

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 624.21.09, 624.271, 625.7

DOI:10.31649/2311-1429-2025-1-06-18

В. О. Попов¹І. В. Масвська¹А. В. Попова²М. С. Агарков¹

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОПОР ШЛЯХОПРОВОДУ ІЗ ПРОРІЗОМ ДЛЯ ПРОЇЗДУ АВТОТРАНСПОРТУ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет²Донецький національний університет імені Василя Стуса, Україна

У статті описано принципове раціональне конструктивне рішення опор шляхопроводів, які, внаслідок складної містобудівної ситуації, характерної для щільної забудови типових обласних та районних центрів України, повинні мати можливість наскрізного проїзду для автотранспорту крізь опору. Таким чином, опора має одночасно виконувати функцію підтримання пролітної будови шляхопроводу, а, також, забезпечувати технологічну можливість прокладання в рівні основи опори автомобільного проїзду. Розглянуто декілька принципових конструктивних варіантів улаштування проїзних опор, що улаштовуються на слабких ґрунтах. Проаналізовано переваги та недоліки кожного з варіантів. Серед обраних варіантів вибрано найбільш раціональний – у вигляді монолітної рамної «П»-подібної конструкції на пальових фундаментах, що об'єднані суцільним плитним ростверком. Наведено, також, методику підбору геометричних параметрів основних конструктивних компонент такої опори. Запропоновані інженерні рішення проілюстровані на конкретному прикладі – проектуваному шляхопроводі у м. Вінниці. Для зазначеного прикладу розроблено фрагмент генерального плану шляхопроводу та архітектурну форму опори з проїздом у вигляді просторової «П»-подібної рами. Для запропонованої архітектурної форми виконано підбір раціональних геометричних параметрів з урахуванням правил дорожнього руху за викладеною методикою. Для зазначеного архітектурного рішення опори з проїздом розроблено модель споруди у просторовій постановці методом скінчених елементів з використанням стандартного програмного комплексу «Lira-САПР». Оцінено найбільш несприятливі комбінації навантажень, які включають технологічні впливи на споруду у рівні пролітної будови шляхопроводу та в рівні проїзду по тілу фундаментів опори. Проаналізовано напружено-деформований стан опори. Для розробленої моделі проїзної опори виконані попередні міцнісні розрахунки та визначено найбільш небезпечні перерізи, в яких діють максимальні силові та моментні фактори. Доведено, що найбільш навантаженими конструктивними елементами опори з проїздом є ригельна система, що підтримує пролітну будову шляхопроводу, внаслідок великої відстані між стійками опори, а також, конструкції фундаментів, внаслідок горизонтальних складових, що виникають при русі автотранспорту.

Виконані розрахунки підтверджують, з точки зору міцності і жорсткості, принципову можливість улаштування та раціональність обраного конструктивного рішення опори із проїздом.

Ключові слова: автомобільний шляхопровід, проїзна опора, пролітна будова, напружено-деформований стан, залізобетонна рама, перехідні конструкції.

Вступ

Ця наукова робота є продовженням циклу авторських науково-практичних досліджень, присвячених аналізу поведінки під навантаженням конструкцій мостів, мостових переходів та шляхопроводів та їх основних конструктивних елементів [1-4]. Наукові дослідження цієї статті базуються на власному інженерно-практичному досвіді авторського колективу за напрямком раціонального проектування мостових опор, доповнюють і уточнюють попередні напрацювання присвячені оцінці міцності, стійкості і довговічності монолітних залізобетонних опор пролітних будов мостів і шляхопроводів в умовах складної містобудівної ситуації, яка притаманна більшості обласних та районних центрів України.

Відомо, що в Україні, внаслідок тривалих воєнних дій автотранспортна система відіграє ключове значення для забезпечення функціонування економіки держави, загалом, та для підтримання обороноздатності, зокрема [1]. Водночас роботи з модернізації морально застарілої автодорожньої системи, яка не відповідає вимогам сучасних норм з вантажопідйомності та пропускної здатності, які були розпочаті у довоєнний період в рамках програми Президента «Велике будівництво», через зрозумілі економічні чинники, на жаль, не були завершені та поставлені на паузу до завершення бойових дій [2-3]. Отже, перед проектувальниками постає складне завдання з реконструкції старих та будівництва нових транспортних артерій держави в умовах обмеженого фінансування. Найбільш конструктивно складним та відповідальним структурним елементом автодороги є мости, мостові переходи та шляхопроводи. Ці лінійні споруди створюють для подолання автомобільною дорогою різноманітних перешкод (річок, озер, залізничних колій, інших автомобільних доріг) [1-4]. В умовах

обласних та районних центрів України часто проблемними ділянками, що утруднюють транспортне сполучення міста, є розгалужені залізничні колії, які іноді розрізають територію міста на декілька частин. Водночас, залізничні шляхи входять у загальну транспортну систему держави, та є її критичними інфраструктурними об'єктами. Тому потрібним і актуальним є будівництво нових шляхопроводів через залізничні колії без тривалої зупинки експлуатації самих залізниць.

На цей час в Україні переважну більшість загального фонду автодорожніх мостів та шляхопроводів на дорогах національного значення складають балочні одно- або багато пролітні споруди, що спираються на ґрунтову основу через опори, які містять поширення в верхній частині у вигляді капітелей або ригельних систем [2]. Тіло проміжних опор, виходячи з вимог раціонального проектування, виконується максимально компактним у плані, але достатньо надійним через великі динамічні впливи збоку рухомого складу. Часто тіло проміжних опор являє собою масивну конструкцію у формі паралелепіпеда, або систему окремих циліндричних чи колон, встановлених з регулярним кроком поперек осі пролітної будови. Таким чином, на сьогодні, питання проектування раціональних опорних систем мостів та шляхопроводів є доцільним і актуальним.

Постановка проблеми.

Іноді, внаслідок складної містобудівної ситуації, що характерно, в основному, для обласних та районних центрів України, виникає потреба у влаштуванні проїздів, саме, у тілі опор. Звичайно, проектувальники шляхопроводів намагаються максимально уникати таких випадків раціональним розплануванням опорної системи шляхопроводів. Однак, іноді, цього уникнути не вдається. Така конструктивна складність часто виникає у випадку необхідності прокладання під шляхопроводом дороги-дублеру, яка співосна шляхопроводу, що проектується, але займає нижній рівень будови. У другому випадку, існуючі транспортні системи, або наявні підземні інженерні мережі настільки складні і відповідальні, що їх не можна переносити. Зазначені складнощі, також, бувають пов'язані з земельними питаннями. При цьому у проектувальника не залишається іншого вибору, як-то вигадувати нестандартні, конструктивно складні рішення опор з наскрізним проїздом. Крім того, до шляхопроводів, розташованих всередині міста, часто пред'являються особливі вимоги щодо підвищеної архітектурної виразності. Відкриті для огляду опори не повинні бути занадто масивними, але, водночас, повинні мати високу міцність і довговічність. Тому, головною метою даної роботи є пошук раціонального та естетичного інженерного рішення мостової опори з наскрізним проїздом та обґрунтування його надійності.

Основна частина.

У подальшому методика раціонального проектування проміжної опори шляхопроводу з проїздом описана на прикладі реальної споруди, що проектується у м. Вінниці. Клас наслідків (відповідальності) споруди шляхопроводу – СС-3 (значні наслідки) [5]. За [6] клас відповідальності споруди – І (шляхопроводи та естакади завдовжки понад 600 м). На рис. 1 показано містобудівну ситуацію в зоні проектованої проміжної опори шляхопроводу, а на рис. 2 показано пропонуване архітектурне рішення. Добре видно, що проектований проїзд повинен перетнути тіло опори по осі.

Складна містобудівна ситуація пояснюється збігом невігідних факторів, а саме, наявністю декількох близько розташованих залізничних колій та трьох стрілкових систем колій, організація проїзду через які заборонені технічними умовами АТ «Укрзалізниця» та відповідними нормативними документами.

На зазначені вище містобудівні складнощі накладається складність та неоднорідність інженерно-геологічних умов майданчика забудови, що утруднює проектування опор шляхопроводу та їх фундаментів.

Таким чином, опора по осі «7» в верхньому рівні повинна сприймати навантаження від пролітної будови, а в нижньому рівні забезпечувати можливість проїзду автотранспорту по двохсмуговій автомобільній дорозі.

Типові опори шляхопроводу (наприклад, опора по осі «8», що зображена на передньому плані рис. 2) спроектовані у вигляді чотирьох колон прямокутного перерізу, об'єднані в рівні оголовків ригельною системою. Ригелі, в свою чергу сприймають навантаження від нерозрізної залізобетонної монолітної прогонової будови у вигляді довгомірної ортотропної ребристої плити з балок, діафрагм та накладної плитної конструкції. Опори передають навантаження на плитні ростверки, а ті, в свою чергу, на пальове поле. У якості можливих опорних систем з проїздом по осі «7» було розглянуто декілька варіантів.

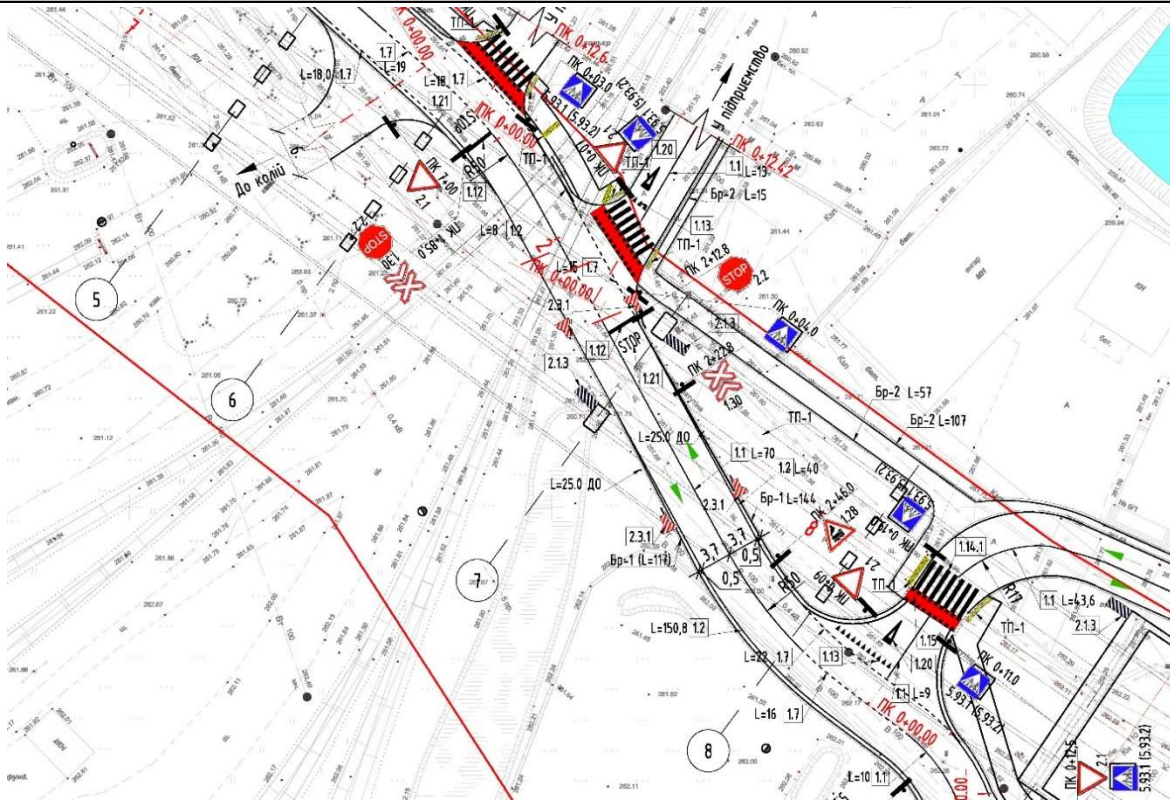


Рисунок 1 – Містобудівна ситуація під проектованим шляхопроводом над залізничними коліями (показано тонкими лініями) у м. Вінниці в осях «5-9». Опора по осі «7» – з наскрізним проїздом.



Рисунок 2 – Пропоноване архітектурне рішення фрагмента в осях «5-9» проектованого шляхопроводу над залізничними коліями у м. Вінниці, включаючи проміжну опору з наскрізним проїздом по осі «7» (архітектор Наталія Бурдейна).

Варіант 1 – двохопорна система із безконсольним ригелем (опора у вигляді перевернутої літери «П» із одним спільним проїздом для обох смуг руху проїзду. Планувальне рішення, розмітка в рівні проїзду, дорожні знаки та загальний зовнішній вигляд дивись рис. 1, 2. Такий варіант забезпечує високий рівень оглядовості учасникам дорожнього руху в рівні проїзду, однак є найбільш складним у виготовленні та матеріаломістким.

Варіант 2 – двохопорна система із двохконсольним ригелем (опора у вигляді двох літер «ТТ»). Така опора, у порівнянні з варіантом 1, менш матеріаломістка, однак проїзд у цьому випадку може бути вузьким, тобто, тільки односмуговим, із улаштуванням дорожніх знаків 1.5.1 «Звуження дороги», 2.5 «Перевага перед зустрічним рухом» та 2.6 «Перевага зустрічного руху» [7].

Варіант 3 – трьохопорна система з двома проїздами (конструкція опори у вигляді перевернутої

літери «Ш»), тобто, кожна смуга перетинала опорну систему під своєю рамою. Звісно, рух по такому проїзду має регулюватись низкою знаків, підібраних у відповідності до [7]. Така опора є найменш матеріаломісткою, у порівнянні із попередніми варіантами, однак значно погіршує оглядовість водіїв що рухаються по проїзду.

Перебором різних варіантів із урахуванням довготривалих факторів та ризиків, обумовлених складністю містобудівної ситуації, а також, після консультацій із фахівцями Департаменту патрульної поліції Національної Поліції України у якості основного було обрано перший варіант конструктивного рішення проїзної опори шляхопроводу (рис. 3).

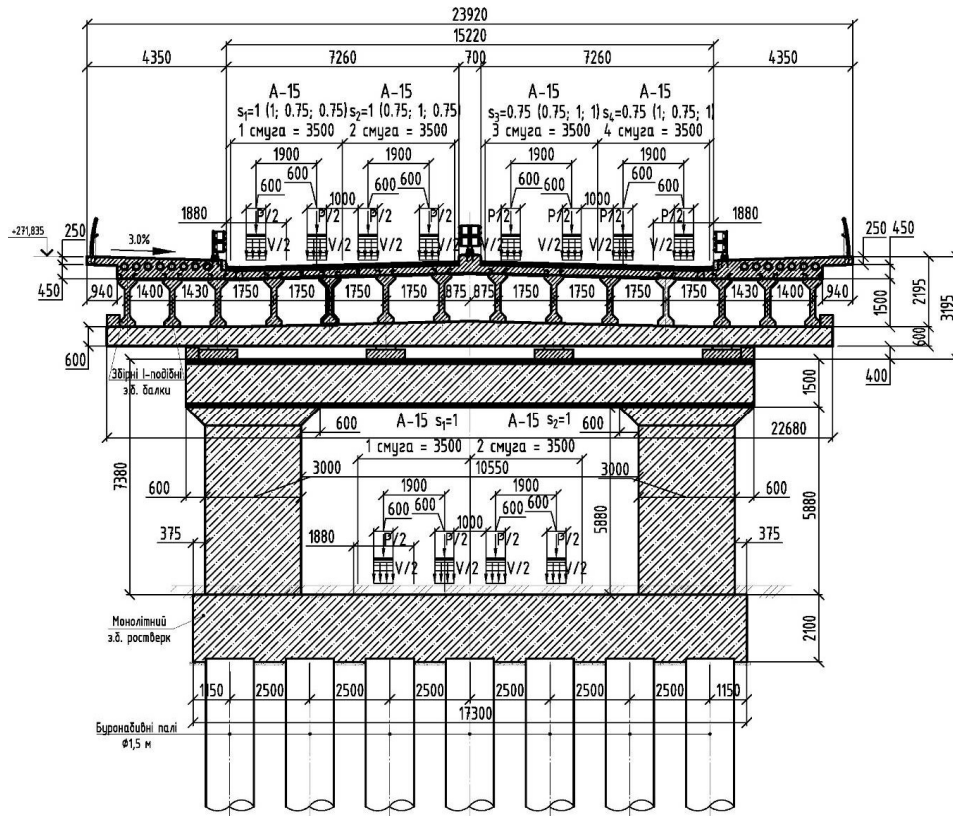


Рисунок 3 – Конструкція опори шляхопроводу із проїздом по осі «7». На проїзній частині в рівні пролітної будови та у проїзді під опорою показане навантаження на опору: 4 x A-15 + 2 x A-15.

Перебором можливих конструктивних співвідношень встановлено раціональні геометричні розміри компонент пропонованої опори та розроблена методика раціонального конструювання, яка полягає в наступному.

- 1) Виходячи з габариту проїзду вантажного транспорту та кількості смуг руху проїзду встановлюють висоту та ширину потрібного прорізу в опорі, L_p .
- 2) За шириною проїзду призначають висоту ригеля, яка складає $(1/6 \dots 1/8)$ від L_p .
- 3) Ширина перерізу ригеля встановлюється за міцнісними розрахунками за методикою граничних станів.
- 4) Призначають довжину колони (розмір у площині рами опори), що має бути співставна з висотою ригеля, яку слід помножити на коефіцієнт $(1,5 \dots 2,0)$.
- 5) Призначають конструктивну висоту ростверків, які повинні бути на 20 – 40% товщими за висоту ригеля.
- 6) Розраховують та раціонально розташовують пальове поле за таким загальним принципом – під стійками – згущене багаторядне поле, в зоні проїзду – розріджене.
- 7) Підбирають бетон та арматуру згідно з вимогами [6, 10 ... 12].

Конструкція опори по осі «7» у вигляді запропонованої «П»-подібної рами колоно-ригельного типу законструйована за зазначеною вище методикою. Для конкретного шляхопроводу у м. Вінниці вона є найбільш навантаженою опорою всієї опорної системи фрагмента шляхопроводу в осях «4-9» через потребою передачі на фундамент горизонтальних складових навантажень від усього фрагмента. Для сприйняття навантажень від надземних конструкцій опори та передачі їх на ґрунтову основу запроектовано дві колони прямокутного перерізу 3,0 x 1,8 м, які спираються на плитні ростверки товщиною 2,1 м, що передають навантаження від опори на куц з чотирнадцяти бурунабівних паль діаметром 1500 мм.

Ростверки прийняті суцільними для уникнення надмірних навантажень на оголовки паль та для перерозподілу гальмівних та інерційних сил від рухомого складу. Поверх колон виконано капітальне поширення у вигляді зрізаної піраміди (див. рис. 3). На капітелі спирається посилений залізобетонний ригель перерізом $3 \times 1,5$ (h) м. Розміри ригеля прийняті для забезпечення проїзного габариту під ригелем. Опора шляхопроводу по осі «7» забезпечує рух автотранспорту під ригелем та над ростверками. Таким чином, конструкція опори по осі «7», із урахуванням ростверків, являє собою замкнену «О»-подібну геометричну фігуру, яка суттєво зменшує негативні горизонтальні впливи на ґрунт.

Для вирішення складного науково-практичного завдання з раціонального проектування проїзної опори шляхопроводу по осі «7» було розроблено її скінчено-елементну модель засобами стандартного програмного комплексу «Lira-САПР» (рис. 4).

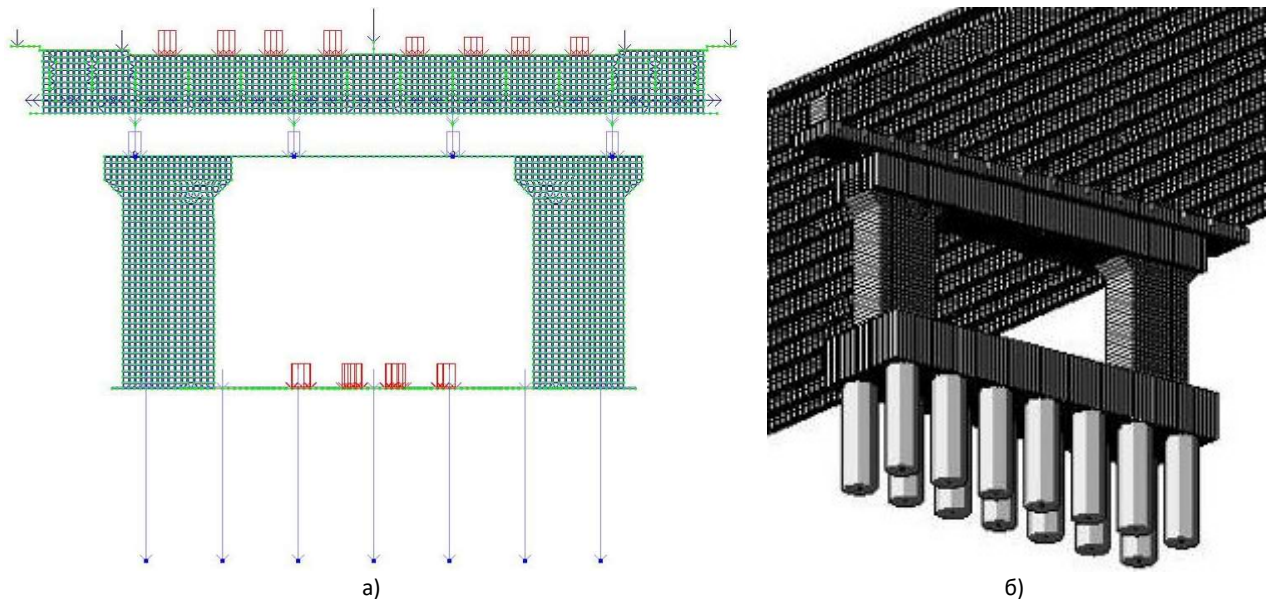


Рисунок 4 – Фрагмент розрахункової моделі шляхопроводу: а – пластинчасто-стрижнева скінчено-елементна модель під дією тимчасового впливу 4 x A-15 на шляхопроводі та 2 x A-15 у проїзді (виділено червоним), б – її тривимірне відображення.

Розрахунок напружено-деформованого стану фрагмента шляхопроводу виконаний шляхом деталізованого моделювання основних елементів у вигляді тривимірної моделі за допомогою програмного комплексу «Lira-Windows», що є комп'ютерною системою для структурного аналізу та проектування. Теоретичною основою використаної програми є метод скінчених елементів (МСЕ). Реалізований варіант МСЕ використовує принцип можливих переміщень (більш детально дивись інструкцію до програми).

Модель фрагмента шляхопроводу поблизу опори з проїздом по осі «7» в осях «0-1» прийнята у вигляді просторової системи, що складається із пластинчастих елементів, які імітують роботу монолітної плитної частини, консольних звисів тротуарної плити, монолітних діафрагм, монолітних ростверків, стійок та ригелів опор шляхопроводу, елементи збірних І-подібних прогонових балок, а також, стрижневих елементів, що імітують роботу паль, підферменників, еластомерних опор, зв'язкових елементів між пластинчастими конструкціями для компенсації геометричної неоднорідності, окремих ригелів. Для спрощення зміна висоти підферменників, а також, ухили прогонової монолітної плити розрахункового фрагмента шляхопроводу при моделюванні не враховувалася.

Товщина пластинчастих скінчених елементів плити проїзної частини прийнята сталою, 250 мм; товщина пластинчастих елементів консольного звису тротуарної частини – 250 мм; пластини опорної частини діафрагми – 600 мм; пластини стінок діафрагм проміжних опор – 1200 мм, крайніх опор – 600 мм; пластинчасті елементи ригеля опори шляхопроводу по осі «7» – 1500 мм; пластини стінок, верхньої та нижньої полиць збірних попередньо напружених балок – 160 мм; пластини колон опори шляхопроводу по осі «7» – 1800 мм.

Класи бетонів для більшості будівельних конструкцій шляхопроводу, а саме, пролітних будов, перехідних плит, діафрагм прийняті згідно з рекомендаціями [10] від C35/40 (B40) до C45/50 (B50). У бік запасу при розрахунках вважаємо всі конструкції виготовлені з класу C35/40 (B40). Палі згідно з

проектними рішеннями виготовлені з класу бетону C30/35 (B35). Фізико-механічні характеристики пластинчастих та стрижневих елементів моделі. Модуль пружності знижуємо, в бік запасу, згідно з рекомендаціями методичної літератури. Для всіх пластинчастих елементів $E_{B40} = 0,7 \cdot E_{cd}(B40) = 20 \cdot 10^9 \text{ Па}$, для стрижневих елементів паль $E_{B35} = 18,9 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$, густина $R_0 = 2,5 \text{ т / м}^3$. Крок дискретизації пластинчастої моделі – 100 x 100 мм. Характеристики стрижневих елементів моделі (палі).

Характеристики стрижневих елементів опори по осі «7», що моделюють нерухомі у повздовжньому напрямку опорні частини. Переріз стрижневих елементів – 620 x 620 мм, висота 128 мм із гумовою подушкою діаметром ~500 мм, товщиною 80 мм. Модуль пружності гуми знижуємо, в бік запасу, згідно з рекомендаціями методичної літератури: $E_{elastic} = 5 \cdot 10^9 \text{ (Па)}$, коефіцієнт Пуассона для твердої гуми $\nu = 0,5$, густина – $R_0 = 1,4 \text{ т / м}^3$.

При моделюванні розглянуто два варіанти роботи паль – з обпиранням на скельний ґрунт (палі – стійка) та при обпиранні на пружний ґрунт (висяча палі).

При виконанні розрахунків напружено-деформованого стану основних несучих конструкцій, якими є всі елементи опори по осі «7» (клас А), було враховано коефіцієнт надійності за відповідальністю за [6, табл. 4.1] $\gamma_r = 1,05$.

На опорі шляхопроводу по осі «7» чинять постійні гравітаційні впливи власна вага опори, вага прогонової будови, частина ваги перехідних конструкцій в рівні ростверків, вага покриття автодорожньої частини (дорожній одяг) та тротуарів у обох рівнях, вага ізоляційних матеріалів, вага перильного та бар'єрного огорожень, вага стовпів електроосвітлення, вага мереж, що прокладені по прогоновій будові, вага незйомної опалубки, із відповідними коефіцієнтами надійності, що прийняті у відповідності до [6] та [8]. Ці навантаження змодельовані корисним навантаженням, прикладеним до пластинчастих елементів прогонових конструкцій.

До тимчасових впливів, які діють на опорі по осі «7» згідно з [8] слід віднести рухомі колісні навантаження НК-100 та А-15, які діють в межах проїзної частини на прогонову будову, навантаження від натовпу пішоходів в межах тротуарів (та проїзної частини, коли колісні впливи відсутні), а, також, кліматичні впливи. НК-100 – чотирьохосний екіпаж з нормативним навантаженням на 1 вісь $P_n = 245 \text{ кН}$ з коефіцієнтом надійності $\gamma_f = 1,0$. А-15 – двовісний візок з нормативним навантаженням на 1 вісь – $P_n = 147,15 \text{ кН}$ + смуга рівномірно розподіленого навантаження на $V_n = 14,7 \text{ кН / м}$ по двом смугам в створі рух коліс. Кількість розрахункових смуг (4 шт.) навантаження А-15 визначено згідно з [8], шляхом ділення габариту проїзду на 3,5 м та заокругленням до цілого. Найбільш невигідним для опори шляхопроводу по осі «7» є розташування умовних візків А-15 колісних навантажень безпосередньо над опорою. Тимчасове навантаження на тротуарну частину від натовпу пішоходів прийняте до розрахунку складає 3,92 кПа, коефіцієнт надійності $\gamma_f = 1,4$ [8]. Інші тимчасові впливи – кліматичні. Для м. Вінниці згідно з [9] – вітровий тиск, 3-й вітровий район $q_{wf} = 0,5 \text{ кПа}$; сніговий тиск, 4-й вітровий район $q_{sf} = 1,4 \text{ кПа}$ (не враховується разом з технологічними впливами, як взаємно виключаючі); товщина кірки ожеледі – 19 мм для 3-го ожеледного району (враховується тільки на металоконструкції бар'єрного та перильного огорожень).

Далі розглянуто поведінку надземних конструкцій опори по осі «7». Дослідження пального поля опори шляхопроводу по осі «7» із визначенням раціональної глибини залягання підошви паль та оптимальної форми пального поля буде представлено в рамках подальших наукових досліджень.

Розрахунки потрібного армування ригельної системи, колон та ростверків опори шляхопроводу з проїздом по осі «7» виконані за двома методиками. Методика 1 – викладена у розділі 3 [10]. Методика 2 – викладена у [12]. Результати розрахунків за обома методиками ідентичні. Різниця по коефіцієнтах використання перерізу не перевищує 5%, що свідчить про достовірність результатів.

А) Розрахунок ригеля опори шляхопроводу по осі «7».

Розподіл згинальних моментів в елементах ригеля опори шляхопроводу по осі «7» при найбільш невигідному розташуванні візків тимчасових впливів 4 х А-15 показані на рис. 5. Аналогічний розподіл був отриманий при комбінації навантажень із урахуванням рухомого впливу екіпажу НК-100.

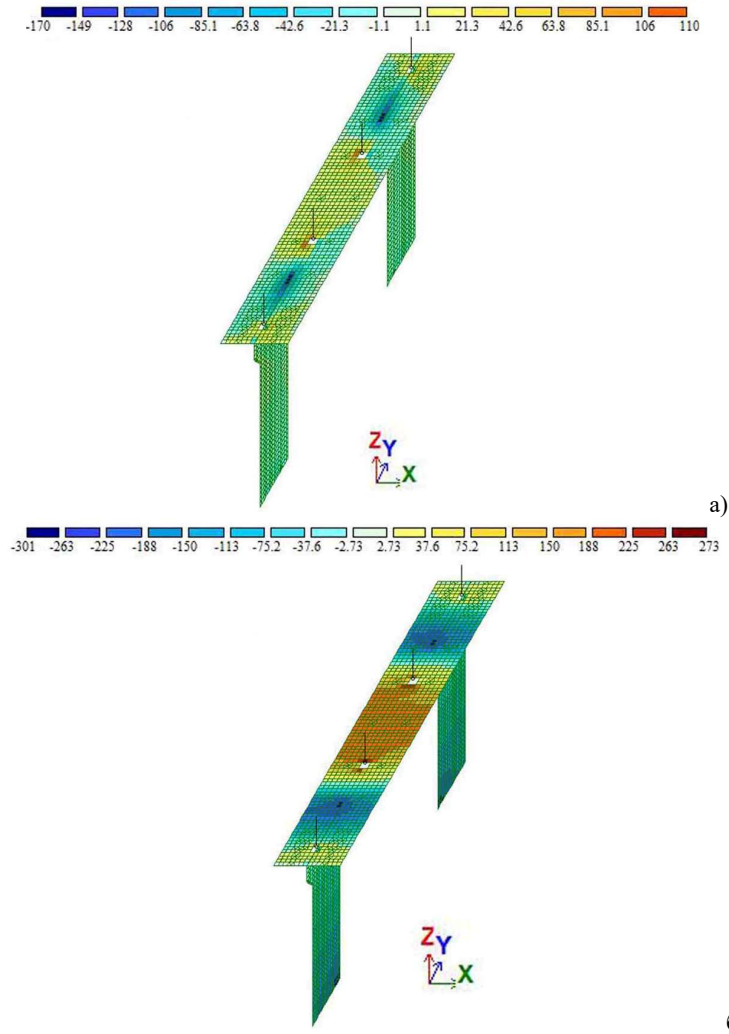


Рисунок 5 – Згинальні моменти П-подібної рами опори шляхопроводу по осі «7» при комбінації навантажень із тимчасовими рухомими навантаженнями А-15: а – M_x , б – M_y , тм/м.п.

Шляхом порівняння було встановлено, що комплекс динамічних навантажень від візків А-15 викликає більші значення внутрішніх моментних факторів, аніж навантаження від екіпажу НК-100. Локалізація найбільш напружених ділянок ригеля добре прослідковується на рис. 5 (ділянка ригеля, що межує з внутрішнім краєм капітелей опорних колон. З рис. 5,а) видно, що розрахунковий згинальний момент у ригелі в напрямку глобальної осі Ox (вздовж шляхопроводу, поперек ригеля) при урахуванні комбінації навантажень із тимчасовим впливом від рухомого навантаження 4 х А-15 з урахуванням натовпу пішоходів складає $M_{x, \max} = +1100 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$ (пролітний момент) та $M_{x, \min} = -1700 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$ (опорний момент). Ці моменти впливають відповідно на нижнє і верхнє армування ригеля по осі «7» (поперек осі ригеля). Те саме у робочому напрямку по осі Oy (впливає на армування вздовж ригеля), рис. 5,б): $M_{y, \max} = +2730 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$, $M_{y, \min} = -3010 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$. Робочим напрямком для ригеля опори по осі «7» є напрямок по осі Oy (вздовж ригеля, поперек осі шляхопроводу).

Конструкції ригеля згідно з рекомендаціями [10, 12] запроектована з бетону класу С35/40 (В40). Згідно з виконаними розрахунками за методикою граничних станів першої та другої груп за [6, 11, 12] виявлено, що основне робоче армування верхньої зони розрахункового прямокутного перерізу шириною 1 м ригеля в напрямку осі Ox (вздовж шляхопроводу, поперек ригеля) повинно бути виготовлене у вигляді стрижнів діаметром 25 мм класу А400, улаштованих з кроком 200 мм у два ряди. Нижнє армування – стрижні діаметром 25 мм класу А400, улаштовані з кроком 200 мм у два ряди (рис. 6,а). Згідно з виконаними розрахунками потрібне з умов міцності, жорсткості і тріщиностійкості робоче армування нижньої зони розрахункового прямокутного перерізу шириною 1 м в напрямку осі Oy (вздовж ригеля, поперек осі шляхопроводу) – спарені по висоті стрижні діаметром 32 мм класу А400, улаштовані з кроком 200 мм, в верхній зоні – трійки стрижнів діаметром 32 мм класу А400, улаштовані з кроком 200 мм (рис. 6,б).

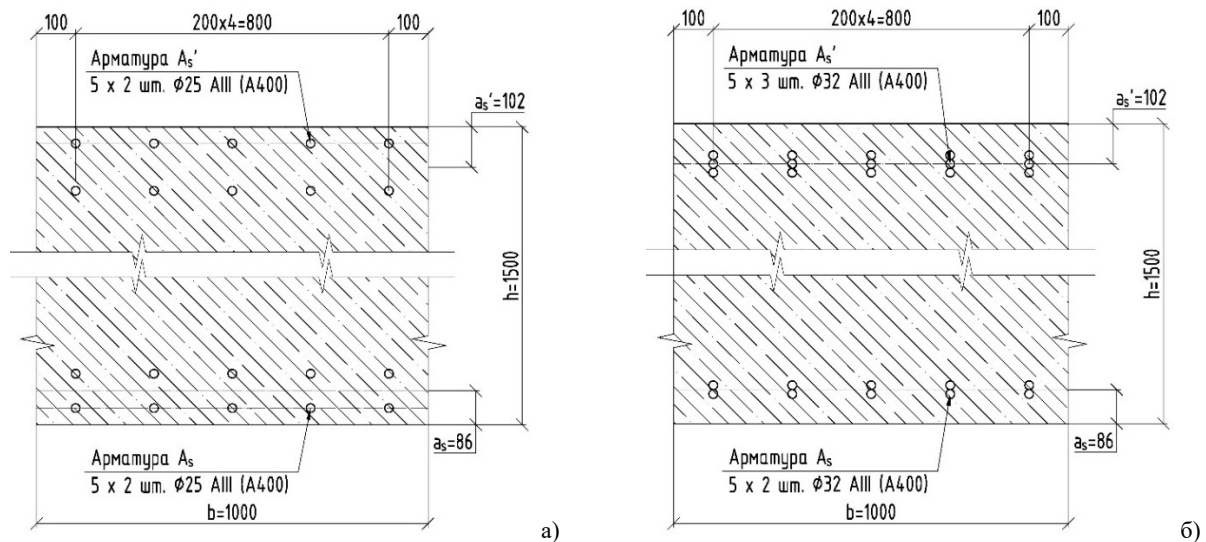


Рисунок 6 – Визначене за розрахунком армування 1 м.п. ригеля опори шляхопроводу по осі «7»: а – армування по 0х (поперек осі ригеля, вздовж шляхопроводу), б – те саме у робочому напрямку, вздовж ригеля.

Б) Розрахунок колон опори шляхопроводу по осі «7».

Перебором варіантів впливів розрахункових комбінацій виявлено найбільш невідгідний варіант завантаження колон опори шляхопроводу по осі «7». Цим варіантом виявилася комбінація навантажень із урахуваннями тимчасових рухомих впливів при найбільш невідгідному розташуванні візків 4 х А-15 (шляхопровід) та 2 х А-15 (у проїзді) безпосередньо над ростверками, тобто, аналогічно невідгідному завантаженню ригеля. Розподіл силових та моментних факторів у колонах наведено на рис. 7. Розрахунками виявлено, що пластинчасті скінчені елементи, в яких виникають максимальні за модулем стискаючі напруження інтенсивністю $N_{y, \min} = -9,46 \text{ МПа}$ розташовані в основі колон опори шляхопроводу по осі «7» із внутрішнього боку в перерізах поблизу ростверків, а, також, у перерізах, розташованих безпосередньо під капітелями.

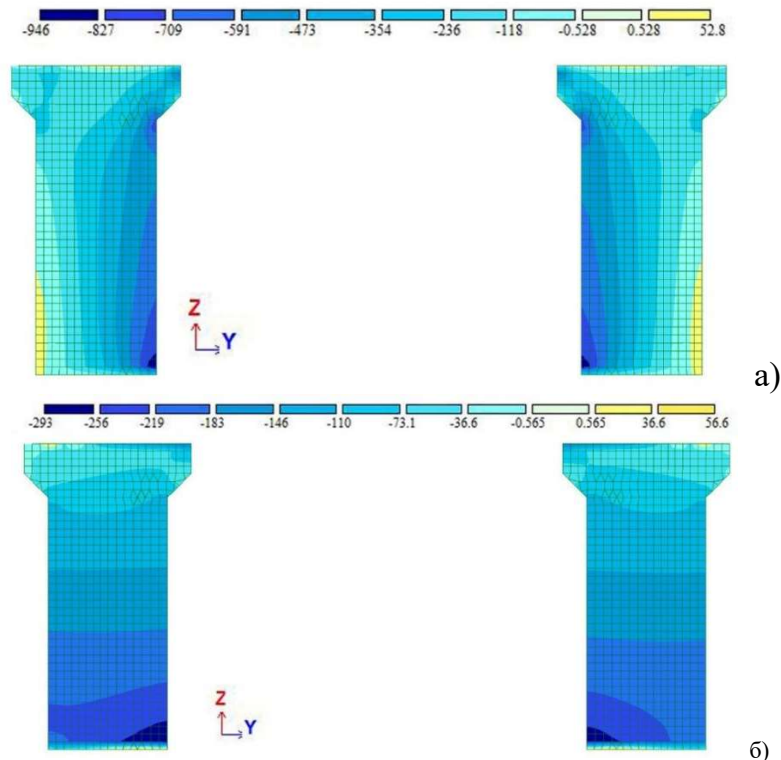


Рисунок 7 – Розподіл осьових напружень в колонах опори шляхопроводу по осі «7» комбінацій навантажень із тимчасовими рухомими навантаженнями 4 х А-15 в рівні пролітної будови та 2 х А-15 у проїзді над ростверками: а – N_y , т/м², б – M_y , тм/м.п.

Зазначені напруження мають сприйматися бетонним каменем та арматурою колони. З урахуванням моментної складової, стискаючі напруження значно більші – $N_{e, \min} = -1,47 \cdot 10^3 \text{ м / м}^2 = -14,7 \text{ МПа}$.

Умова міцності при стиску:

$$|N_{e, \min}| \leq f_{cd} \quad (1)$$

Оскільки $(|N_{e, \min}| = 14,7 \text{ МПа}) < (f_{cd} = 20 \text{ МПа})$, найбільш напружених (стиснутих) волокон перерізу колони опори по осі «7» забезпечена.

На зовнішній поверхні опори шляхопроводу локалізовані ділянки із розтягувальними напруженнями (див. рис. 7,а) – $N_{y, \max} = +0,528 \text{ МПа}$. Ці напруження мають сприйматися виключно арматурою. З урахуванням моментної складової ці напруження збільшуються до величини – $N_{e, \max} = +4,74 \text{ МПа}$.

Загальна товщина скінченного елемента розтягнутого волокна $\Delta = 0,2 \text{ м}$. Загальна ширина скінченного елемента розтягнутого волокна $b = 1,8 \text{ м}$.

Рівнодійна напружених розтягнутих волокон в цій зоні визначається за виразом (2):

$$R_y = N_{e, \max} \cdot b \cdot \Delta, [\text{кН}] \quad (2)$$

Підставляючи дані у формулу (2) отримуємо $R_y = 4,74 \cdot 10^6 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = 853 (\text{кН})$.

Виходимо з припущення, що бетонний камінь не може сприймати розтягувальні напруження, а ці напруження мають сприйматися виключно арматурою. Прийняте з конструктивних міркувань армування масивних колон у зоні розтягу за мінімальним відсотком армування – стрижні діаметром 32 мм класу А400, 8 шт., $A_s = 6434 \text{ мм}^2$.

Фактичні напруження у розтягнутій верхній арматурі:

$$\sigma_x = R_x \cdot \gamma_r / A_s = 853 \cdot 10^3 \cdot 1,05 / 6434 \cdot 10^{-6} = 140 (\text{МПа}) \quad (3)$$

Допустимі напруження у арматурі А-III $f_{yd} = 350 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

$(\sigma_x = 140 \text{ МПа}) < (f_{yd} = 350 \cdot 10^3 \text{ МПа})$. Умову виконано. Міцність розтягнутого армування найбільш навантаженої колони проїзної мостової опори забезпечено.

В) Розрахунок ростверків опори шляхопроводу по осі «7».

Найбільш не вигідний варіант завантаження ростверків опори по осі «7» спостерігається у випадку роботи пальового поля за схемою висячих паль. Ізополя згинальних моментів в елементах ростверків опори при не вигідному розташуванні візків тимчасових впливів 4 х А-15 (шляхопровід) та 2 х А-15 у проїзді безпосередньо над ростверками показані на рис. 8. При впливі на опору шляхопроводу комбінації навантажень із урахуванням екіпажу НК-100 величини згинальних моментів у ростверках менші, тому не розглядаються.

З рис. 8,а) видно, що розрахунковий згинальний момент у ростверках в напрямку глобальної осі Ох (вздовж шляхопроводу) при тимчасовому впливі від рухомого навантаження 4 х А-15 з урахуванням натовпу пішоходів складає $M_{x, \max} = +3280 \text{ кН} \cdot \text{м / м.л.}$ (тільки в зоні колон) Розрахунковий згинальний момент в повздовжньому напрямку складає $M_{x, \min} = -431 \text{ кН} \cdot \text{м / м.л.}$ Ці моменти впливають відповідно на нижнє і верхнє армування ростверків по осі «7» (поперек осі ростверків, вздовж осі шляхопроводу). Те саме у робочому напрямку по осі Оу (впливає на армування вздовж ростверків), рис. 8,б): $M_{y, \max} = +2130 \text{ кН} \cdot \text{м / м.л.}$, $M_{y, \min} = -3080 \text{ кН} \cdot \text{м / м.л.}$ Найбільші згинальні моменти локалізовані на ділянках посередині ростверків, а, також, поблизу внутрішньої грані колон.

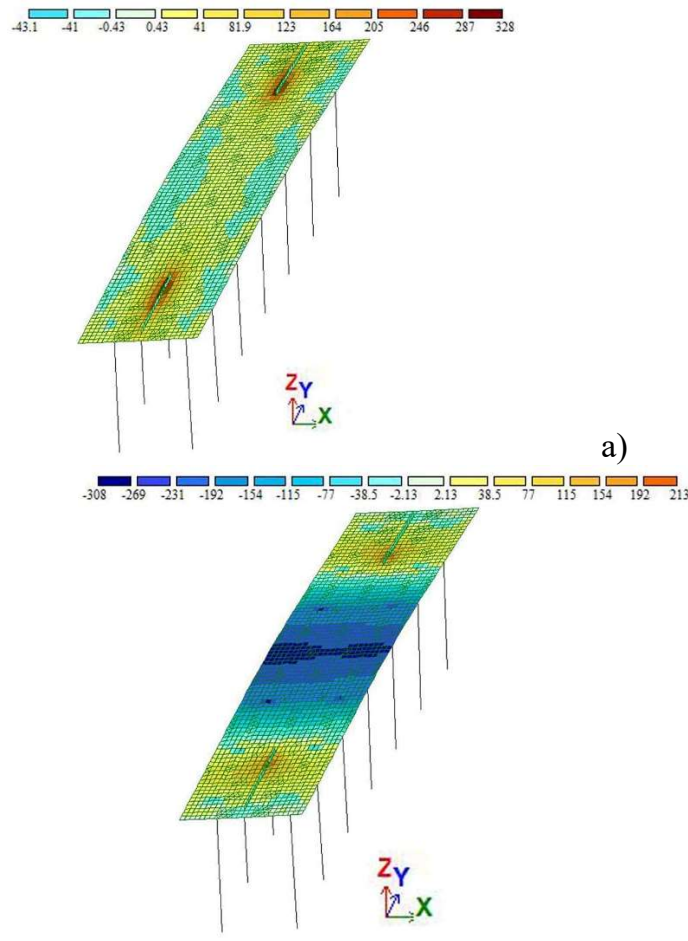


Рисунок 8 – Розподіл згинальних моментів в ростверках опори шляхопроводу по осі «7» при комбінації навантажень із тимчасовими рухомими навантаженнями 4 х А-15 в рівні пролітної будови та 2 х А-15 у проїзді над ростверками: а – M_x , б – M_y , тм/м.п.

Розрахунками виявлене потрібне армування ростверків, яке складає:

- в напрямку осі $0x$ (вздовж шляхопроводу, поперек осі ростверків), верхня та нижня зона розрахункового прямокутного перерізу шириною 1 м ростверків поблизу внутрішньої грані колон – стрижні діаметром 32 мм класу А400, улаштовані з кроком 200 мм у два ряди (рис. 9,а);
- в напрямку осі $0y$ (поперек осі шляхопроводу, вздовж ростверків), верхня та нижня зона розрахункового прямокутного перерізу шириною 1 м ростверків поблизу внутрішньої грані колон – стрижні діаметром 32 мм класу А400, улаштовані з кроком 100 мм (рис. 9,б).

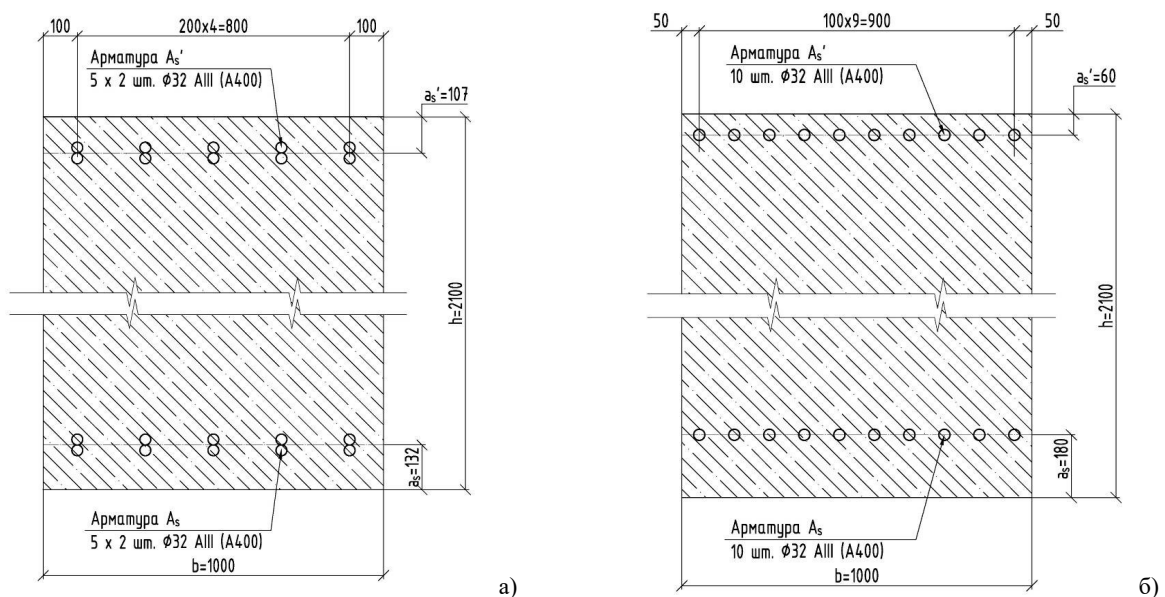


Рисунок 9 – Розрахунковий переріз ростверків по осі «7» зі схемою розрахункового армування: а – по $0x$ (поперек осі ростверків, вздовж шляхопроводу); б – по $0y$ (вздовж осі ростверків, поперек шляхопроводу).

Крім наведених у п. А)... В) результатів розрахунків було виконано комплексне оцінювання міцності похилих перерізів всіх конструктивних елементів опори шляхопроводу по осі «7» із проїздом, оцінено величини деформацій та тріщинистікості, а, також, оцінено коефіцієнти надійності найбільш важливих конструктивних елементів опори.

Прогини ригеля опори шляхопроводу по осі «7» від експлуатаційних впливів не перевищують 30 мм, що менше запасу (150 мм), врахованого при проектуванні проїзного прорізу.

Розрахунками встановлено наступне. Міцність ригеля опори шляхопроводу у м. Вінниці по осі «7», виходячи з умов улаштування армування, у кількості не менше зображеного на рис. 6, забезпечена. При цьому коефіцієнт використання перерізу не перевищує 0,773. Міцність колон опори з проїздом перерізом у плані 3 x 1,8 м забезпечена при улаштуванні рівномірного проектного армування із кроком 200 мм діаметром 32 мм класу А400 по зовнішньому контуру колони. При цьому коефіцієнт використання перерізу не перевищує 0,735. Міцність ростверків опори шляхопроводу по осі «7», виходячи з умов улаштування армування, яке не менше зображеного на рис. 9 забезпечена. При цьому коефіцієнт використання перерізу не перевищує 0,658. Розрахунки за другою групою граничних станів фрагментів шляхопроводу в осях «4-9» в зоні проїзної опори доводять наступне. Прогини ригеля опори шляхопроводу по осі «7» від експлуатаційних впливів не перевищують 30 мм, що менше запасу (150 мм), врахованого при проектуванні проїзного прорізу.

Висновки

Проведені наукові дослідження дозволили обґрунтувати принципову можливість та доцільність проектування проїзних опор шляхопроводів у вигляді літери «П». Така форма найбільш раціональна виходячи з умов безпеки руху та архітектурної виразності. Пропонована конструкція опор повинна містити дві колони прямокутного перерізу та видовжений ригель. Довжина вільного прольоту ригеля визначається за потрібною шириною проїзду. Для таких опор рекомендується улаштовувати пальові фундаменти, що об'єднані суцільними плитними ростверками. Це рішення ростверків, що перетворює «П»-подібну раму у замкнену «О»-подібну конструкцію, унеможливує горизонтальне розповзання опор внаслідок впливу розпорів та горизонтальних інерційних впливів збоку рухомого складу. Палі рекомендується розташовувати у вигляді окремих густих кушів під колонами та, більш розріджено, рівномірно, у проїзді.

Деталізованим моделюванням напружено-деформованого стану пропонованого конструктивного рішення проїзної опори (вісь «7») методом скінчених елементів для реальної проектованої споруди шляхопроводу у м. Вінниці встановлено найбільш небезпечні ділянки основних конструктивних компонентів опори. Для ригелів напруженими ділянками є фрагменти поблизу внутрішніх обрізів капітелей колон, для колон – внутрішні та зовнішні ділянки поблизу ростверків, для ростверків, подібно ригелям, ділянки поблизу внутрішніх обрізів колон та серединний переріз. Встановлено, також, що для проїзних опор найбільш небезпечним виявилася комбінація впливів із тимчасовим впливом рухомих навантажень А-15 одночасно у проїзді та на шляхопроводі, безпосередньо над опорою. При цьому не вигідна кількість смуг навантажень А-15 встановлюється за максимально можливою величиною кількості смуг руху в рівні шляхопроводу і проїзду. Ці висновки можна розповсюдити, також, на конструктивно подібні проїзні пори інших шляхопроводів.

Зазначений аналіз моделей споруди дозволив підібрати раціональні конструктивні параметри ригелів, колон та ростверків. При моделюванні встановлено, що висота та ширина перерізу ригеля обумовлюється, в основному, транспортним проїзним габаритом, товщина ростверків повинна бути не меншою за (1,2...1,4) висоти ригеля, раціональна довжина колон співставна з висотою ригеля, що слід помножити на коефіцієнт (1,5 ... 2,0). Описані раціональні співвідношення дозволили сформулювати методику конструювання проїзних опор, наведену у основній частині статті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попов В.О., Войцехівський О.В. Метод підсилення залізобетонних мостових опор улаштуванням бітрапецеїдальної обойми. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2022-1. С. 5 – 15. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/355784>; <https://dorndi.org.ua/ua/metod-pidsilennya-zalizobetonnih-mostovih-opor-ulashtuvanniam-bitrapeceidalnovo-oboymy>
2. Popov VOLODYMYR, Voitshivskiy OLEXANDR The effective method of strengthening of reinforced concrete beam bridges by arrangement of the horizontal steel-concrete cover system. Concrete structures for resilient society. Proceeding of the FIB Symposium 2020, 22-24 November, China, Shanghai. Chapter 12. P. 1258 – 1264.
3. Попов В.О. Метод реконструкції балочних мостів без зупинки їх експлуатації улаштуванням нової збірно-монолітної пролітної будови / В.О. Попов, І.В. Маєвська, А.В. Попова, М.Я. Жилівський // Сучасні технології, матеріали і

- конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2021-2. С. 5 – 15. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/35576>; <https://dorndi.org.ua/ua/metod-rekonstrukciyi-balochnih-mostiv-bez-zupinki-yih-ekspluatsiyi-ulashtuvannyam-novoyi-zbirno-monolitnoyi-prolitnoyi-budovi>
4. Попов В.О. Несуча здатність залізобетонних мостових балок за похилими перерізами / В.О. Попов, Д.М. Байда, О.В. Войцехівський, В.В. Котенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2024-1. С. 6 – 13. . Режим доступу: <https://mtmdc.com.ua/uk/journals/tom-21-1-2024>, <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-6-13>
 5. ДБН В.1.2-14:2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. К.: Мінбуд України, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
 6. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. [На заміну ДБН В.2.3-14:2006]. [Чинний від 2009-11-11] – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. (Державні будівельні норми України).
 7. ДСТУ 4100:2021. Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування. [На заміну ДСТУ 4100:2014]. [Чинний від 2021-11-01] – К.: ДП УкрНДНЦ, 2021 – 140 с. – (Національні стандарти України).
 8. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Введ. 3 2010-03-01 на заміну ДБН В.2.3-14:2006. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 84 с. – (Державні будівельні норми України).
 9. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
 10. ДБН В.2.3-14:2006. Мости та труби. Правила проектування. [На заміну СНиП 2.05.03-84]/ [чинний від 2006-05-06]. К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 217 с. – (Державні будівельні норми України).
 11. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Введ. 3 1 січня 2007 р. на заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с. – (Національний стандарт України).
 12. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с. – (Національні стандарти України).

REFERENCES

1. Popov V.O., Voytsekhiv's'kyi O.V. Metod pidsilennya zalizobetonnykh mostovykh opor ulashtuvannyam bitrapetseyidal'noyi oboymy. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2022-1. S. 5 – 15. Rezhym dostupu: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/355784>; <https://dorndi.org.ua/ua/metod-pidsilennya-zalizobetonnih-mostovih-opor-ulashtuvannyam-bitrapececidal'noyi-obovymi>
2. Popov VOLODYMYR, Voitsehivskiy OLEXANDR The effective method of strengthening of reinforced concrete beam bridges by arrangement of the horizontal steel-concrete cover system. Concrete structures for resilient society. Proceeding of the FIB Symposium 2020, 22-24 November, China, Shanghai. Chapter 12. P. 1258 – 1264.
3. Popov V.O. Metod rekonstruktsiyi balochnykh mostiv bez zupynky yikh ekspluatatsiyi ulashtuvannyam novoyi zbirno-monolitnoyi prolitnoyi budovy / V.O. Popov, I.V. Mayevs'ka, A.V. Popova, M.YA. Zhylovs'kyi // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2021-2. S. 5 – 15. Rezhym dostupu: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/35576>; <https://dorndi.org.ua/ua/metod-rekonstrukciyi-balochnih-mostiv-bez-zupinki-yih-ekspluatatsiyi-ulashtuvannyam-novoyi-zbirno-monolitnoyi-prolitnoyi-budovi>
4. Popov V.O. Nesucha zdattist' zalizobetonnykh mostovykh balok za pokhylymy pererizamy / V.O. Popov, D.M. Bayda, O.V. Voytsekhiv's'kyi, V.V. Kotenko // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2024-1. S. 6 – 13. Rezhym dostupu: <https://mtmdc.com.ua/uk/journals/tom-21-1-2024>, <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-6-13>
5. DBN V.1.2-14:2009. Zahal'ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel', sporud, budivel'nykh konstruktsiy ta osnov. K.: Minbud Ukrayiny, 2009. – 37 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
6. DBN V.2.3-22:2009 Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya. [Na zaminu DBN V.2.3-14:2006]. [Chynnyy vid 2009-11-11] – K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2009. (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
7. DSTU 4100:2021. Bezpeka dorozhn'oho rukhu. Znaky dorozhni. Zahal'ni tekhnichni umovy. Pravyla zastosuvannya. [Na zaminu DSTU 4100:2014]. [Chynnyy vid 2021-11-01] – K.: DP UkrNDNTS, 2021 – 140 s. (Natsional'ni standarty Ukrayiny).
8. DBN V.1.2-15:2009 Mosty ta truby. Navantazhennya ta vplyvy. [Na zaminu DBN V.2.3-14:2006]. [Chynnyy vid 2009-11-11] – K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2009. – 84 s. (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
9. DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya. [Na zaminu SNyP 2.01.07-85 (krim rozdil 10)]. [Chynnyy vid 2007-01-01] – K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 71 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
10. DBN V.2.3-14:2006 Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya. [Na zaminu SNyP 2.05.03-84]/ [chynnyy vid 2006-05-06]. K.: Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2006. – 217 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
11. DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya. Vved. Z 1 sichnya 2007 r. na zaminu rozdil 10 SNyP 2.01.07-85. K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 10 s. – (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
12. DSTU B V.2.6-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannya. [Chynnyy vid 2011-06-01]. - K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2011. – 118 s. – (Natsional'ni standarty Ukrayiny).

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.

Маєвська Ірина Вікторівна – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5999-6824

Попова Аліна Володимирівна – студент. Факультет хімії, біології та біотехнологій, Донецький національний університет імені Василя Стуса, м. Вінниця, Україна e-mail: alina.popova260702@gmail.com.

Азарков Михайло Сергійович – магістрант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, email: diamondchariot96@gmail.com.

V. Popov¹
I. Majewska¹
A. Popova²
M. Aharkov¹

THE MODELLING OF STRESS STREIN STATE OF OVERPASS PIERS WITH A HOLE FOR VEHICLE PASSAGE FOR THE RATIONAL DESIGN

¹Vinnitsia National Technical University

²Vasyl' Stus Donetsk National University, Ukraine

In the paper have been described a principled rational design solution for overpass piers, which must have the possibility of through-passage for vehicles through the piers, as a result of the complex urban planning situation, characteristic of the dense construction of typical regional and district cities of Ukraine. Thus, the pier have to simultaneously perform the function of maintaining the span structure of the overpass, and also ensure the technological possibility of laying at the level of the base of the pier of the roadway. Have been considered several basic constructive options for the arrangement of passage piers, which are arranged on weak soils. Have been analyzed the advantages and disadvantages of each. Among the selected options have been chosen the most rational one in the form of a monolithic P-shaped frame structure on the base of pile foundations, united by a solid slab grid. Have been also presented method of selecting the geometric parameters of the main structural components of such pier. The proposed engineering solutions were illustrated on the example of the designed overpass in the Vinnitsia city. Have been developed a fragment of the general plan of the overpass and the architectural form of the pier with a passage in the form of a spatial -shaped frame for this example. Have been carried out the selection of rational geometric parameters of the proposed architectural form taking into account the rules of traffic according by the described method. Have been developed a 3D-model of the specified architectural solution of the pier with a passage using the finite element method by standard software Lira-SAPR. Have been evaluated the most dangerous combinations of loads, which include technological effects on the structure at the level of the span of the overpass structure and at the level of roadway along the body of the support foundations. Have been analyzed the stress-strain state of the pier. Have been performed preliminary strength calculations for the developed model of the road pier and have been determined the most dangerous cross-sections, in which the maximum force and bending moment factors operate. Have been proven that the most loaded structural elements of the passage pier are the crossbar system that supports the span structure of the overpass, due to the large distance between the support posts, as well as the foundation structure, due to the horizontal components that arise during the movement of vehicles.

The performed design job confirm, from the point of view of strength and stiffness, the principle possibility of arrangement and the rationality of the selected structural solution of the pier with the passage.

Key words: overpass, passage piers, span structure, stress-strain state, reinforced concrete frame, transition structures.

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, Ukraine. email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Majewska Irina Victorivna – 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, Ukraine e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5999-6824

Popova Alina V. – student, Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnitsia city, Ukraine, e-mail: alina.popova260702@gmail.com.

Aharkov Myhailo S. – graduate student of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnitsia national technical university, Vinnitsia city, Ukraine. email: diamondchariot96@gmail.com