

УДК 625.745.1

**ЗАХОДИ З ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ГАСІННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФОРМ РУХУ
ПОТОКІВ ВОДИ В НИЖНЬОМУ Б'ЄФІ ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ**

Канд. техн. наук М. В. Гаркуша

**MEASURES FOR PREVENTING AND EXTINGUISHING DANGEROUS WATER FLOW
PATTERNS IN THE DOWNSTREAM SECTION OF ROAD CULVERTS**

PhD (Tech.) M. V. Harkusha

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336352>



***Анотація.** Дорожні водопропускні труби є наймасовішими штучними спорудами на автомобільних дорогах. Слід зазначити, що нижній б'єф таких споруд працює у складних експлуатаційних умовах зі значною нерівномірністю розподілу питомих витрат, високою кінетичністю потоку, насиченістю потоку донними наносами, камінням, сміттям, що спричиняє розмивання нижнього б'єфу споруди та руйнування насипу і штучної споруди. Попередити утворення небезпечних форм руху рідини в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб можна шляхом застосування інженерних споруд, що дають змогу змінити механізм руху та швидкісну структуру потоку за водопропускною спорудою, що може бути досягнуто за рахунок влаштування гасника енергії для забезпечення вирівнювання за шириною відвідного русла витрат, глибин, швидкості та зниження їхньої пульсації. Одним із слабких місць дорожніх водопропускних труб є зона нижнього б'єфу, що нерідко зазнає деформації, оскільки з виходом струменя з дорожньої водопропускної труби круглого перерізу в каналі трапецеїдальної форми з'являється збійність течії, утворюються водоворотні зони,*

формуються великі донні швидкості. Тому необхідно змусити потік води розтікатися без збійності, із більш сприятливою швидкісною структурою та зменшеними актуальними швидкостями у придонній області.

На сьогодні відомо про велику кількість руйнувань нижнього б'єфа, що змушує розробляти нові конструкції нижнього б'єфу дорожнього водовідводу. Можна виділити два підходи щодо розв'язання проблеми кріплення нижніх б'єфів дорожніх водопропускних споруд: повна відмова від улаштування конструкцій гасників енергії і зсув на значну відстань вирви розмиву від дорожнього насипу; використання гасників енергії, розсікачів або розсіювачів різного типу.

Для запобігання пошкодженню потоком дорожніх водопропускних труб у нижньому б'єфі необхідно виконувати гасіння небезпечних форм руху потоків води.

У статті розглянуто заходи з попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб.

Ключові слова: гасіння енергії, дорожня водопропускна труба, нижній б'єф, русло, потоки води.

Abstract. Road culverts are the most common type of artificial structure on highways. It is important to note that the downstream section of these structures operates under challenging conditions characterized by a significant uneven distribution of specific discharges, high kinetic energy of the flow, and a stream saturated with bottom sediments, stones, and debris. These factors cause erosion of the downstream section and destruction of both the embankment and the culvert itself.

Preventing the formation of dangerous water flow patterns in the downstream section of road culverts can be achieved through the use of engineering structures that alter the flow mechanism and velocity structure behind the culvert. This can be accomplished by installing energy dissipators, which help to equalize the flow distribution across the width of the downstream channel, normalize flow depths and velocities, and reduce their pulsations.

One of the weakest areas of road culverts is the downstream zone, which is often subject to deformation. This occurs when water exits a circular culvert into a trapezoidal channel, flow disruption, vortex zones, and high bottom velocities form. Therefore, it is necessary to make the water flow spread without disruption, with a more favorable velocity structure and reduced actual velocities near the bottom.

Currently, there is widespread damage to downstream sections, which necessitates the development of new downstream structural designs for road drainage systems. Two main approaches can be distinguished for addressing the problem of reinforcing culvert downstream sections: complete abandonment of energy dissipator structures with relocation of the scour hole far from the road embankment; or the use of various types of energy dissipators, deflectors, or diffusers.

To prevent damage to road culverts by water flow in the downstream section, it is essential to eliminate dangerous water flow patterns.

This article discusses measures for preventing and damping dangerous water flow patterns in the downstream section of road culverts.

Keywords: energy dissipation, road culvert, downstream section, channel, water flows.

Вступ. Одним із слабких місць дорожніх водопропускних труб є зона нижнього б'єфу, що нерідко зазнає деформації, оскільки з виходом струменя з дорожньої водопропускної труби круглого

перерізу в каналі трапецеїдальної форми з'являється збійність течії, утворюються водоворотні зони, формуються великі донні швидкості [1]. Тому необхідно змусити потік води розтікатися без збійності, із

більш сприятливою швидкісною структурою та зменшеними актуальними швидкостями у придонній області.

Оскільки глибини в зоні вільного розтікання бурхливого потоку порівняно невеликі, істотної дисипації енергії досягають застосуванням укріплень із підвищеною шорсткістю або гасників енергії [2] для необхідності забезпечення розтікання потоку порівняно в короткій ділянці русла.

Найпоширенішими гасниками енергії є водобійні стінки, як суцільні, так і прорізні; балки; пороги; колодязі; шашки; пірси; зуби [1–3]. Однак вони не завжди забезпечують зазначені умови, а на їхню роботу істотно впливають гідравлічні режими в дорожній водопропускній трубі: під час безнапірного та напівнонапірного режимів роботи ефективними є донні пороги, направляючі стінки на відкосах, під час напірного режиму роботи, прорізні водобійні стінки з насадками, комбінація насадок і Г-подібних балок із колодязями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика частина гасників енергії, що працює в дорожніх водопропускних трубах із пропускними витратами до $10 \text{ м}^3/\text{с}$, не має власного фундаменту, тому прикріплені до плит кріплення і, отже, передають їм отриманий гідродинамічний імпульс і в такий спосіб знижують стійкість всієї конструкції кріплення в нижньому б'єфі, а конструкція гасника слугує перешкодою і здатна сприяти засміченню або замулюванню за рахунок захаращення проточної частини споруди [1].

Зі збільшенням глибини розмивання стійкість фундаменту конструкції може бути втрачена, що призведе до ризику пошкодження конструкції та її відмови [3–5].

Крім того, ерозію вниз за течією та розмив вважають основними причинами руйнування водопропускної споруди [6].

Погіршення структурної цілісності водопропускної системи також може

призвести до серйозного та дорогого пошкодження водопропускної споруди та пов'язаної з нею системи, обвалення дорожнього покриття, що лежить вище, і необхідності дорогого технічного обслуговування [7, 8].

Розмивання ґрунту вниз за течією в кінцях водопропускних споруд також зумовлює проблеми з навколишнім середовищем, оскільки це може спричинити падіння поверхні води і стати перешкодою для руху водних видів фауни [9].

Отже, існує потреба у вдосконаленні конструкції кінців водопропускних споруд, щоб зменшити ерозію вниз за течією, розмив і подальший ризик передчасного виходу з ладу водопропускної споруди [3, 5, 6, 8].

Слід зазначити, що швидкість потоку та кінетичну енергію постійно включають у дослідження ерозії, спричиненої потоками [10, 11]. Висока швидкість потоку, що витікає з кінців водопропускної споруди, створює високу кінетичну енергію, що призводить до розмиву та ерозії, якщо цю енергію не можна зменшити або розсіяти [12]. Попередні дослідження також показали, що висока швидкість і кінетична енергія випускного потоку на кінці водопропускної споруди збільшують її ерозійну здатність [10–12].

Тому проведення досліджень з оцінювання та гасіння швидкості кінетичної енергії випускного потоку, оптимізації конструкції нижнього б'єфу з урахуванням цих факторів є актуальним і необхідним для проектування дорожніх водопропускних споруд [6, 13–15].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою виконання роботи є узагальнення сучасних заходів із попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб, аналіз експериментальних досліджень.

Основна частина дослідження. Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття. Гілл М. [16]

розробив систему для визначення характеристик потоку на перепадах, дивлячись на співвідношення між глибиною каналу та висотою падіння. Цей спосіб перевірки характеристик має вирішальне значення для визначення правильної конструкції заспокійливого басейну, який необхідний для адекватного розсіювання енергії. Автор розробив набір рівнянь, за допомогою яких проєктувальник може правильно спроектувати вертикальне падіння для заданого набору умов.

Федеральне управління автомобільних доріг випустило посібник «Гідравлічне проєктування розсіювачів енергії для водопропускних труб і каналів» [17], у якому наведено використання додаткових конструкцій і заспокійливих басейнів для зменшення енергії потоку, коли він виходить із водопропускної труби. Перепадні структури контролюють нахил русла так, що високі ерозійні швидкості ніколи не розвиваються (FHWA). Використання заспокійливих басейнів сприяє розсіюванню енергії через удар води, що падає на основу русла, перенаправлення потоку і турбулентність. У цьому посібнику є приклад конструкції, який ілюструє покроковий процес, пов'язаний із визначенням правильної конструкції з прямим падінням і відповідного заспокійливого басейну.

Автори роботи [18] у результаті проведених досліджень виявили, що для надкритичних потоків масову швидкість потоку контролюють умовами входу, але для субкритичних потоків масова швидкість потоку стає контрольованою властивостями матеріалу потоку та відхиленням каналу. Надкритичні течії ($Fr > Fr_c$) швидкі та неглибокі, тоді як докритичні потоки ($Fr < Fr_c$) повільні та глибокі. Це вказує на те, що седиментація буде більш вірогідною в підкритичному потоці після індукованого гідравлічного стрибка в водопропускних трубах.

У роботі [19] запропоновано аналітичні рішення для обчислення

послідовної глибини та відносних втрат енергії для вільного гідравлічного стрибка в горизонтальних і похилих прямокутних каналах на основі експериментальних досліджень. Автори використовували відношення довжини стрибка до глибини стрибка та число Фруда, щоб обчислити довжину вільного стрибка на горизонтальній основі. Фактори стрибка та форми були оцінені експериментально для вільного стрибка на похилому руслі. Щоб перевірити ефективність стрибка, вони порівняли з попередніми розв'язаннями Лудіна, Бахматова, Сільвестра та Чертоусова і виявили, що отримані ними рівняння можна використовувати замість їхніх рівнянь.

Гаранглюк А. та Чаудрі М. [20] подали три моделі для чисельного моделювання гідравлічних стрибків у прямокутному каналі, ураховуючи значний ефект розподілу негідростатичного тиску. Одновимірні рівняння Бусінеска розв'язувані в часі за відповідних граничних умов, які чисельно моделюють гідравлічний стрибок. Результати порівнювали з експериментальними даними, які вказують на те, що чотирипорядкові моделі з членами Бусінеска або без них дали подібні результати для всіх перевірених чисел Фруда. Числа Фруда коливалися від 2,3 до 7,0. Схема Макормака та дисипативна схема «два-чотири» використані для розв'язування основних рівнянь із дотриманням заданих кінцевих умов до досягнення стаціонарного стану.

У роботі [21] досліджено характеристики хвилеподібного гідравлічного стрибка потоку.

Ченсон Г. [22] досліджував появу хвилеподібних стрибків у водопропускних трубах. Він дійшов висновку, що в круглих водопропускних трубах потік можна передбачити, використовуючи припущення про критичний потік для чисел Фруда трохи вище одиниці, характеристики хвилястості вільної поверхні можна порівняти в більшості ситуацій, близьких до критичних.

А ідеальна теорія течії рідини може досить добре передбачити хвильові властивості. Однак зі збільшенням чисел Фруда кожен тип майже критичних потоків демонструє іншу поведінку, наприклад властивості течії хвилястих гідравлічних стрибків неможливо передбачити за допомогою теорій ідеальної рідини для більших чисел Фруда. Подібність між різними типами майже критичних потоків може забезпечити певний порядок величини для вільної поверхні хвилястості за майже критичних потоків.

У роботі [23] наведено результати експериментів, проведених в Університеті Саскачевану, щодо ефективності водопропускної труби. Вони виявили, що проєктування трохи більшої рами водопропускної труби вище за течією підвищує ефективність входу. Це дослідження, проведене на круглих водопропускних трубах, показало взаємозв'язок між стилями входу та ефективністю входу, виражений у вигляді коефіцієнта випуску, коли водопропускна труба працює з гасниками енергії на вході, і коефіцієнта втрат на вході, коли водопропускна труба працює з гасниками енергії на виході.

Оцу І. та ін. [24] оцінили початкові умови гідравлічного стрибка потоків через вертикальні пороги. Вони визначили два способи отримання початкового стрибка: збільшення висоти порогу або збільшення глибини нижньої води, доки поверхневий ролик (валик) не сформується вище за течією порогу.

Шталь Х. і Хагер В. [25] провели різні експерименти, аналізуючи гідравлічний стрибок у круглих трубопроводах. Вони зазначають, що в умовах стрибка, коли поверхня не може бути вільною, характеристики починають відхилятися від характеристик класичного гідравлічного стрибка. Це відхилення від класичного гідравлічного стрибка спонукало до вивчення водопропускних труб збільшеної висоти. Крім того, дослідження показало,

що стрибки з малою глибиною відрізняються від стрибків із більшою глибиною приблизно на 30 % діаметра труби.

Тягі А. та ін. [26] провели багато експериментів для умов відкритої водопропускної труби. Оптимального розсіювання енергії було досягнуто шляхом розміщення одного порогу на відстані 40 футів від вихідного отвору для падіння на 24 фути. Фрикційні блоки та інші модифікації порогів були не такими ефективними.

Департамент транспорту штату Юта [27] розглядає аспекти зламаних водопропускних труб і гідравлічних стрибків у Посібнику з інструкцій штату, щодо дренажу доріг і водопропускних труб. Цей посібник ілюструє етапи проєктування зламаних водопропускних труб, які включають: 1) встановлення профілю водопропускної лінії; 2) визначення розміру водопропускної труби; 3) початок розрахунку надкритичного профілю; 4) завершення розрахунків профілю; 5) розгляд гідравлічних попереджень про стрибок. Розділ F дод. 9 посібника охоплює аспекти гідравлічних стрибків у водопропускних трубах, включаючи причину та наслідок, тертя імпульсу, порівняння кривих імпульсу і питомої енергії та потенційне виникнення гідравлічних стрибків. Посібник також ураховує послідовну глибину стрибка для прямокутних трубопроводів, круглих трубопроводів і трубопроводів інших форм.

Оцу І. та ін. [28] досліджували умови хвилеподібного гідравлічного стрибка в гладкому прямокутному горизонтальному каналі. Вони виявили, що утворення хвилястого стрибка залежить лише від числа Фруда. У діапазонах чисел Фруда вони виявили, що вплив співвідношення сторін і числа Рейнольдса на характеристики потоку був незначним. Під час експериментального дослідження було встановлено, що верхня межа чисел Фруда – 1,3—2,3 на припливі. Крім того, було встановлено, що число Фруда 1,7 є критичною точкою швидкості,

за якої приплив повністю розвивається. Вони розрахували відношення товщини межового шару до глибини носка стрибка, яке становило 0,45—1,0, що узгоджено з прогнозованими значеннями з експериментальних результатів.

Під час проектування будь-якої водопропускної труби необхідно врахувати певні міркування. У «Гідравлічному проектуванні водопропускних труб» [29] є перелік цих особливих міркувань, що включають, але не обмежені ерозією, седиментацією та контролем сміття, проходженням риби, контролем і вимірюванням потоку. Ерозію розглядають як розмив води на входах і виходах, що є дуже важливим питанням під час визначення ефективності водопропускної труби. Інша проблема, яка викликає занепокоєння, стосується економічних показників, що залежать від терміну служби, порівняння водопропускної труби та мостів, порівняння матеріалів і форм, а також аналізу ризиків. Цей посібник ілюструє необхідність того, щоб водопропускна труба була здійсненою та могла служити засобом захисту від розмиву води.

Бейрамі М. К. і Чамані М. Р. [30] розробили емпіричне рівняння для дослідження характеристик потоку за вертикального перепаду. Це рівняння використовує число Фруда для оцінювання відносних втрат енергії для надкритичного потоку. Отримане рівняння не обмежено діапазоном чисел Фруда; отже, також може оцінити характеристики докритичного потоку. Це рівняння порівняли з експериментальними даними, зібраними авторами, і визначили, що воно дуже близьке до фактичних лабораторних даних. Основну відмінність пояснюють залученням повітря та зсувом шару в нижній частині.

Департамент транспорту Техасу [31] розглядає пристрої захисту та контролю швидкості для водопропускних труб у Посібнику з гідравлічного проектування штату. Цей посібник ілюструє необхідність вибору водопропускної труби за критеріями

вартості будівництва та обслуговування; ризику невдачі; ризику пошкодження майна; безпеки руху; екологічних та естетичних міркувань; доцільності будівництва.

У розділі посібника, присвяченому водопропускним трубам, наведено процедуру проектування, яка дає змогу інженеру-проектувальнику наслідувати встановлені переліки інструкцій для належного проектування та будівництва водопропускних труб. Ця процедура передбачає використання зламаной водопропускної труби для виконання вимог держави. У цій конструкції особливу увагу приділяють створенню гідравлічного стрибка, який допомагає зменшити швидкість виходу води. Це зменшення швидкості безпосередньо пов'язане зі зменшенням шкоди, завданої водним розливом навколо вихідного отвору водопропускної труби.

Ларсон Е. [32] пропонує розсіювати енергію у водопропускних спорудах шляхом примусового гідравлічного стрибка безпосередньо у водопропускній споруді для зменшення енергії води на виході і, отже, зменшити енергію, доступну для розмиву води. Було розглянуто два приклади проектування для створення гідравлічного стрибка всередині водопропускної споруди: 1) прямокутний водозлив, розміщений на плоскому фартуху; 2) вертикальне падіння разом із прямокутним водозливом. Ці дві конструкції використані для дослідження енергетичного зниження енергії потоку на виході. З цих експериментів виявили, що обидві конструкції були ефективними для зниження швидкості на виході, імпульсу та енергії. Ці скорочення зменшать потребу в пом'якшенні розмиву вниз за течією.

Прості методи розсіювання енергії на водопропускних отворах Гочкісс Р. і Ларсон Е. [33] досліджують як можливість зменшення розмиву води навколо водопропускної труби через контроль води на виході. У цьому проєкті досліджено

ефективність простої водопропускної ємності біля вихідного отвору водопропускної труби проти водопропускної труби, яка має водопропускну сітку з перепадом вище за течією в стовбурі водопропускної труби. Сфера уваги для цих обстежень стосується повністю гідравлічного стрибка, який був або не був сформований. Розглянуті властивості стрибка включають геометрію та ефективність зменшення енергії. Дві конструкції призначені для зменшення енергії потоку на виході шляхом індуквання гідравлічного стрибка всередині стовбура водопропускної труби без допомоги хвостової води [33]. Ці скорочення розглядають з точки зору відповідних чисел Фруда. Для цієї роботи діапазон чисел Фруда був від 2,6 до 6,0. Визначено, що обидві форми керування випуском здатні зменшити швидкість води, зменшуючи в такий спосіб енергію та імпульс.

Гідравлічна конструкція розсіювачів енергії для водопропускних труб і каналів від Федерального управління автомобільних доріг [34] дає інформацію про проєктування для аналізу та зменшення проблем, пов'язаних із розсіюванням енергії на виходах водопропускних труб і відкритих каналів. Рекомендовано використовувати розбиту задню конструкцію водопропускної труби як внутрішній розсіювач енергії. Запропонована конструкція водопропускної труби зі зламаною трубою обмежена такими умовами: 1) ухил крутої ділянки має бути меншим або дорівнювати 1,4:1 (V:H); 2) гідравлічний стрибок має бути виконано в межах водопропускного стволу.

Мінью Е. та Сьєнфугес Р. [35] зосередилися на експериментальному дослідженні розсіювання енергії та створення турбулентності у двох нерозвинених і частково розвинених слабких гідравлічних стрибках припливу, виміряних за допомогою мікро-ADV. Числа Фруда коливалися від 1,34 до 1,99. Для нерозвинених стрибків припливу

турбулентність здебільшого обмежена шаром зсуву, розташованим у верхній частині товщі води. Для частково розвиненого стрибка припливу спостерігають дві пікові області виникнення турбулентності: одна у верхньому шарі зсуву, друга в пристінній області. Крім того, вимірний розподіл розсіювання енергії в стрибках показує подібне поздовжнє спадання розсіювання енергії, інтегроване по секціях потоку, і максимальних значень виникнення турбулентності від проміжної області стрибка до його секції вниз за течією. Виявили, що підвищення максимальної турбулентної кінетичної енергії (ТКЕ) і створення турбулентності в шарі зсуву були подібними.

Аліхані А., Бегрозі-Рад Р., Фатхі-Могадам М. [36] провели багато експериментів, щоб оцінити вплив безперервного вертикального торцевого порогу в заспокійливій ємності. Вони виміряли вплив положення порога на глибину та довжину гідравлічного стрибка без урахування глибини хвостової води. В експериментах вони використовували п'ять різних висот стінок, розташованих на трьох окремих поздовжніх відстанях, у своїй моделі в масштабі 1:30. Характеристики гідравлічного стрибка були виміряні та порівняні з класичним гідравлічним стрибком за змінними розрядами. Вони запропонували нове співвідношення між висотою і положенням порогу, а також співвідношення глибини та довжини басейну, дійшовши висновку, що зменшення довжини басейну на 30 % можна досягти шляхом ефективного контролю довжини гідравлічного стрибка через висоту стінки.

Протягом багатьох років було розроблено багато комп'ютерних програм, які допомагають інженерам у проєктуванні та оцінюванні певних типів водопропускних труб. Порівняно з традиційною експериментальною методологією чисельне моделювання має багато переваг, включаючи економію часу та коштів [37], що дає можливість широко

використовувати в механіці рідини для розв'язання проблем із математичними моделями, які надто складні, щоб забезпечити аналітичні рішення [38].

Висновки. Одним із слабких місць дорожніх водопропускних труб є зона нижнього б'єфу, що нерідко зазнає деформації, оскільки з виходом струменя з дорожньої водопропускної труби круглого перерізу в каналі трапецеїдальної форми з'являється збійність течії, утворюються

водоворотні зони, формуються великі донні швидкості. Тому необхідно змусити потік води розтікатися без збійності, із більш сприятливою швидкісною структурою та зменшеними актуальними швидкостями у придонній області. Практична цінність отриманих результатів пов'язана з тим, що проаналізовано заходи з попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб.

Список використаних джерел

1. Ковшун В. Я. Швидкісна структура потоку в нижньому б'єфі трубчатого перепаду з кінцевим гасником. *Гідравліка і гідротехніка: Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник*. Київ, 1982. Вип. 34. С. 19—26.
2. Ліпівський Г. О. Застосування гасника енергії при раптовому розширенні русла в нижньому б'єфі малої штучної споруди. *Гідравліка: Міжвідомчий республіканський науково-технічний збірник*. Київ: Техніка, 1965. Вип. 1. С. 194—201.
3. Гаркуша М. В. Аналіз конструкцій гасників надмірної кінетичної енергії водного потоку. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ: НТУ, 2024. Вип. 116. Ч. 1. С. 171—194. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.1-171-194.
4. Підвищення несучої здатності основ при будівництві споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах залягання слабких ґрунтів / А. М. Онищенко, В. В. Ковальчук, І. А. Карнаков та ін. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ: НТУ, 2024. Вип. 115. Ч. 2. С. 121—136. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-121-136.
5. Taha N., El-Feky M. M., El-Saiad A. A. & Fathy I. Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alexandria Eng. J.* 2020. 59 (5): 3503—3513. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.032>.
6. Othman Ahmed K., Amini A., Bahrami J., Kavianpour M. R. & Hawez D. M. Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 2021. 12 (4): 04021040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578).
7. Meegoda J. N., Juliano T. M. & Tang C. Culvert information management system. *Transp. Res. Rec.* 2009. 2108 (1): 3—12. <https://doi.org/10.3141/2108-01>.
8. Peter J. M. & Moore I. D. Effects of erosion void on deteriorated metal culvert before and after repair with grouted slip liner. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 2019. 10 (4): 04019031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000399](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000399).
9. Kilgore R. T., Bergendahl B. & Hotchkiss R. H. Culvert design for aquatic organism passage: Hydraulic engineering circular number 26. Rep. 2010. No. FHWA-HIF-11-008. Lakewood, CO: Central Federal Lands Highway Division.
10. Smith & Hallmark. New developments for erosion control at culvert outlets. *Highway Research Board Bulletin*. 1960. No. 286. Washington, DC: Highway Research Board.
11. Mamedov A. I. & Levy G. J. Soil erosion—runoff relations on cultivated land: Insights from laboratory studies *Eur. J. Soil Sci.* 2019. 70 (3): 686—696. <https://doi.org/10.1111/ejss.12759>.
12. Mohammed S. R., Nile B. K. & Hassan W. H. Modelling stilling basins for sewage networks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. 671 (1): 012111. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012111>.

13. Azamathulla H. M. & Ghani A. A. ANFIS-based approach for predicting the scour depth at culvert outlets. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 2011. 2 (1): 35–40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000066](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000066).
14. Гаркуша М. В. Вплив пошкоджених гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на навколишнє середовище. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг. V Міжнар. наук.-техн. конф., 11-13 жовтня 2023, Україна, Львів : зб. матер.* Київ: Яроченко Я. В., 2023. С. 82—83. DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-33-9>.
15. Цивін М. Н. Дослідження експлуатаційних характеристик погашувача енергії активного типу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 57. С. 209–213.
16. Gill M. A. Hydraulics of Rectangular Vertical Drop Structures. *Journal of Hydraulic Research.* 1979. Vol. 17, No. 4. P. 289–302.
17. Federal Highway Administration. Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. *Hydraulic Engineering Circular.* No. 14. Sept 1983.
18. Campbell C. S. and others. Flow Regimes in Inclined Open-Channel Flows of Granular Materials. *Powder Technology. Elsevier Sequoia.* 1985.
19. Bhutto H., Mirani S. and Chandio S. Characteristics of Free Hydraulic Jump in Rectangular Channel. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology.* 1989. 8(2). 34–44.
20. Gharanglik A. and Chaudhry M. Numerical simulation of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering.* 1991. 117(9). 1195–1211.
21. Chanson H., and Montes J. S. Characteristics of Undular Hydraulic Jumps. Experimental Apparatus and Flow Patterns. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE.* 1995. Vol. 121, No. 2. P. 129–144. Discussion : Vol. 123, No. 2 P. 161–164.
22. Chanson H. Free-surface flows with near-critical flow conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering.* 1996. 23(6): 1272–1284. <https://doi.org/10.1139/l96-936>.
23. Smith C. & Oak A. Culvert inlet efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering.* 1995. 22. 611–616. DOI:10.1139/l95-069.
24. Ohtsu I. et al. Incipient jump conditions for flows over a vertical sill. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE.* 1996. 122(8). 465–469. doi: 10.1061/(ASCE)0733-29(1996)122:8(465).
25. Stahl H. and Hager W. Hydraulic Jump in Circular Pipes. *Canadian Journal of Civil Engineering. CSCE.* 1998.
26. Tyagi A. K. et al. Energy Dissipation in Broken-back Culverts under Open Channel Flow Conditions. Am. Soc. Civil Engineers International Perspective on Current and Future State of Water Resources, 2010. 10 p.
27. Utah Department of Transportation. Manual of Instruction – Roadway Drainage and Culverts. 2004.
28. Ohtsu I. et al. Hydraulic condition for undular jump formation. *Journal of Hydraulic Research.* 2001. 39(2). 203–209.
29. Federal Highway Administration. Hydraulic Design of Highway Culverts. Report No. FHWA-NHI-01-020. No. 5. Sept 2001.
30. Beirami M. K. and Chamani M. R. Flow Characteristics at Drops. *Journal of Hydraulic Research.* 2002. Vol. 128, No. 8. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:8(788)).
31. Texas State Department of Highways and Public Transportation. Bridge Division Hydraulic Design Manual. 2004.
32. Larson E. Energy dissipation in culverts by forcing a hydraulic jump at the outlet. Master's Thesis, Washington State University. 2004.

33. Hotchkiss R. and Larson E. Simple Methods for Energy Dissipation at Culvert Outlets. Impact of Global Climate Change. World Water and Environmental Resources Congress. 2005.
34. Federal Highway Administration. The Hydraulic Design of Energy Dissipaters for Culverts and Channels. 2006.
35. Mignot E. and Cienfuegos R. Energy dissipation and turbulent production in weak hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 2010. 136 (2). 116-121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000001).
36. Alikhani A. et al. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International Journal of Physical Sciences*. 2010. 5(1). 25-29. <http://www.academicjournals.org/IJPS>.
37. Cristian B., Oprean C., Olivian C., Erdei Z., Neamtu L., Horgos M. & Popa A. The advantages of numerical analysis for claw pole alternator. *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. 2014. 353–357. <http://10.1109/ICEPE.2014.6969928>.
38. Allaire G. Numerical Analysis and Optimization an Introduction to Mathematical Modelling and Numerical Simulation. Oxford University Press Inc., New York. 2007.

Гаркуша Микола Васильович, доцент, кандидат технічних наук, 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.

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>. Tel.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Статтю прийнято 24.06.2025 р.