

УДК 625.745
UDK 625.745

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-175-183

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ВИБОРУ
ПАРАМЕТРІВ ВОДОПРОПУСКНИХ СПОРУД

SYSTEMATIZATION OF APPROACHES TO HYDRAULIC CALCULATION AND SELECTION
OF CULVERT PARAMETERS



*Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,
e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,*

<http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



*Духненко Яна Сергіївна, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,
e-mail: yana.duhnenko@gmail.com, тел. +380638352205,*

<https://orcid.org/0009-0007-8742-7718>

Анотація: У статті розглянуто методологію проектування водопропускних споруд, що поєднує гідравлічні та гідрологічні аспекти. Описано фактори впливу на пропускну здатність споруд, зокрема режими регулювання на вході та виході. Проаналізовано типи водопропускних споруд, матеріали їх виготовлення та особливості розташування відносно русла водотоку. Значну увагу приділено вимогам до вихідних даних для проектування та використанню автоматизованих систем розрахунку. Висвітлено питання врахування акумуляції води перед спорудою та методи оцінки ризиків при виборі розрахункових витрат.

Ключові слова: водопропускні споруди, водопропускні труби, бетон, проектування, б'єф

Вступ. Проектування водопропускних споруд займає значне місце у загальному обсязі проектування автомобільних доріг, каналів та залізниць. Методика розрахунку базується в основному на гідравлічних методах, що дає можливість застосування комп'ютерних методів створення автоматичних програм із застосуванням інформаційних систем. Сучасна методологія проектування має чіткий, зручний для використання формат збору гідрологічного та гідравлічного матеріалу та апарату

для розрахунків. Вона призначена для фахівців, які добре розуміють основні гідрологічні та гідравлічні методи. Досвідчений проєктувальник, як передбачається, здатний розуміти різноманітні умови потоку, які можливі в цих складних гідротехнічних спорудах, та вносити відповідні корективи.

Водночас, недосвідчений проєктувальник та ті, хто не знайомий з гідравлічними явищами, повинні використовувати автоматизовані системи з обережністю.

Представлена розробка базується на комплексній публікації серії «Гідравлічне проєктування» № 5 (HDS-05), яка поєднує інформацію з циркулярів НЕС № 5, № 10 та № 13, а також новіші дані від урядових органів та університетів [1,3,5].

Мета роботи - систематизувати підходи до гідравлічного розрахунку та вибору параметрів водопропускних споруд (ВП).

Виклад основного матеріалу.

1. Фактори впливу на гідравлічну роботу споруди

Розрахунок водопропускних споруд включає визначення необхідного діаметру труби для забезпечення пропускної здатності та безпечної роботи системи. Гідравлічна робота ВП залежить від режиму протікання: регулювання на вході або регулювання на виході.

Оскільки регулювання на виході знаходиться на кінці нижче за течією, на верхів'я впливають усі фактори, зазначені в таблиці 1. Фактори на вході, що впливають на характеристики при керуванні входом, також впливають на ВП при керуванні вихідним отвором.

Таблиця 1 — Фактори впливу щодо проєктування водопропускних споруд

Table 1 – Influence factors regarding the design of culverts

Фактор	Регулювання входу	Регулювання виходу
Напір верхнього б'єфу	X	X
Площа труби	X	X
Форма	X	X
Конфігурація входу	X	X
Шорсткість труби		X
Довжина ВП		X
Ухил ВП	X	X
Напір нижнього б'єфа		X

Примітка: Для регулювання на вході коефіцієнти площі та форми стосуються площі та форми входу. Для регулювання на виході вони стосуються площі та форми ствола

Основні характеристики, що впливають на пропускну здатність [6,7,9]:

Шорсткість поверхні залежить від матеріалу, який використовується для виготовлення труби. До матеріалів належать бетон, гофрований метал та пластик. Шорсткість поверхні представлена коефіцієнтом гідравлічного опору, таким як значення Маннінга n . Додаткове обговорення джерел та виведень значень Маннінга n міститься в Додатку Б. Значення Турісала Меннінга n , що використовуються для проєктування водопропускних труб, становлять $n = 0,012$ для водопропускних труб з гладкими стінками та $n = 0,024$ для водопропускних труб з шорсткою стінкою (гофрованих).

Площа водопропускних споруд залежить від розмірів водопропускної труби. Більша площа водопропускних споруд забезпечить більший потік.

Форма водопропускних споруд залежить від типу та матеріалу водопропускної труби. Залежно від розташування центру ваги для заданої площі, найефективнішою формою є арка, потім арка, а далі - арка.

Довжина водопропускних споруд – це загальна довжина водопропускної труби від входу до виходу з неї. Оскільки розрахункова висота арки та ухил впливають на фактичну довжину, для початку процесу проектування зазвичай необхідне наближене значення довжини ВП.

Ухил водопропускних споруд – це фактичний ухил водопропускної труби. Ухил водопропускних споруд часто збігається з природним ухилом потоку. Однак, коли вхід водопропускної труби піднімається або опускається, ухил водопропускних споруд відрізняється від ухилу потоку. Ухил не є фактором при розрахунку втрат водопропускних споруд для типів потоку USGS 4, 6 та 7; але є фактором при розрахунку типів потоку USGS 2 та 3, коли розраховується профіль поверхні води.

Висота нижнього б'єфа базується на висоті поверхні води нижче за течією. Для визначення висоти нижнього б'єфа використовуються розрахунки підпору на основі контролю нижче за течією, наближення нормальної глибини або польових спостережень.

2. Типи водопропускних споруд та матеріали

ВП - це гідравлічно короткий трубопровід, який передає потік через дорожню насип. Вибір типу ВП базується на вартості, обмеженнях рівня води та висоті насипу. Найпоширеніші форми включають круглу, прямокутну (коробчасту), еліптичну та аркову (рис. 1) [10,11].

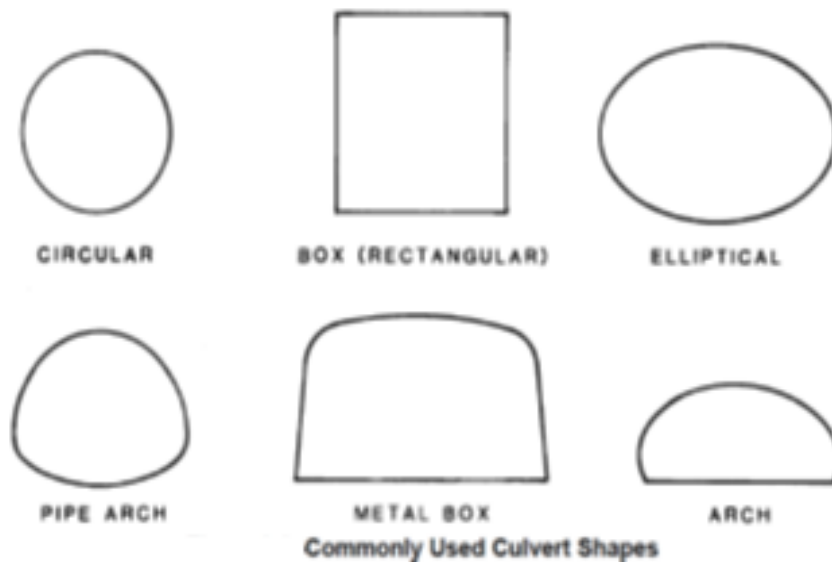


Рисунок 1 – Типові форми ВП
Figure 1 – Typical forms of culverts

Трьома найпоширенішими матеріалами є бетон, гофрований алюміній та гофрована сталь. Металеві ВП можуть бути облицьовані асфальтобетоном для захисту.

Важливим елементом є конфігурація вхідного отвору. Конфігурація вхідного краю є основним фактором, що впливає на регулювання вхідним отвором. Зменшення стиснення потоку на вході (наприклад, за допомогою скошених країв) збільшує пропускну здатність (рис. 2,3,4) [10,11].

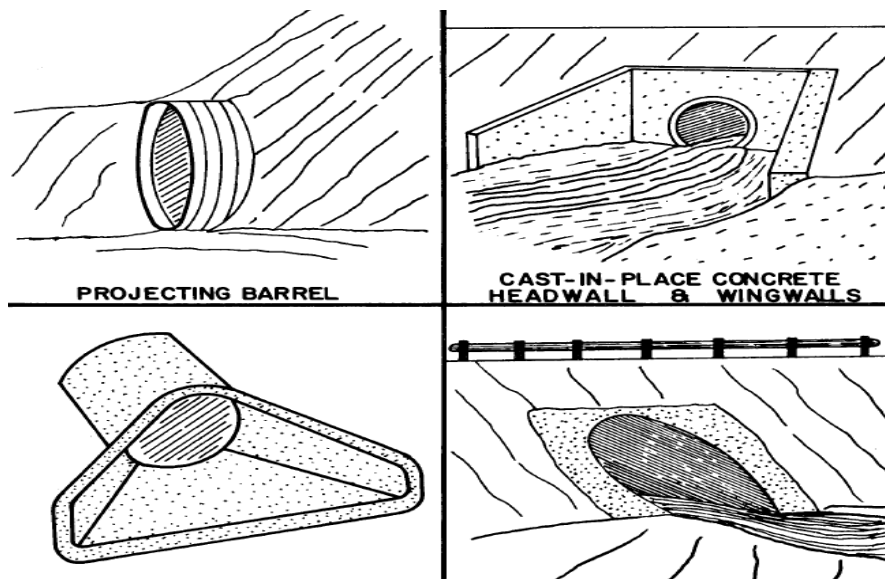


Рисунок 2 – Типові конструкції вхідних та вихідних отворів ВП
Figure 2 – Typical designs of culvert inlets and outlets

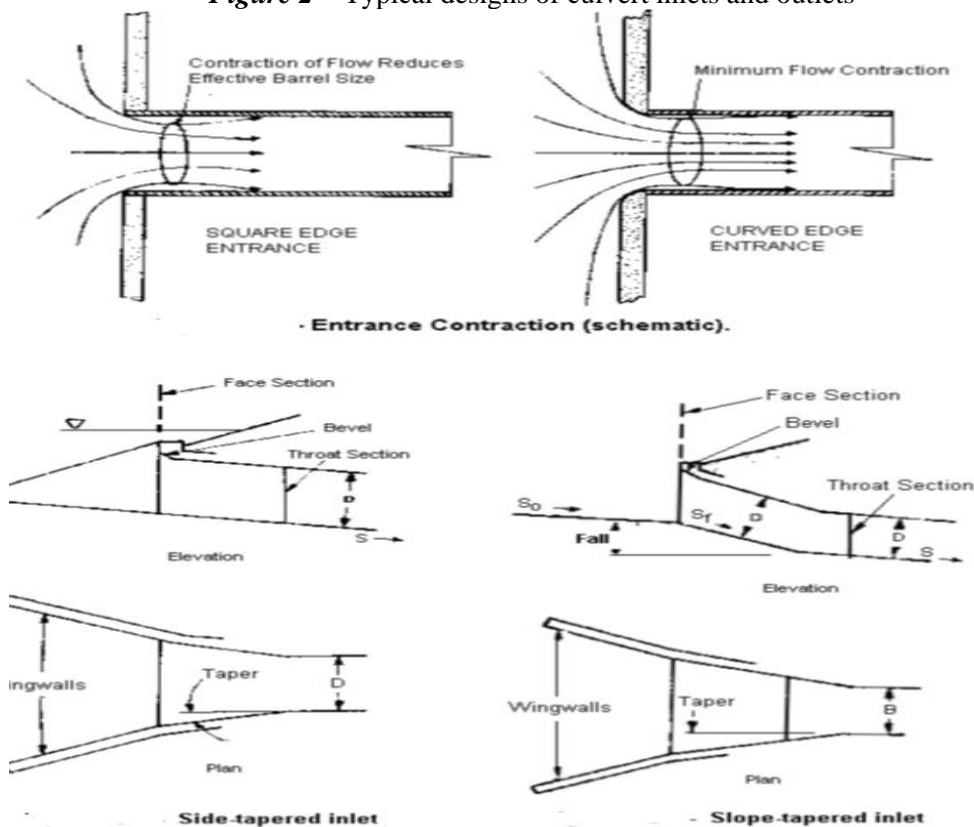


Рисунок 3 – Схема стиснення потоку на вході
Figure 3 – Diagram of flow contraction at the inlet

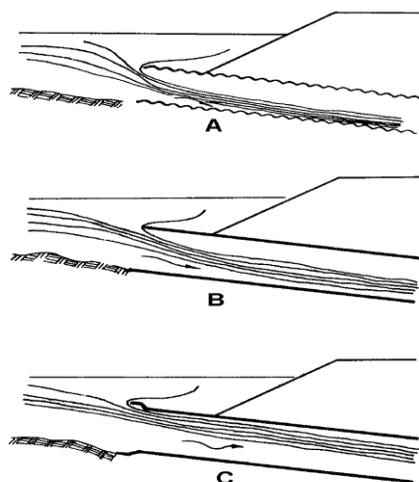


Рисунок 4 – Стиснення потоку різними варіантами матеріалів висунутих вхідних отворів ВП
Figure 4 – Flow contraction by various options of materials for projecting culvert inlets

3. Вимоги до даних для проєктування

Ефективне проєктування вимагає збору детальної інформації про гідрологію, топографію та характеристики водотоку. Перед зверненням до інформаційних систем (ІС) необхідно виконати вимоги до збору даних (таблиця 2) [2,4].

Таблиця 2 – Вимоги до даних для проєктування водопропускних споруд

Table 2 – Data requirements for culvert design

Дані	Джерело даних
ГІДРОЛОГІЯ Піковий потік	Аналіз даних водомірних постів або розрахунок за допомогою формули співвідношення, рівнянь регресії тощо.
Перевірка потоків	Те саме, що й для пікового потоку.
Гідрографи (якщо використовується маршрут зберігання)	З інформації водомірних постів або синтетичних методів обробки, таких як метод Снайдера або комп'ютерні моделі.
ДАНІ ПРО ДІЛЯНКУ. Розташування ВП.	На основі характеристик ділянки, включаючи природний переріз потоку, ухил та виправлення.
Дані про водний шлях. Поперечні перерізи. Поздовжній ухил. Опір потоку. Ділянка НБ Накопичення у ВБ	Польове дослідження або топографічні карти. Спостереження, фотографії або методи розрахунку. Польове дослідження або топографічні карти.
Ділянка НБ Накопичення у ВБ	Польове дослідження або топографічні карти.
Дані про дорогу. Поперечний переріз. Плани дороги. Профіль. Довжина ВПу.	Плани дороги.
Проєктування верхів'я. Критичні точки на дорозі. Навколишні будівлі або споруди	Плани доріг. Аерофотознімки, топографічні дослідження або топографічні карти
Нормативні обмеження	Норми щодо забезпечення заплав від повеней та небезпечних ділянок від досягнення потоку
Довільні обмеження	Державні або місцеві норми щодо облаштування ВПів

Для визначення допустимого напору (HW) необхідно враховувати економічні міркування, регуляторні обмеження та можливі збитки від затоплення. Допустиме співвідношення HW/D зазвичай коливається від 1,0 до 1,5.

4. Розташування та геометричне проектування

В ідеалі ВП слід розташовувати в існуючому руслі каналу для мінімізації витрат. Проте, складні умови можуть вимагати переміщення русла або використання скошених конструкцій. Незначні переміщення русла є допустимими, якщо природне русло стабільне.

Ефективна конструкція повинна відповідати природному потоку за траєкторією та ухилом. Якщо вісь ВП не перпендикулярна до осі дороги, використовується поняття "кута скосу" (рис. 5) [5,6].

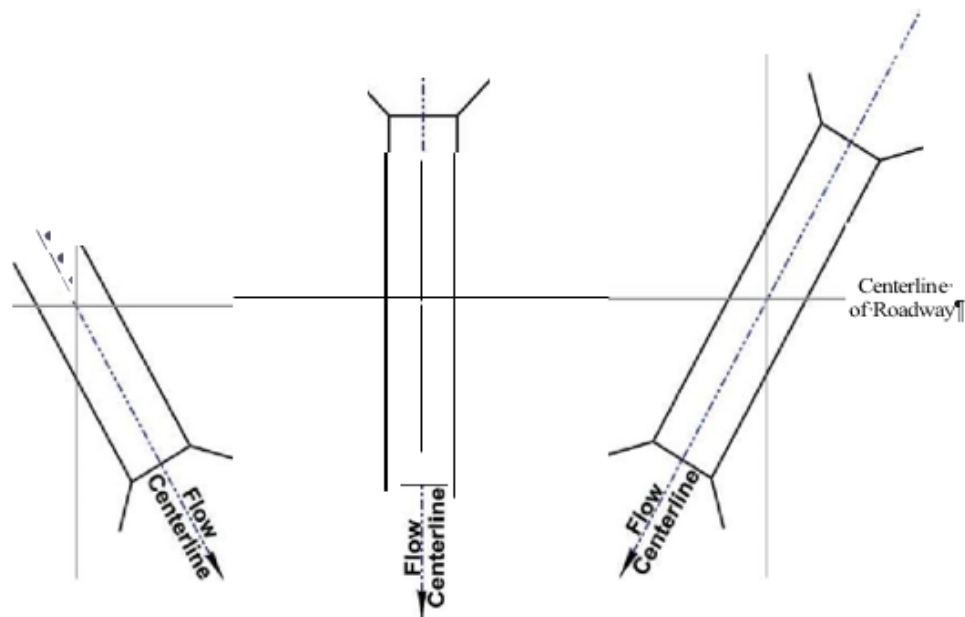


Рисунок 5 – Кут нахилу ствола ВП від центральної лінії дороги, дивлячись вгору або вниз за течією

Figure 5 – Angle of culvert barrel skew from the road centerline, looking upstream or downstream

Профіль дороги діє як перешкода, а у випадку переповнення гребінь дороги працює як аварійний водозлив.

5. Гідрологічний аналіз

Гідрологічний аналіз є першим кроком у проектуванні та базується на оцінці пікового потоку та періоду повторення. Період повторення (наприклад, 20 років) вказує на ймовірність виникнення повені певної величини.

Для великих об'єктів може знадобитися аналіз ризиків, який збалансовує вартість споруди зі збитками від недостатньої пропускної здатності. Важливим аспектом є врахування ефекту акумуляції води перед насипом. Процес накопичення маси потоку призводить до ослаблення піку паводку через збільшення об'єму зберігання у верхньому б'єфі (рис. 6). Врахування накопичення дозволяє зменшити розмір проектної ВП [8].

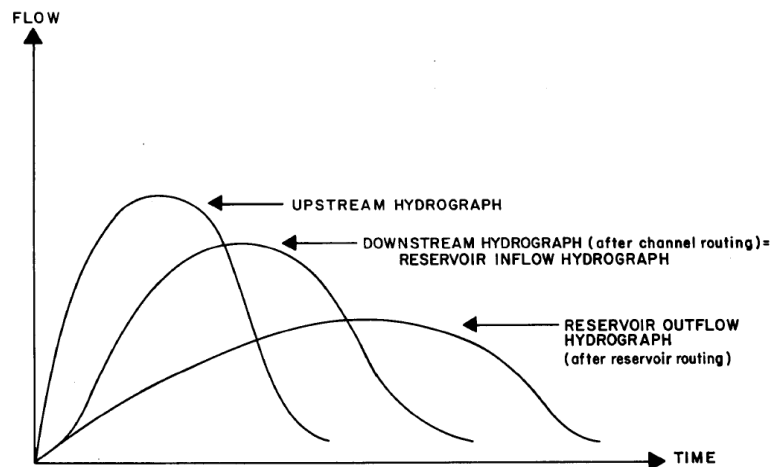


Рисунок 6 – Схема модифікації форми повеневого гідрографу
Figure 6 – Diagram of flood hydrograph shape modification

Висновки. Розроблена методологія проектування водопропускних споруд базується на сучасних гідравлічних методах (серія HDS-5) та дозволяє враховувати широкий спектр факторів впливу, включаючи режим протікання, геометричні параметри та характеристики матеріалів. Ключовим етапом проектування є збір точних вихідних даних про гідрологію та топографію ділянки. Помилки на цьому етапі можуть призвести до некоректного визначення пропускної здатності. Використання автоматизованих інформаційних систем значно спрощує процес розрахунку, проте вимагає від проектувальника розуміння фізичної суті гідравлічних явищ. Врахування ефекту акумуляції паводкових вод у верхньому б'єфі є перспективним напрямком оптимізації проектних рішень, що дозволяє зменшити розміри споруд без зниження надійності.

Перелік послань

1. Two dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model. Publication No. FHWA-RD-03-053, U.S. Department of Transportation, 2003.
2. Normann, J. M., Houghtalen, R. J., and Johnston, W. J. (1985). "Hydraulic design of highway culverts." Hydraulic Design Series No. 5, Report No. FHWA-IP-85-15, 2001 Federal Highway Administration, Washington, D.C.
3. Онищенко А.М., І.В. Башкевич, М.Н. Цивін, С.В. Кожарін. Гідравліка: практичний курс із застосуванням Mathcad: підручник. Київ: «Видавництво Людмила», 2022. 264 с. ISBN 978-617-555-007-6.
4. Онищенко А.М., Ковальчук В.В., Гаркуша М.В., Цивін М.Н., Карнаков І.А., Мошківський Р.В. Забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації: монографія. Київ: «Видавництво Людмила», 2023. 179 с. https://doi.org/10.32751/Mono_Zabez2023
5. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз конструктивних заходів з укріплення нижніх б'єфів гідротехнічних споруд у транспортному будівництві з дорожніх водопропускних труб. Дороги і мости. Київ, 2022. Вип. 26. С. 215–227. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.215>
6. Kovalchuk Vitalii, Karnakov Ihor, Onyshchenko Artur, Petrenko Oleksiy, Boikiv Roman. Assessing the stresses and magnitude of plastic hinge in a tunnel conduit made of precast metal corrugated structures taking into account the soil backfill parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkov, 2023. №4/7 (124). P. 43–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.285893.

7. Kovalchuk Vitalii. Restoration of the bearing capacity of damaged transport constructions made of corrugated metal structures / Vitalii Kovalchuk, Mykola Sysyn, Yuriy Hnativ, Artur Onyshchenko, Maksym Koval, Oleksii Tiutkin, Mariana Parneta // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – RTU Press, 2021 Volume 16 Issue 2. – pp.90 – 109. ISSN 1822-427X/eISSN 1822-4288.
8. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз спряження б'єфів гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах плоскої завдачі. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 27. С. 228–244. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228>
9. Цивін М. Н., Ткаченко Н. І. Оптимальна конструкція кріплення нижнього б'єфу водопропускних споруд систем лиманного зрошення. Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Львів, 1988. Вип. 16. С. 38–43
10. Onyshchenko, A., Ostroverkh B., Potapenko, L., Kovalchuk, V., Zdolnyk, O., & Pentsak, A. (2024). Devising a procedure for integrated modeling of riverbed shape in the area of bridge crossing in order to avoid dangerous washing erosion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(1 (127), 23–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298675>. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/298675>
11. Onyshchenko, A., Kovalchuk, V., Voskoboinick, V., Voskobiinyk, A., Aksonov, S., Trudenko, D., & Hrevtsov, S. (2024). Establishing patterns of change in the coefficients of reflection, transmission, and dissipation of wave energy depending on parameters of a permeable vertical wall. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(5 (130), 45–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309969> <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/309969>

SYSTEMATIZATION OF APPROACHES TO HYDRAULIC CALCULATION AND SELECTION OF CULVERT PARAMETERS

Onyshchenko Artur M., D.Sc. (Doctor of Engineering Sciences), Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, tel. +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Dukhnenko Yana S., PhD student, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, e-mail: yana.dukhnenko@gmail.com, tel. +380638352205, <https://orcid.org/0009-0007-8742-7718>

Abstract. The article examines the methodology for designing culverts, which combines hydraulic and hydrological aspects. Factors influencing the structures' capacity, specifically inflow and outflow control regimes, are described. Types of culverts, their manufacturing materials, and the specifics of their placement relative to the watercourse channel are analyzed. Significant attention is paid to the requirements for input data for design and the use of automated calculation systems. The issue of considering water accumulation (storage) upstream of the structure and risk assessment methods for selecting design discharges are highlighted.

Keywords: culverts, hydraulic structures, concrete, design, headwater

References

1. Two dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model. Publication No. FHWA-RD-03-053, U.S. Department of Transportation, 2003.
2. Normann, J. M., Houghtalen, R. J., and Johnston, W. J. (1985). "Hydraulic design of highway culverts." Hydraulic Design Series No. 5, Report No. FHWA-IP-85-15, 2001 Federal Highway Administration, Washington, D.C.
3. Onyshchenko A.M., I.V. Bashkevych, M.N. Tsyvin, S.V. Kozharin. Hydraulics: a practical course with the use of Mathcad: textbook. Kyiv: "Vydavnytstvo Liudmyla", 2022. 264 p. ISBN 978-617-555-007-6.

4. Onyshchenko A.M., Kovalchuk V.V., Harkusha M.V., Tsyvin M.N., Karnakov I.A., Moshkivskiy R.V. Ensuring the reliability and durability of hydraulic structures in transport construction made of road culverts under operating conditions: monograph. Kyiv: "Vydavnytstvo Liudmyla", 2023. 179 p. https://doi.org/10.32751/Mono_Zabez2023
5. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analysis of constructive measures for strengthening the downstream channels of hydraulic structures in transport construction using road culverts. *Dorohy i mosty (Roads and Bridges)*. Kyiv, 2022. Vol. 26. P. 215–227. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.215>
6. Kovalchuk Vitalii, Karnakov Ihor, Onyshchenko Artur, Petrenko Oleksiy, Boikiv Roman. Assessing the stresses and magnitude of plastic hinge in a tunnel conduit made of precast metal corrugated structures taking into account the soil backfill parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2023. №4/7 (124). P. 43–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.285893.
7. Kovalchuk Vitalii. Restoration of the bearing capacity of damaged transport constructions made of corrugated metal structures / Vitalii Kovalchuk, Mykola Sysyn, Yuriy Hnativ, Artur Onyshchenko, Maksym Koval, Oleksii Tiutkin, Mariana Parneta // *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – RTU Press, 2021 Volume 16 Issue 2. – pp.90 – 109. ISSN 1822-427X/eISSN 1822-4288.
8. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analysis of the downstream channel connection of hydraulic structures in transport construction using road culverts under planar conditions. *Dorohy i mosty (Roads and Bridges)*. Kyiv, 2023. Vol. 27. P. 228–244. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228>
9. Tsyvin M. N., Tkachenko N. I. Optimal construction of the downstream channel lining for culverts of estuarine irrigation systems. *Hydromelioration and Hydraulic Engineering*. Lviv, 1988. Vol. 16. P. 38–43
10. Onyshchenko, A., Ostroverkh B., Potapenko, L., Kovalchuk, V., Zdolnyk, O., & Pentsak, A. (2024). Devising a procedure for integrated modeling of riverbed shape in the area of bridge crossing in order to avoid dangerous washing erosion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1 (127), 23–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298675>. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/298675>
- Onyshchenko, A., Kovalchuk, V., Voskoboinick, V., Voskobiinyk, A., Aksonov, S., Trudenko, D., & Hrevtsov, S. (2024). Establishing patterns of change in the coefficients of reflection, transmission, and dissipation of wave energy depending on parameters of a permeable vertical wall. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (130), 45–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309969> <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/309969>