

В. О. Попов¹
І. О. Каялайнєн²
А. В. Попова³

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ КОМУНІКАЦІЙНОГО ТУНЕЛЮ ПІД АВТОДОРОЖНІМ ШЛЯХОПРОВОДОМ

¹Вінницький національний технічний університет

²SoftServe inc., м. Вінниця, Україна

³Донецький національний університет імені Василя Стуса, м. Вінниця

У статті описано раціональне конструктивне рішення заглибленого комунікаційного тунелю для прокладання інженерних мереж під автодорожнім шляхопроводом. Серед розглянутих конструктивних варіантів тунелю вибрано найбільш раціональний – у вигляді монолітної рамної «П»-подібної конструкції на плитних фундаментах. Доведено необхідність і раціональність улаштування підсилення ділянок тунелю, що заглиблені більше 5 м, шляхом улаштування системи зовнішніх контрфорсів. Запропоновані рішення впроваджені на проектуваному комунікаційному тунелі під земляним насипом шляхопроводу у м. Вінниці. Розроблено скінчено-елементні моделі напружено-деформованого стану на стандартному програмному комплексі «Lira-САПР», з урахуванням ґрунтових умов, тисків від земляної засипки та від автомобільного транспорту. Оцінено найбільш несприятливі комбінації навантажень. Доведено, що домінуючий вплив на заглиблені ділянки тунелю здійснює земляний насип. Для ділянок тунелю, які мало заглиблені, є потреба в улаштуванні перехідних конструкцій, які вирівнюють жорсткість основи під дорожнім покриттям.

Для запропонованої конструктивної форми тунелю виконано підбір раціональних геометричних параметрів за викладеною методикою, визначено найбільш небезпечні перерізи. Доведено, що найбільш навантаженими конструктивними елементами тунелю є балкові конструкції в місцях улаштування переходів між тунелем та суміжних вентиляційних камер. ригельна система, що підтримує перекриття тунелю, а також, конструкції фундаментної плити під прорізами. Виконані розрахунки підтверджують, з точки зору міцності і жорсткості, принципову можливість улаштування та раціональність обраного конструктивного тунелю, а також, використання конструкцій тунелю як тимчасового укриття.

Ключові слова: комунікаційний тунель, деформаційний блок, напружено-деформований стан, земляний насип, дорожнє покриття, динамічне автомобільне навантаження.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 01.04.2026

Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Попов В.О., Каялайнєн І.О., Попова А.В.

Вступ

Ця наукова робота продовжує авторське дослідження [1], присвячене раціональному проектуванню заглиблених тунелів для автодорожнього будівництва.

В умовах воєнного стану, транспортна інфраструктура міст та міжміських сполучень відіграє критичне значення для обороноздатності, зокрема, та для економіки країни, загалом. Водночас динаміка розвитку крупних обласних та районних центрів країни на пряму залежить від удосконалення вуличної дорожньої системи, в якій особливе місце займають магістральні міські дороги регульованого та нерегульованого руху, оскільки вони забезпечують безперервне функціонування логістики міста, основну масу товарообігу та переміщення людського ресурсу. Особливої уваги потребують, саме, зношені високо категорійні міжміські автодороги та магістральні вулиці обласних та районних центрів.

Відомо, що під міськими вулицями улаштовані численні комунікації різного призначення, причому, чим більшою є міська вулиця, тим більше комунікацій прокладено під нею. Впорядкування комунікацій, нагляд за технічним станом та постійне сервісне обслуговування створює важливі передумови їх довготривалої експлуатації та безаварійної роботи. Інженерний досвід доводить, що найбільш раціонально влаштовувати комунікації під дорогами у спільних тунелях, які улаштовують співосно вулиці.

Будь-яка магістральна вулиця крупного міста, зазвичай завантажена потужними транспортними потоками. Сумні реалії воєнного стану на сьогодні диктують необхідність створення тимчасових укриттів не тільки для мешканців будівель, а і для учасників дорожнього руху [2]. Улаштування

поодиноких надземних укриттів на зупинках громадського транспорту може забезпечити тільки незначний відсоток учасників дорожнього руху [3, 4]. Тому доцільним і актуальним є використання підземного простору під дорогою для створення протяжних та містких укриттів.

З робіт професора Сердюка В.Р. [5], відомо, що загальна зношеність мереж в Україні, особливо тепло- та водонесучих, в крупних містах перевищує 50%. Науковець підкреслює, що перспективна модернізація державних теплових мереж пов'язана з використанням попередньо ізольованих труб, прокладених у місцях, зручних для постійного огляду і догляду.

З досліджень науковців Алейнікової, А.І., Бондаренко Д.О., Булгакова В.В., Гармаша О.О. та ін. [8 – 11] відомо, що незадовільний технічний стан тунелів пов'язаний з недосконалістю конструктивних форм, руйнуванням основ, помилками при проектуванні, аварійним станом мереж, станом ізоляції та біогенною корозією. М. А. Лісневським, В. Т. Гузченко, Й.Й. Лучко у [12, 13] відзначено, що улаштування надійної гідроізоляції конструкцій тунелів є необхідним чинником їх тривалої експлуатації. Раціональним способом гідроізоляції підземних бетонних споруд тунелів є тампонаж порожнин пінополіуретанами, використання ремонтних матеріалів на основі мастик, а, також, утворення ґрунтоін'єкційних непроникних структур.

Розвинені країни світу накопичили величезний фонд комунікацій, оскільки їх кількість пропорційна кількості населення та рівню технологічного розвитку. Закордонні науковці приділяють особливу увагу питанням оптимізації конструкцій комунікаційних тунелів під дорожнім покриттям вулиць та автомобільних доріг. Аналізуючи загальносвітовий досвід проектування тунелів, фахівці дійшли до висновку, що комунікаційні тунелі вирішують важливу проблему уникнення геометричних колізій і конфліктів при прокладанні комунікацій [14 – 16]. Розроблена низка рекомендацій щодо раціонального розташування, заглиблення, форм та розмірів тунелів. При великій кількості різноманітних комунікацій рекомендовано розділяти тунелі на повздовжні відсіки вузького призначення, а, якщо кількість комунікацій незначна, доцільно створювати суцільний робочий об'єм розділений поперечними протипожежними перегородками.

Китайські інженери та вчені запропонували раціональну структуру укладання комунікацій у прохідних тунелях, а також, розробили методологію моделювання напружено-деформованого стану збірних комунікаційних тунелів з використанням сучасного програмного комплексу ABAQUS, [15, 16].

Узагальнюючи світове надбання за напрямком проектування магістральних та міжквартальних мереж [5 – 16] можна сформулювати основні принципи їх прокладання: доступність, зручність, ремонтпридатність, швидкість, економія коштів. Цим принципам відповідає улаштування комунікацій у тунелях під дорожнім покриттям вулиці. Отже, удосконалення конструктивних форм комунікаційних тунелів під вуличною мережею міста, їх пристосування для тимчасового укриття учасників дорожнього руху є важливою та актуальною науково-практичною задачею.

Постановка проблеми

Наукове узагальнення напрацювань вітчизняних і закордонних вчених свідчить, що проблема проектування надійних та економічних тунелів пов'язана з розробкою адекватних моделей їх напружено-деформованого стану із врахуванням сумісної роботи з ґрунтовою основою. Світовою наукою приділяється не достатня увага питанням забезпечення міцності основ та дорожнього покриття над кришками тунелів, особливо проблемі забезпечення плавного перерозподілу жорсткості у насипу. Таким чином постає завдання дослідження, яке полягає у розробленні раціональної конструкції та технології зведення тунелю під проектованим шляхопроводом із ґрунтовою засипкою над кришкою тунелю різної товщини на основі деталізованого скінчено-елементного моделювання. При цьому важливим є дослідження впливу товщини засипки на напружено-деформований стан тунелю та зворотного впливу.

Основна частина

Узагальнюючи практичний досвід з обстеження водопропускних, комунікаційних та пішохідних тунелів, труб та інших інженерних споруд, улаштованих під дорожнім покриттям у Вінницькій області, [1], а також, аналізуючи закордонні напрацювання [12 – 16], встановлено, що раціональною внутрішньою формою перерізу комунікаційних не заглиблених тунелів є прямокутна форма. Прикладом такої споруди є тунель загальною довжиною близько 300 м, який планується до будівництва під дорожнім покриттям шляхопроводу по магістральній вулиці Лук'яненка м. Вінниця

[17]. Проектований тунель служить для прокладання у ньому інженерних мереж, які переулаштовуються при будівництві шляхопроводу та потрапляють у пляму виконання будівельних робіт. Враховуючи рекомендації [15 – 16] розглянуто де-кілька варіантів організації внутрішнього простору (із розділенням проміжними перегородками на повздовжні відсіки та без розділення). Встановлення однієї чи де-кількох несучих повздовжніх вертикальних перегородок між кришкою та фундаментною плитою споруди, звичайно, зменшує пролітний згинальний момент, що дозволяє зекономити матеріал, збільшує загальну жорсткість конструкції. Однак додаткові протяжні конструктивні елементи суттєво утруднюють зведення та експлуатацію заглибленої споруди.

Кількісно та якісно аналізуючи комунікації, які необхідно перенести у тунель при будівництві шляхопроводу згідно з рекомендаціями [12 – 15] раціонально створити однокамерний поперечник прямокутної форми внутрішнім розміром 3,5 x 2,2 (h) м. Тунель конструктивно розділений по довжині деформаційними швами на блоки довжиною від 14 до 50 м. Виходячи з вимог раціонального проектування основні конструкції тунелю прийняті монолітними залізобетонними ненапруженими. Для мало заглибленої частини споруди із невеликим (до 3,5 м) земляним насипом над кришкою, використано пласкі несучі конструкції підосви, кришки та стін. Заглиблена частина тунелю (земляний насип над кришкою до 8,2 м) містить розширену плиту основи та стінки, що підсилені улаштуванням зовнішніх контрфорсів. Кожний деформаційний блок тунелю складається з фундаментної плити, стінок та кришки товщинами 500...600 мм. На кришці тунелю кожні 50 м улаштовано оглядові колодязі доступу.

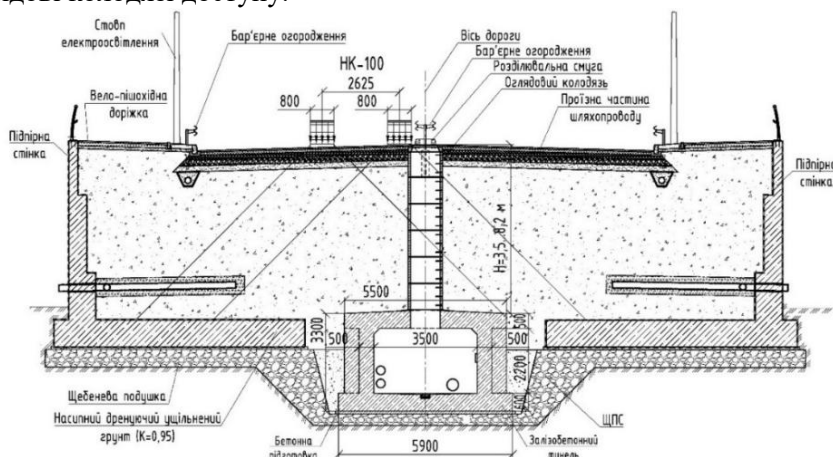


Рисунок 1 – Переріз заглибленої частини тунелю

Ґрунтові умови будівельного майданчика надзвичайно складні. На всій протяжності тунелю спостерігається високий рівень ґрунтових вод та підтопленість території. Основи фундаментів являють собою ґрунти з низькими фізико-механічними характеристиками – суглинки важкі, пилуваті, сіро-коричневі, сіро-жовтий, м'якопластичної консистенції, місцями з прошарками суглинку легкого, піщанистого. Ґрунтова основа на всій протяжності тунелю – неоднорідна.

Задача ефективного моделювання напружено-деформованого стану заглибленої споруди може бути реалізована тільки з використанням сучасних програмних комплексів типу ANSYS, ABAQUS, MIDAS тощо. Напружений стан тунелю, обраного для прикладу, був змодельований у тривимірній постановці за допомогою програмного комплексу для структурного аналізу та проектування «Lira-SAPR». Теоретичною основою використаної програми є метод скінчених елементів, що реалізує принцип можливих переміщень.

При моделюванні розглянуті дві невідгідних ділянки: ділянка тунелю із незначною товщиною дорожнього одягу, і, відповідно, спостерігається максимальний локальний тиск на конструкції кришки, від колісного транспорту (рис. 2,а) та ділянка тунелю, що залягає найглибше (рис. 2,б). Обидві ділянки можна розглядати як умовно незалежні, оскільки вони відділені від інших суміжних конструкцій деформаційними швами.

Моделі розрахункових фрагментів тунелю прийняті у вигляді просторових систем, що складаються із пластинчатих елементів із кроком дискретизації 100 x 100 мм. Згідно з рекомендаціями чинних норм [18] клас бетону основних конструкцій тунелю – В30 (С30/35). Прийнято, що все робоче повздовжнє армування виконано з арматурної сталі А400. Навантаження на конструкції тунелю змодельовані згідно з [19, 20].

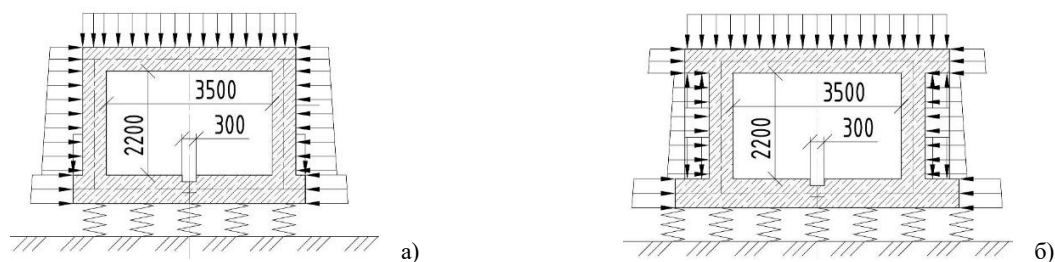


Рисунок 2 – Розрахункова схема поперечника проектного тунелю під дією тиску ґрунту у місці: а – неглибокого залягання (засипка до 3,5 м), б – значного заглиблення, із контрфорсами (товщина засипки більше 3,5 м)

При моделюванні враховані постійні і тимчасові впливи на тунель, які включають рухомий колісний вплив на дорожнє покриття екіпажу НК-100 та тимчасовий вплив на дорожнє покриття декількох екіпажів А-15. При розрахунку за 1-шою групою граничних станів використовувались розрахункові навантаження, за 2-гою групою граничних станів – експлуатаційні. Тривимірна візуалізація найбільш заглибленого фрагмента тунелю показана на рис. 3.

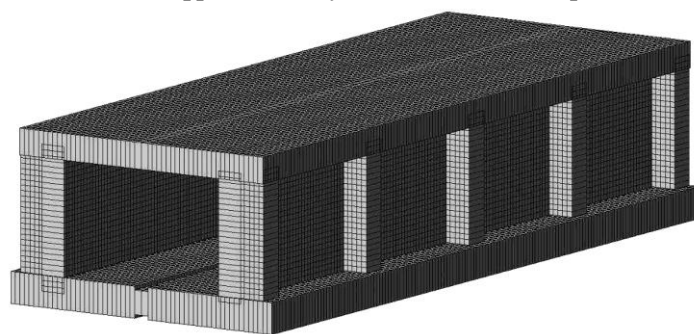


Рисунок 3 – Візуалізація розрахункової моделі заглибленого фрагмента тунелю із контрфорсами

Порівнянням варіантів завантажень встановлено, чотири двовісних екіпажі А-15 створюють через земляний насип та дорожнє покриття вищі тиски на кришку тунелю, аніж один екіпаж НК-100. Для визначення коефіцієнтів постелі основи під подошвою тунелю та для дослідження осідань тунелю були створені комбінації навантажень, які складаються тільки з постійних впливів. Після багатокрокового ітераційного визначення і уточнення коефіцієнтів постелі з урахуванням результатів інженерно-геологічних вишукувань був виконаний аналіз напружено-деформованого стану основних будівельних конструкцій тунелю при сумісному моделюванні тунелю та ґрунтової основи, а також, було проаналізовано деформації елементів системи. Моментні фактори у фундаментній плиті розрахункового фрагмента тунелю при невідгідній комбінації впливів із тимчасовим навантаженням 4 x А-15 показані на рис. 4.

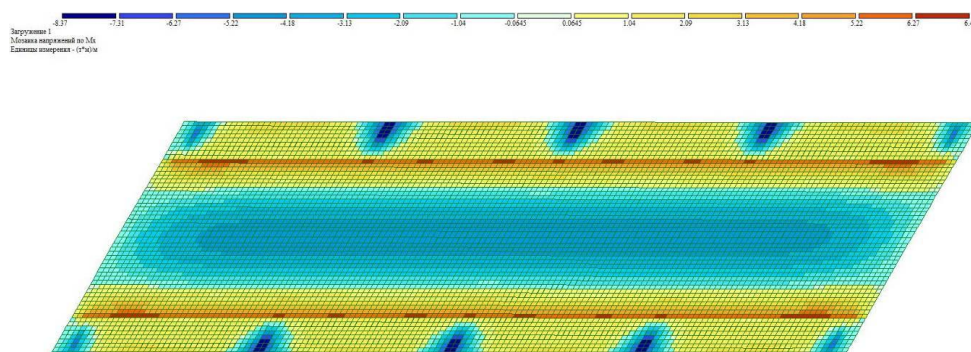


Рисунок 4 – Згинальні моменти в днищі підсиленого тунелю, M_x , тм/м.п

Завантаженими є ділянки, які знаходяться у місці примикання фундаментної плити до стінок та контрфорсів. Згинальні моменти при впливі найбільш невідгідної (основної) комбінації навантажень (чотири екіпажі А-15 з урахуванням натопу пішоходів в межах тротуарної частини) у повздовжньому напрямку складають $M_{x, \max} = +64,5 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$, $M_{x, \min} = -83,7 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$, у поперечному напрямку $M_{y, \max} = +345 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$, $M_{y, \min} = -244 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$. Додатні моменти впливають на нижнє армування, від’ємні – на верхнє.

Порівнюючи значення згинальних моментів у повздовжньому та поперечному напрямку бачимо, що у поперечному напрямку моменти набагато вищі. За вказаними граничними значеннями згинальних моментів було виконано підбір робочого армування небезпечних зон фундаментної плити за першою групою граничних станів за нормальними перерізами в прольоті (за методикою розділу 3 ДБН В.2.3-14:2006 [21]) за таким алгоритмом. Розрахункові поперечники фрагментів фундаментної плити показаний на рис. 5.

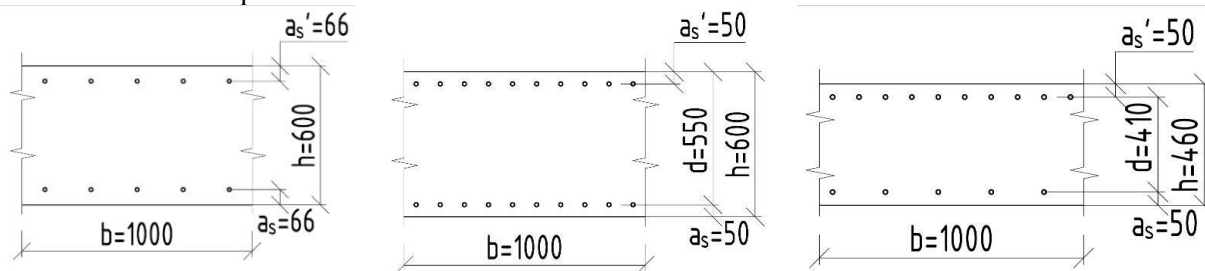


Рисунок 5 – Розрахункові перерізи фундаментної плити для перевірки армування: а – вздовж 0x (вздовж осі тунелю); б – поблизу стінок вздовж 0y, в – в прольоті, вздовж 0y, у місці дренажного лотка

Аналітичний розрахунок армування. Як приклад взятий розрахунок нижнього армування по 0x (вздовж тунелю). Робоча висота перерізу $h_0 = d = h - a_s = 534$ мм.

Площу нижньої розтягнута не напружувана арматура класу А400 ($R_s = 350$ МПа) визначено з конструктивних міркувань за мінімальним відсотком армування $A_s = 1005$ мм². Фактична висота стиснутої зони бетону, виходячи з формули (3.18) [19], вираз (1):

$$x = \frac{R_s \cdot A_s + R_p \cdot A_{sp} - R_{sc} \cdot A'_s - \sigma_{pc} \cdot A'_{sp}}{R_b \cdot b}, [m]. \quad (1)$$

Розтягнута напружувана арматура відсутня $A_{sp} = 0$; стиснута попередньо напружувана арматура відсутня $A'_{sp} = 0$; для бетону прийнятого бетону В30, $R_b = 15,5$ МПа; ширина фрагмента $b = 1000$ мм.

Виходячи з попереднього припущення, що верхня арматура плити не включається в роботу стиснутого бетону приймаємо $A'_s = 0$. Підставляючи відомі величини у (1) та спрощуючи вираз, отримуємо $x = 0.023$ м. Оскільки ($x = 23$ мм) < ($a_s' = 66$ мм), попереднє припущення про те, що верхня арматура плити не включається в роботу стиснутого бетону, підтверджене.

Фактична відносна висота стиснутої зони бетону розраховується за виразом (2):

$$\xi = x / h_0, [-] \quad (2)$$

Підставляючи відомі величини у (2), отримуємо: $\xi = 0.043$.

Характеристика $\omega = 0.85 - 0.008 \cdot R_b = 0.85 - 0.008 \cdot 15.5 = 0.726$.

Напруження $\sigma_1 = R_s = 350$ МПа; $\sigma_2 = 500$ МПа.

Гранична відносна висота стиснутої зони бетону визначається за (3.16) [22], вираз (3):

$$\xi_y = \frac{\omega}{1 + \sigma_1 / \sigma_2 \cdot (1 - \omega / 1.1)}, [-] \quad (3)$$

Підставляючи відомі величини у (3), отримуємо: $\xi_y = 0.586$. Оскільки $\xi = 0.043 < \xi_y = 0.586$. Умову п. 3.62 [21] виконано.

Граничний згинальний момент, який може витримати умовний прямокутний переріз фрагмента фундаментної плити, знаходимо за формулою (3.17) ДБН В.2.3-14:2006 [21], вираз (4):

$$M_u = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_{01} - a_s') + \sigma_{pc} \cdot A'_{sp} \cdot (h_0 - a_{sp}'), [кН \cdot м]. \quad (4)$$

Спрощуючи вираз (4) при $A'_{sp} = 0$, $A'_s = 0$ отримуємо: $M_{ux} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x) = 186$ (кН · м). Оскільки ($M_x \cdot \gamma_r = 64.5 \cdot 1,0 = 64.5$ кН · м) < ($M_{ux} = 186$ кН · м). Умову міцності виконано. Коефіцієнт використання перерізу – 0.35. Розрахунок верхнього армування, на опорі в напрямку 0x виконано аналогічно. Коефіцієнт використання перерізу – 0.45.

Результати автоматизованого підбору армування фундаментної плити найбільш навантаженого фрагмента підсиленого тунелю при впливі невідгідної комбінації навантажень, що включають

постійні та тимчасові колісні впливи показані на рис. 6, 7. Для інших конструкцій тунелю були виконані аналогічні розрахунки. Згідно з результатами автоматизованого підбору потрібне армування верхньої грані фундаментної плити в центральній зоні в місці улаштування дренажного лотка в робочому напрямку (вздовж осі 0y) на 1 м.п. довжини складає $A_{yui}' = 1270 \text{ мм}^2 / \text{м.п.}$, для нижньої грані в зоні примикання до стінок $A_{yui} = 1900 \text{ мм}^2 / \text{м.п.}$. Підібране за аналітичним розрахунком по 1-й та 2-й групі граничних станів армування напружених ділянок фундаментної плити (стрижні діаметром 16 мм класу А400), крок 100 мм в робочому напрямку 0y $A_{yui} = A_{yui}' = 2010 \text{ мм}^2 / \text{м.п.}$ для верхньої та нижньої зони плити більше потрібного за програмним розрахунком. Армування верхньої грані фундаментної плити в зоні примикання до контрфорсів в не робочому напрямку осі 0x складає $A_{xui}' = 769 \text{ мм}^2 / \text{м.п.}$. Армування нижньої грані складає $A_{xui} = 566 \text{ мм}^2 / \text{м.п.}$. Підібране за аналітичним розрахунком по 1-й та 2-й групі граничних станів армування напружених ділянок фундаментної плити (стрижні діаметром 16 мм класу А400), крок 200 мм в не робочому напрямку по 0x на 1 м.п. довжини $A_{xui} = A_{xui}' = 1005 \text{ мм}^2 / \text{м.п.}$ для верхньої та нижньої зони плити більше потрібного за програмним розрахунком. Потрібне робоче поперечне армування в зоні примикання до стінок на 1 м² складає $A_{svu} = 1270 \text{ мм}^2$. З конструктивних міркувань у небезпечних зонах встановлюємо вертикальне армування у вигляді стрижнів діаметром 10 мм класу А240 із кроком 100 мм у 3 ряди по 6 стрижнів на 1 м.п. $A_{sv} = 1413 \text{ мм}^2$ більше потрібного за програмним розрахунком.

Аналогічні аналітичні і програмні розрахунки параметрів армування було виконано і для інших конструктивних елементів тунелю (стінок, контрфорсів та кришки) у різних небезпечних місцях, включаючи ділянки із неглибокою засипкою, ділянок з прорізами тощо.

Програмно підібране робоче повздовжнє та поперечне армування повністю підтверджує результати аналітичних розрахунків. Міцність та тріщиностійкість фундаментної плити конструкцій тунелю забезпечені.

Характерне армування поперечника заглибленої частини тунелю, розроблене на основі виконаних розрахунків за методикою граничних станів, показано на рис. 8.

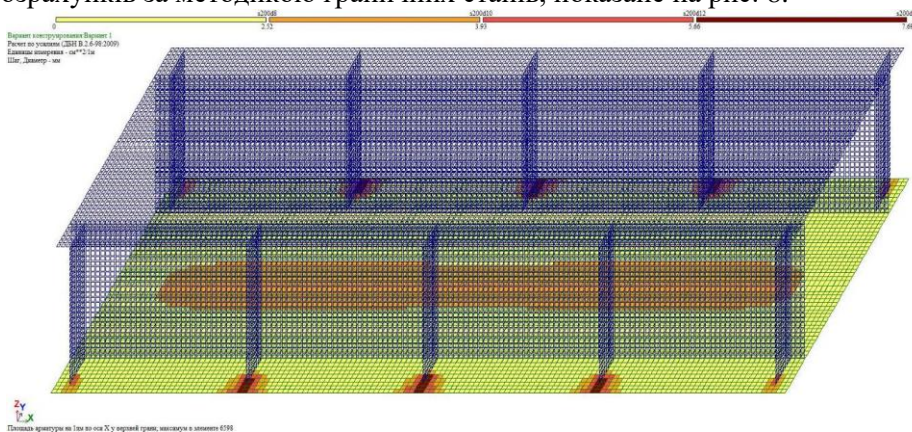


Рисунок 6 – Потрібне за розрахунком армування верхньої грані фундаментної плити заглибленої частини тунелю вздовж тунелю (по 0x)

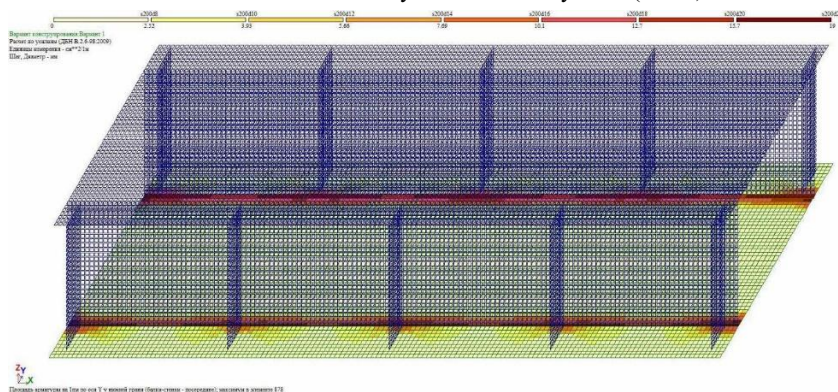


Рисунок 7 – Потрібне за розрахунком армування нижньої грані фундаментної плити по 0y (поперек тунелю)

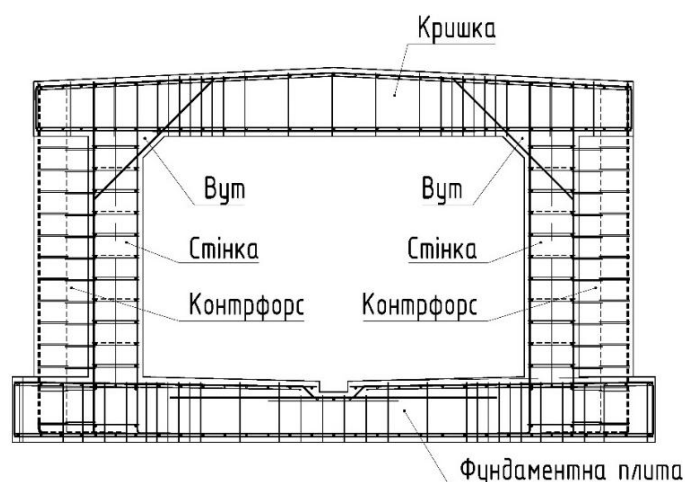


Рисунок 8 – Армування поперечника заглибленого фрагмента тунелю в місці улаштування контрфорсів

Результати розрахунку деформацій (прогинів) та осідань конструкцій тунелю показують, що відносні прогини елементів кришки і фундаментної плити розрахункового фрагмента тунелю, $\Delta f = 3 \text{ мм}$, що менше гранично допустимого значення для залізобетонних монолітних плитних конструкцій $f_u = 17.5 \text{ мм}$. Умову жорсткості конструкцій виконано. Граничні осідання фундаментів підсиленого тунелю згідно з [21], п. 1.65 слід приймати, як для фундаментів споруд.

Згідно з п. 1.64 гранична величина нерівномірності осідання не повинна перевищувати величини: $f_u = 0.5 \cdot \sqrt{l} = 0.5 \cdot \sqrt{14.56} = 1.9 (\text{см}) = 19 (\text{мм})$. $\Delta f = 3 \text{ мм} < f_u = 19 \text{ мм}$. Умову жорсткості основ виконано.

При моделюванні встановлено, що повне фактичне осідання фундаментної плити $f = 92 \text{ мм}$ при постійних навантаженнях (експлуатаційне значення). Це осідання менше гранично допустимого загального осідання f_u : $f = 92 \text{ мм} < f_u = 200 \text{ мм}$, умову жорсткості елементів фундаментної плити виконано. Таким чином, жорсткість конструкцій найбільш заглибленого фрагмента тунелю забезпечена. Деформації основ не перевищують нормативних значень.

Всі умови міцності, жорсткості, тріщиностійкості, осідання основ для будівельних конструкцій тунелю та підстиляючих ґрунтів забезпечуються.

В результаті моделювання дорожнього одягу шляхопроводу над тунелем на ділянках із незначною товщею засипки над кришкою (до 1 м), встановлено, що, внаслідок різниці жорсткості залізобетонних конструкцій тунелю та ґрунтової засипки виникає велика різниця у піддатливості основи покриття, та перенапруження ділянок одягу. Тому на цих ділянках тунель рекомендується обладнати перехідними заглибленими конструкціями, які вирівнюють жорсткість основи та, відповідно, згладжують реактивний тиск основи під дорожнім покриттям. Для цього на стінках необхідно улаштувати трапецеїдальні опорні консолі. Крім того, через високий рівень ґрунтових вод рекомендується улаштування пристінного дренажу споруди тунелю (рис. 9).

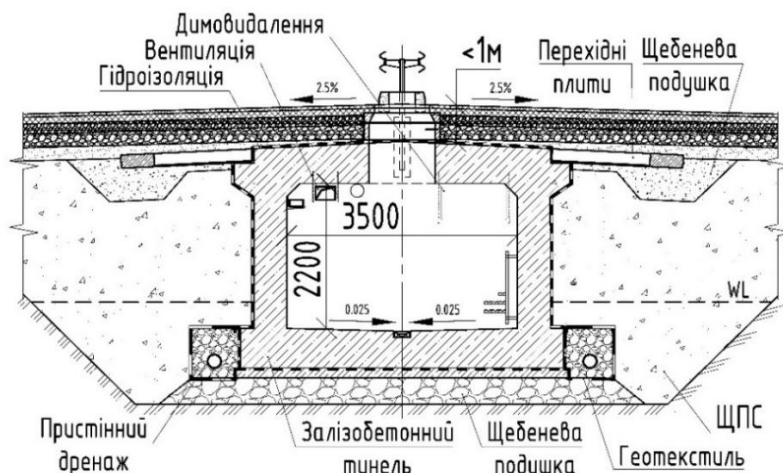


Рисунок 9 – Рекомендований поперечник мало заглибленої ділянки тунелю

Враховуючи великий протяжний будівельний об'єм споруди, високу міцність та жорсткість її будівельних конструкцій, заглибленість у ґрунті можна рекомендувати використання запропонованої споруди у якості найпростішого укриття (залізобетонного бліндажу) для здійснення тимчасового захисту учасників дорожнього руху на час воєнних дій. Звісно, це можливо за умови відповідного маскуванню та дообладнання комунікаційного тунелю, в тому числі, засобами вентиляції, димовидалення, іншими протипожежними системами, та після прибудови додаткових приміщень сантехнічного призначення.

Раціональна технологічна послідовність виконання робіт зі зведення тунелю, яка рекомендується до подальшого інженерного впровадження при зведенні подібних конструкцій:

1) Відкопують та укріплюють шпунтовими стінками котлован, здійснюють водовідвідні заходи, улаштовують дренажну підсіпку, підбетонку, встановлюють мембранну гідроізоляцію та зводять фундаментну плиту тунелю.

2) Зводять стінові конструкції тунелю. Улаштовують покриття (кришку) тунелю із подальшою ізоляцією конструкцій після твердіння та набору проектної міцності. Фундаментна плита, стінки та кришка тунелю мають бути розрізані деформаційними швами на блоки, рекомендована довжина яких 25 ... 50 м. Шви мають бути герметизовані.

3) Виконується зведення оглядових колодязів. Будівництво колодязів слід виконувати послідовно, порівнево, з одночасним улаштуванням земляного насипу проектного шляхопроводу вздовж вулиці Лук'яненка.

4) Місця примикання до кришки тунелю, а, також, зовнішні поверхні колодязів слід надійно ізолювати від проникнення ґрунтових вод. Конструкції тунелю гідроізолюються по всій поверхні примикання до ґрунту.

5) Влаштовується дренажна система з геокомпозиту по контуру фундаментної плити тунелю.

6) Одночасно із земляними роботами рекомендується здійснювати перевлаштування (перенесення) інженерних мереж та прокладання їх всередині тунелю, а також, прокладання технологічних мереж самого тунелю (систем пожежогасіння, димовидалення, вентиляції, освітлення), що, з часом, дасть змогу використовувати простір тунелю як укриття.

7) Зворотну засипку котловану виконувати дренажним ґрунтом вздовж всієї ділянки проектування з пошаровим ущільненням ґрунту (коефіцієнт ущільнення не нижче 0,98).

8) Здійснюється контроль якості виконаних будівельно-монтажних робіт.

Висновки

В результаті проведених наукових досліджень набув подальшого розвитку метод раціонального проектування та улаштування комунікаційних автодорожніх споруд тунельного типу.

Вивчено та узагальнено стан питання з раціонального проектування конструкцій комунікаційних тунелів в Україні та за кордоном. Виявлено, що передові наукові розробки за цим напрямком на сьогодні ведуться у Канаді та КНР.

Розроблено раціональну конструктивну форму прохідного тунелю з монолітного залізобетону, який заплановано до будівництва у м. Вінниці вздовж магістральної вул. Лук'яненка під земляним насипом шляхопроводу, що у перерізі нагадує прямокутник.

Досліджено напружено-деформований стан моделі запропонованої підземної споруди під дією комплексу постійних та тимчасових навантажень з урахуванням важких ґрунтових умов з використанням сучасного програмного комплексу Lira-САПР. Виявлено найбільш небезпечні з точки зору міцності ділянки комунікаційного тунелю, якими виявилася фундаментна плита в місці улаштування дренажного жолоба, ділянки кришки та фундаментів у зоні влаштування контрфорсів, місця примикання кришки тунелю до стінок. За результатами виконаних аналітичного та скінчено-елементного моделювання тунелю виявлено, що прийняті конструктивні рішення забезпечують її подальшу надійну експлуатацію протягом встановленого.

Для забезпечення міцності дорожнього одягу над мало заглибленою частиною тунелю рекомендовано улаштування перехідних заглиблених конструкцій (рис. 9). Для водовідводу з підтопленої території будмайданчика споруди рекомендовано улаштування пристінного дренажу вздовж усієї споруди.

Запропоновано ефективну технологію виконання будівельно-монтажних робіт з улаштування тунелю, якої рекомендується дотримуватись при зведенні подібних споруд.

За умови відповідного дообладнання комунікаційного тунелю доведено можливість його використання у якості найпростішого укриття для здійснення тимчасового захисту учасників дорожнього руху на час воєнних дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Попов В.О., Попова А.В. Комбіновані водопропускні споруди тунельного типу для дорожнього господарства. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2022-2. С. 69 – 80. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-60-71>
- [2] Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI // Відомості Верховної Ради України. — 2013. — № 34-35, № 36, № 37. — Ст. 458. https://dbn.co.ua/load/zakony/kodeks_civilnogo_zakhistu_ukrajini/19-1-0-1189
- [3] Нечаусов А. С. Методика аналізу зон пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів за допомогою сучасних засобів геопросторового аналізу / А. С. Нечаусов, С. І. Горелик, С. М. Андреев, А. В. Лахтіна // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 2, № 76. С. 11–17. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3343>.
- [4] Галкін А.С., Оцінка просторової доступності укриттів для користувачів транспортної системи міста Харкова / А.С. Галкін, Г.О. Самчук, С.Е. Лифенко, А. О. Боцман та ін. / (2025). Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 4(192), 424-433. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-424-433>
- [5] Сердюк В. Р. Актуальність реновації застарілих внутрішньоквартальних теплових мереж / В. Р. Сердюк, Т. В. Сердюк, і К. В. Бауман / СучТехнБудів, вип. 32, вип. 1, Червень, 2022. С. 63–72. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-1-63-72>
- [6] Бондаренко Д.О. Каналізаційні тунелі Харкова: QUOVADIS?: монографія / Д.О. Бондаренко, В.В. Булгаков, О.О. Гармаш, Д.Ф. Гончаренко, С.С. Піліграм; під заг. ред. Гончаренко Д.Ф. – Харків: Раритети України, 2018. 232 с.
- [7] Гулевський П.Ю. Дослідження факторів, що впливають на надійність експлуатації каналізаційних тунелів в місцях приєднання до оглядових шахт. / П.Ю. Гулевський // Науковий вісник будівництва. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2020. №3. С. 94-98. DOI: [10.33042/2522-1809-2020-3-101-94-98](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-101-94-98)
- [8] Алейнікова, А.І. Методологічні основи подовження експлуатаційного ресурсу підземних інженерних мереж / А.І.Алейнікова, В.М.Волков, Д.Ф. Гончаренко, Г.Г.Зубко, О.В. Старкова: під заг.ред. Старкової О.В. – Х.: Раритети України, 2017. 320 с.
- [9] Алейнікова А.І., Організаційно-технологічні рішення ремонту та відновлення каналізаційних тунелів в місцях межування з оглядовими шахтами / А.І. Алейнікова, П.Ю. Гулевський, І.В. Вороненко / Комунальне господарство міст, 2023, том 4, випуск 178. С. 118-124. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-118-124>
- [10] Лісневський М. А. Проектування гідроізоляції при будівництві і експлуатації тунелів / М. А. Лісневський, В. Т. Гузченко, О. М. Кулаженко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2015. № 8. С. 42–47. DOI: 10.15802/bttrp2015/90756.
- [11] Лучко Й. Й. Дослідження технології ін'єкційної гідроізоляції підземних споруд / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета, А. Я. Пенцак // Вісник ОДАБА. – Одеса.: ОДАБА, 2018. – Вип. 71. – С. 113-119. DOI: 10.31650/2415-377X-2019-76-52-62
- [12] Y. Luo, C. Zhang, A. Hammad. Recent development of multi-purpose utility tunnels in China Tunnelling and Underground Space Technology, CSCE Annual Conference, Laval (Greater Montreal) June 12 - 15, 2019.
- [13] Y. Luo, A. Alaghandrad, T.K. Genger, A. Hammad. History and recent development of multi-purpose utility tunnels. Volume 103, September 2020, 103511. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103511>
- [14] Luo Y. , Multi-Criteria Spatial Analysis of Multi-Purpose Utility Tunnels / Y. Luo / A Thesis In The Department of Building, Civil, and Environmental Engineering. Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science (Civil Engineering) at Concordia University Montreal, Quebec, Canada December 2019 ©Yisha Luo, 2019 – 203 p.
- [15] Shang, J., Zhang, Z., Zhou, Y., Qin, L., Wang, Y., Niu, Z., Ding, L., & Yin, F. (2024). Construction of Utility Tunnel power supply and distribution system. Vol. 2 (2024): 3rd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electrical Engineering (AMMEE 2024). Transactions on Engineering and Technology Research, 2, 158-165. DOI:10.62051/fqxn771
- [16] Zhang J. Experimental and Numerical Investigation into Full-Scale Model of New Type Assembled Integral Utility Tunnel / J. Zhang, Yan Zhang, C. Peng, Y. Lei, A. Zhang, Z. Zuo, Z. Chen / *Buildings* 2023, 13(6), 1428. <https://doi.org/10.3390/buildings13061428>
- [17] Попов В. О. Моделивання напружено-деформованого стану опор шляхопроводу із прорізом для проїзду автотранспорту для раціонального проектування / В. О. Попов, І. В. Масвська, А. В. Попова, М. С. Агарков / СучТехнБудів, вип. 38, вип. 1, С. 6–18, Вер 2025. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-1-06-18>
- [18] ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: [Чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
- [19] ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Введ. з 2010-03-01 на заміну ДБН В.2.3-14:2006. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 84 с.
- [20] ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель та споруд зі зміною 1. К.: МінРегіонБуд України, 2022. 37 с.
- [21] ДБН В.2.3-14:2006. Мости та труби. Правила проектування. Введ. 6.05.2006. К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. 217 с.

REFERENCES

- [1] Popov V.O., Popova A.V. Kombinovani vodopropuskni sporudy tunel'noho typu dlya dorozhn'oho gospodarstva. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktysiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2022-2. S. 69 – 80. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-60-71>

- [2] Kodeks tsyvil'noho zakhystu Ukrayiny : Zakon Ukrayiny vid 02.10.2012 № 5403-VI // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny. — 2013. — № 34-35, № 36, № 37. — St. 458. https://dbn.co.ua/load/zakony/kodeks_civilnogo_zakhistu_ukrajini/19-1-0-1189
- [3] Nechausov A. S. Metodyka analizu zon pishoyi dostupnosti ukryttiv zalezno vid typu balistychnykh snaryadiv za dopomohoy suchasnykh zasobiv heoprostorovoho analizu / A. S. Nechausov, S. I. Horelyk, S. M. Andryeyev, A. V. Lakhtina // Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku. Zbirnyk naukovykh prats'. — 2024. — T. 2, № 76. S. 11–17. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3343>.
- [4] Halkin A.S., Otsinka prostorovoyi dostupnosti ukryttiv dlya korystuvachiv transportnoyi systemy mista Kharkova / A.S. Halkin, H.O. Samchuk, S.E. Lyfenko, A. O. Botsman ta in. / (2025). Komunal'ne hospodarstvo mist. Seriya: «Informatsiyni tekhnolohiyi ta inzheneriya», 4(192), 424-433. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-424-433>
- [5] Serdyuk V. R. Aktual'nist' renovatsiyi zastariykh vnutrishn'okvartal'nykh teplovykh merezh / V. R. Serdyuk, T. V. Serdyuk, i K. V. Bauman / SuchTekhnBudiv, vyp. 32, vyp. 1, Cher 2022. s. 63–72. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-1-63-72>
- [6] Bondarenko D.O. Kanalizatsiyni tuneli Kharkova: QUOVADIS?: monohrafiya / D.O. Bondarenko, V.V. Bulhakov, O.O. Harmash, D.F. Honcharenko, S.S. Pilihram; pid zah. red. Honcharenko D.F. — Kharkiv: Rarytety Ukrayny, 2018. 232 s.
- [7] Hulyevs'kyi P.Y. Doslidzhennya faktoriv, shcho vplyvayut' na nadiynist' ekspluatatsiyi kanalizatsiynykh tuneliv v mistyakh pryednannya do ohlyadovykh shakht. / P.Y. Hulyevs'kyi // Naukovyy visnyk budivnytstva. Kharkiv: KHD TUBA KHOTV ABU, 2020. №3. S. 94-98
- [8] Aleynikova, A.I. Metodolohichni osnovy podovzhennya ekspluatatsiynoho resursu pidzemnykh inzhenernykh merezh [Tekst] / A.I. Aleynikova, V.M. Volkov, D.F. Honcharenko, H.H. Zubko, O.V. Starkova; pid zah. red. Starkovoyi O.V. — KH.: Rarytety Ukrayny, 2017. 320 s.
- [9] Aleynikova A.I., Orhanizatsiyno-tekhnolohichni rishennya remontu ta vidnovlennya kanalizatsiynykh tuneliv v mistyakh mezhuvalnnykh z ohlyadovymy shakhtamy / A.I. Aleynikova, P.YU. Hulyevs'kyi, I.V. Voronenko / Komunal'ne hospodarstvo mist, 2023, tom 4, vypusk 178. S. 118-124. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-118-124>
- [10] Lisnevs'kyi M. A. Proektuvannya hidroizolyatsiyi pry budivnytstvi i ekspluatatsiyi tuneliv / M. A. Lisnevs'kyi, V. T. Huzchenko, O. M. Kulazhenko // Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka. 2015. № 8. S. 42–47. — Rezhym dostupu: DOI: 10.15802/btrp2015/90756.
- [11] Luchko Y. Y. Doslidzhennya tekhnolohiyi inyektsiynoyi hidroizolyatsiyi pidzemnykh sporud / Y. Y. Luchko, B. Z. Parneta, A. YA. Pentsak // Visnyk ODABA. — Odesa.: ODABA, 2018. — Vyp. 71. S. 113-119. DOI: 10.31650/2415-377X-2019-76-52-62
- [12] Y. Luo, C. Zhang, A. Hammad. Recent development of multi-purpose utility tunnels in China Tunnelling and Underground Space Technology, CSCE Annual Conference, Laval (Greater Montreal) June 12 - 15, 2019.
- [13] Y. Luo, A. Alaghandrad, T.K. Genger, A. Hammad. History and recent development of multi-purpose utility tunnels. Volume 103, September 2020, 103511. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103511>
- [14] Luo Y. , Multi-Criteria Spatial Analysis of Multi-Purpose Utility Tunnels / Y. Luo / A Thesis In The Department of Building, Civil, and Environmental Engineering. Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science (Civil Engineering) at Concordia University Montreal, Quebec, Canada December 2019 ©Yisha Luo, 2019 – 203 p.
- [15] Shang, J., Zhang, Z., Zhou, Y., Qin, L., Wang, Y., Niu, Z., Ding, L., & Yin, F. (2024). Construction of Utility Tunnel power supply and distribution system. Transactions on Engineering and Technology Research, 2, 158-165. DOI:10.62051/fqxn771
- [16] Zhang J. Experimental and Numerical Investigation into Full-Scale Model of New Type Assembled Integral Utility Tunnel / J. Zhang, Yan Zhang, C. Peng, Y. Lei, A. Zhang, Z. Zuo, Z. Chen / Buildings 2023, 13(6), 1428. <https://doi.org/10.3390/buildings13061428>
- [17] Popov V. O. Modelyuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu opor shlyakhoprovodu iz prorizom dlya proyizdu avtotransportu dlya ratsional'noho proektuvannya / V. O. Popov, I. V. Mayevs'ka, A. V. Popova M. S. Aharkov / SuchTekhnBudiv. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk., vyp. 38, vyp. 1, S. 6–18, Ver 2025. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-1-06-18>
- [18] DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi. Osnovni polozhennya: [Chynnyy vid 2011-06-01]. — K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2011. 71 s.
- [19] DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya i vplyvy. Vved. Z 2010-03-01 na zaminu DBN V.2.3-14:2006. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2009. 84 s.
- [20] DBN V.1.2-14:2018. Zahal'ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' ta sporud zi zminoyu 1. K.: MinRehionBud Ukrayiny, 2022. 37 s.
- [21] DBN V.2.3-14:2006. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya. Vved. 6.05.2006. K.: Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2006. 217 s.

Попов Володимир Олексійович — к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: v.a.popov.vntu@gmail.com. ORCID 0000-0003-2379-7764.

Каялайнен Ілля Олександрович — software engineer. SoftServe inc., м. Вінниця, Україна. e-mail: illia.kaialainen@gmail.com ORCID 0009-0001-5044-238X

Попова Аліна Володимирівна — аспірантка. Навчально-науковий інститут природничих наук, Донецький національний університет імені Василя Стуса, м. Вінниця, Україна. e-mail: alina.popova260702@gmail.com, ORCID 0000-0003-3576-5823

V. Popov¹
 I. Kaialainien²
 A. Popova³

MODELING THE STRESS–STRAIN BEHAVIOR OF UTILITY TUNNEL STRUCTURES BENEATH A HIGHWAY

¹Vinnitsia National Technical University

²SoftServe inc., Vinnitsia city, Ukraine

³Vasyl' Stus Donetsk National University, Ukraine

The paper presents rational structural solution for a deep utility tunnel intended for the installation of utility networks beneath the highway overpass. Among the considered alternatives, the most rational solution of tunnels structure has been chosen – namely, a monolithic frame U-shaped structure on slab foundations. The necessity and feasibility of reinforcing tunnel sections embedded at depths exceeding 5 m have been substantiated by means of installing a system of external buttresses. The proposed engineering solutions are realized into a designed utility tunnel beneath an embankment of an overpass in the Vinnitsia city. Finite element models of the stress–strain state have been developed using the standard software package LIRA-SAPR, taking into account soil conditions, pressures of earth backfill and live loads from vehicular traffic. The most unfavorable load combinations have been evaluated. It has been demonstrated that, for tunnel sections under the large soil layer, the dominant influence is exerted specifically by the earth embankment. It has been demonstrated that shallow tunnel sections require the installation of transition structures to equalize the stiffness of the subgrade beneath the pavement.

For the proposed structural configuration of the tunnel, rational geometric parameters have been selected according to the described methodology, and the most critical cross-sections have been identified. It has been demonstrated that the most heavily loaded structural elements of the tunnel are beam structures at the interfaces between the tunnel and adjacent ventilation chambers, the beam (girder) system supporting the tunnel roof slab, as well as the foundation slab structures beneath the openings. The performed analyses confirm, in terms of strength and stiffness, the fundamental feasibility and rationality of the proposed tunnel structural solution as well as the use of tunnel structures as temporary shelter.

Key words: utility tunnel, deformation block, stress–strain state, earth embankment, road pavement, dynamic vehicular load.

Popov Vladimir O. — Ph.D. Docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnitsia national technical university, Vinnitsia city, email: v.a.popov.vntu@gmail.com ORCID 0000-0003-2379-7764.

Kaialainien Illia O. — Software Engineer, SoftServe Inc., Vinnitsia, Ukraine, e-mail: illia.kaialainien@gmail.com ORCID 0009-0001-5044-238X

Popova Alina V. — PhD student, Educational and Scientific Institute of Natural Sciences, Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnitsia city, Ukraine, e-mail: alina.popova260702@gmail.com ORCID 0000-0003-3576-5823