	k	$1,000 \times 10^{-7}$ м/добу

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

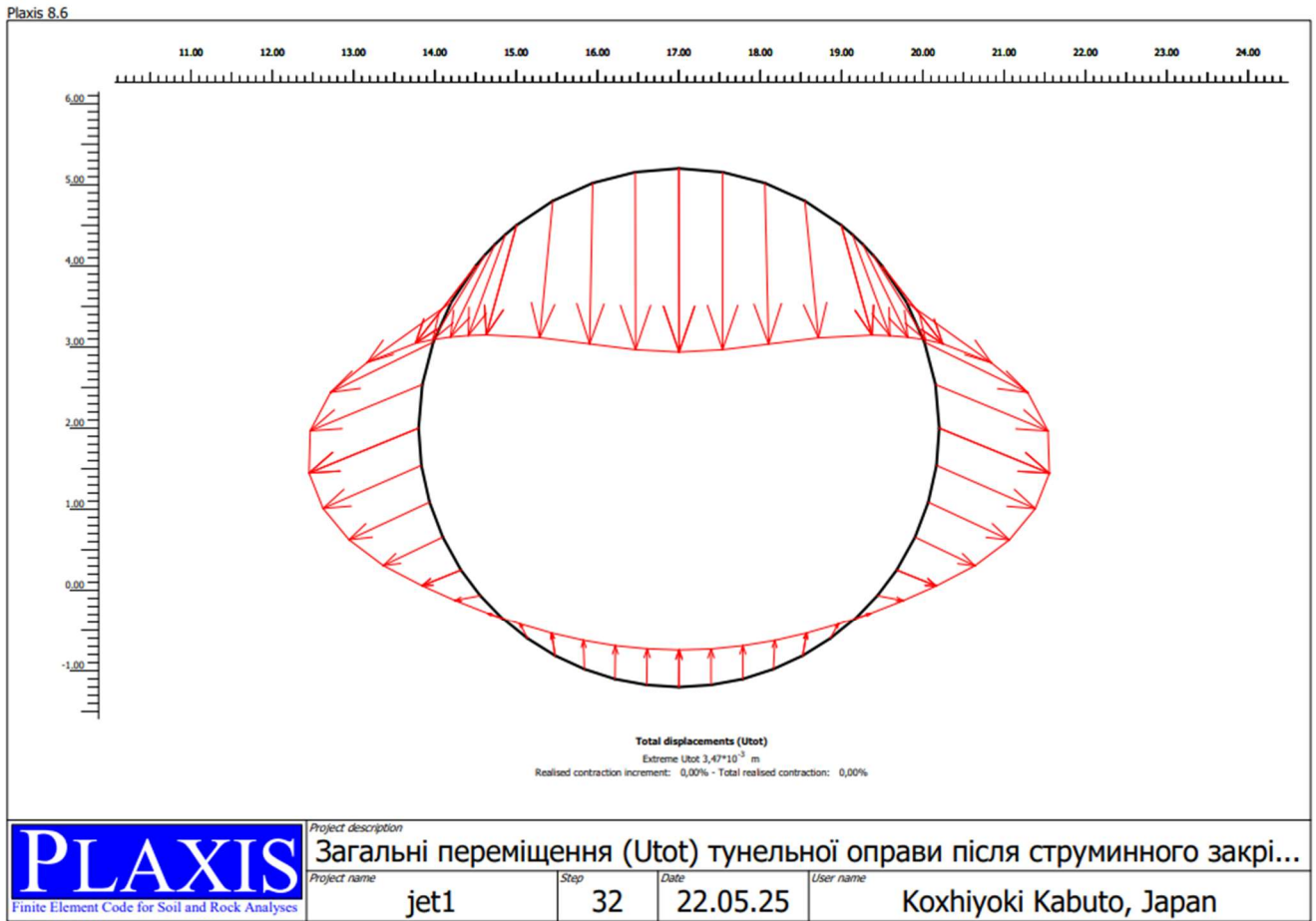


Рисунок 4.9 – Загальні переміщення (Utot) тунельної оправи після струминного закріплення

Максимальне значення загальних переміщень після реалізації струминного закріплення становить $\sim 3,47 \times 10^{-3}$ м. Це демонструє кращу ефективність порівняно з базовим варіантом та варіантом із підсиленою сорочкою, оскільки додатково зменшується деформація навколо оправи та покращується робота конструкції в зоні впливу ґрунтів. Також спостерігається значне зменшення деформації в районі лотка тунельної оправи.

4.7 Розрахункова модель із застосуванням хімічного закріплення ґрунтів

Останнім варіантом моделювання стало дослідження впливу хімічного закріплення ґрунтів у зоні контакту із тунельною конструкцією. Метод хімічного

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

закріплення передбачає введення у ґрунтовий масив спеціальних реагентів, що сприяють ущільненню, зменшенню проникності та підвищенню міцності ґрунту. Модель сформована шляхом створення кільцевої області з покращеними характеристиками навколо тунелю. Параметри закріпленого ґрунту наведено у таблиці нижче:

Таблиця 4.6 - Параметри закріпленого ґрунту

Параметр	Позначення	Значення
Об'ємна вага (суха/насичена)	$\gamma_{\text{unsat}} / \gamma_{\text{sat}}$	20,0 / 22,0 кН/м ³
Модуль деформації	E_{ref}	$3,000 \times 10^4$ кН/м ²
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,250
Питоме зчеплення	c_{ref}	50,000 кН/м ²
Кут внутрішнього тертя	ϕ	25,0°
Коефіцієнт фільтрації	k	$1,000 \times 10^{-8}$ м/добу

Застосування хімічного закріплення дозволяє суттєво знизити проникність ґрунту та підвищити його опір зсувним і контактним деформаціям. У наступному підрозділі буде наведено результати моделювання з оцінкою ефективності цього виду закріплення.

4.8 Результати моделювання із застосуванням всіх технологій по відновленню перігінного тунелю

Було виконано чисельне моделювання тунельної конструкції з урахуванням хімічного закріплення ґрунту у зоні контакту з оправою. Метод передбачає створення монолітного армувального масиву з покращеними механічними

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата						

характеристиками та зменшеною проникністю.

Нижче наведено деформовану сітку, карту загальних переміщень, векторне поле зміщень і розподіл зсувних напружень.

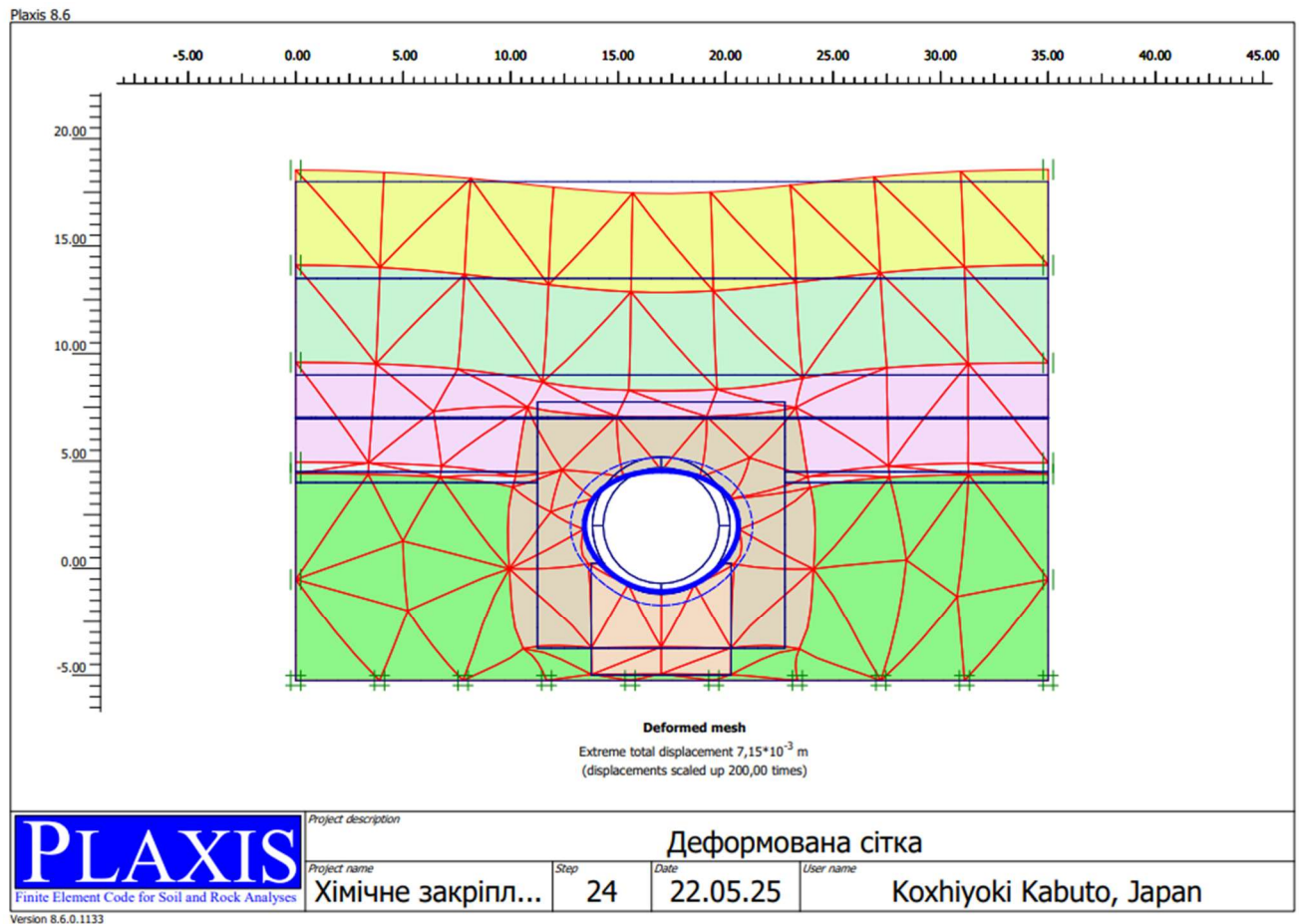


Рисунок 4.10 – Деформована сітка (масштаб деформації збільшено в 200 разів)

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

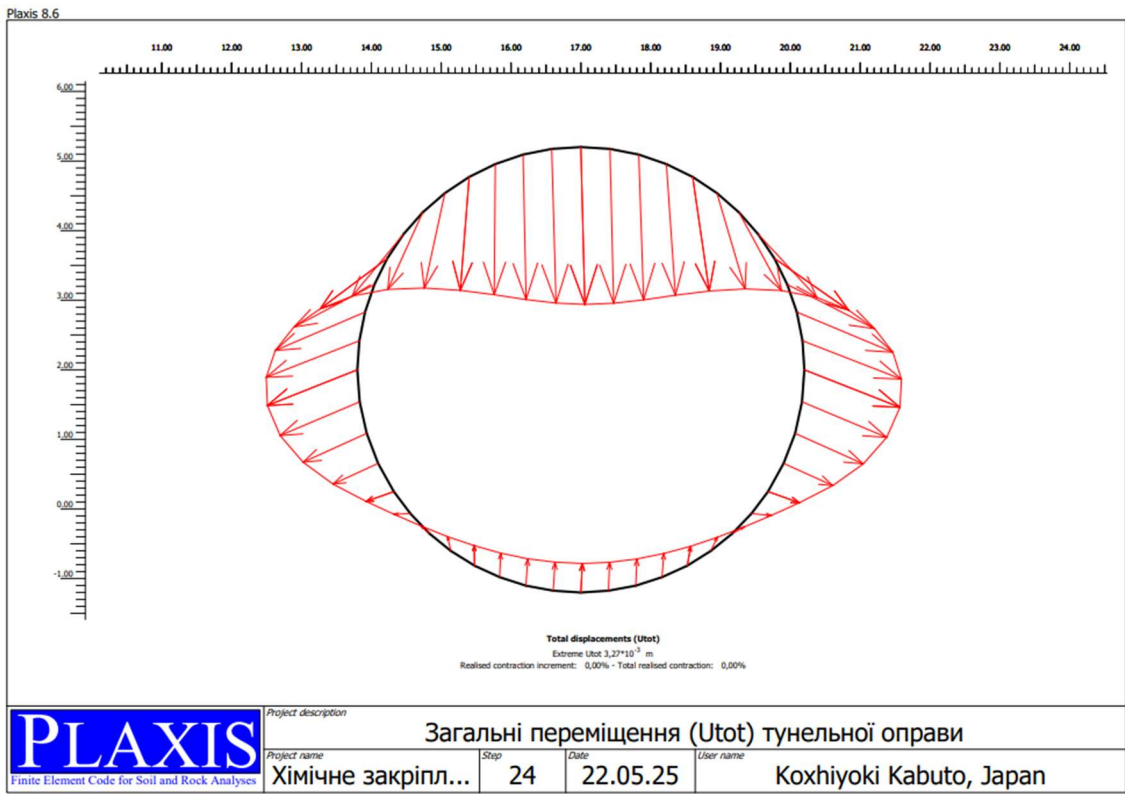


Рисунок 4.11 – Загальні переміщення (Utot) тунельної оправи

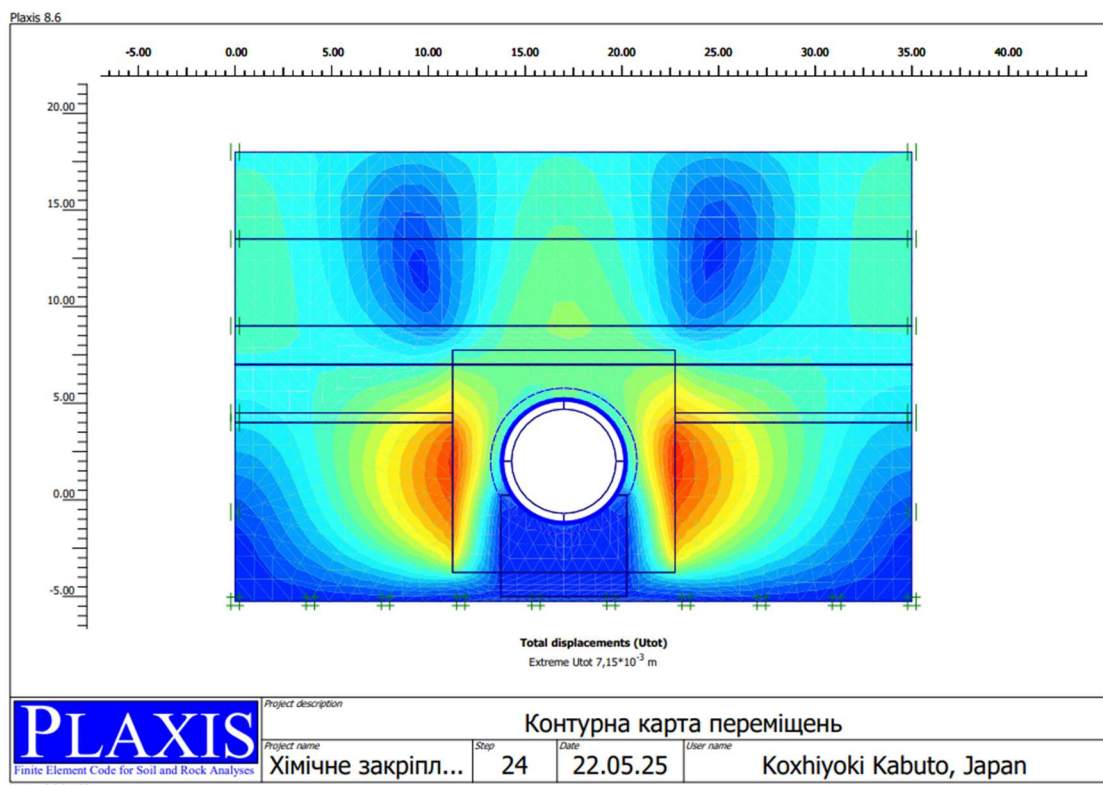


Рисунок 4.12 – Контурна карта переміщень

Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата

1698-с.ОС-11.007

Арк.

Максимальне переміщення становить $\sim 7,15 \times 10^{-3}$ м, за тунельною оправою, на горизонтальних межах хімічного закріплення. Контура переміщень стали більш симетричними, зона інтенсивного впливу суттєво звузилася — особливо в нижній частині тунелю. Максимальне переміщення тунельної оправи у варіанті з хімічним закріпленням становить $3,27 \times 10^{-3}$ м, що демонструє ще кращий результат в порівнянні з іншими технічними рішеннями.

4.9 Висновок до розділу моделювання

У рамках даного дослідження було змодельовано чотири основні варіанти конструктивного підсилення перегінного тунелю метрополітену, кожен із яких мав на меті зменшити деформації тунельної оправи в умовах підвищених водопритоків.

Базова модель без підсилення продемонструвала таке значення загальних переміщень – до $11,63 \times 10^{-3}$ м. Це вказує на значний вплив гідрогеологічних умов на тунельну конструкцію та недостатню ефективність лише існуючої оправи.

Підсилення тунельної оправи залізобетонною сорочкою дозволило знизити переміщення майже втричі — до $4,13 \times 10^{-3}$ м. Це підтверджує ефективність геометричного та конструктивного підсилення елемента, що сприймає зовнішній тиск.

Застосування струминного закріплення ґрунтів (Jet Grouting) продемонструвало ще кращі результати — максимальні переміщення зменшилися до $3,47 \times 10^{-3}$ м. Формування кільцевої області підвищеної жорсткості навколо тунелю сприяло зниженню напруженого стану та деформацій у зоні контакту.

Хімічне закріплення ґрунтів дало покращений результат серед усіх варіантів — загальні переміщення становили $3,27 \times 10^{-3}$ м. Завдяки значному зниженню проникності та покращенню міцнісних характеристик ґрунту, забезпечено ефективну стабілізацію конструкції.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

Усі три технічні рішення дозволили досягти суттєвого зменшення деформацій у порівнянні з базовою моделлю. Ефективність продемонстрували всі варіанти, що показує доцільність до впровадження у випадках підвищених водопритоків.

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

5. КОШТОРИСНИЙ РОЗРАХУНОК

5.1 Витрати праці, час роботи машин, матеріали

У процесі реалізації капітального ремонту перегінного тунелю лінії Київського метрополітену було визначено основні види ресурсів, необхідних для виконання запроєктованих будівельно-монтажних та спеціальних робіт.

Тунель проходить у складних гідрогеологічних умовах, що обумовлює необхідність застосування як традиційних, так і спеціалізованих технологій: армування, ін'єктування, хімічне та струменеве закріплення ґрунтів (jet grouting), влаштування гідроізоляції. Відповідно, у таблиці нижче узагальнено трудові ресурси, експлуатаційний час машин і механізмів, а також обсяг основних будівельних матеріалів, які застосовуються в межах ремонтних робіт.

Найбільшу трудомісткість мають роботи з монтажу арматури та бетонування захисної обійми тунелю, а також комплекс заходів із закріплення ґрунтів. Витрати машинного часу розраховано для спеціалізованого обладнання, яке працює в обмеженому тунельному просторі. Узагальнені витрати ресурсів наведені у таблиці 5.1:

Таблиця 5.1 - Узагальнені витрати ресурсів

Найменування ресурсу	Одиниця виміру	Орієнтовна кількість
Загальні витрати праці	люд.-год.	4273
Бетонозмішувачі примусової дії	маш.-год.	24
Установка для ін'єктування	маш.-год.	36,5
Бурові установки	маш.-год.	42
Jet grouting машини	маш.-год.	54

1698-с.0С-11.007

Зам. інв.№						1698-с.0С-11.007			
	Зм.	Кіль	Арк	№ док.	Підпис		Дата	Стадія	Аркцш
Інв. № орг.						Кошторисний розрахунок	ТЕР	1	1
	Розробив	Лук'янчук М.А.					КПІ ім. Ізоря		
	Перевірів	Гайко Г.І.					Сікорського НН ІЕЕ		
	Н. контр.	Ган А.Л.							

Бетон В30 і В40	м ³	270
Арматура А500С, А240	т	18,3
Ін'єкційні суміші	т	11,5
Гідроізоляція (рулонна, мастики)	м ²	300
Піщано-гравійна суміш	м ³	56

5.2 Кошторисна вартість будівництва

Кошторисна вартість будівництва є основним узагальненим показником економічної оцінки відновлювальних робіт на об'єкті. Розрахунок кошторисної вартості проводився на основі локальних кошторисів із наданих матеріалів, а також із урахуванням підготовчих та супровідних робіт. Враховано всі основні етапи будівництва: демонтаж пошкоджених фрагментів, очищення та підготовка основи, армування, бетонування оправи, хімічне та струменеве закріплення ґрунтів, гідроізоляційні роботи, супровідні витрати. Узагальнені кошторисні показники подані в таблиці нижче.

Таблиця 5.2 – Орієнтовна кошторисна вартість капітального ремонту перегінного тунелю

Найменування етапу робіт	Орієнтовна вартість, грн
Підготовчі роботи (очищення, доступ, освітлення)	245 000
Демонтаж зруйнованих бетонних фрагментів	320 000
Влаштування арматурного каркасу	615 000

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ доцм.	Підпис	Дата		

Улаштування бетонної обойми	980 000
Ін'єктування тріщин та пустот	480 000
Струмене́ве закріплення ґрунтів (jet grouting)	1 250 000
Хімічне закріплення ґрунтів	820 000
Влаштування гідроізоляції	610 000
Відновлення відводів води	190 000
Тимчасові споруди та електроживлення	175 000
Сезонне подорожчання (зимовий період)	120 000
Інші витрати (охорона праці, адміністративні)	463 723,80
Разом	6 268 723,80

5.3 Кошторисна вартість матеріалів

Матеріали становлять вагому частину загальної вартості робіт з капітального ремонту перегінного тунелю. Основними напрямками витрат є бетон, арматура, ін'єкційні та гідроізоляційні суміші, хімічні компоненти для закріплення ґрунтів, а також допоміжні будівельні матеріали.

Оцінка кошторисної вартості матеріалів здійснювалася на основі локальних кошторисів, середньоринкових цін на момент складання дипломного проєкту, а також із врахуванням кількісних обсягів, наведених у таблиці ресурсів (див. табл. 5.1). Нижче наведено узагальнену таблицю матеріальних витрат.

Таблиця 5.3 – Орієнтовна кошторисна вартість матеріалів

						1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата			

5.5 Зведений кошторисний розрахунок вартості будівництва

Зведений кошторисний розрахунок містить повний перелік витрат, необхідних для реалізації проекту капітального ремонту перегінного тунелю метрополітену. У ньому враховано витрати на матеріали, експлуатацію машин і механізмів, оплату праці, вартість будівельно-монтажних робіт, сезонні надбавки, витрати на тимчасові споруди, адміністративні витрати та інші супутні витрати.

Цей розрахунок дозволяє оцінити повну вартість реалізації проекту та використовується як основа для формування бюджету замовника і визначення доцільності будівництва.

Таблиця 5.5 – Зведений кошторисний розрахунок вартості капітального ремонту перегінного тунелю

Найменування статті витрат	Орієнтовна вартість, грн
Вартість матеріалів	2 108 000
Вартість експлуатації машин та механізмів	366 000
Заробітна плата та соціальні внески	1 290 000
Будівельно-монтажні роботи	1 250 000
Тимчасові будівлі, освітлення, вентиляція	175 000
Гідроізоляція, захист конструкцій	610 000
Витрати на струменеве та хімічне закріплення ґрунтів	2 070 000
Сезонні надбавки (роботи в зимовий період)	120 000
Адміністративні та супутні витрати	463 723,80

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Загальна кошторисна вартість	8 452 723,80
-------------------------------------	---------------------

5.6 Висновок до розділу

У даному розділі було виконано комплексний кошторисний розрахунок капітального ремонту перегінного тунелю Київського метрополітену. Оцінено витрати на основі реальної проектної документації, із застосуванням методичних підходів до виробничого нормування, ресурсних таблиць, а також з урахуванням специфіки будівництва у складних гідрогеологічних умовах.

Були визначені основні статті витрат: витрати праці, машинного часу і матеріалів; кошторисна вартість будівництва; вартість матеріалів і експлуатації механізмів; загальний зведений кошторис;

Загальна орієнтовна вартість реалізації проекту становить 8 452 723,80 грн, що включає прямі й непрямі витрати, пов'язані з підготовкою, виконанням і супроводом будівельних робіт.

Проведені розрахунки свідчать про техніко-економічну доцільність проекту та забезпечують основу для планування бюджету, визначення потреб у ресурсах, а також розробки графіка виробництва робіт.

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

6.2 Шкідливі та небезпечні виробничі фактори і засоби захисту

Капітальний ремонт виконується в складних підземних умовах, що супроводжуються впливом широкого спектра шкідливих та небезпечних виробничих факторів. Їх своєчасне виявлення, оцінка ступеня ризику та впровадження належних захисних заходів є обов'язковою умовою безпечного виконання будівельно-монтажних робіт.

Основні фактори виробничої безпеки:

1. Фізичні фактори: Підвищена вологість, знижена температура, недостатня освітленість; інтенсивне шумове навантаження, зумовлене роботою будівельної техніки (бурильні установки, насосне обладнання, компресори); вібрації та електромагнітні коливання, що виникають у процесі роботи механізмів; обмеження в просторі, обмеження руху, обмежений доступ до природного провітрювання.

2. Хімічні фактори: вплив цементно-піщаних, полімерних і хімічно активних сумішей, що застосовуються під час ін'єктування тріщин і зміцнення ґрунтів; ймовірність утворення парів летких речовин у замкнутому просторі тунелю; наявність будівельного пилу, який може мати подразнюючу та алергенну дію.

3. Механічні та техногенні фактори: ризик травмування працівників під час монтажу або демонтажу важких елементів обійми, інструментів та опалубки; загроза ураження електричним струмом унаслідок експлуатації електрифікованого обладнання у вологому середовищі; потенційна небезпека часткового обвалу порід при веденні ремонтних робіт у зонах зі зниженою стійкістю.

Засоби індивідуального захисту: усі працівники, залучені до робіт на об'єкті, зобов'язані бути забезпечені такими захисними касками, протидарні захисні окуляри або щитки, респіратори відповідного класу захисту або напівмаски з фільтрами, вогнестійкий та вологозахисний спецодяг, діелектричні рукавиці,

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата						

1698-с.ОС-11.007

чоботи, жилети підвищеної видимості, засоби для захисту слуху у зонах з перевищенням допустимого рівня шуму.

До засобів колективного захисту, що забезпечують безпечні умови праці під час ремонтних робіт, належать - системи примусової вентиляції з багаторазовою фільтрацією повітря; освітлювальні системи аварійного та основного типу з автономним живленням; засоби дренажу для відведення ґрунтових та інфільтраційних вод; тимчасові огороження небезпечних зон, сигнальні знаки, схеми евакуації; системи відеоспостереження, радіозв'язку та оперативного сповіщення; засоби пожежогасіння, аптечки, комплекти для надання домедичної допомоги.

Усі засоби індивідуального та колективного захисту повинні відповідати чинним технічним регламентам, мати сертифікати відповідності, перебувати в справному стані та перевірятись перед кожним використанням. Працівники зобов'язані пройти інструктаж щодо правил експлуатації засобів захисту, що фіксується у відповідному журналі обліку.

6.3 Організація безпечного ведення робіт

Організація безпечного ведення будівельно-монтажних робіт у межах об'єкта є ключовим елементом комплексного управління ризиками. Особливості підземного простору, підвищена вологість, обмежений доступ до повітря, ризик підтоплень і обвалів, а також складність евакуаційних шляхів, зумовлюють необхідність впровадження спеціальних заходів з охорони праці.

В основі безпечної організації робіт лежить детальне попереднє планування, яке охоплює розроблення та погодження проєкту виробництва робіт. У ньому мають бути чітко визначені технологічна послідовність виконання робіт, розміщення будівельної техніки, зон небезпеки, маршрутів евакуації, а також графік чергування персоналу. Крім того, визначаються відповідальні особи за дотримання вимог

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата						

охорони праці в межах кожної ділянки, а також встановлюються правила контролю та допуску працівників до робіт.

Перед початком кожного етапу виконуються відповідні інструктажі з техніки безпеки, серед яких обов'язковими є вступний, первинний, повторний та цільовий. Їх проведення фіксується у спеціальних журналах відповідно до норм чинного законодавства. Допуск до робіт здійснюється лише за наявності відповідного наряду-допуску, а для сторонніх осіб передбачено обмежений доступ до зони виконання робіт.

Безпечне виконання робіт забезпечується також організацією стабільного двостороннього зв'язку між працівниками та черговими службами об'єкта. Важливим компонентом є система примусової вентиляції, яка здійснює подачу свіжого повітря та відведення забрудненого, що забезпечує належні санітарно-гігієнічні умови. Систематичний контроль параметрів повітряного середовища, у тому числі концентрації шкідливих газів і пилу, виконується за допомогою переносних газоаналізаторів і фіксується у відповідних протоколах.

Особливу увагу приділяють безпечному транспортуванню матеріалів, обладнання та людей. Переміщення здійснюється по заздалегідь визначених маршрутах, що виключають перетин з зонами робіт підвищеної небезпеки. Усі шляхи переміщення позначаються сигнальними табличками та освітлюються переносними джерелами світла низької напруги (12–36 В), що знижує ризик електротравматизму у вологому середовищі.

З урахуванням тривалого перебування працівників у підземних умовах, організовується змінний режим роботи з тривалістю зміни не більше шести годин. Передбачені регламентовані перерви для відпочинку через кожні півтори-дві години. У випадку виконання робіт у нічний час, вводиться чергування відповідальних осіб за техніку безпеки та безперервне освітлення аварійних виходів.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

1698-с.ОС-11.007

Загалом, організація безпечного ведення робіт базується на дотриманні вимог чинної нормативної документації, зокрема ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва» [17], ДБН В.2.3-7:2018 «Метрополітени» [18], а також положень системи стандартів безпеки праці. Реалізація вищезазначених заходів дозволяє істотно знизити рівень виробничого травматизму, запобігти виникненню аварійних ситуацій і забезпечити збереження життя та здоров'я працівників на об'єкті.

6.4 Висновок до розділу

У межах виконання капітального ремонту лінії метрополітену питання охорони праці мають пріоритетне значення. Умови підземного будівництва супроводжуються підвищеним рівнем виробничих ризиків, пов'язаних із фізичними, хімічними, техногенними та організаційними факторами. Це вимагає системного підходу до забезпечення безпечного середовища на всіх етапах реалізації проєкту.

Проведений аналіз свідчить про необхідність дотримання норм чинної нормативної документації, зокрема ДБН, ДСТУ та галузевих стандартів, а також забезпечення працівників усіма необхідними засобами індивідуального та колективного захисту. Особливу увагу приділено організації безпечного ведення робіт: розробленню ППР, проведенню інструктажів, створенню ефективної системи контролю, зв'язку та евакуації.

Застосування відповідних технічних, організаційних і профілактичних заходів дозволяє мінімізувати ризики професійних захворювань, травматизму та надзвичайних ситуацій. Таким чином, реалізація комплексу заходів з охорони праці є необхідною умовою для досягнення високої ефективності та безпеки будівельно-монтажних робіт у складних підземних умовах.

						1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата			

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Козлов К. Київський метрополітен: хронологія, події, факти / К. Козлов. – Київ : Варто, 2011. – 256 с.
2. Геоінженерія мегаполіса: підземна урбаністика : підручник / В. Г. Кравець, Г. І. Гайко, А. Л. Ган та ін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. – 660 с. ISBN 978-966-990-106-4 Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65405> (дата звернення: 02.06.2025).
3. Brinkgreve, R.B.J. et al. Plaxis 2D Reference Manual. Delft University of Technology & Plaxis BV, 2020.
4. Деміївська (станція метро) [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Деміївська_\(станція_метро\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Деміївська_(станція_метро)) (дата звернення: 02.06.2025).
5. Айвазов Ю. М. Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУУ, 2005. – Т. 1. – 186 с.
6. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 « Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія ».
7. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України ».
8. ДБН А.2.1-1-2008 Інженерні вишукування для будівництва ».
9. ДСТУ Б ГОСТ 23961:2011 Метрополітени. Габарити наближення будівель, обладнання і рухомого складу.
10. Croce P. Jet Grouting: Technology, Design and Control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. – New York : CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. – 298 p.
11. Kanematsu H. High pressur jet grouting method. Civil Construction. 1980. Vol. 21. No. 13. pp. 136–147.
12. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення.

Зам. інв.№

Підпис і дата

Інв. № орг.

1698-с.0С-11.007

Зм.	Кіль	Арк	№ док.	Підпис	Дата	Стадія	Аркцш	Аркцшів
						ТЕР	1	1
Розробив		Лук'янчук М				Список використаної літератури НТУУ КПІ		
Перевірів		Ган О.В.						
Н. контр.		Ган А.Л.						

13. ДБН В.2.3-27:2023 Тунелі. Норми проектування.
14. ДСТУ-Н Б В.2.1-28:2013 Настанова щодо проведення земляних робіт, улаштування основ та спорудження фундаментів (СНиП 3.02.01-87, MOD).
15. ДБН А.3.2-2-2009 Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12).
16. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.
17. ДБН А.3.1-5:2016 Організація будівельного виробництва.
18. ДБН В.2.3-7:2018 Метрополітени.
19. Затоплення тунелю у підрозділах КМДА, київському метрополітені і "Метробуді": проходять обшуки [Електронний ресурс] // Forbes Україна. – Режим доступу: <https://forbes.ua/news/zatoplennya-tunelyu-u-pidrozdilakh-kmda-kiivskomu-metropoliteni-i-metrobudi-prokhodyat-obshuki-13122023-17861> (дата звернення: 02.06.2025).
20. У КМДА кажуть, що ґрунт біля метро «Деміївська» просів: це може призвести до закриття станцій синьої гілки [Електронний ресурс] // Укрінформ. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-kyiv/3801340-u-kmda-kazut-so-grunt-bila-metro-demiiivska-prosiv-se-do-zakritta-sesti-stancij-sinoy-gilki.html> (дата звернення: 02.06.2025).
21. ДСТУ Б В.2.6–193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування.
22. Петренко В. І. Станції метрополітену: конструкції та спорудження / В. І. Петренко. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2012. – 164 с.
23. ДБН В.1.1-24-2009. Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування. – Чинний від 2009-12-07.
24. ДСТУ Б В.2.7–170:2008. Будівельні матеріали. Бетони
25. На тунель між «Деміївська» – «Либідська» чекає бетонна «сорочка»: що вже зроблено [Електронний ресурс] // Big Kyiv. – Режим доступу:

										1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата							

<https://bigkyiv.com.ua/na-tunel-mizh-demiyivska-lybidska-chekaye-betonna-sorochka-shho-vzhe-zrobleno/> (дата звернення: 02.06.2025).

					1698-с.ОС-11.007	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		