https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190

УДК 625.7/.8

Онищенко А. М., *д-р техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
Гаркуша М. В., *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*
Клименко М. І., *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-7967-5881*

Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ТРАНСПОРТНОГО БУДІВНИЦТВА З ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація

Вступ. Незабезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації пов'язане з дією статичних і динамічних навантажень від транспортних засобів і температурних кліматичних впливів, руйнівної сили водяного потоку, абразивного руйнування, корозії металу.

Причиною недостатньої ефективності конструктивних рішень дорожніх водопропускних труб — їх принципова відмінність від мостів умовами протікання потоку через споруду. На виході з труби утворюється двовимірний потік, а на ділянці гасіння енергії водяного потоку двовимірний потік трансформується у тривимірний високотурбулентний потік, що спричинює деформацію дна відвідного русла і, як наслідок, руйнування конструкції кріплення нижнього б'єфу, зсуву ґрунту, руйнування водопропускної споруди в цілому.

Проблематика. Із літературного аналізу встановлено, що дорожні водопропускні труби перебувають у складних умовах експлуатації, що зпричинює передчасне їх руйнування.

Мета. Полягає в аналізі проблем забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх гофрованих металевих водопропускних труб.

Результати. Проведено аналіз проблем забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації. Надано пропозиції розрахунку вихідних ділянок споруди для забезпечення її надійності.

Висновки. На сьогоднішній день не у повній мірі вивчено питання забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб — поперемінна зміна режимів підтоплення водопропускної труби, зокрема робота дорожніх водопропускних труб в частково напірному режимі; зміна та вплив коефіцієнта шорсткості за рахунок наявності гофр, їх розміщення; вплив корозії металу на довговічність конструкції; абразивне зношення стінок гофр. Недостатньо вивчене питання кінетики вихідних ділянок гофрованої металевої водопропускної споруди.

Ключові слова: автомобільна дорога, водопропускна труба, гідротехнічна споруда, довговічність, надійність.

Актуальність роботи

Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб, що представлені у вигляді гофрованих металевих труб, мають великі переваги з альтернативними конструкціями та нерідко застосовуються як малі та середні мости. У свою чергу проєктування цих споруд потребує застосування заходів із забезпеченням та оцінкою їх довговічності.

Пошкодження дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації

Беручи до уваги, що застосування гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб у вигляді металевих гофрованих листів є актуальним, в практиці зустрічаються випадки недостатньої пропускної здатності труб, що з часом може призвести до руйнування водопропускної труби та земляного полотна [1–3]. Крім того, виникає розмивання нижнього б'єфу водопропускної труби, руйнування за рахунок абразивного впливу, окислення металу, нанесення ґрунту та каменю, недостатньої міцності гофр (**рис. 1–6**).

Рисунок 1 — Нанесення ґрунту та каміння у водопропускну трубу [1]

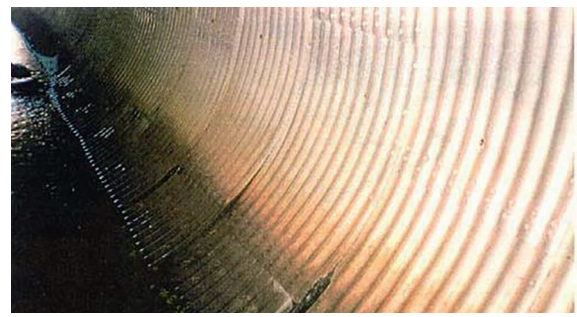


Рисунок 2 — Конструктивні недоліки водопропускної труби, пропускання води через шви [1]

Рисунок 3 — Руйнування стінок водопропускної труби від корозії [2]

Рисунок 4 — Руйнування стінок водопропускної труби від корозії [2]

Рисунок 5 — Руйнування стінок водопропускної труби від навантаження [2]

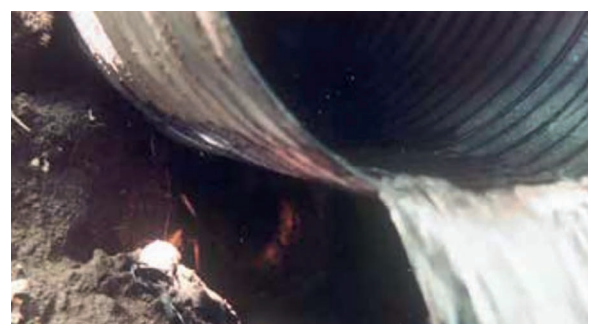


Рисунок 6 — Розмивання нижнього б'єфу водопропускної труби [2]

Основні критерії відмови за умовою довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб

Вивчення питання довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб наведено в багатьох роботах [4–11] та інших.

У проведених дослідженнях встановлено фактори, що впливають на їх довговічність та запропоновані методики розрахунку довговічності.

Одним із основних впливів на довговічність гофрованих металевих водопропускних труб має дія статичних і динамічних навантажень від транспортних засобів і температурних кліматичних впливів [11], руйнівна сила водяного потоку, режими роботи водопропускних труб, абразивне руйнування, корозія металу [4] тощо.

Із впливом негативних факторів на гофровані металеві водопропускні труби вони з працездатного стану переходять у обмежено-працездатний стан. Із обмежено-працездатного стану в результаті відмови переходять у обмежений (аварійний) стан. Критеріями відмови гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб є параметри, які визначають працездатність будови в цілому, а також окремі його елементи: захисне покриття, матеріал труби, конструктивні особливості. Ці параметри або сукупність їх встановлюється в нормативно-технічній або конструкторській документації. Загальні критерії для призначення категорій дефектів і відмови для водопропускних труб наведено в ВБН В.2.3-218-198 [12], ДСТУ Б В.2.3-24 [13], ДСТУ-Н Б В.2.3-34 [14].

Згідно з ДБН В.2.3-14 [15] допускається проєктувати споруди на пропуск розрахункової витрати при напівнапірному і напірному режимах. При цьому під оголовками і ланками потрібно влаштовувати фундаменти, а при необхідності — також протифільтраційні екрани. Крім того, при напірному режимі потрібно передбачати спеціальні вхідні оголовки і забезпечувати водонепроникність швів між торцями ланок і секціями фундаментів, надійне зміцнення русла, стійкість насипу проти напору і фільтрації.

Однак особливості конструкції гофрованих споруд не дозволяють забезпечити герметичність стиків, а умови роботи гнучкої споруди не передбачають влаштування фундаменту. Відсутність герметичності в стиках ланок не дозволяє забезпечити в металевих гофрованих спорудах стійкий напірний або напівнапірний режими протікання [16].

Гофровані металеві водопропускні споруди слід проєктувати на перепуск розрахункової витрати тільки при безнапірному режимі.

Підходи з розрахунку надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб

Перші рекомендації щодо розрахунку довговічності дорожніх водопропускних труб були розроблені в США (California Department of Transportation) у 1959 році [23]. Метод оцінював довговічність водопропускних труб з моменту введення в експлуатацію до моменту появи в ній першого наскрізного отвору від руйнування спричиненого корозією металу.

Розрахунок полягає в тому, що встановлюється період часу, протягом якого відбувається повне руйнування стінки металевої гофрованої труби корозією.

Цей період залежить від початкової товщини стінки труби, швидкості корозії, яка залежить від pH води та ґрунту засипки, а також питомого електричного опору ґрунту R, тобто, здатності протистояти корозії.

Даний підхід спричинив влаштування оцинкованих гофрованих труб із додатковим захисним антикорозійним захистом [23]. Однак дослідження в Нью-Йорку та Північній Кароліні не підтверджують кореляцію pH та опору ґрунту R з довговічністю водопропускних труб.

У результаті чого в інституті заліза та сталі США (AISI) [23] розробили свою методику визначення довговічності, яка залежить від положення труби та товщини її стінки.

Довговічність, розрахована за методикою AISI приблизно вдвічі більше, ніж за методикою

Каліфорнійського департаменту транспорту. Дані Національної асоціації з гофрованих труб США (NCSPA), показали, що в більшій мірі корозія відбувається з боку водного потоку, а в меншій — ґрунту насипу.

Для уповільнення або запобігання корозії існує низка методів:

- підвищення товщини стін труб;
- додаткові захисні покриття;
- електричне заземлення, катодний захист або обидва способи;
- розміщення труб у неагресивних умовах (гранульована обойма тощо).

Результати досліджень довговічності труб, виконані у різних штатах США, помітно відрізняються [23], що спричинило сумніви запропонованих розрахунків, однак альтернативи, їх в США не існує.

Можна констатувати, що цинкове покриття легко руйнується при абразивному впливі водного потоку на нього і тому забезпечити надійний захист водопропускних труб можна лише за умови відсутності абразивного впливу водного потоку або якщо рівень абразивної дії дуже низький.

В Україні відсутні сучасні підходи та нормативні документи з розрахунку надійності дорожніх водопропускних труб, тому це питання є надзвичайно актуальним.

Одним з важливих факторів, що впливає на надійність дорожніх водопропускних труб є кінематика потоку в нижньому б'єфі при вільному розтіканні і донному режимі, яка впливає як на режим роботи водопропускної споруди, так і на її ефективність.

Загальні рекомендації з гідравлічних розрахунків для забезпечення надійності та довговічності водопропускних труб

Металеві гофровані споруди відрізняються від «гладких» у гідравлічному відношенні істотно великими критичними ухилами, величина яких при безнапірному режимі досягає 0,02–0,03. Для забезпечення максимальної водоперепускної здатності ухили гофрованих споруд повинні бути не менше вказаних значень і в крайньому випадку не менше ніж 0,01.

Гофровані споруди відрізняються від гладких істотно більшою шорсткістю, що пов'язано з наявністю на внутрішній поверхні гофрів. Середнє значення коефіцієнта шорсткості n = 0,013–0,033, а при наявності гофрів великих розмірів (більше 152,4 мм × 50,8 мм) або наносів у лотковій частині споруди коефіцієнт шорсткості може сягати 0,04.

Наявність підвищеної шорсткості призводить до істотно великих мінімальних ухилів гофрованих споруд порівняно з гладкими, значення яких у гофрованих спорудах сягає 0,02 – 0,03. При ухилі споруди менше ніж 0,01 необхідно враховувати зниження перепускної здатності водоперепускної споруди [16].

У кожному конкретному випадку попередньо встановлюється мінімальний ухил споруди $i_М$. Враховуючи мінімальний ухил споруди й ухил місцевості, призначають ухил споруди $i_С$ з дотриманням умови:

$$i_С = i_М, \tag{1}$$

де $i_С$ — ухил споруди;

$i_М$ — мінімальний ухил, величина якого при безнапірному режимі становить 0,01.

При недотриманні умови пропускна здатність споруди знижується, причому при $i_С \geq 0{,}01$ цим можна знехтувати, при $i_М < 0{,}01$ реальна перепускна здатність споруди повинна встановлюватися відповідно до книги «Гидрологические и гидравлические расчёты малых дорожных сооружений» [17], з деяким наближенням — до рекомендацій із гідравлічних розрахунків, які наведені нижче.

Пропускна здатність металевих гофрованих споруд визначається, виходячи з умов входу рівнинного типу, при якому перед спорудою утвориться ємність, що характеризується підпертою

глибиною. При цьому потік надходить в споруду у спокійному стані [16].

Вхід вказаного типу мають усі водоперепускні споруди без підхідних швидкотоків, що підводять потік у бурхливому стані до споруди.

Для споруд, що мають на вході швидкотоки, перевіряють можливість входу потоку в споруду в бурхливому стані [17–19].

Якщо в результаті розрахунку виявиться, що має місце вхід рівнинного типу, то гідравлічні розрахунки проводять згідно настанов [17] як для рівнинних споруд. В іншому випадку споруди за умовами входу є косогірними і їх гідравлічні розрахунки згідно з [19].

Згідно з чинними нормами України є рекомендація виконання гідравлічних розрахунків у двох варіантах: за наявності гладкого лотка і за його відсутності [12].

Пропозиції розрахунок вихідних ділянок споруди для забезпечення її надійності

Швидкості потоку на виході з споруди можуть досягати (5–8) м/с, у той час як допустимі швидкості для неукріплених ґрунтів відвідних русел складають (0,7–1,0) м/с. У зв'язку з цим спостерігаються розмиви неукріплених русел, тому розрахунок укріплень вихідних ділянок споруд має таке ж велике значення, як і визначення отворів споруди, так і оцінки його пропускної здатності [16].

Завдання розрахунків вихідних ділянок споруд, зводитися до наступного:

– аналізу умов протікання потоку в нижньому б'єфі споруди;

– аналізу можливих руслових деформацій за спорудою і врахування при розрахунку найбільш небезпечного місцевого розмиву;

– підбору типу зміцнення вихідної ділянки;

– розрахунку геометричних розмірів кріплення.

Залежно від глибини потоку в зворотному руслі можливі наступні три форми сполучення потоку, що виходить зі споруди:

– сполучення за типом затопленого струменя, спостерігається в тому випадку, коли вихідні отвори споруди затоплені з боку нижнього б'єфу. При цьому відбувається поступове зменшення швидкостей потоку;

– сполучення за типом збійної течії спостерігається в тому випадку, коли глибина потоку в нижньому б'єфі менша ніж глибина потоку, поєднаної з глибиною на виході зі споруди ($h_{нб} < h_в''$). Транзитний струмінь викривляється, натікаючи по черзі на бічні стінки відвідного русла. При цьому зменшення швидкостей в транзитному струмені і їх вирівнювання відбувається повільно, тому потрібне зміцнення цього русла на значному відрізку;

– сполучення за типом вільного розтікання бурхливого потоку спостерігається у тому випадку, коли глибина потоку у відвідному руслі менша, ніж глибина потоку на виході із споруди ($h_{нб} < h_в$).

Кінематика потоку в нижніх б'єфах при коротких укріпленнях значним чином визначається взаємодією потоку з руслом, що розмивається. При цьому можливі два види розтікання: вільне і сковане.

Вид розтікання визначається за відношенням побутової глибини до граничної глибини $h_п$, при якій настає затоплення гідравлічного стрибка в створі найбільшого розтікання потоку:

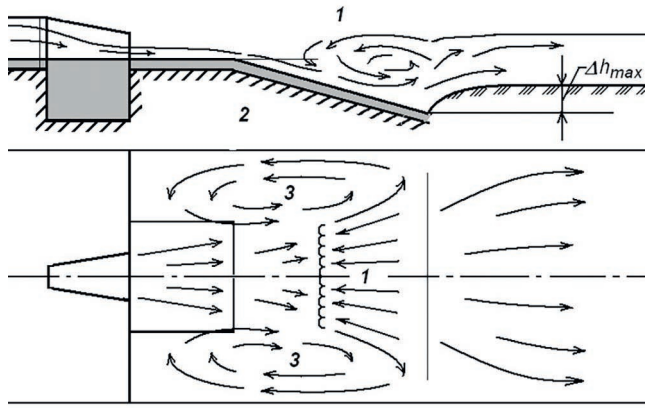
– при $h_{нб} < 0{,}85h_п$ — вільне розтікання;

– при $h_{нб} > 0{,}85h_п$ — сковане розтікання і збійні течії.

Відношення граничної глибини до критичної відвідного русла є функцією міри розширення $\varepsilon_п = \dfrac{B_л}{h}$ ($B_л$ — ширина балки по поверхні потоку при побутовій глибині $h_{нб}$) і числа Фруда на виході із споруди.

При вільному розтіканні (найбільш частий випадок) у вихідних руслах із запобіжним укосом без гасника енергії потік, потрапляючи зі зміцнення на частину русла, що розмивається, утворює

просторовий гідравлічний стрибок. Транзитна частина потоку проходить під вальцем гідравлічного стрибка уздовж запобіжного укосу; з обох боків її утворюються потужні водоворотні зони. Цей режим називається донним, а сполучення б'єфів — за схемою донного режиму (**рис. 7**). При цьому найбільші швидкості спостерігаються поблизу дна і за відсутності зміцнення виходить глибокий розмив. Тому розрахунок рекомендується вести на донний режим як найбільш небезпечний за розмивом.



1 — просторовий гідравлічний стрибок;
2 — транзитний потік;
3 — водоворітні зони.

Рисунок 7 **—** Кінематика потоку в нижньому б'єфі при вільному розтіканні і донному режимі

При підтопленні нижнього б'єфу споруд, гідравлічний стрибок насувається на споруду. При цьому нижній б'єф гасить енергію водоворотних зон, що є однією із причин розмиву за спорудою.

При $\frac{h_{нб}}{0,85h_{п}} > 5 \div 6$ виникає збійна течія.

При збійній течії відбувається збільшення питомої витрати потоку на частини ширини русла. Проте в умовах дорожніх водопропускних споруд блукання збійного струменя призводить до зменшення розрахункових глибин розмиву, що відповідають цій тривалості паводку.

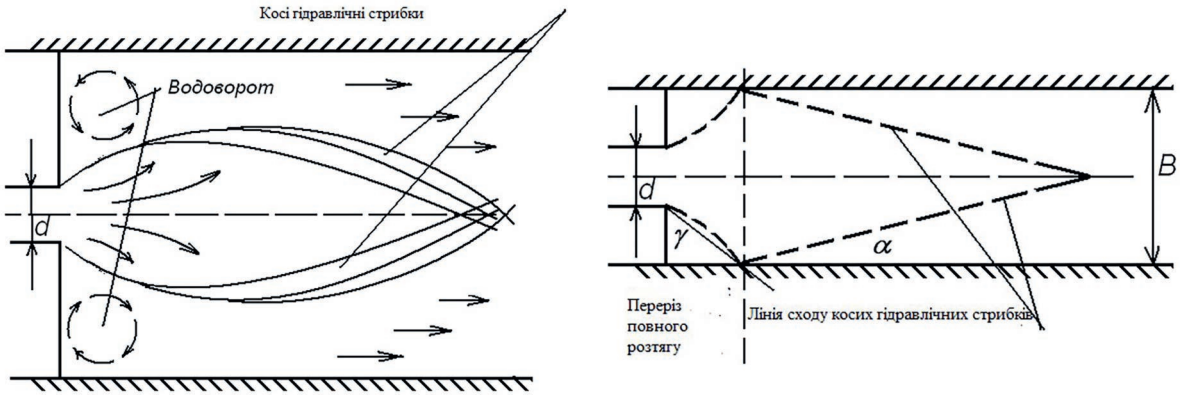
При підтопленні нижнього б'єфу воронка розмиву звужується і подовжується.

Кінематика потоку при вихідних, що не розмиваються, руслах істотно відрізняється від кінематики потоку при руслах, що розмиваються.

Вільне розтікання бурхливого потоку характерне інтенсивним розширенням транзитного струменя, що супроводжується зменшенням глибин і зростанням швидкостей.

У відносно широких нижніх б'єфах область розтікання бурхливого потоку, сполучається з водними масами нижнього б'єфу за допомогою косих гідравлічних стрибків, що приймаються в плані характерну форму пелюстки (**рис. 8**).

У відносно вузьких нижніх б'єфах відбувається різке збільшення глибин і утворення косих гідравлічних стрибків в місцях набігання крайніх цівок потоку, що розтікається, на бічні стінки відвідного русла тобто в перерізі повного розтікання (**рис. 8**).



а) відносно широке русло;
б) відносно вузьке русло.

Рисунок 8 **—** Розтікання бурхливого потоку

Для визначення глибини потоку у вихідному перерізі рівнинних труб круглого поперечного перерізу Пічугов Г. С. запропонував наступну залежність [16]:

$$\frac{h_{\text{В}}}{d} = K(\Pi_{\text{q}})^{\text{n}}. \tag{2}$$

При безнапірному режимі $K = 0{,}75$; $n = 0{,}5$.

При напівнапірному режимі $K = 0{,}70$; $n = 0{,}333$.

Для рівнинних труб прямокутного поперечного перерізу можуть бути використані дані Цивіна М. Н., **табл. 1** [20].

Таблиця 1

Відносна глибина потоку у вихідному перерізі труби (безнапірний режим)

i	0	0,005	0,010	0,020	0,030	0,050	0,075	0,100
$\frac{h_{\text{В}}}{h_{\text{к}}}$	0,79	0,78	0,77	0,72	0,67	0,61	0,54	0,52

При напівнапірному режимі відносну глибину потоку $\frac{h_{\text{В}}}{a}$ (a — висота отвору труби) можна визначити за залежністю Цивіна М. Н. [20]:

$$\frac{h_{\text{В}}}{a} = 0{,}597 - 0{,}082\,X_1 + 0{,}105\,X_2 - 0{,}285\,X_2^2, \tag{3}$$

де $X_1 = \frac{i - 0{,}055}{0{,}045}$; $X_2 = \frac{h_{\text{к}} - 1}{0{,}30}$.

Згідно з дослідженнями Кольченка О. Л. за довжини труби більше ніж 10–15 діаметрів труби (чи висоти отвору труби) довжина труби і тип оголовка практично не впливає на глибину потоку у вихідному перерізі труби [21].

Аналіз роботи водопропускних споруд показав, що відносно вузьке відвідне русло найхарактерніше для споруджень систем дорожнього водовідведення [16]. Для наближених

орієнтовних розрахунків прийнято вважати, що граничне значення критерію відносного розширення русла дорівнює 8, тобто:

$$\beta_{\text{П}} = \frac{B}{d} \approx 8. \tag{4}$$

У результаті експериментальних досліджень було встановлено, що величина граничного розширення змінюється в широкому діапазоні (від 4 до 20) і залежить від багатьох чинників тобто такі гідравлічні умови, при яких потік, що розтікається, у перерізі повного розтікання тільки торкається обмежуючих стінок, але не набігає на них.

Величина $\beta_{\text{п}}$ не є величиною постійною, є складною функціональною залежністю. В якості основних чинників, що визначають величину $\beta_{\text{п}}$, являються такі як величина витрати, ухил і довжина водозливного тракту, форма його поперечного перерізу, гідравлічний режим роботи споруди і відносна глибина нижнього б'єфу:

$$\beta_{\text{П}} = f(\Pi_{\text{q}}, \frac{i}{i_{\text{k}}}, \frac{l_T}{b}, \frac{h_T}{b}, \frac{h_{\text{B}}}{h_{\text{k}}}), \tag{5}$$

де Π_{q} — параметр витрати, для прямокутної труби — $\Pi_{\text{q}} = \dfrac{Q}{bh_{\text{T}}\sqrt{qh_{\text{T}}}}$;

для круглої труби — $\Pi_{\text{q}} = \dfrac{Q}{\sqrt{qd^5}}$;

l_{T} — довжина труби;

$i_{\text{к}}$ — критичний ухил;

$h_{\text{к}}$ — критична глибина потоку у відвідному руслі.

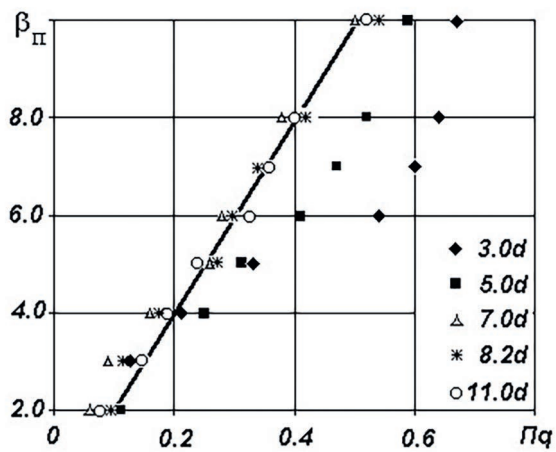


Рисунок 9 **—** Вплив параметра кінетичності на величину граничного розширення при різних довжинах труби

Тоді величина граничного розширення може бути визначена за такою залежністю [16]:

$$\beta_{\text{П}} = 20\Pi_{\text{q}}, \tag{6}$$

при $\Pi_{\text{q}} < 0{,}6$ та $l_{\text{T}} > 7d$.

Виконаний аналіз показує, що зона вільного розтікання може бути описана такими параметрами:

γ — кутом розтікання двомірного бурхливого потоку;

α — кутом сходу косих гідравлічних стрибків, величина яких залежить від наступної сукупності чинників:

$\Pi_q = \frac{Q}{(q^{0,5} d^{2,5})}$ — безрозмірний параметр витрати;

$\beta = \frac{B}{d}$ — відносне розширення нижнього б'єфу;

B та d — відповідно ширина нижнього б'єфу і діаметр водоскидної споруди;

i_T — ухил дна водоскидної споруди;

K_p – коефіцієнт, що характеризує режим роботи водоскиду.

З огляду на те, що один з чинників — режим роботи, може змінюватися тільки дискретно, було прийнято рішення реалізувати план експерименту окремо за режимами [16]. Це дозволило значно розширити діапазон варіювання Π_q і β, а також зменшити число чинників з 4 до 3. У **табл. 2** наведені умови кодування і межі варіювання змінних [16].

Таблиця 2

Межі варіювання змінних і умови їх кодування

Режим	Змінні	Π_q	β	i_T
Безнапірний	Основний рівень (0)	0,40	4,0	0,05
	Інтервал варіювання	0,15	1,0	0,05
	Верхній рівень (+1)	0,55	5,0	0,10
	Нижній рівень (-1)	0,25	3,0	0,00
Напівнапірний	Основний рівень (0)	0,90	5,5	0,05
	Інтервал варіювання	0,35	2,5	0,05
	Верхній рівень (+1)	1,25	8,0	0,10
	Нижній рівень (-1)	0,55	3,0	0,00

Переведення з розмірних величин у безрозмірні нормовані здійснювали за допомогою відомих співвідношень [16]:

$$X_i = \frac{x_i - \overline{x_i}}{\Delta x_i}, \tag{7}$$

де X_i — безрозмірне значення змінної;

x_i — натуральне значення змінної;

$\overline{x_i} = \frac{x_{imin} - x_{imax}}{2}$ — середнє значення змінної в даному діапазоні її зміни (основний рівень змінної);

$\Delta x_i = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2}$ — інтервал зміни даної змінної (інтервал варіювання).

Безнапірний режим:

$$\gamma = 64,416 - 0,938X_1 - 1,540X_2 - 6,364X_3 + 0,964X_1X_2 + 1,164X_1X_3 + 0,509X_2X_3; \tag{8}$$

$$\text{tg}\alpha = 0,237 + 0,006X_1 - 0,002X_2 - 0,048X_3 - 0,008X_1X_2 + 0,006X_1X_3 + 0,003X_2X_3 + \\ +0,004X_2 + 0,015X_3 + 0,010X_1X_2 + 0,006X_2X_3 - 0,590X_1X_2 + 1,520X_3 - 0,621X_1X_2X_3. \quad (9)$$

Напівнапірний режим:

$$\gamma = 56,456 - 6,275X_1 + 1,045X_2 - 1,510X_3 + 4,009X_1X_3 - 1,759X_2X_3 + 0,655X_1 + \\ +0,620X_2 - 0,505X_3 - 3,039X_1X_2X_3 - 2,784X_1X_2 + 1,42X_1X_2X_3; \quad (10)$$

$$\text{tg}\alpha = 0,211 - 0,027X_1 - 0,005X_2 - 0,009X_3 + 0021X_1X_2 + 0013X_1X_3 + 0,005X_2X_3 + \\ +0,001X_1X_2X_3 + 0,031X_2 + 0,006X_3 - 0,021X_1X_2X_3 + 0,009X_2X_3. \quad (11)$$

Розрахункові залежності (8 — 11) дозволяють розрахувати контури зони вільного розтікання при безнапірному і напівнапірному режимі роботи труби.

Порядок розрахунку наступний:

Вибирають вихідні дані для розрахунку — витрата води, що проходить через трубу Q; діаметр труби d; ухил дна труби $i_т$; ширину відвідного русла B; режим роботи труби (безнапірний або напівнапірний) [16].

Підраховують числове значення параметра витрати $\Pi_q = \dfrac{Q}{(q^{0,5}d^{2,5})}$.

Підраховують відносну ширину нижнього б'єфу $\beta = \dfrac{B}{d}$.

За залежністю (7) нормують і масштабують підраховані змінні, наприклад, якщо числове значення параметра витрати склало 0,4, то перерахунок робитися таким чином [16]:

$$X_1 = \frac{0,3 - 0,4}{0,15} = -0,667,$$

де значення $\overline{x_i}$ та Δx_i приведені з [16].

Підставивши вичислені значення змінних X_1, X_2, X_3 у відповідні розрахункові залежності (8) і (9) або (10) і (11) отримаємо числові значення кута розтікання і кута сходу для безнапірного або напівнапірного режиму роботи споруди.

Відстань від вихідного перетину труби до перетину повного розтікання можна порахувати за формулою [16]:

$$L_{пр} = 0,5\ (B - d)\ \text{tg}\gamma. \quad (12)$$

Висновки

На теперішній час не вивчено питання забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб — зміна та вплив коефіцієнта шорсткості за рахунок наявності гофр, їх розміщення; вплив корозії металу на довговічність конструкції; абразивне зношення стінок гофр; поперемінна зміна режимів підтоплення водопропускної труби, зокрема робота дорожніх водопропускних труб у частково напірному режимі. Недостатньо вивчене питання кінетики вихідних ділянок гофрованої металевої водопропускної споруди.

Крім того, залишається актуальним питання методів ремонту гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб, їх удосконалення, а головне створення методів із застосуванням сучасних підходів та матеріалів.

Список літератури

1. Assessment and rehabilitation of existing culverts: A synthesis of highway practice. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 303. Transportation Research Board, 2002.
2. Mathews, J.C. Decision analysis guide for corrugated metal culvert rehabilitation and replacement using trenchless technology. 2012: United States Department of Agriculture, Forest Service.
3. CSP Durability Guide. *National Corrugated Steel Pipe Association*. Washington, 2000.
4. Drainage Handbook Optional Pipe Materials. State of Florida Department of Transportation. Tallahassee, Florida. 2014. 38 p.
5. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. 2012. 326 p.
6. Handbook of steel drainage and highway construction products. Published by Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. 2002. 470 p.
7. Pettersson, L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. *Structural Desing and Bridges*. Stockholm, 2007. 84 p.
8. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249, Washington, D. C., 2001.
9. CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7. Code, Buried Structures (Final), February 1998. CSPI (2002).
10. Коваль П.М., Бабяк І.П., Сітдикова Т.М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро, 2010. № 39. С. 114–117.
11. Ковальчук В. В. Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури. Одеса, 2019. 445 с.
12. ВБН В.2.3-218-198:2007 Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 32 с. (Інформація та документація).
13. ДСТУ Б В.2.3-24:2009 Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану. Київ, 2010. 21 с. (Інформація та документація).
14. ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016 Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб. Київ, 2017. 92 с. (Інформація та документація).
15. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. Київ, 2006. 366 с. (Інформація та документація).
16. Онищенко А.М., Башкевич І.В., Гаркуша М.В., Цивін М.Н., Кожарін С.В. Гідравліка: практичний курс із застосуванням Mathcad : підручник. Київ, 2022. 264 с.
17. Большаков В.А., Курганович А.А. Гидрологические и гидравлические расчёты малых дорожных сооружений. Вища школа. Головное изд-во, 1983. 280 с.
18. Колотков Н.М., Янковский О.А., Щербіна К.Б., Черняховская С.Э. Металические гофрированные трубы под насыпями. Москва, 1973. 120 с.
19. Муромов В.С. Лившиц М.Х. Косогорные водопропускные трубы. Москва, 1975. 144 с.
20. Цивін М.Н. Дослідження експлуатаційних характеристик погашувача енергії активного типу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництвою.* Вип. 57. 1999. С.209–213.
21. Кольченко О.Л. Управление кинематической структурой двухмерного бурного потока за трубчатыми водосбросными сооружениями: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.09 / КИСИ. Киев, 1987. 20 с.
22. Ткаченко Н.И. Совершенствование элементов крепления нижнего бьефа трубчатых водопропускных сооружений лиманного орошения: Автореф. диссерт. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / НИМИ. Новочеркасск, 1987. 24 с.
23. Service life of culverts. NCHRT. Synthesis of Highway Practice 474. *Transportation Research Board of the National Academies*. Washington, 2015. 145 p.

References

1. Assessment and rehabilitation of existing culverts: A synthesis of highway practice. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 303. Transportation Research Board, 2002 [in English].
2. Mathews, J.C., Decision analysis guide for corrugated metal culvert rehabilitation and replacement using trenchless technology. 2012: United States Department of Agriculture, Forest Service [in English].
3. CSP Durability Guide. *National Corrugated Steel Pipe Association*. Washington, 2000 [in English].
4. Drainage Handbook Optional Pipe Materials. State of Florida Department of Transportation. Tallahassee, Florida. 2014. 38 p. [in English].
5. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. April, 2012. 326 p. [in English].
6. Handbook of steel drainage and highway construction products. Published by Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. 2002. 470 p. [in English].
7. Pettersson L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. *Desing and Bridges*. Stockholm, 2007. 84 p. [in English].
8. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249, Washington, D. C., 2001 (Information and documentation) [in English].
9. CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7. Code, Buried Structures (Final), February 1998. CSPI (2002). [in English].
10. Koval P.M., Babyak I.P., Sitdykova T.M. Normuvannya pry proektuvanni ta budivnytstvi sporudy z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy. *Nauka ta progres transportu*. Dnipro, 2010. № 39. P. 114–117.
11. Nesucha diyu transportnykh sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruktsiy v umovakh ekspluatatsiyi : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 23.05.01 / Koval′chuk Vitaliy Volodymyrovych ; Odes. derzh. akad. bud-va ta arkhitektury. – Odesa, 2019. 445 p.
12. VBN V.2.3-218-198:2007 Proektuvannia ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruktsii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia [Federal building regulations (VBN V.2.3-218-198:2007) Design and construction of structures made of corrugated metal structures on public roads]. Kyiv, 2007. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
13. DSTU B V.2.3-24:2009 Truby dorozhni. Obstezhennya ta otsinyuvannya tekhnichnoho stanu [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.3-24:2009) Transport constructions. Culverts. Inspection and assessment]. Kyiv, 2009. 21 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
14. DSTU-N B V.2.3-34:2016 Nastanova z vykonannya robit pry budivnytstvi mostiv ta trub [State Standard of Ukraine (DSTU-N B V.2.3-34:2016) Guidance on implementation of works at building of bridges and pipes]. Kyiv, 2017. 92 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
15. DBN V.2.3-14:2006 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia [State Building Norms (DBN V.2.3-14:2006) Transport facilities. Bridges and pipes. Design rules]. Kyiv, 2006. 366 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
16. Onyshchenko A.M., Bashkevych I.V., Harkusha M.V., Tsyvin M.N., Kozharin S.V. Hidravlika: praktychnyy kurs iz zastosuvannyam Mathcad: pidruchnyk. Kyiv, 2022. 264 p. [in Ukrainian].
17. Bolshakov V.A., Kurhanovych A.A. Hydrolohycheskye y hydravlycheskye raschëty malykh dorozhnykh sooruzhenyy. 1983. 280 p. [in Russian].
18. Kolotkov N.M. Yankovskyy O.A. Shcherbina K.B. Chernyakhovskaya S.Ye. Metalichni hofrovani truby pid nasypamy. Moscow, 1973. 120 p. [in Russian].
19. Muromov V.S., Lyvshyts M.Kh. Kosohorni vodopropuskni truby. Moscow, 1975. 144 p. [in Russian].
20. Tsyvin M.N. Doslidzhennya ekspluatatsiynykh kharakterystyk pohashuvacha enerhiyi aktyvnoho typu. *Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo*. Iss. 57. 1999. P. 209–213 [in Ukrainian].
21. Kolchenko O.L. Upravlinnya kinematychnoyu strukturoyu dvokhmernoho burovoho potoku za trubchatymy vodosbrosnymy sporudamy: Avtoref. dyss. ... kand. tekhn. nauk: 14.05.09/ KYSY. Kyiv, 1987. 20 p. [in Ukrainian].

22. Tkachenko N.Y. Sovershenstvovanye elementiv kriplennya nyzhnoho byefa trubchatykh vodopropusknykh sooruzhenyy lymannoho oroshenyya: Avtoref. dysert. ... kand. tekhn. nauk: 06.01.02 / NYMY. Novocherkassk, 1987. 24 p. [in Russian].

23. Service life of culverts. NCHRT. Synthesis of Highway Practice 474 / Transportation Research Board of the National Academies. Washington, 2015. 145 p. [in Ukrainian].

Artur Onyshchenko, *D.Sc., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
Mykola Harkusha, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*
Mykola Klymenko, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-7967-5881*

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF PROBLEMS OF ENSURING RELIABILITY AND DURABILITY OF HYDRAULIC STRUCTURES OF TRANSPORT CONSTRUCTION FROM ROAD WATERWAYS

Abstract

Introduction. Failure to ensure the reliability and durability of hydraulic structures of transport construction of road culverts in operating conditions due to static and dynamic loads from vehicles and temperature and climatic influences, the destructive force of water flow, abrasive destruction, corrosion of metal.

The reason for the lack of efficiency of design solutions of road culverts is the fundamental difference in the conditions of water flow through the road culvert, at the outlet of the pipe a two-dimensional flow is formed, and and, as a consequence, the destruction of the structure of the lower reaches, landslides, the destruction of the culvert as a whole.

Problems. From the literature analysis it is established that road culverts are in difficult operating conditions, which causes their premature destruction.

Purpose. It consists in the analysis of problems of ensuring reliability and durability of hydraulic structures of transport construction from road corrugated metal culverts.

Results. The analysis of problems of ensuring reliability and durability of hydraulic structures of transport construction from road culverts in operating conditions is carried out. Proposals for calculating the initial sections of the structure to ensure its reliability are given.

Conclusions. To date, the issue of ensuring the reliability and durability of hydraulic structures of transport construction of road culverts is not fully studied — alternating changes in the modes of flooding of culverts, including the operation of road culverts in part in the pressure mode; change and influence of the roughness coefficient due to the presence of corrugations, their placement; the effect of metal corrosion on the durability of the structure; abrasive wear of corrugated walls. The question of the kinetics of the initial sections of the corrugated metal culvert is insufficiently studied.

Keywords: road, culvert, hydraulic structure, durability, reliability.