

УДК 625.745.1

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННОГО ПАВОДКА ТА РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УНАСЛІДОК ПРОРИВУ ҐРУНТОВОЇ ГРЕБЛІ

Кандидати техн. наук О. О. Давиденко, І. А. Козарчук, М. В. Гаркуша

MODELING OF TECHNOGENIC FLOOD AND THE PERFORMACE OF ROAD TRANSPORT STRUCTURES AS A RESULT OF AN EARTH DAM FAILURE

PhD (Tech.) O. Davydenko, PhD (Tech.) I. Kozarchuk,
PhD (Tech.) M. Harkusha

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362495>



***Анотація.** У статті розглянуто основні причини прориву ґрунтової греблі з аналізом причин руйнувань. Наведено приклад існуючих катастроф, пов'язаних із проривом ґрунтових гребель, і на основі досліджень встановлено основні фактори, які впливають на руйнування гребель. У роботі проаналізовано існуючі методи прогнозування прориву ґрунтових гребель.*

Будівництво гребель відіграє важливу роль у життєдіяльності людини: збір і регулювання поверхневих вод, боротьба з повенями, іригаційні системи, водопостачання та джерело електроенергії. Однак гідротехнічні споруди у вигляді гребель можуть являти небезпеку через втрату важливого джерела води, непоправних фінансових втрат і втрати домівок і життя людей. Прориви гребель можуть відбуватися як поступово, так і раптово. Поступове руйнування частіше трапляється в ґрунтових греблях через явище переповнення або прориву. Раптові прориви часто трапляються в бетонних греблях через переповнення або ковзання.

Техногенні паводки, викликані проривом напірних фронтів гідротехнічних споруд з утворенням отворів у тілі греблі, відбуваються значно рідше, ніж природні повені, однак їхні руйнівні наслідки можуть бути значно серйозніші.

Унаслідок прориву ґрунтової греблі необхідно визначити ступінь затоплення та час проходження техногенного паводка для встановлення пропускної спроможності водопропускних споруд, які застосовують у разі фактичного прориву ґрунтової греблі. У цьому випадку важливо зробити точні прогнози, які впливають на попередження та

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Давиденко О. О., Козарчук І. А., Гаркуша М. В., 2026.

ефективність роботи водопропускних споруд для зменшення або уникнення наслідків техногенного наводка.

Результатами роботи є гідрологічні і гідравлічні розрахунки з визначенням розрахункових витрат, рівня високих вод, загального розмиву і підпору. На основі досліджень, зважаючи на розраховану величину загального розмиву та геологічну будову русла та заплавної частини отвору водопропускної споруди, рекомендовано передбачити укріплення конусів стоянів. Запропоновано влаштування двовічкової металеві гофрованої конструкції, яка здатна пропустити воду на пересипаній насипами частині заплави у випадку прориву греблі. Під час виконання роботи рекомендовано обстежити греблю для визначення її технічного стану та необхідного подальшого ремонту, щоб забезпечити надійне функціонування споруд.

Ключові слова: автомобільна дорога, водопропускна споруда, ґрунтова гребля, транспортна споруда, наводок, прорив греблі.

Abstract. The article examines the main causes of earth dam failures, including an analysis of the mechanisms leading to structural destruction. Examples of existing disasters associated with earth dam failures are presented, and based on previous studies, the key factors influencing dam failure are identified. The paper also provides an analysis of existing methods for predicting earth dam failures.

Dam construction plays an important role in human activity by enabling the collection and regulation of surface water, flood control, irrigation systems, water supply, and power generation. However, hydraulic structures in the form of dams can pose significant hazards due to the potential loss of critical water resources, irreversible financial losses, and the destruction of homes and loss of human life. Dam failures may occur either gradually or suddenly. Gradual failure is more common in earth dams and is typically associated with overtopping or internal erosion. Sudden failures more often occur in concrete dams due to overtopping or sliding.

Technogenic floods caused by the failure of the pressure fronts of hydraulic structures, resulting in the formation of failures within the dam body, occur much less frequently than natural floods; however, their destructive consequences can be significantly more severe.

In the event of an earth dam breach, it is necessary to determine the extent of inundation and the travel time of the technogenic flood in order to assess the hydraulic capacity of water conveyance structures used under actual dam failure conditions. In this context, the development of accurate forecasts is critical, as they directly affect early warning measures and the operational efficiency of water conveyance structures, helping to reduce or prevent the consequences of technogenic flooding.

The results of the study include hydrological and hydraulic calculations to determine the design discharge and high-water levels, as well as overall scour and backwater effects. Based on the obtained results, including the calculated total scour depth and the geological characteristics of the channel and floodplain within the opening of the water conveyance structure, it is recommended to provide reinforcement of the inlet and outlet cones. The installation of a double-cell metal corrugated structure is proposed, capable of conveying the design discharge across the embankment-filled section of the floodplain in the event of a dam failures. During the study, it is also recommended to conduct a detailed inspection of the dam to assess its technical condition and determine the need for further repairs to ensure the reliable operation of the structures.

Keywords: automobile road, culvert structure, earth dam, transport structure, flood, dam failure.

Вступ. У світі було збудовано понад 800 000 гребель і дамб, однак їхня історія

пов'язана з історією їх руйнування [1]. Існує сотні випадків руйнування гребель і дамб,

що сталися за минулі століття, і навіть сьогодні вони руйнуються під тиском води з катастрофічними наслідками [1], що призводить до викиду великої кількості води у вигляді паводкових вод і мулу, завданих шкоди і збитків людям та економіці, загрозливих для життя ризиків, а також втрати води в країні [2].

Найгірша у світі катастрофа, що пов'язана з греблями, сталася в провінції Хенань у Китаї в серпні 1975 року, коли водосховища Баньцяо та Шимантан катастрофічно вийшли з ладу через переповнення, спричинене зливовими дощами, унаслідок чого миттєво загинуло близько 85 000 людей, а ще більше – від голоду та епідемій після цієї катастрофи [3].

У США 5 червня 1976 року прорвало греблю Тітон (Teton Dam) (рис. 1) [4].

Унаслідок аварії було випущено майже 300 000 акрів води, а потім затоплено сільськогосподарські угіддя та міста нижче за течією, що призвело до втрати 14 життів і збитків, які оцінюють, за різними джерелами, від 1 до 2 млрд дол. [4]. Причини техногенної катастрофи пов'язані з інженерними прорахунками. Основа греблі складалася з базальтових порід, а вони через свою високу проникність непридатні для будівництва гребель, унаслідок просочення води в тіло греблі та насичення лесових ґрунтів (суглинисто-піщана гірська порода) поступово розпочалося їх вимивання, призводячи до тріщин уже безпосередньо в тілі греблі, що спричинило її руйнування [4]. Греблю після аварії не відновлювали.



Руйнування греблі внаслідок прориву



Затоплене місто Рексбург, унаслідок прориву



Стан греблі Тітон у 2004 році

Рис. 1. Прорив греблі Тітон і його наслідки

В Україні паводок 1998 року на річці Тиса став одним із найбільш катастрофічних за останні 200 років, що забрав життя 17 осіб. Паводковими водами і місцевим стоком у листопаді було зруйновано 2984 житлових будинки, підтоплено 40793 житлових будинки, пошкоджено 2877 будівель, що викликало потребу у відселенні 24340 осіб [5].

Найпоширенішими механізмами руйнування земляних гребель і дамб є зовнішня ерозія через перелив потоку та внутрішня ерозія через просочування.

Руйнування через переповнення є найпоширенішою причиною руйнування гребель – 48 % зареєстрованих випадків руйнування гребель [6]. Земляні або кам'яні насипи є найпоширенішими типами гребель у світі. Наприклад, статистика, опублікована Комітетом США з великих дамб (1975), показує, що близько 80 % великих гребель у США побудовані з використанням еродованого ґрунтового матеріалу, що робить їх особливо схильними до руйнування через переповнення [6], і часто розмиваються [7], тому для зменшення ризику паводка

необхідні точне оцінювання проривів, що виникають під час їх руйнування, а також аналіз водопропускної спроможності споруд.

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий за останні десятиліття [8], моделювання проривів гребель усе ще є активною сферою теоретичних і прикладних досліджень, що викликає великий інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з найперших публікацій про руйнування гребель можна вважати роботу Г. Стерлінга [9], а перші методи прогнозування процесів руйнувань з'явилися лише на початку 80-х років минулого століття [10].

У новітній історії зафіксовано 12 масштабних аварій на греблях у період з 1946 по 1955 рік, у той же час побудовано понад 2000 нових гребель, із 1956 року по 1965 рік зафіксовано 24 аварії та побудовано понад 2500 нових гребель [11, 12].

На основі досліджень встановлено основні фактори, які впливають на руйнування гребель: землетрус, нерівномірне осідання, просочування, переповнення, руйнування конструкції дамби, зсуви, неналежне будівництво, саботаж [1–13].

Слід зазначити, що ймовірність руйнування гребель може бути досить низькою, однак виникнення руйнування матиме катастрофічні наслідки, що включає потенційну втрату людських життів, майна (житлові будинки, комерційні будівлі, промислові об'єкти, сільськогосподарські угіддя та пасовища), інфраструктурних і комунальних споруд, розташованих нижче за течією [12], а отже, прогнозування ймовірності руйнувань є актуальним і необхідним.

Наразі існує низка моделей моделювання прориву гребель, що широко використовували, таких як прогнозування національної метеорологічної служби, Mike-21 (Датський гідравлічний інститут), гідрограф повеней НЕС-1 (Інженерний корпус армії США), гідрограф уніфіко-

ваного прориву дамби BOSS DAMBRK гідродинамічної маршрутизації повеней і служби охорони ґрунтів (SCS) TR#66 [12].

Точне прогнозування характеристик прориву є одним із найважливіших і найскладніших питань для аналізу проблем руйнування ґрунтових гребель, і воно має багато невизначеностей [14]. Протягом останніх кількох десятиліть була розроблена модель оцінювання стоку за проривів земляних гребель через переповнення, переважно з використанням математичних методів [2].

У роботі [7] проаналізовано 74 прориви гребель насипу для оцінювання параметрів, необхідних в емпіричних моделях утворення проривів, які розглядають їх як трапецію. Вирази для параметрів, тобто середня ширина прориву, коефіцієнт бічного ухилу трапецієподібного отвору та час утворення прориву, а також їхні дисперсії, були розроблені на основі даних. Результати моделювання мають розподіли ймовірностей, які охоплюють усі потенційні результати моделі повені. Дослідження [15], проведені під час експериментальних проривів греблі, включали повторні контрольні вимірювання, а також порівняння з числовими результатами, отриманими за допомогою програмного забезпечення PLAXIS 3D.

Авторами роботи [16] було розроблено математичну модель прогнозування наслідків прориву греблі на практичній основі (Республіка Казахстан) зі створенням алгоритму для розрахунку максимального рівня хвилі прориву з урахуванням різних параметрів гідротехнічної споруди.

Колектив авторів [17] розглядають наслідки можливого руйнування глиняної насипної греблі Сіріу в Румунії, вибір тематичного дослідження базований на деяких важливих критеріях, включаючи її розташування в регіоні, схильному до землетрусів, і високий ризик повеней, тип греблі та попередні проблеми з ними, що визначають необхідність впровадження програми спостереження за безпекою.

Для оцінювання впливу конфігурацій перешкод під час прориву греблі на поведінку потоку досліджено варіанти перешкод для подальшого вивчення впливу та наслідків прориву греблі [18].

Рім Нассер, Дімітріс Ціуціос та Іліу Лю [19] сформулювали ефективне управління ризиками, що має вирішальне значення для зниження вразливості від структурних аварій; основним принципом управління ризиками є визнання того, що відмови в критичній інфраструктурі – дамбі – часто передбачувані. Автори навели особливості виникнення аварій і їх можливе попередження.

Отже, можна стверджувати, що дослідження і моделювання техногенного паводка та роботи транспортних споруд автомобільних доріг унаслідок прориву ґрунтової греблі є актуальними і необхідними.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є моделювання

техногенного паводка та роботи транспортних споруд автомобільних доріг унаслідок прориву ґрунтової греблі.

Основна частина дослідження. Міст розташований поблизу с. Нова Миколаївка в Харківській області. Вище за течією (приблизно 1,7 км) розташоване водосховище із земляною греблею довжиною 513 м (водогосподарський паспорт Миколаївського водосховища Ізюмського району Харківської області) і шириною 6 м (рис. 2, 3).

Струмок бере свій початок поблизу с. Рижове приблизно в 17,7 км від створу моста. Відмітки змінюються від 179 до 77 м. Середній похил до створу мостового переходу – 0,0057. Похил у створі мостового переходу – 0,003 – отримано з використанням програмного комплексу Google Earth (рис. 3). Площа водозбірного басейну до створу мостового переходу – 114 км². Рівень меженних вод – 77,65 м.

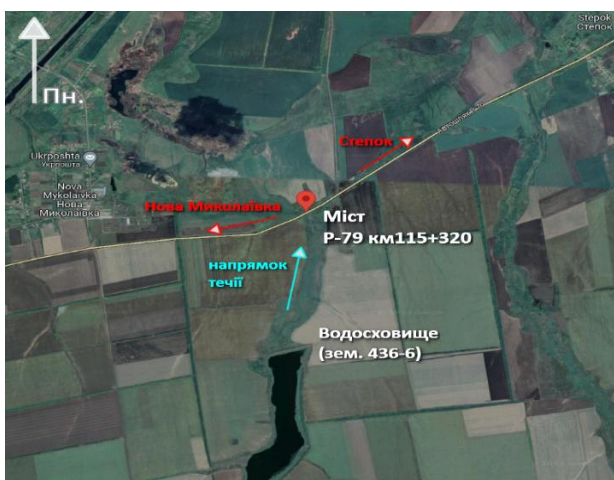


Рис. 2. Місце розташування моста на карті

Розрахунок максимальних витрат води від опадів. Оскільки дані багаторічних натурних спостережень за водотоком відсутні, необхідно визначити розрахункові гідрологічні характеристики з використанням теоретико-емпіричних залежностей для норми стоку від зливи та сніготанення.

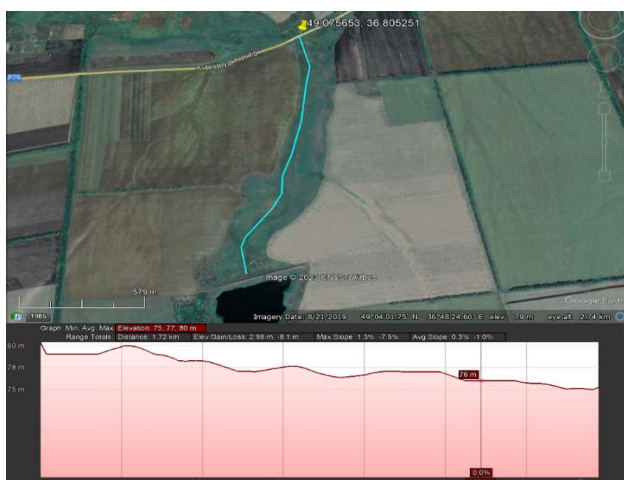


Рис. 3. Зображення профілю рельєфу вздовж русла струмка, між мостом і греблею

Розрахункові максимальні витрати можуть бути:

- від зливогого стоку (дощові паводки);
- танення снігу (весняні повені).

Для розрахунків приймають максимальні витрати такого походження, за якого створено найбільш несприятливі умови для роботи споруди, при цьому за розрахункову приймають витрати, сформовані більшим об'ємом стоку повені або паводка.

Розрахунковими є максимальні миттєві витрати води. На великих річках ці витрати збігаються із середніми добовими максимальними витратами води. На малих річках унаслідок внутрішньодобової нерівномірності стоку середньодобовий максимум менший від миттєвих максимальних витрат води, тому в розрахунки для малих річок уведено відповідні поправки.

Розрахунок максимальних витрат за відсутності даних спостережень виконують згідно з джерелом [20].

Оскільки міст через довжину 18 м належить до малих мостів (< 25 м), а категорія дороги – III, тому, за табл. 6.2 ДБН В.2.3-22:2009 [21], імовірність перевищення розрахункових максимальних витрат повені приймають $P = 2\%$.

Для розрахунку максимальних витрат від зливого стоку використовують емпіричну редуційну формулу

$$Q_{зл} = q_{200} \cdot \left(\frac{200}{F}\right)^{n_3} \cdot \delta \cdot \delta_2 \cdot \delta_3 \cdot \lambda_p \cdot F, \quad (1)$$

де $Q_{зл}$ – максимальні витрати зливого стоку за ймовірності перевищення P , м³/с;

q_{200} – модуль максимального дощового стоку забезпеченістю 1 %, приведений до площі водозбору 200 км², м³/с·км²;

F – площа водозбірного басейну перед розрахунковим створом, км²;

n_3 – показник ступеня редуції модуля максимальних витрат;

δ – коефіцієнт, що враховує вплив озер, ставків і водосховищ басейну на зниження величини максимальних витрат;

δ_2 – коефіцієнт, що враховує вплив заболоченості водозбору на зниження

величини максимальних витрат (для гірських річок 1,0);

δ_3 – коефіцієнт, що враховує зміну величини максимальних дощових витрат q_{200} залежно від зміни середньої висоти водозбору в гірських районах, визначають за даними гідрологічно вивчених річок;

λ_p – коефіцієнт переходу від одновідсоткової забезпеченості до розрахункової.

Отже, $F = 114$ км². Параметр $q_{200} = 0,2$. Показник ступеня редуції $n_3 = 0,7$. Перехідний коефіцієнт $\lambda_p = 0,86$. Коефіцієнти отримано внаслідок вихідних параметрів і табличних значень [20].

Для розрахунку максимальних витрат від танення снігу використовують емпіричну редуційну формулу Воскресенського-Соколова

$$Q_{сн} = \frac{k_0 \cdot h_p \cdot \mu}{(F + F_1)^{n_1}} \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot F, \quad (2)$$

де $Q_{сн}$ – розрахункові миттєві максимальні витрати води від сніготанення (весняної повені) забезпеченістю P , м³/с;

k_0 – коефіцієнт дружності весняної повені;

h_p – шар стоку весняної повені тієї самої розрахункової забезпеченості, мм;

μ – коефіцієнт, що враховує нерівність статистичних параметрів шару стоку і максимальних витрат;

F – площа водозбірного басейну перед розрахунковим створом, км²;

F_1 – додаткова площа водозбору, що враховує зниження редуції, км²;

n_1 – показник ступеня, що характеризує редуцію модуля максимального стоку залежно від площі водозбору;

δ – коефіцієнт, що враховує вплив озер, ставків і водосховищ басейну на зниження величини максимальних витрат;

δ_1 – коефіцієнт, що враховує вплив лісистості басейну на зниження величини максимальних витрат;

δ_2 – коефіцієнт, що враховує вплив заболоченості водозбору на зниження величини максимальних витрат (для гірських річок 1,0).

Шар стоку h_p визначають за такими статистичними параметрами: середній багаторічний шар стоку h_0 , коефіцієнти варіації CV і асиметрії CS стоку повені [20].

Значення h_0 визначають за картами ізоліній середнього шару стоку весняної повені, що відтворює середні зональні умови формування строку весняної повені. Для врахування азональних факторів використовують поправочні коефіцієнти, які враховують вплив на стік повені рельєфу водозбору, закарстованість і озерність. Значення цих коефіцієнтів k_1 і k_2 .

За результатами розрахунку, оскільки максимальні витрати від сніготанення більші, ніж від зливого стоку ($Q_{сн} = 84 \text{ м}^3/\text{с} > Q_{зл} = 28 \text{ м}^3/\text{с}$), то за розрахункові витрати від опадів Q_o приймаємо витрати від сніготанення $Q_o = Q_{сн} = 84 \text{ м}^3/\text{с}$.

Визначення розрахункових витрат води внаслідок прориву греблі. Методика визначення розрахункових витрат на мостових переходах, розташованих у зоні впливу гребель, залежить від капітальності останніх, тобто можливості їх прориву.

Якщо з проходженням розрахункових для мостового переходу витрат води не забезпечено збереження всіх елементів греблі, то таку греблю слід розглядати як некапітальну (для мостового переходу, що проєктують).

Витрати води під час прориву греблі, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$Q_{зр} = B_{зр} \cdot H_n^{\frac{3}{2}} \cdot K_{пр}, \quad (3)$$

де $Q_{зр}$ – витрати води під час прориву греблі, $\text{м}^3/\text{с}$;

$B_{зр} = 513 \text{ м}$ – довжина греблі за урізом води у верхньому б'єфі для граничного наповнення водосховища, м (за копією

водогосподарського паспорта Миколаївського водосховища Ізюмського району Харківської області);

$H_n = 10,25 \text{ м}$ – напір (різниця відміток рівнів води у верхньому (89,5) і нижньому (79,25) б'єфах до прориву греблі, м (за копією водогосподарського паспорта Миколаївського водосховища Ізюмського району Харківської області);

$K_{пр}$ – коефіцієнт, що враховує відношення можливої ширини прориву до довжини греблі $B_{зр}$ та умови закінчення води з проривом.

Отже, виконавши розрахунки, отримаємо $Q_{зр} = 4209 \text{ м}^3/\text{с}$.

Витрати у створі переходу, який розташований у нижньому б'єфі водосховища на відстані L від греблі, визначають за формулою

$$Q_{зр.м} = \frac{W_0 \cdot Q_{зр} \cdot i^{0,14}}{W_0 \cdot i^{0,14} + \varphi \cdot Q_{зр} \cdot L_p}, \quad (4)$$

де $Q_{зр.м}$ – витрати води в створі переходу, $\text{м}^3/\text{с}$;

$W_0 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ – об'єм водосховища для найвищого рівня верхнього б'єфу, м^3 (за копією водогосподарського паспорта Миколаївського водосховища Ізюмського району Харківської області);

$Q_{зр}$ – витрати води під час прориву греблі, $\text{м}^3/\text{с}$;

i – поздовжній похил русла, %;

φ – коефіцієнт умов проходження хвилі, дорівнює 1,2 $\text{с}/\text{м}$;

L_p – розрахункова відстань від греблі до створу моста, м , $L_p = L - l_{гас} = 1597,5 \text{ м}$,

де L – відстань від греблі до створу мостового переходу, м ;

$l_{гас}$ – довжина ділянки гасіння енергії, м .

Отже, виконавши розрахунки, отримаємо $Q_{зр.м} = 1016 \text{ м}^3/\text{с}$.

За водогосподарчим паспортом на Миколаївське водосховище, розташоване у верхньому б'єфі проєктованого мостового

переходу на відстані 1,7 км від створу моста, існуючу греблю може вважати капітальною за такою ознакою: якщо греблю проєктували на витрати води з імовірністю перевищення 1% і жодних порушень у роботі за час її експлуатації не спостерігали, то під час проєктування автодорожніх мостів греблю можна вважати неруйнівною.

Розраховано витрати води у створі проєктованого мостового переходу в разі прориву греблі, зважаючи на воєнний стан. Витрати від прориву греблі в створі мостового переходу – 1016 м³/с. За таких витрат для забезпечення функціонування моста та дороги в разі прориву греблі необхідно значно підвищувати і укріплювати насип дороги, збільшувати отвір моста, що економічно недоцільно для існуючих будівельно-технічних умов будівництва на дорозі третьої категорії.

У подальших розрахунках ухвалено рішення визначати рівень розрахункової високої води у створі моста і проєктні параметри мостового переходу відповідно до витрат води від сніготанення для забезпеченості 2% – 84 м³/с.

Розрахунок загального розмиву.

Нижня межа загального розмиву – це найбільший розмив, що викликаний тривалим впливом на підмостове русло розрахункового паводка постійної висоти. Глибину нижньої межі розмиву визначають за формулою граничного балансу [20]

$$h_{pn} = h_{p,max} \cdot \beta^{8/9} \cdot \left[\frac{B_p}{B_{pm} \cdot (1 - \lambda)} \right]^{2/3}, \quad (5)$$

де h_{pn} – глибина нижньої межі розмиву, м;
 $h_{p,max}$ – максимальна глибина русла до розмиву, м (1,09 м);
 B_p – побутова ширина русла, м (36,54 м);
 B_{pm} – ширина русла під мостом з урахуванням його зрізки (розширення), м;
 λ – відносна ширина опори моста,

$$\lambda = \frac{b_{on}}{l_{np}}, \quad (6)$$

де b_{on} – середньозважена ширина опори (0 м – проміжні опори відсутні);
 l_{np} – довжина прогону, м (18 м);
 β – коефіцієнт стиснення потоку,

$$\beta = \frac{Q}{Q_p + \frac{(\sum Q_z) \cdot (L_m - B_p)}{\sum B_z}}, \quad (7)$$

де Q – витрати води, м³/с;
 Q_p – витрати води річки (струмка), м³/с;
 $\sum B_z$ – сумарна ширина заплав (80,30 + 6,51 = 86,81 м);
 $\sum Q_z$ – сумарні витрати на заплавах (43,8 + 6,6 = 50,4 м³/с);
 L_m – отвір моста у світлі (16,45 м);
 B_p – побутова ширина русла, м.

Коефіцієнт стиснення потоку β на піку паводка для $P = 2\%$ та отвору моста $L_m = B_{pm}$

$$\beta_{2\%} = \frac{Q}{Q_p}, \quad (8)$$

де Q – витрати води, м³/с;
 Q_p – витрати води річки (струмка), м³/с

Якщо $\beta_{2\%} < 1,7$, зрізку не влаштовують, тобто $B_{pm} = B_p$.

Якщо $\beta_{2\%} \geq 1,7$, ширину B_{pm} визначають за формулою, м,

$$B_{pm} = B_p \cdot \left[(\beta^{0,93} - 1) \cdot K_p \cdot K_n + 1 \right], \quad (9)$$

де B_{pm} – ширина русла під мостом з урахуванням його зрізки (розширення), м;
 B_p – побутова ширина русла, м;
 β – коефіцієнт стиснення потоку;
 K_p – коефіцієнт, що враховує ймовірність затоплення заплав;
 K_n – коефіцієнт, що враховує повноту паводка P .

Розраховують ширину русла під мостом після розмиву за формулами:

- для коефіцієнта розмиву, що враховує повноту паводка, $P_{П\%} < 95 \%$:

$$K_p = \left(\frac{P_{П\%}}{100} \right)^{0,5 + \frac{2,5}{\beta_{2\%}}}; \quad (10)$$

- коефіцієнта розмиву, що враховує повноту паводка $P_{П\%} \geq 95 \%$, $K_p = 1$;

$P_{П\%}$ – імовірність затоплення заплави у місці переходу, %, визначають за емпіричною кривою імовірності максимальних рівнів води.

Допустиму глибину в руслі під мостом після розмиву визначають з урахуванням конструкції, глибини закладення фундаменту руслових опор і вимоги, щоб коефіцієнт розмиву P (відношення глибини під мостом після розмиву до побутової глибини) був не більше 1,5 для суднохідних річок і не більше 2 – для несуднохідних:

$$P = \frac{h_{рн}}{h_{р.макс}} \leq 1,5 \text{ або } 2, \quad (11)$$

де $h_{рн}$ – глибина нижньої межі розмиву, м;

$h_{р.макс}$ – максимальна глибина русла до розмиву, м.

Отже, отримаємо відносну ширину опори моста

$$\lambda = \frac{0}{20} = 0.$$

$\beta_{2\%} = \frac{84,0}{33,6} = 2,5 > 1,7$ – необхідна зрізка русла.

Визначимо ширину русла з урахуванням зрізки.

Виконавши розрахунки, отримаємо $\beta = 3,83$; $B_{рм} = 96,95$ м; ширина зрізки $b_{зр} = 60,41$ м.

Глибина загального розмиву

$$h_{рн} = 1,09 \cdot 3,83^{\frac{8}{9}} \cdot \left[\frac{36,54}{96,95 \cdot (1-0)} \right]^{\frac{2}{3}} = 1,88 \text{ м.}$$

$$P = \frac{1,88}{1,09} = 1,50 < 2 \text{ – умова виконується.}$$

Мінімальна відмітка русла з урахуванням загального розмиву $H_{р.заг}$

$$H_{р.заг} = PPBB - h_{рн} = 78,60 - 1,88 = 76,72 \text{ м,}$$

де $PPBB$ – розрахунковий рівень високої води, м;

$h_{рн}$ – глибина нижньої межі розмиву, м.

За відсутності зрізки глибина загального розмиву $h_{рн} = 3,6$ м.

Мінімальна відмітка русла з урахуванням загального розмиву без влаштування зрізки

$$H_{р.заг} = PPBB - h_{рн} = 78,60 - 3,60 = 75,00 \text{ м.}$$

Аналіз існуючих проєктних рішень.

На основі розрахунків рекомендовано застосувати замість існуючого моста транспортну споруду у вигляді металевої

гофрованої конструкції (МГК) MultiPlate MP200 VM 11, шириною отвору 4,13 м і стрілою підйому 2,57 м (рис. 4, 5).

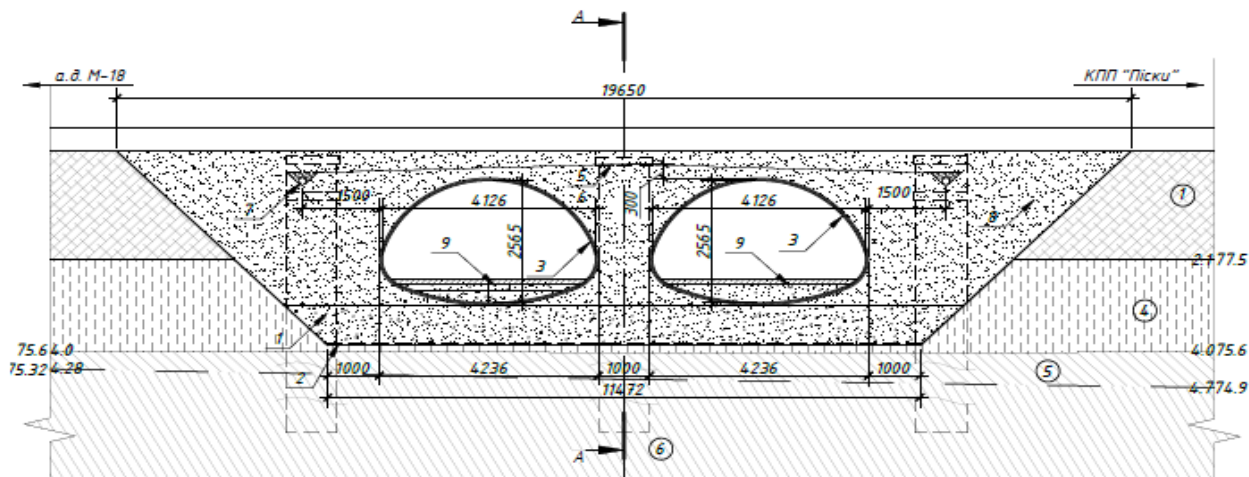


Рис. 4. Проект фасаду рекомендованої металевої гофрованої конструкції

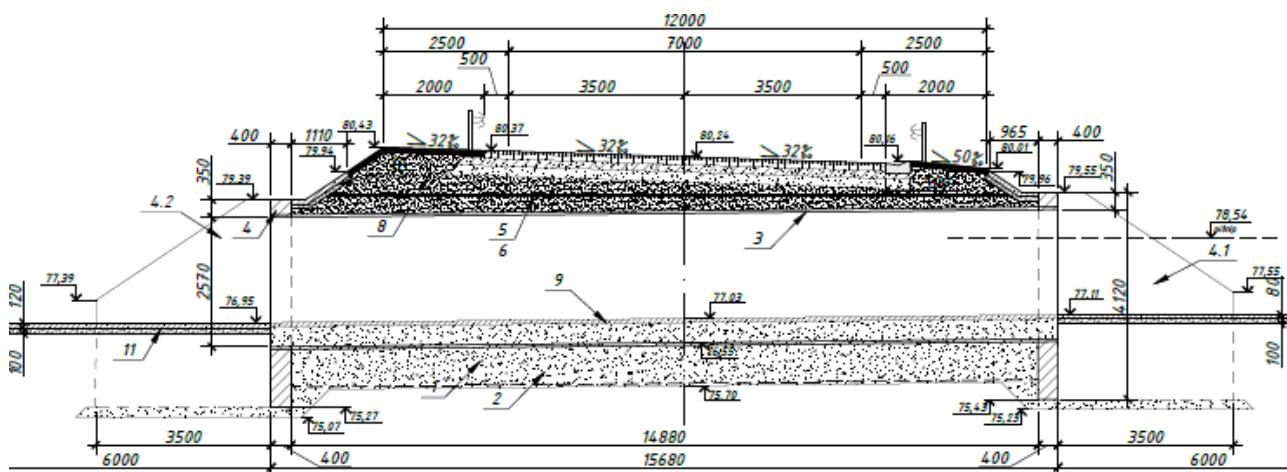


Рис. 5. Проект поздовжнього перерізу рекомендованої металевої гофрованої конструкції (переріз А-А, згідно з рис. 4)

Пропускна спроможність дорожніх труб залежить переважно від напору перед спорудою, розміру отворів і конструкції вхідних оголовків. Розраховують пропускну спроможність труб за рівняннями гідравліки, які відповідають режиму протікання потоку через споруду.

За отриманими розрахунками, водопропускна труба працює за витрат $40 \text{ м}^3/\text{с}$, а отже, працює в напівнапірному режимі.

Перспективи подальших досліджень мають відповідати загальносвітовим вимогам щодо створення методології розрахунку

та прогнозування можливого техногенного паводка внаслідок прориву ґрунтової греблі.

Висновки

В Україні відсутні нормативні документи, які мають чіткий алгоритм розрахунку, тому під час виконання розрахунків застосовано підходи з літературних джерел, суміжних нормативних документів [20, 22] та наявного досвіду виконання подібних розрахунків.

Із гідрологічними та гідравлічними розрахунками визначено розрахункові витрати і рівень високих вод, загальний

розмив і підпір. На основі цього рекомендовані мінімальні відмітки насипу підходів і проїзної частини для пропускання високих вод з імовірністю перевищення розрахункових витрат $P = 2 \%$, для $P = 1, 5, 10 \%$ розрахунки виконано аналогічно до $P = 2 \%$.

Виходячи з розрахованої величини загального розмиву та геологічної будови русла і заплавної частини отвору моста рекомендовано передбачити укріплення конусів стоянів, наприклад монолітним залізобетоном, збірними бетонними блоками, габіонами, і русла, наприклад кам'яною засипкою або габіонними матрацами.

Аналіз проектних рішень у вигляді двовіскової металевої гофрованої конструкції (МГК) MultiPlate MP200 VM 11 показав

забезпеченість прийнятної гідравлічної роботи споруди в безнапірному та напівнапірному режимах, яка здатна пропустити воду на пересипаній насипами частині заплави з урахуванням існуючих справних водопропускних споруд у зоні басейну водозбору.

Рекомендовано передбачити конструкції фундаменту і/або додаткове укріплення русла для МГК MultiPlate MP200 VM 11, що будуть ураховувати теоретичну глибину розмиву, визначену у звіті.

Результати можуть бути використанні для розроблення проекту моста або корегування існуючого проектного рішення МГК.

Рекомендовано обстежити греблю для визначення її технічного стану та необхідності подальшого ремонту, щоб забезпечити надійне функціонування споруд.

Список використаних джерел

1. Zagonjoli, Migena. (2007). *Dam break modelling, risk assessment and uncertainty analysis for flood mitigation*. 140. URL: https://repository.tudelft.nl/file/File_43a12582-841d-44e4-aa3c-f804bf3a34ff?preview=1 (accessed on 01.12.2025).
2. Jie, L., Jiajun, X., Hujun, H. & Xuewei, L. (2022). Analysis of the Influence Relationship for the Earth Dam-Break Outflow Estimation Parameters. *In Proceedings of the 3rd International Symposium on Water, Ecology and Environment*. SciTePress, 1, 150–155. <https://doi.org/10.5220/0011950300003536> (accessed on 01.12.2025).
3. Qing, D. (1998). *The River Dragon has come!: Three Gorges dam and the fate of China's Yangtze River and its people*. Taylor & Francis. 270.
4. Wu, W. (2016). Introduction to DLBreach – A Simplified Physically-Based Dam/Levee Breach Model. *Technical Report*. 120 p.
5. Компанія Басейнове управління водних ресурсів річки Тиса. URL: <https://buvrtyasa.gov.ua/newsite/?p=16747> (дата звернення: 01.02.2025).
6. Ashraf, M., Soliman, A. H., El-Ghorab, E. & El Zawahry, A. (2018). Assessment of Embankment Dams Breaching Using Large Scale Physical Modeling and Statistical Methods. *Water Sci*, 32, 362–379. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110492917301273> (accessed on 01.12.2025).
7. Froehlich, D. (2008). Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)) (accessed on 01.12.2025).
8. Aureli, F., Maranzoni, A. & Petaccia G. (2024). Advances in Dam-Break Modeling for Flood Hazard Mitigation: Theory, Numerical Models, and Applications in Hydraulic Engineering. *Water*, 16(8). 1093. <https://doi.org/10.3390/w16081093> (accessed on 01.12.2025).
9. Sterling, G. Analysis of the Earth Dam Failure (1916). *Engineering News-Record*, Jun. 13(2),75.
10. Benoist, G. (1989). Les etudes d'ondes de submersion des grands barrages d'EDF. *La Houille Blanche*, 1, 43–54.

11. Jansen, R. B. (1988). Advanced dam engineering for design construction and rehabilitation. *Van nostrand reinhold*, 8–16.
12. Kho, Freddy, Law, Puong, Lai, Sai, Oon, Yin, Ngu, Lock & Ting, H. (2009). Quantitative dam break analysis on a reservoir earth dam. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6, 203–210. <https://doi.org/10.1007/BF03327623> (accessed on 01.12.2025).
13. Pandey, B. R., Knoblauch, H. & Zenz, G. (2024). Potential Dam Breach Flood Assessment with the 2D Diffusion and Full DynamicWave Equations Using a Hydrologic Engineering Center-River Analysis System. *Water*, 16, 277. <https://doi.org/10.3390/w16020277> (accessed on 01.12.2025).
14. MacDonald, T. C. & Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching Characteristics of Dam Failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 567 – 586. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567)) (accessed on 01.12.2025).
15. Guney, Mehmet, Dumlu, Emre & Okan, Merve. (2023). Experimental Study of the Evolution of the Breach and the Discharge through the Breach Resulting from Piping Due to Seepage at the Mid-part of Earthfill Dam. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 12, 43–51. <https://doi.org/10.18178/ijscer.12.2.43-51> (accessed on 01.12.2025).
16. Talgat, M., Ziyatbekova, G., Jomartova, S., Mazakova, A. & Mergengali, Y. (2025). Mathematical model of mudflow breakthrough, taking into account the decrease in the volume of water in the reservoir. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8, 2255-2263. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i4.8361> (accessed on 28.03.2026).
17. Ionescu, C.-S., Gogoșe-Nistoran, D.-E., Baciu, C. A., Cozma, A., Motovilnic, I. & Brașovanu L. (2025). The Impact of a Clay-Core Embankment Dam Break on the Flood Wave Characteristics. *Hydrology*, 12(3). 56. <https://doi.org/10.3390/hydrology12030056> (accessed on 28.03.2026).
18. Beteille, E., Larrarte, F., Boyaval, S., Demay, E. & Le, Minh-Hoang (2025). Dam-break flow over various obstacles configurations. *Journal of Hydraulic Research*, 63, 156-170. <https://doi.org/10.1080/00221686.2025.2460020> (accessed on 28.03.2026).
19. Nasser, R., Tzioutzios, D. & Liu, Y. (2025). Statistical Analysis of Global Dam Accidents in the 21st Century: A Focus on Common Features and Causes. *Water Resour Manage*, 39, 6493–6516. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04259-7> (accessed on 28.03.2026).
20. СНиП 2.01.14-83. Визначення розрахункових гідрологічних характеристик. Київ: Мінрегіонбуд України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4260 (дата звернення 01.12.2025).
21. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ: Мінрегіонбуд України. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/46649051ee40205e820d275fd51c595f> (дата звернення 01.12.2025).
22. Методичні рекомендації цивільного захисту. Розд. 3.2. Характеристика осередків ураження, що виникають при аваріях на гідротехнічних спорудах. Харків, 2011. (Інформація та документація).

References

1. Zagonjolti, Migena. (2007). *Dam break modelling, risk assessment and uncertainty analysis for flood mitigation*. 140. URL: https://repository.tudelft.nl/file/File_43a12582-841d-44e4-aa3c-f804bf3a34ff?preview=1 (accessed on 01.12.2025).
2. Jie, L., Jiajun, X., Hujun, H. & Xuewei, L. (2022). Analysis of the Influence Relationship for the Earth Dam-Break Outflow Estimation Parameters. *In Proceedings of the 3rd International Symposium on Water, Ecology and Environment*. SciTePress, 1, 150–155. <https://doi.org/10.5220/0011950300003536> (accessed on 01.12.2025).

3. Qing, D. (1998). *The River Dragon has come!: Three Gorges dam and the fate of China's Yangtze River and its people*. Taylor & Francis. 270.
4. Wu, W. (2016). Introduction to DLBreach – A Simplified Physically-Based Dam/Levee Breach Model. *Technical Report*. 120 p.
5. *Kompaniya Basesnove upravlinnya vodnykh resursiv richky Tysa* [Company Tisza River Basin Water Resources Management]. Retrieved from: <https://buvrtyasa.gov.ua/newsite/?p=16747> (accessed on 01.02.2025) [in Ukrainian].
6. Ashraf, M., Soliman, A. H., El-Ghorab, E. & El Zawahry, A. (2018). Assessment of Embankment Dams Breaching Using Large Scale Physical Modeling and Statistical Methods. *Water Sci*, 32, 362–379. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110492917301273> (accessed on 01.12.2025).
7. Froehlich, D. (2008). Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)) (accessed on 01.12.2025).
8. Aureli, F., Maranzoni, A. & Petaccia G. (2024). Advances in Dam-Break Modeling for Flood Hazard Mitigation: Theory, Numerical Models, and Applications in Hydraulic Engineering. *Water*, 16(8). 1093. <https://doi.org/10.3390/w16081093> (accessed on 01.12.2025).
9. Sterling, G. Analysis of the Earth Dam Failure (1916). *Engineering News-Record*, Jun. 13(2),75.
10. Benoist, G. (1989). Les etudes d'ondes de submersion des grands barrages d'EDF. *La Houille Blanche*, 1, 43–54.
11. Jansen, R. B. (1988). Advanced dam engineering for design construction and rehabilitation. *Van nostrand reinhold*, 8–16.
12. Kho, Freddy, Law, Puong, Lai, Sai, Oon, Yin, Ngu, Lock & Ting, H. (2009). Quantitative dam break analysis on a reservoir earth dam. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6, 203–210. <https://doi.org/10.1007/BF03327623> (accessed on 01.12.2025).
13. Pandey, B. R., Knoblauch, H. & Zenz, G. (2024). Potential Dam Breach Flood Assessment with the 2D Diffusion and Full DynamicWave Equations Using a Hydrologic Engineering Center-River Analysis System. *Water*, 16, 277. <https://doi.org/10.3390/w16020277> (accessed on 01.12.2025).
14. MacDonald, T. C. & Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching Characteristics of Dam Failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 567 – 586. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567)) (accessed on 01.12.2025).
15. Guney, Mehmet, Dumlu, Emre & Okan, Merve. (2023). Experimental Study of the Evolution of the Breach and the Discharge through the Breach Resulting from Piping Due to Seepage at the Mid-part of Earthfill Dam. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 12, 43–51. <https://doi.org/10.18178/ijscer.12.2.43-51> (accessed on 01.12.2025).
16. Talgat, M., Ziyatbekova, G., Jomartova, S., Mazakova, A. & Mergengali, Y. (2025). Mathematical model of mudflow breakthrough, taking into account the decrease in the volume of water in the reservoir. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8, 2255-2263. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i4.8361> (accessed on 28.03.2026).
17. Ionescu, C.-S., Gogoase-Nistoran, D.-E., Baciu, C. A., Cozma, A., Motovilnic, I. & Braşovanu L. (2025). The Impact of a Clay-Core Embankment Dam Break on the Flood Wave Characteristics. *Hydrology*, 12(3). 56. <https://doi.org/10.3390/hydrology12030056> (accessed on 28.03.2026).
18. Beteille, E., Larrarte, F., Boyaval, S., Demay, E. & Le, Minh-Hoang (2025). Dam-break flow over various obstacles configurations. *Journal of Hydraulic Research*, 63, 156-170. <https://doi.org/10.1080/00221686.2025.2460020> (accessed on 28.03.2026).

19. Nasser, R., Tzioutzios, D. & Liu, Y. (2025). Statistical Analysis of Global Dam Accidents in the 21st Century: A Focus on Common Features and Causes. *Water Resour Manage*, 39, 6493–6516. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04259-7> (accessed on 28.03.2026).

20. SNyP 2.01.14-83. *Vyznachennya rozrakhunkovykh hidrolohichnykh kharakterystyk* [SNiP 2.01.14-83. *Determination of design hydrological characteristics*]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4260 (accessed on 01.12.2025) [in Ukrainian].

21. DBN V.2.3-22:2009. *Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya*. [DBN V.2.3-22:2009. *Bridges and pipes. Basic design requirements*]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. Retrieved from: <https://e-construction.gov.ua/files-token/46649051ee40205e820d275fd51c595f> (accessed on 01.12.2025). [in Ukrainian].

22. Metodichni rekomendatsiyi tsyvil'noho zakhystu. Rozd. 3.2. Kharakterystyka oseredkiv urazhennya, shcho vynykayut' pry avariyakh na hidrotekhnichnykh sporudakh. [Methodological recommendations for civil protection. Section 3.2. Characteristics of damage foci that occur during accidents at hydraulic structures]. Kharkiv, 2011. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Давиденко Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна.

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>. Тел.: +38 (050) 471-33-99.

E-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua.

Козарчук Ігор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-4972-6016>. Тел.: +38 (093) 889-56-46. E-mail: igorkozarchuk@ntu.edu.ua.

Гаркуша Микола Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>. Тел.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Davydenko Oleksandr, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>. Тел.: +38 (050) 471-33-99.

E-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua.

Kozarchuk Ihor, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-4972-6016>. Тел.: +38 (093) 889-56-46.

E-mail: igorkozarchuk@ntu.edu.ua.

Harkusha Mykola, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>. Тел.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Дата надходження статті 21.12.2025 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY