УДК 624.21.093:624.042.8.

В. О. Попов
А. В. Клімишина

РАЦІОНАЛЬНІ ВИБУХОСТІЙКІ МОСТОВІ ОПОРИ ПОЛІГОНАЛЬНОГО АБРИСУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій науковій роботі описане принципове конструктивне рішення проміжної опори багатопрогонової мостової конструкції, у вигляді монолітної полігональної густоармованої масивної конструкції, яка має високий ступінь захисту від вибухів, що можуть виникати у разі ракетно-дронової небезпеки, у порівнянні з традиційними збірними та збірно-монолітними мостовими опорами. Описані ймовірні вибухові впливи від боєголовок ударних безпілотників та методику спрощеного моделювання таких опор прикладанням епізодичних навантажень у вигляді надлишкового короткочасного повітряного тиску.

Ключові слова: проміжні мостові опори, ударна хвиля, полігональний абрис, надлишкове армування, стійкість та міцність.

Abstract

This research paper describes a fundamental structural design solution for an intermediate pier of a multi-span bridge structure, conceptualized as a monolithic, polygonal, heavily reinforced massive structure. This design provides a high level of blast resistance against potential explosions resulting from missile and drone threats, compared to traditional precast and precast-monolithic bridge piers. The paper outlines the probable blast effects from UAV warheads and presents a simplified modeling methodology for such piers by applying accidental loads in the form of short-duration transient overpressure.

Keywords: intermediate bridge piers, blast wave, polygonal outline, heavy reinforcement, stability and strength.

Вступ.

В умовах воєнного стану та тривалих бойових дій в Україні питання забезпечення надійності й живучості транспортної інфраструктури набуло особливого значення. Автомобільні та залізничні мости забезпечують транспортний зв'язок між регіонами, перевезення населення і вантажів, функціонування гуманітарних та логістичних маршрутів. Руйнування окремої мостової споруди на дорозі національного чи регіонального значення може призвести не лише до припинення руху на певній транспортній ділянці, а й до суттєвого ускладнення функціонування транспортної мережі цілого регіону. За відкритими даними іноземних джерел, станом на кінець 2025 р. прямі збитки транспортному сектору України оцінювалися у 40,3 млрд. доларів США, а потреби у його відновленні — у 96,3 млрд. доларів США [1].

Практичний досвід відновлення критичної інфраструктури України також свідчить про значну кількість, саме, мостових споруд, пошкоджених або зруйнованих унаслідок бойових дій. Зокрема, лише протягом 2024 було відновлено 20 мостів, мостових переходів і шляхопроводів на дорогах державного значення, які зазнали пошкоджень унаслідок воєнної агресії [2]. При цьому мости розглядаються як важливі об'єкти не лише цивільного транспортного сполучення, але й забезпечення логістичних та гуманітарних маршрутів. У 2026 році ракетно-дронові удари по транспортній інфраструктурі України, взагалі, та по її найбільш уразливій, мостовій, частині, зокрема, набули ще більш загрозливих масштабів.

Особливістю мостових споруд, як складних багатоелементних просторових системи є те, що її загальна працездатність значною мірою залежить від збереження несучої здатності окремих ключових елементів. До таких елементів належать конструкції прогонової будови та опорні конструкції. Найбільш визначальними для забезпечення міцності та стійкості багатопрогонових мостів в цілому є збереження цілісності проміжних мостових опор, через які навантаження від прогонової будови переда-

ються на фундаменти та основу. Втрата несучої здатності проміжної опори, або значні деформації опори, що супроводжуються понаднормативними горизонтальними переміщеннями, або руйнування опорної зони можуть спричинити втрату ділянки обпирання прогонової будови й розвиток локального або прогресуючого обвалення мостової споруди.

Результати сучасних досліджень вибухового впливу від фугасних ракетних боєголовок на залізобетонні мостові опори підтверджують критичність цих елементів для збереження загальної цілісності мосту. У наукових роботах, присвячених вибухостійкості залізобетонних мостових опор, зазначається, що пошкодження опори від інтенсивного короткочасного навантаження у вигляді однобічного стрибка тиску повітря, може суттєво знижувати її несучу здатність, а за несприятливого сценарію — створювати передумови для руйнування мостової системи [3, 4]. Особливе значення мають місцеве руйнування бетону, прямий зріз бетону і арматури, згинальна реакція та збереження залишкової несучої здатності після дії ударної хвилі.

Для мостів, що експлуатуються в умовах воєнних ризиків, врахування постійних, транспортних, температурних, вітрових та інших нормативних навантажень, обумовлених [5], може бути недостатньо для оцінювання живучості конструкції. ДБН В.2.3-22:2009 [6] встановлює загальні вимоги щодо надійності мостів, належного вибору матеріалів, конструктивної схеми та визначення розрахункових поєднань навантажень. Разом із тим сучасні умови зумовлюють доцільність додаткових наукових досліджень роботи найбільш відповідальних елементів споруди за короткочасних аварійних і вибухових впливів.

Постановка проблеми

Серед характерних небезпек воєнного часу для транспортної інфраструктури можна виділити ударні безпілотні літальні апарати, крилаті ракети, а також інші засоби ураження, дія яких може супроводжуватися повітряною ударною хвилею, уламковим впливом та локальним руйнуванням конструктивних елементів. Для інженерного аналізу одним із визначальних параметрів такого впливу є надлишковий тиск у фронті ударної хвилі. Його величина залежить від енергії вибуху, відстані до конструкції, геометрії перешкоди, умов відбиття й дифракції хвилі та інших чинників. У міжнародній практиці розрахунку вибухостійких конструкцій застосовуються підходи, що передбачають визначення параметрів ударної хвилі та подальший динамічний розрахунок конструктивних елементів [7]. Отже, постає задача дослідження – запропонувати раціональне конструктивне рішення мостової опори із підвищеною стійкістю проти вибухових хвиль, а також, окреслити методику дослідження її надійності.

Основна частина

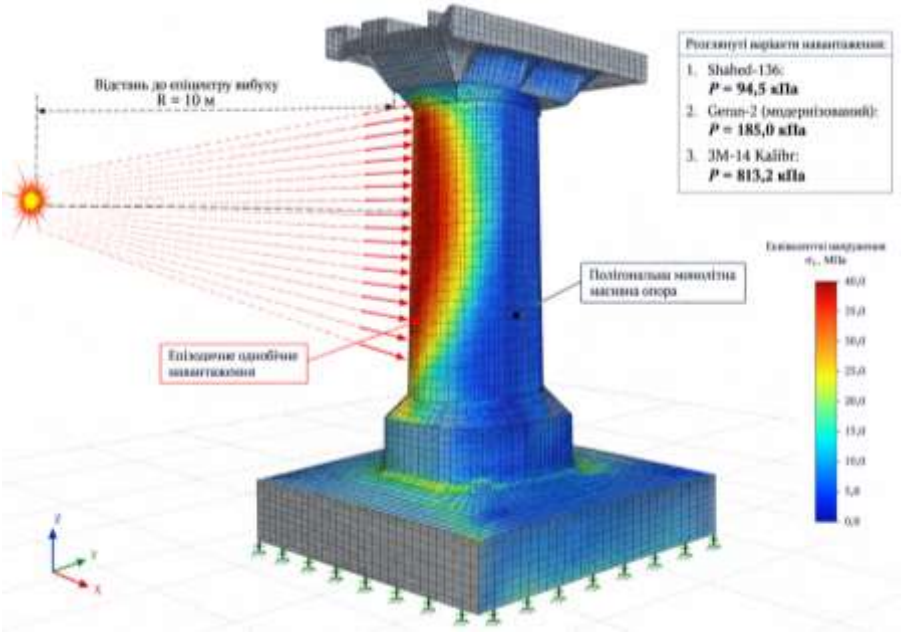
Одним із перспективних напрямів підвищення конструктивної живучості мостів є застосування масивних монолітних залізобетонних густоармованих проміжних опор, у яких ригельна система та ствол опори нерозривно зв’язані між собою. На відміну від традиційних опорних систем мостів, що складаються з окремих збірних елементів та, як наслідок, значної кількості стикових з’єднань, монолітна конструкція утворює просторово цілісне неперервне тіло. Відсутність монтажних стиків у тілі монолітної опори зменшує кількість потенційно вразливих зон, у яких за імпульсної дії вибухової хвилі можуть виникати значні взаємні переміщення окремих елементів. Водночас, уразливими для понаднормативних зміщень залишаються опорні частини (шарнірні пружно-піддатливі гумові або гумово-металеві елементи). Тому питанню запобігання втраті надійного обпирання прогонової будови на опорні частини необхідно приділити особливу увагу. Необхідно розробити конструктивні заходи із забезпечення стійкості положення опорних частин і вузлів її закріплення, наприклад, улаштуванням обмежувачів руху або іншими запобіжними пристроями.

Як варіант конструктивної реалізації монолітної вибухостійкої опори можна запропонувати використання масивних опор полігонального абрису [8]. Багатогранна форма поперечного перерізу дозволяє створювати архітектурно виразну конструкцію, а зміна орієнтації граней відносно напрямку зовнішньої вибухової дії та може зменшувати вплив надлишково тиску на опору за рахунок перерозподілу внутрішніх напружень. Дослідження вибухонавантажених мостових опор показують, що форма абрису і розміри поперечного перерізу є одними з параметрів, які необхідно враховувати під час визначення розподілу вибухового навантаження по поверхні конструкції. У роботі L. L. Ma, H. Wu та Q.

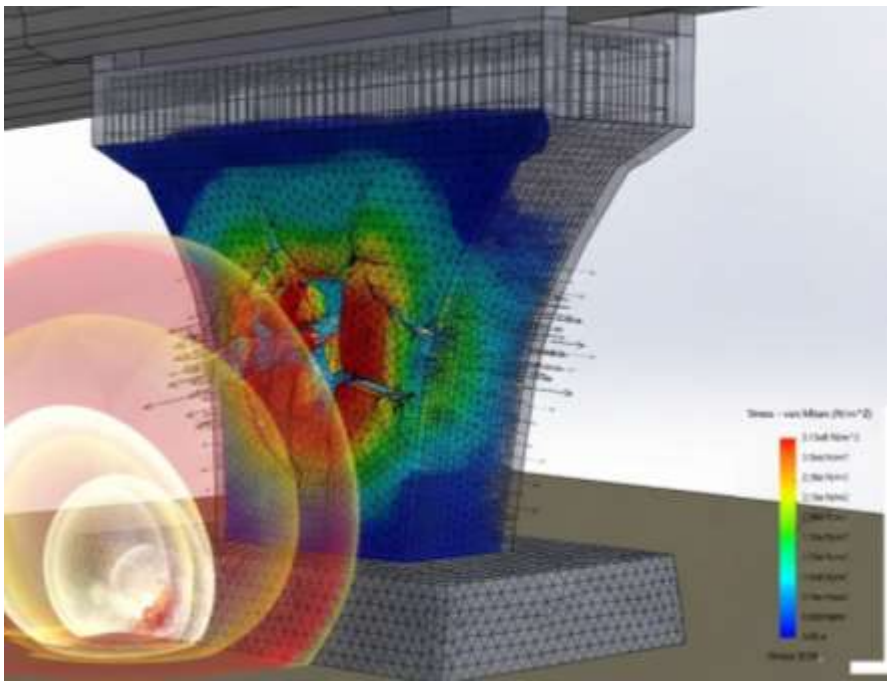
Fang [3], зокрема, чисельне моделювання виконувалося з урахуванням різних форм поперечного перерізу та ефектів відбиття і дифракції ударної хвилі.

Таким чином, поняття раціональної вибухостійкої опори доцільно розглядати не лише як збільшення її масивності. Раціональність конструкції повинна полягати у поєднанні достатньої площі поперечного перерізу, просторової жорсткості, належного армування, конструктивної цілісності та такої геометрії зовнішнього контуру, яка забезпечує сприятливіший розподіл напружень за різних напрямків короткочасної вибухової дії. Огляд сучасних досліджень вибухостійкості мостів підтверджує актуальність комплексного підходу, який передбачає врахування вибухового навантаження, поведінки опор, прогонових будов, вузлів та загальної стійкості мостової системи [7].

Для чисельного оцінювання надійності запропонованої конструкції було розглянуто декілька конструктивних різновидів проміжних опор, в тому числі, полігональну монолітну масивну опору під дією умовного однобічного вибухового навантаження (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Схема моделювання однобічного вибухового навантаження на проміжні мостові опори різної форми: а – опора у вигляді цилінроїда, б – масивна полігональна опора.

Моделі розроблено методом скінчених елементів із залученням ефективних програмних комплексів Solid Works та Cosmos Works, оскільки саме чисельне моделювання є одним із поширених інструментів оцінювання вибухостійкості залізобетонних мостових опор [3, 4, 8]. На рисунку показано схему прикладання епізодичного однобічного навантаження.

Вибуховий вплив у першому наближенні представлено у вигляді повітряного тиску, прикладеного до однієї сторони конструкції. Через велику швидкість розповсюдження ударної хвилі негативним тиском (відтоком) повітря з протилежного від джерела вибуху боку опори у першому наближенні можна знехтувати. Виходячи з даних відкритих джерел рекомендується відстань від опори до умовного епіцентру вибуху попередньо приймати близькою до 10 м. У наданому розрахунковому фрагменті розглянуті три умовні сценарії — Shahed-136 (умовний тротиловий TNT-еквівалент 40 кг), модернізований Geran-2 (TNT-еквівалент ~90 кг) і 3M-14 Kalibr (TNT-еквівалент ~450 кг), для яких прийняті орієнтовні надлишкові тиски відповідно 94,5; 185,0 та 813,2 кПа. Ці попередні величини однобічного навантаження на опору запропоновано використовувати саме, як можливі розрахункові сценарії для порівняльного моделювання. Прийняті вихідні значення мають орієнтовний характер і використовуються як параметри для постановки порівняльного чисельного експерименту. У подальшому вони можуть задаватися в скінченно-елементній моделі опори у вигляді короткочасного однобічного навантаження з визначенням напружено-деформованого стану конструкції та порівнянням варіантів її геометрії.

Візуалізація поля еквівалентних напружень дає змогу простежити характер їх перерозподілу в тілі опори, у зоні переходу до фундаменту та в підферменній частині. З рис. 1 видно, що у полігональної опори, внаслідок масивного розміру, периферійні від вибуху ділянки не є перенапруженими і, як наслідок, така опора, навіт в разі суттєвих пошкоджень ділянок поблизу епіцентру вибуху може виконувати свої функції. Подальше дослідження може передбачати порівняння декількох форм поперечного перерізу за однакових матеріалів, висоти, площі перерізу та граничних умов з визначенням максимальних напружень, переміщень і зон концентрації деформацій. Крім того, потрібно дослідити питання можливості улаштування наскрізних отворів в такій опорі, розміри та форму таких отворів для ефективного пропускання ударної хвилі через опору без поглинання всієї енергії удару.

Наведені приклади моделювання напружено-деформованого стану слід розглядати саме як попередню розрахункову постановку. Реальний вибух є короткочасним динамічним процесом, а тиск по поверхні опори не є постійним за часовим і просторовим параметрами. На розподіл навантаження впливають відбиття ударної хвилі від поверхні прогонової будови розрахункової та сусідніх опор, огинання хвилі навколо зазначених конструкцій та геометрична форма (абрис) самої опори. Тому для поглибленого дослідження доцільним є перехід від статичного еквівалентного навантаження до динамічного розрахунку з використанням залежності «тиск–час» та врахуванням нелінійної роботи бетону й арматури під навантаженням.

Отже, забезпечення живучості мостових споруд в умовах сучасних воєнних загроз вимагає перегляду підходів до формування їх конструктивних рішень. Особливу увагу доцільно приділяти проміжним опорам як елементам, пошкодження яких може спричинити втрату обпирання прогонових будов і суттєве порушення транспортного сполучення.

Висновки

Проведені в цій науковій роботі науково-практичні дослідження на основі скінчено-елементного моделювання на ефективних програмах типу Cosmos Works дозволили запропонувати раціональну полігональну конструктивну форму мостової опори з високими характеристиками вибухостійкості. Застосування масивної монолітної залізобетонної конструкції полігонального абрису може розглядатися, як один із перспективних напрямів створення опор із підвищеною стійкістю до локальних короткочасних впливів через наявність численних недонапружених конструктивних ділянок. Окреслено напрямки подальших досліджень, пов’язаних з чисельним порівнянням полігональної, прямокутної та циліндроїдної та інших раціональних форм опор за однакових вихідних умов із визначенням напружено-деформованого стану, характеру пошкоджень і залишкової несучої здатності конструкції та перевіркою їх надійності та довговічності. Також потребують додаткових досліджень питання пов’язані з орієнтацію вибухової хвилі по відношенню до опори та питання перепустку частини ударної хвилі крізь отвори у мостовій опорі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ukraine. Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5). Government of Ukraine, World Bank Group, European Commission, United Nations, 2026. URL: https://openknowledge.worldbank.org/... (дата звернення: 06.10.2026).

2. Аварійні та зруйновані внаслідок російської агресії мости в процесі відновлення: підсумки завершених проєктів у 2024 році. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, 2025. URL: https://restoration.gov.ua/... (дата звернення: 06.10.2026).

3. Ma L. L., Wu H., Fang Q. Blast-resistant design approach for RC bridge piers. International Journal of Impact Engineering. 2023. Vol. 180. 104685. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104685.

4. Yuan S., Li Y., Zong Z., Li M., Xia Y. A review on close-in blast performance of RC bridge columns. Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2023. Vol. 10, No. 4. P. 675–696. DOI: 10.1016/j.jtte.2023.07.001.

5. ДБН В.1.2-15:2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 95 с. (Державні будівельні норми України).

6. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, Мінрегіонбуд України.2009. 54 с.

7. UFC 3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of Defense, USA.

8. Zong Z., Gan L., Yuan S., Li M., Shan Y., Lin J., Xia M., Chen Z. Review on Anti-blast Resistance and Safety Protection of Bridge Structures. China Journal of Highway and Transport. 2024. Vol. 37, No. 5. P. 1–37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.05.001.

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

Клімишина Аліна Віталіївна – магістрантка факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, email: kysliakalinavitalievna@gmail.com. ORCID 0009-0004-4671-8525

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

Kyslyak Alina V. – student of Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine, email: kysliakalinavitalievna@gmail.com. ORCID 0009-0004-4671-8525