

УДК 625.745.1

Гаркуша М. В., канд. техн. наук., доц., <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

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

ДОСЛІДЖЕННЯ СПРЯЖЕННЯ Б'ЄФІВ ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКАЛЬНИХ СПОРУД З МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація

Вступ. Дорожні водопропускальні споруди з металевих гофрованих конструкцій (далі — МГК) незважаючи на понад сторічну історію застосування, в Україні є досить новим видом споруд та набувають широкого застосування в транспортному будівництві як альтернатива традиційним сталевим або бетонним мостовим конструкціям. Загальновідомими перевагами, які виправдовують вибір такого рішення, є в основному короткий строк і відносно низька вартість будівництва, будівництво за умови дотримання відповідного технологічного режиму не викликає особливих проблем. Однак сучасний процес проектування та будівництва дорожніх водопропускальних споруд з МГК є недосконалим та постійно поліпшується. Деякі особливості місцевості вимагають будівництво дорожньої водопропускальної труби з крутим ухилом, що збільшує швидкість води та створює потік високої енергії на виході дорожньої водопропускальної труби. Ця високоенергетична вода може розмивати природне русло. Найбільш ефективним способом гасіння надмірної кінетичної енергії водного потоку є гасіння за допомогою гідравлічного стрибка. Проведено аналіз особливості спряження б'єфів для дорожніх водопропускальних труб в умовах плоскої задачі, визначено вплив ряду факторів на довжину гідравлічного стрибка та наведено методологічний підхід до вирішення завдань спряження б'єфів.

Проблематика. Встановлено, що існує необхідність в уточненні існуючих підходів спряження б'єфів дорожніх водопропускальних споруд з металевих гофрованих конструкцій з урахуванням світових підходів.

Мета. Мета наукової роботи полягає у дослідженні спряження б'єфів дорожніх водопропускальних труб в умовах плоскої задачі, визначено вплив ряду чинників на довжину гідравлічного стрибка та наведено методологічний підхід до вирішення завдань спряження б'єфів.

Результати. Проведено аналіз досвіду експлуатації та особливостей роботи водопропускальних споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах. Досліджено особливості спряження б'єфів для дорожніх водопропускальних труб в умовах плоскої задачі. Встановлено методологічний підхід до вирішення завдань спряження б'єфів.

Висновки. Найбільш ефективним способом гасіння надмірної кінетичної енергії водного потоку є гасіння за допомогою гідравлічного стрибка.

Однак, попри наявні дослідження з кінематики потоку в зоні формування гідравлічного стрибка та його стійкості, питання впливу конструктивних елементів гасників активного типу на керування потоком у зоні розтікання, особливо в умовах відносно широких і вузьких русел, залишаються недостатньо вивченими.

У зв'язку з тим, що на ділянці двомірний у плані бурхливий потік трансформується в тривимірний з високим рівнем анізотропної турбулентності для дослідження такого типу завдань, на сучасному етапі, можливий лише статистичний підхід із застосуванням методів теорії математичного планування експерименту.

Під час формування потоку із заданими гідравлічними характеристиками доцільно використовувати принцип управління — цілеспрямований вплив на потік конструктивними елементами нижнього б'єфу.

Використання рівняння руху рідини в диференціальній формі дозволяє отримати рівняння досконалого гідравлічного стрибка у вигляді, явного відносно шуканої другої сполученої глибини в разі шорстких водоводів з похилим дном.

Аналіз рівняння загального розв'язку гідравлічного стрибка показав, що вплив сил зовнішнього тертя і похилу дна на висотні розміри гідравлічного стрибка можна враховувати окремо, незалежно один від одного.

Виконаний аналіз сучасного стану проблеми дозволяє зробити висновок про недосконалість існуючих методик розрахунку спряження б'єфів та необхідність удосконалення існуючих підходів розрахунку.

Ключові слова: автомобільні дороги, гідротехнічні споруди, гідравлічний стрибок, дорожні водопропускальні труби.

Актуальність роботи

Останнім часом відбувається погіршення стану транспортних споруд, у тому числі побудованих і за типовими проєктами, що зумовлено впливом навколишнього середовища, фізичним зносом і старінням матеріалів та конструкцій, підвищенням осьових навантажень, збільшенням транспортного потоку тощо [1 – 4].

Дорожні водопропускальні споруди з металевих гофрованих конструкцій (далі — МГК) є перспективним видом транспортних споруд, використання яких вимагає мінімальних витрат на транспортування елементів споруди, невеликих витрат матеріалів та трудовитрат на будівельному майданчику, маючи при цьому великі переваги з альтернативними конструкціями та нерідко застосовуються як малі та середні мости [5].

Крім того, одним із напрямків застосування металевих гофрованих конструкцій є ремонт існуючих малих мостів і дорожніх водопропускальних труб [1].

Згідно з даними «Аналітичної експертної системи управління мостами» Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України всього на дорогах загального користування обліковується станом на 01.05.2020 — 16 155 мостів [6] та 129 053 дорожніх водопропускальних труб, що становить в середньому, при мережі доріг загального користування 169 739 км, кількість близько однієї (0,8) дорожньої водопропускальної труби на один кілометр [1], що робить їх наймасовішими транспортними спорудами та одними з найважливіших конструктивних елементів автомобільних доріг [5]. Більше 10 000 мостів на дорогах загального користування не відповідають сучасним нормам (63,5 %), з них 4 204 моста — на дорогах державного значення та 6 061 міст на дорогах місцевого значення [6]. Не менше ніж 29 % дорожніх водопропускальних труб вимагають ремонтних заходів. Основними їх дефектами є тріщини кілець та їх просідання, порушення гідроізоляції стиків між кільцями, корозія елементів споруди, руйнування лотка і укріплень тощо [1].

Згідно літературних джерел [2] у США близько 40 % загальної кількості транспортних споруд, що входять до складу дорожньої мережі потребують термінового ремонту. В Європі є багато мостових споруд, які потребують термінової модернізації або реконструкції або навіть заміни [2]. Частим результатом зносу конструкції є значне зниження навантажувальної здатності, часто внаслідок дії руйнівних природних сил, таких як повінь, неправильне обслуговування або пізня реакція на виниклі пошкодження.

Однією з причин передчасного руйнування дорожньої водопропускальної споруди з МГК є корозія металу, а також відсутність сучасних підходів аналізу та врахування корозійного пошкодження водопропускальної труби на її подальшу надійність та довговічність [5].

Важливість транспортних споруд, пов'язана, наприклад, з їх стратегічним розташуванням, викликає необхідність пошуку сучасних будівельних рішень, що поєднують швидке виконання, низьку вартість і задовільний строк служби [2].

Поверхневий стік дорожніх водопропускальних споруд впливає не лише на ерозію ґрунтів, а й руйнування транспортної споруди в цілому. Дорожні водопропускальні споруди переважно працюють у безнапірному або рідше в напівнонапірному режимі течії, в нижньому б'єфі дорожніх водопропускальних споруд з МГК залежно від умов протікання водного потоку при раптовому розширенні русла спряження потоків може здійснюватися або вільним розтіканням двовимірною у плані бурхливого потоку, або збійним перебігом струменя, що повільно розтікається [5, 7 – 9]. Обидва способи спряження впливають на деформацію дна відповідного русла в нижньому б'єфі, що спричинює місцеві розмиви дна і берегів відповідного русла та становлять

небезпеку для стійкості дорожніх водопропускальних споруд з МГК, та може призвести до руйнування всієї споруди [7, 9 – 11].

У випадку вільного розтікання бурхливого потоку значному розмиву може піддаватися дно русла по всій його ширині [8]. Варто зазначити, що розмив, як правило, виникає внаслідок нерівномірності величини пропускної витрати, під час збійної течії транзитний струмінь, зберігає надмірну кінетичну енергію на значній відстані від вихідного перерізу споруди, що надає йому високу розмивну здатність. Глибокий розмив, не зважаючи, що ширина транзитного струменя відносно невелика, загрожує руслу в будь-якій точці дна поперечного перерізу відвідного русла з огляду на те, що транзитний струмінь може змінити своє положення в плані, також значні деформації русла виникають у зоні бічних водоворотних зон [8]. Потік в зоні розтікання володіє швидкостями, що в кілька разів перевищують нерозмивну швидкість для ґрунтів дна русла [5, 8] та насиченості його донними і залученими наносами та сміттям, малим підтопленням із боку нижнього б'єфу [7 – 11], що негативно впливає не лише на експлуатацію та утримання споруди, але й на безпеку та життєдіяльність людей в тому числі і на екологічну ситуацію в регіоні [5].

Запобігання небезпечним деформаціям русла в нижньому б'єфі дорожньої водопропускальної споруди досягають за рахунок зміцнення відвідного русла або влаштування гасників надлишкової кінетичної енергії потоку, що забезпечують розтікання потоку в плані [5, 8].

Крім того, під час аналізування причин таких руйнувань встановлено, що однією з причин руйнувань також є недостатня вивченість місцевого стоку або недооблік його особливостей, що веде до неузгодженості водного режиму та пропускної спроможності дорожніх водопропускальних споруд [5]. Це викликає необхідність передбачити заходи щодо захисту конструктивних елементів у нижньому б'єфі споруди від абразивного зносу, занесення великоуламковим матеріалом, забезпечити перепустку плаваючих тіл [5].

Для запобігання розмиву споруди з боку нижнього б'єфу, що працює в таких умовах, передбачається влаштування гасників надлишкової кінетичної енергії потоку [5]. Аналіз конструкцій водопропускальних споруд показав, що в більшості випадків ширина русла в нижньому б'єфі в кілька разів більша ширини водопропускальної споруди (шляху потоку в споруді), що зумовлює просторовий характер руху потоку в ньому і крайню нерівномірність розподілу питомих витрат. Характер просторового руху водного потоку в нижньому б'єфі, що розширюється, залежить, у першу чергу, від глибини води в ньому і гідравлічних характеристик потоку у вихідному перерізі зі споруди. Залежно від побутової (природної) глибини потоку у відвідному руслі можливі три форми спряження потоку, що виходить із споруди з побутовим потоком у широкому нижньому б'єфі [7, 9 – 11]:

- спряження за типом затопленого струменя;
- спряження за типом збійної течії;
- спряження за типом вільного розтікання.

Існуючі технічні рішення конструкцій нижнього б'єфу мають недостатню ефективність, що спричинено принциповою відмінністю в умовах протікання потоку в нижньому б'єфі — на ділянці розтікання має місце двовимірний потік, а на ділянці гасіння надлишкової кінетичної енергії двовимірний потік трансформується на тривимірний високотурбулентний потік [9 – 11]. Розрахунок конструктивних елементів гасників, як правило, ведеться на пропуск однієї розрахункової витрати води, що визначається за даними гідрологічних спостережень, гідрологічні розрахунки базуються на імовірнісному підході, тому є наближеними, а значить, існує і ймовірність перевищення витрат, що пропускається над розрахунковим [5].

Тому, проведення досліджень оптимізації конструкції нижнього б'єфу з урахуванням даних факторів є актуальним та необхідним [5, 9 – 11].

Отже, актуальність цього дослідження полягає в необхідності дослідження спряження б'єфів дорожніх водопропускальних споруд з металевих гофрованих конструкцій.

Викладення основного дослідження

Розрахунок спряження б'єфів, особливо, за схиловими дорожніми водопропускальними трубами є досить складною задачею, тому що на ділянці вільного розтікання має місце двовимірний

потік, а на ділянці гасіння надлишкової кінетичної енергії двовимірний потік перетворюється на тривимірний турбулентний потік. Це робить практично неможливим дати точний теоретичний розв'язок про рух води в нижньому б'єфі дорожньої водопропускальної труби, а отже, і розрахувати місце розташування та геометричні розміри конструкції гасника надлишкової кінетичної енергії та призначити розміри та тип конструкції кріплення дна відповідного русла [12].

Потік води на ділянці спряження за допомогою гідравлічного стрибка в умовах плоскої задачі може бути віднесений до розряду двовимірних потоків з високим рівнем анізотропної турбулентності [12].

Зважаючи на надзвичайну складність процесів, що проходять у гідравлічному стрибку розв'язок задач пов'язаних з визначенням лінійних розмірів гідравлічного стрибка носить емпіричний або напівемпіричний характер.

Раніше багато дослідників зосереджувалися на властивостях гідравлічного стрибка в горизонтальному прямокутному руслі [13]. Умови течії хвилеподібних стрибків були класифіковані, а основні характеристики течії були досліджені Chanson, H. і Montes, J. [14], Chanson, H. і Montes, J. [15] і Ohtsu, I. [16], Chanson, H. [17] подав огляд порівняно недавніх досягнень у вивченні турбулентних гідравлічних стрибків за допомогою лабораторних експериментів. Chanson, H. і Montes, J. [18] досліджували властивості повітряно-водяного потоку в шарі зсуву, що розвивається. Дослідження Valiani, A. [19] застосував інтегральний баланс лінійного і кутового моментів у стаціонарному гідравлічному стрибку. Авторами [20] продемонстровано, що терміни Бусінеска не впливають на результат розташування стрибка, використовуючи модель четвертого порядку. Molls, T. та Molls, F. [21] розв'язали 1D і 2D рівняння Сен-Венана гідравлічного стрибка за допомогою явної двокрокової числової схеми.

У загальному випадку, при розгляді стрибкового спряження в похилому шорсткому руслі використовують або емпіричні залежності або рівняння кількості руху, для замикання якого застосовують ті чи інші статистичні гіпотези або статистичні моделі [12].

Розглядаючи схему спряження в похилому гладкому руслі, дослідники зазвичай використовували рівняння кількості руху. Основна проблема виникала щодо ваги відсіку рідини, між розрахунковими перерізами і лінією дна.

Більш ранні дослідження гідравлічних стрибків були у похилих прямокутних руслах та застосовувалися у водозливах, та включали похилу поверхню вгору за течією та горизонтальну поверхню вниз за течією. Перший теоретичний підхід був представлений Ellms, R. [22]. Перше систематичне дослідження було проведено Bakhmeteff, B. і Matzke, A. [23]. Kindsvater, C. E. [24] класифікував стрибки на чотири категорії на основі положення місця стрибка. Дослідження типу D-стрибка були проведені Rajaratnam, N. [25], Ohtsu, I. та Yasuda, Y. [26], а також Gunal, M. і Narayanan, R. [27]. Автори [28] продемонстрували, що висота першої хвилі для хвилястого гідравлічного стрибка не залежить від нахилу русла. Beirami, M. та Chamani, M. R. [29] припустили, що ефектами масштабу можна знехтувати для стрибків із малими початковими глибинами.

Коефіцієнт наповнення у оцінюється як:

$$y = \frac{h}{D}, \quad (1)$$

де h — глибину потоку;

D — діаметр труби.

Спрощене рівняння для оцінки числа Фруда [13]:

$$Fr = \frac{Q}{(gDh^4)^{1/2}}, \quad \text{де } 0,2 < y < 0,95. \quad (2)$$

Gargano, R. та Hager, W. H. [12] запропонували емпіричну формулу для першої вершини хвилі h_{1c} :

$$h_{1c} / D = (1,20Fr_1y_1 - 0,10), \quad \text{де } Fr_1 > 1. \quad (3)$$

Викликає стан затримки потоку, який виникає, коли глибина потоку після стрибка h_{j2} більше діаметра труби D . Задача гідравлічного стрибка починається з принципу імпульсу, щоб вивести рівняння для прямого розрахунку стрибка, між глибиною потоку перед стрибком h_{j1} і глибиною потоку після стрибка h_{j2} виражається як:

$$\rho Q V_1 + \rho g Y_{c1} A_1 = \rho Q V_2 + \rho g Y_{c2} A_2 - L_j \frac{A_1 + A_2}{2} \rho g \sin \alpha, \quad (4)$$

де 1 і 2 — індекси, що відносяться до перерізів потоку до і після стрибка відповідно;
 ρ — густина води;
 Y_c — відстань від поверхні води до центру тягаря розглянутого поперечного перерізу.
 Сили тертя ігнорувалися, оскільки вони малі порівняно з потоками імпульсу і силами тиску.

Вагомий вплив на розміри гідравлічного стрибка має шорсткість русла [12]. Виняткова складність процесу, що протікає, призвело до того, що всі розрахункові залежності були отримані, як правило, на основі експериментальних досліджень [12].

Задача визначення висотних розмірів стрибкового спряження в гладкому горизонтальному призматичному руслі привернула одну з найбільших уваг дослідників.

У результаті досліджень основне рівняння гідравлічного стрибка отримало вигляд:

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_1} + y_1 \omega_1 = \frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_2} + y_2 \omega_2, \quad (5)$$

де ω_1 і ω_2 — відповідно площі поперечного перерізу потоку в секціях h_1 і h_2 ;
 y_1 та y_2 — глибина занурення центрів ваги площ поперечного перерізу ω_1 і ω_2 відповідно;
 Q — розрахункова витрата.

Вираз (5) можна виразити через параметр кінетичності $Пк$.

У роботі [12] розглянуто можливість роз'язання даного рівняння для тих типів русел, площа поперечного перерізу, яких відповідає такій залежності:

$$\frac{Пк_1}{Пк_2} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{x_0} = \eta^{x_0}, \quad \frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m = \eta^m, \quad \frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n = \eta^n, \quad (6)$$

і позначає відношення $\frac{By}{w} \mu$, тоді після нескладних перетворень рівняння стрибка може бути представлено в наступному вигляді:

$$\varepsilon_1 = \left[\frac{1}{\mu} \frac{(\eta^{m+n} - 1)}{(\eta^m - 1)} \frac{1}{\eta^m} \right]^{\frac{1}{x_0}}, \quad (7)$$

де числові значення величин $\bar{\mu}$; m ; n ; x_0 для різних типів русел приведені в [12].

Дане рівняння встановлює зв'язок між величинами ξ_1 і η .

Цивіним М. Н. [12] встановлено, що при однакових значеннях величини спряженої глибини η числові значення відносної глибини ξ_1 відрізняються досить незначно. Так при $\eta = 10$ розбіжність між величинами ε , розрахованими для трикутного і прямокутного русел, становить всього 3,3 %, у той час як параметр кінетичності $Пк$ трикутного русла виявився більше $Пк$ прямокутного русла у 12,2 рази.

Слід зазначити, що дослідження Ellms, R. [22], Bakhmeteff, B. і Matzke, A. [23]. Kindsvater, C. E. [24], Rajaratnam, N. [25], Ohtsu, I. та Yasuda, Y. [26], Gunal, M. і Narayanan, R. [27], Beirami, M. та Chamani, M. R. [29] стосувалися прямокутного каналу, мало уваги приділено гідравлічному стрибку в круглому каналі, внаслідок своєї складності. Stahl, H. та Hager, W. H., Reinauer, R. та Hager, W. H. і Gargano, R. та Hager, W. H. [12] досліджували формування гідравлічного стрибка в горизонтальній круглій трубі. Вони запропонували емпіричні рівняння для висоти та довжини стрибка. Існують дві

основні відмінності між гідравлічними стрибками в круглій трубі та в прямокутній: коефіцієнт наповнення вище за течією відіграє більш важливу роль у першому, ніж у другому, і круговий потік може бути заглушений наявністю гідравлічних стрибків. Дослідження властивості течії гідравлічного стрибка в похилій круглій трубі приділено дуже мало уваги.

Розв'язання рівняння щодо другої спряженої глибини можливе лише для прямокутного русла:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right], \quad (8)$$

де h_1 — початкова глибина;

h_2 — послідовна глибина;

Fr_1 — число Фруда вище за течією, оцінене на початковій ділянці глибини.

Числове моделювання турбулентних течій пов'язане зі значними труднощами, точного обчислення динаміки вихору, визначення миттєвого положення та конфігурації вільної поверхні, ефекта турбулентності та залучення повітря [12]. Гідравлічний стрибок вивчався за допомогою математичних моделей, заснованих на рівняннях N-S (Нав'є – Стокса), методів відстеження вільної поверхні, таких як метод об'єму рідини (VOF) або метод встановлення рівня та різних моделей турбулентності.

Відомо, що під час стрибку розсіюється велика кількість енергії. Якщо E_1 і E_2 — питомі енергії на початку та в кінці стрибка відповідно, і якщо E_L — втрата питомої енергії під час стрибка, можна показати, що [25, 42]:

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{8Fr_1^4 + 20Fr_1^2 - (8Fr_1^2 + 1)^{3/2} - 1}{2Fr_1^2(2 + Fr_1^2)}. \quad (9)$$

З цього рівняння можна знайти втрати енергії, що дорівнюють $0,86E_1$; тобто 86 % початкової питомої енергії розсіюється [25, 42].

Метод об'єму рідини використовує функцію $f(x, y, z, t)$ для призначення вільної поверхні. Функція f , що представляє частку рідини, отримується з наступного рівняння:

$$\frac{df}{dt} + U_j \frac{df}{dx_j} = 0, \quad (10)$$

де U — швидкість конвекції.

Найбільш часто застосовуваний підхід для моделювання турбулентного потоку полягає в тому, що ґрунтується на усередненні за часом, усереднення за часом використовується за рівнянням Рейнольдса, рівняння Нав'є – Стокса усереднюється за Рейнольдсом (RANS) [12]. У цьому статистичному підході миттєві значення швидкості та тиску зображуються як сума середнього та флуктуаційного компонентів [12]. Будь-яку миттєву швидкість u_i при заданих координатах x і часу t можна записати як:

$$u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) + u'_i(x, t), \quad (11)$$

де $\bar{u}_i$ — середня швидкість;

u' — флуктуаційна швидкість.

Середня швидкість все ще має залежати від часу t , що можливо, коли усереднення часу визначається як [12]:

$$\bar{u}_i(x, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i(x, t) dt, \quad T_1 \ll T \ll T_2, \quad (12)$$

де T_1 — характерний часовий масштаб турбулентних коливань;

T_2 — характерний часовий масштаб нестабільності. У той час як $T \ll T_2$, може відтворити деяку нестабільність потоку (наприклад, флуктуації стрибка).

Розв'язання задачі числовими методами призводить до різних рівнянь, вираз основних рівнянь руху, написаних для безперервного середовища, через дискретні величини дозволяє отримати тільки наближені розв'язки, проте при такому підході коло розв'язуваних завдань є значно ширшим, ніж при використанні аналогового підходу [12].

Обчислювальна гідродинаміка використовує числовий аналіз і структури даних для прогнозування та моделювання потоків, найпоширеніший програмний комплекс FLOW-3D, що дає можливість моделювання потоку і аналізу процесу розмиву вниз за течією з високою точністю [30 – 36], у тому числі використовується для проектування гідравлічних конструкцій, що розсіюють енергію, таких як резервуари для заспокоєння, щоб зменшити ризик розмиву та ерозії в структурах випуску [32] для руху нестисливої в'язкої рідини, використано тривимірне усереднене за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса [37]:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x, \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y, \quad (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z, \quad (16)$$

де R_{DIF} — турбулентна дифузія;
 P — середній гідродинамічний тиск;
 f_x, f_y і f_z — в'язкі прискорення;
 G_x, G_y і G_z — тіло прискорення;
 ρ — густина рідини;
 V_F — об'ємна частка;
 A_x, A_y і A_z — частки площі;
 x, y та z — декартові координати;
 u, v, w — компоненти швидкості.

Визначення локальної швидкості транспортування осаду (наносів) є ключовим елементом під час розроблення математичних моделей, що служать для прогнозування деформації дна та берегової лінії. Однак, відсутні надійні практичні моделі розрахунку процесу транспортування осаду (наносів). Рух транспортування осаду (занесення, завислий стан, осідання та навантаження на пласт) було оцінено шляхом прогнозування процесу адвекції, ерозії та осадження за допомогою рівнянь, описаних Вей Г. та ін [38].

За аналогією з рухом води рівняння транспорту наносів може бути представлене як математичний вираз закону збереження маси, та можна записати у двовимірному вигляді [43]:

$$(1 - \rho_m) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{q}_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{q}_{sy}}{\partial y} = 0, \quad (17)$$

де ρ_m — щільність осаду, що знаходиться в одиниці об'єму рідини;
 z_b — рівень дна;
 $\tilde{q}_{sx}$ і $\tilde{q}_{sy}$ — об'ємне транспортування осаду на одиницю ширини (m^2/c) в напрямках x та y відповідно.

Подібне рівняння балансу може бути записано для індивідуальної фракції заданого розміру у разі, коли осад є сумішшю фракцій різних розмірів. При цьому рівняння має розглядатися обсяг цієї фракції, взаємодію фракцій різних розмірів, як правило, нехтують.

Метод об'єму рідини (VOF) використовувався для застосування правильних граничних умов на межі розділу та відстеження межі розділу рідин через довільні деформації [35]. Гідродинамічний аналіз проводився на основі методології представлення двофазної площі / об'єму перешкод (FAVOR) [35, 39]. Цей метод дозволяє відстежувати межу розділу рідин через довільні деформації та застосовувати правильні граничні умови на межі розділу [35, 40].

У програмному комплексі OpenFOAM швидкість і тиск є важливими параметрами, які можна використовувати для порівняння [41]. Для розв'язування нестисливої в'язкої рідини використовуються рівняння двофазної течії нестисливої N-S рівняння (усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса) [42]:

$$\nabla \cdot u = 0 ,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) - \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) S) = -\nabla p + \rho g + \sigma K \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} , \quad (18)$$

де u — векторне поле швидкості;

p — поле тиску;

μ_t — турбулентна вихрова в'язкість;

α — функція об'ємної частки для двох рідин, визначена як:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{об'єм, який займає повітря;} \\ 1 & \text{об'єм, який займає вода.} \end{cases}$$

S — тензор швидкості деформації, $S = \frac{1}{2} \nabla u + \nabla u^T$;

σ — поверхневий натяг;

K — кривизна поверхні.

Модель турбулентності виражена рівнянням транспортування для моделі $k-\omega$ SST [41]:

— кінематична вихрова в'язкість:

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} , \quad (19)$$

— кінетична енергія турбулентності:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] , \quad (20)$$

— питома швидкість дисипації:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} , \quad (21)$$

де k — турбулентна кінетична енергія;

μ_t — коефіцієнт турбулентної в'язкості;

ω — швидкість дисипації;

τ_{ij} — тензор напруження Рейнольдса $\left[= \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \sigma_{ij} \right]$;

σ_{ij} — дельта Кронекера.

Висновки

Найбільш ефективним способом гасіння надмірної кінетичної енергії водного потоку є гасіння за допомогою гідравлічного стрибка.

Однак практично досліджено питання, пов'язані з кінематикою потоку на ділянці утворення гідравлічного стрибка та питання його стійкості, погано вивчено керуючий вплив на потік у зоні розтікання конструктивних елементів гасників активного типу для відносно широких та відносно вузьких русел.

У зв'язку з тим, що на ділянці двомірний у плані бурхливий потік трансформується в тривимірний з високим рівнем анізотропної турбулентності для дослідження такого типу завдань, на сучасному етапі, можливий лише статистичний підхід із застосуванням методів теорії математичного планування експерименту.

При формуванні потоку із заданими гідравлічними характеристиками доцільно використовувати принцип управління — цілеспрямований вплив на потік конструктивними елементами нижнього б'єфу.

Використання рівняння руху рідини в диференціальній формі дозволяє отримати рівняння досконалого гідравлічного стрибка у вигляді, явного відносно шуканої другої сполученої глибини в разі шорстких водоводів з похилим дном.

Аналіз рівняння загального рішення гідравлічного стрибка показав, що вплив сил зовнішнього тертя і похилу дна на висотні розміри гідравлічного стрибка можна враховувати окремо, незалежно один від одного.

Виконаний аналіз сучасного стану проблеми дозволяє зробити висновок про недосконалість існуючих методик розрахунку спряження б'єфів та необхідність удосконалення існуючих підходів розрахунку.

Список літератури

1. Коваль П. М., Фаль А. Є., Бабяк І. П., Сітдикова Т. М. Нормативне забезпечення проектування і будівництва споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Дороги і мости*. Київ, 2008. Вип. 8. С. 154–158. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/Uz_21.pdf.
2. Damian Beben. *Soil-Steel Bridges*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2020., 2020. P. 214. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8>.
3. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проектування та будівництва гідротехнічних споруд транспортного будівництва у вигляді водопропускних труб з полімерних матеріалів на автомобільних дорогах. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 112–133. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112>.
4. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Технічний стан транспортних споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. Вип. 19. С. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2021/233873>.
5. Гаркуша М. В. Вплив пошкоджених гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на навколишнє середовище. Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг. V міжнародна наукова-технічна конференція, 11-13 жовтня 2023, Україна, Львів : зб. матер. Електрон. дан. Київ : Яроченко Я. В., 2023. С. 82–83. DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-33-9>.
6. Цинка А. О., Боднар Л. П. Дослідження стану мостових переходів на основі аналітичної експертної системи управління мостами. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 21. С. 270–281. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.270>.
7. А. М. Онищенко, І. В. Башкевич, М. В. Гаркуша, М. Н. Цивін, С. В. Кожарін. Гідравліка: практичний курс із застосуванням Mathcad: підручник. Київ: «Видавництво Людмила», 2022. 264 с.
8. Ліпницький Г. О. Застосування гасника енергії при раптовому розширенні русла в нижньому б'єфі малої штучної споруди. *Гідравліка: Міжвідомчий республіканський науково-технічний збірник*. К.: Техніка, 1965. Вип. 1. С. 194–201.
9. Цивін М. Н. Новий підхід до проблеми гасіння надмірної кінетичної енергії за трубчастими водоскидами. *Гідравліка та гідротехніка: Міжвідомчий республіканський науково-технічний збірник*. 1998. Вип. 59. С. 85–89.

10. 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.
11. 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.
12. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз спряження б'єфів гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах плоскої задачі. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 27. С. 228–244. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228>.
13. Wang C, Li SS. Hydraulic Jump and Resultant Flow Choking in a Circular Sewer Pipe of Steep Slope. *Water*. 2018; 10(11):1674. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10111674>.
14. Chanson, H.; Montes, J.S. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experimental apparatus and flow patterns. *J. Hydraul. Eng.* 1995, 121, 129–144.
15. Montes, J.; Chanson, H. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experiments and analysis. *J. Hydraul. Eng.* 1998, 124, 192–205.
16. Ohtsu, I.; Yasuda, Y.; Gotoh, H. Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels. *J. Hydraul. Eng.* 2003, 129, 948–955.
17. Chanson, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. *Eur. J. Mech. B/Fluids* 2009, 28, 191–210.
18. Chanson, H.; Brattberg, T. Experimental study of the air–water shear flow in a hydraulic jump. *Int. J. Multiph. Flow* 2000, 26, 583–607.
19. Valiani, A. Linear and angular momentum conservation in hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 1997, 35, 323–354.
20. Gharangik, A.M.; Chaudhry, M.H. Numerical simulation of hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 1991, 117, 1195–1211.
21. Molls, T.; Molls, F. Space-time conservation method applied to Saint Venant equations. *J. Hydraul. Eng.* 1998, 124, 501–508.
22. Ellms, R. Hydraulic jump in sloping and horizontal flumes. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1932, 54, 113–121.
23. Bakhmeteff, B.; Matzke, A. The hydraulic jump in sloped channels. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1938, 60, 111–118.
24. Kindsvater, C.E. The hydraulic jump in sloping channels. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 1944, 109, 1107–1154.
25. Rajaratnam, N. The hydraulic jump in sloping channels. *Water Energy Int.* 1966, 23, 137–149.
26. Ohtsu, I.; Yasuda, Y. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng.* 1991, 117, 905–921.
27. Gunal, M.; Narayanan, R. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng.* 1996, 122, 436–442.
28. Gotoh, H.; Yasuda, Y.; Ohtsu, I. Effect of channel slope on flow characteristics of undular hydraulic jumps. *J. Appl. Mech.* 2004, 7, 953–960.
29. Beirami, M.; Chamani, M.R. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *J. Hydraul. Eng.* 2006, 132, 1061–1068.
30. Kim, D. G. Numerical analysis of free flow past a sluice gate. *KSCE J. Civ. Eng.* 2007. 11 (2): 127–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02823856>.
31. Kim, S., K. Yu, B. Yoon, and Y. Lim. A numerical study on hydraulic characteristics in the ice harbor-type fishway. *KSCE J. Civ. Eng.* 2012. 16 (2): 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0010-5>.
32. Mohammed, S. R., B. K. Nile, and W. H. Hassan. 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>.
33. Olsen, N. R. B., and G. Hillebrand. Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. *J. Soils Sediments*. 2018. 18 (9): 3031–3040. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1989-0>.
34. Karimpour, S., S. Gohari, and M. Yasi. Experimental and numerical investigation of blockage effects on flows in a culvert. *J. Hydraul.* 2020. 15 (2): 1–14. DOI: <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.211670.1425>.

35. Taha, N., M. M. El-Feky, A. A. El-Saiad, and I. Fathy. Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alexandria Eng. J.* 2020. 59 (5): 3503–3513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.032>.
36. Othman Ahmed, K., A. Amini, J. Bahrami, M. R. Kavianpour, and D. M. Hawez. Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 2021. 12 (4): 04021040. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578).
37. Mostafazadeh-Fard, Saman, Samani, Zohrab. Dissipating Culvert End Design for Erosion Control Using CFD Platform FLOW-3D Numerical Simulation Modeling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2023. 14. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1373>.
38. Wei, G., J. Brethour, M. Grünzner, and J. Burnham. The sedimentation scour model in FLOW-3D. *Flow Science Rep.* 2014. No. 03-14. Santa Fe, NM: Flow Science Inc.
39. Hirt, C. W., and B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries *J. Comput. Phys.* 1981. 39 (1): 201–225. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
40. Flow Science, FLOW-3D version 11.2 user manual. Los Alamos, NM: Flow Science. 2016
41. Christopher J. G. OpenFOAM User Guide version 5.0. OpenFOAM Foundation Ltd, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License. 2017.
42. Rajaratnam, N. Hydraulic jumps in advances in hydrosience, V. T. Chow, ed., Academic Press, New York, N.Y., 1967. 197–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2>.
43. Mosselman E. Basic equations for sediment transport in CFD for fluvial morphodynamics. In Bates PD, Lane SN, Ferguson RI, editors, *Computational fluid dynamics; applications in environmental hydraulics*. Chichester: Wiley. 2005. P. 71–89.

References

1. Koval' P. M., Fal' A. YE., Babyak I. P., Sitdykova T. M. Normatyvne zabezpechennya proektuvannya i budivnytstva sporud z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy (Regulatory support for the design and construction of structures made of corrugated metal structures). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2008. Issue 8. P. 154–158. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/Uz_21.pdf [in Ukrainian].
2. Damian Beben. *Soil-Steel Bridges*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2020., 2020. P. 214. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8> [in English].
3. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analiz proyektuvannya ta budivnytstva hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva u vyhlyadi vodopropusknykh trub z polimernykh materialiv na avtomobil'nykh dorohakh (Analysis of the design and construction of hydraulic structures of transport construction in the form of culverts made of polymer materials on highways). *Dorohy i mosty*. 2021. Issue 24. C. 112–133. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112> [in Ukrainian].
4. Luchko Y. Y., Koval'chuk V. V. Tekhnichnyy stan transportnykh sporudi z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy (Technical condition of transport structures made of corrugated metal structures). *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka*. 2021. Issue 19. P. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233873> [in Ukrainian].
5. Harkusha M. V. Vplyv poskodzhennykh hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnykh vodopropusknykh trub na navkolishnye seredovyshe (The impact of damaged hydraulic structures of transport construction from road culverts on the environment). *Vodopostachannya i vodovidvedennya: proektuvannya, budivnytstvo, ekspluatatsiya, monitoringh. V mizhnarodna naukova-tekhnichna konferentsiya, 11-13 zhovtnya 2023, Ukrainy, L'viv : zb. mater. Elektron. dan. Kyiv : Yarochenko YA. V., 2023. P. 82–83. DOI <https://doi.org/10.51500/7826-33-9> [in Ukrainian].*
6. Tsynka A. O., Bodnar L. P. Doslidzhennya stanu mostovykh perekhodiv na osnovi analitychnoyi ekspertnoyi systemy upravlinnya mostamy (Research on the condition of bridge crossings based on an analytical expert bridge management system). *Dorohy i mosty*. 2020. Issue 21. P. 270–281. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.270> [in Ukrainian].
7. Hidravlika: praktychnyy kurs iz zastosuvannyam Mathcad: pidruchnyk (Hydraulics: a practical course using Mathcad: a textbook) / A. M. Onyshchenko, I. V. Bashkevych, M. V. Harkusha, M. N. Tsyvin, S. V. Kozharin. Kyiv: "Vydavnytstvo Lyudmyla", 2022. 264 p. [in Ukrainian].

8. Lipits'kyy H. O. Zastosuvannya hasnyka enerhiyi pry raptovomu rozshyrenni rusla v nyzhn'omu b'yefi maloyi shtuchnoyi sporudy (Application of energy absorber during sudden widening of the channel in the lower reaches of a small artificial structure). *Hidravlika: Mizhvidomchyy respublikans'kyy naukovotekhnichnyy zbirnyk*. K.: Tekhnika, 1965. Issue 1. P. 194–201 [in Ukrainian].
9. Tsyvin M. N. Novyy pidkhid do problemy hasinnya nadmirnoyi kinetychnoyi enerhiyi za trubchastymy vodoskydamy (A new approach to the problem of extinguishing excess kinetic energy behind tubular spillways). *Hidravlika ta hidrotekhnika: Mizhvidomchyy respublikans'kyy naukovotekhnichnyy zbirnyk*. 1998. Issue 59. P. 85–89 [in Ukrainian].
10. Tsyvin M.N. Doslidzhennya ekspluatatsiynykh kharakterystyk pohashuvacha enerhiyi aktyvnogo typu (Research on the operational characteristics of an active-type energy absorber). *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo: Mizhvid. nauk.-tekhn. zb.* 1999. Issue 57. P. 209–213 [in Ukrainian].
11. Tsyvin M. N., Tkachenko N. I. Optymal'na konstruktciya kriplennya nyzhn'oho b'yefu vodoprusknykh sporud system lymannoho zroshennya (Optimal design of fastening of the lower part of the culvert structures of estuary irrigation systems). *Hidromelioratsiya ta hidrotekhnichne budivnytstvo*. L'viv, 1988. Issue 16. P. 38–43 [in Ukrainian].
12. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analiz spryazhennya b'yefiv hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnykh vodoprusknykh trub v umovakh ploskoyi zavdachi (Analysis of the conjugation of the bunds of hydraulic structures of transport construction from road culverts in flat-bed conditions). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2023. Issue 27. P. 228–244. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228> [in Ukrainian]
13. Wang C, Li SS. Hydraulic Jump and Resultant Flow Choking in a Circular Sewer Pipe of Steep Slope. *Water*. 2018; 10(11):1674. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10111674> [in English].
14. Chanson, H.; Montes, J.S. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experimental apparatus and flow patterns. *J. Hydraul. Eng.* 1995, 121, 129–144 [in English].
15. Montes, J.; Chanson, H. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experiments and analysis. *J. Hydraul. Eng.* 1998, 124, 192–205 [in English].
16. Ohtsu, I.; Yasuda, Y.; Gotoh, H. Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels. *J. Hydraul. Eng.* 2003, 129, 948–955 [in English].
17. Chanson, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. *Eur. J. Mech. B/Fluids* 2009, 28, 191–210 [in English].
18. Chanson, H.; Brattberg, T. Experimental study of the air–water shear flow in a hydraulic jump. *Int. J. Multiph. Flow* 2000, 26, 583–607 [in English].
19. Valiani, A. Linear and angular momentum conservation in hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 1997, 35, 323–354 [in English].
20. Gharangik, A.M.; Chaudhry, M.H. Numerical simulation of hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 1991, 117, 1195–1211 [in English].
21. Molls, T.; Molls, F. Space-time conservation method applied to Saint Venant equations. *J. Hydraul. Eng.* 1998, 124, 501–508 [in English].
22. Ellms, R. Hydraulic jump in sloping and horizontal flumes. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1932, 54, 113–121 [in English].
23. Bakhmeteff, B.; Matzke, A. The hydraulic jump in sloped channels. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1938, 60, 111–118 [in English].
24. Kindsvater, C.E. The hydraulic jump in sloping channels. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 1944, 109, 1107–1154 [in English].
25. Rajaratnam, N. The hydraulic jump in sloping channels. *Water Energy Int.* 1966, 23, 137–149 [in English].
26. Ohtsu, I.; Yasuda, Y. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng.* 1991, 117, 905–921 [in English].
27. Gunal, M.; Narayanan, R. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng.* 1996, 122, 436–442 [in English].
28. Gotoh, H.; Yasuda, Y.; Ohtsu, I. Effect of channel slope on flow characteristics of undular hydraulic jumps. *J. Appl. Mech.* 2004, 7, 953–960 [in English].

29. Beirami, M.; Chamani, M.R. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *J. Hydraul. Eng.* 2006, 132, 1061–1068 [in English].
30. Kim, D. G. Numerical analysis of free flow past a sluice gate. *KSCE J. Civ. Eng.* 2007. 11 (2): 127–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02823856> [in English].
31. Kim, S., K. Yu, B. Yoon, and Y. Lim. A numerical study on hydraulic characteristics in the ice harbor-type fishway. *KSCE J. Civ. Eng.* 2012. 16 (2): 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0010-5> [in English].
32. Mohammed, S. R., B. K. Nile, and W. H. Hassan. Modelling stilling basins for sewage networks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. 671 (1): 012111. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012111> [in English].
33. Olsen, N. R. B., and G. Hillebrand. Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. *J. Soils Sediments.* 2018. 18 (9): 3031–3040. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1989-0> [in English].
34. Karimpour, S., S. Gohari, and M. Yasi. Experimental and numerical investigation of blockage effects on flows in a culvert. *J. Hydraul.* 2020. 15 (2): 1–14. DOI: <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.211670.1425> [in English].
35. Taha, N., M. M. El-Feky, A. A. El-Saiad, and I. Fathy. Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alexandria Eng. J.* 2020. 59 (5): 3503–3513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.032> [in English].
36. Othman Ahmed, K., A. Amini, J. Bahrami, M. R. Kavianpour, and D. M. Hawez. Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 2021. 12 (4): 04021040. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578) [in English].
37. Mostafazadeh-Fard, Saman, Samani, Zohrab. Dissipating Culvert End Design for Erosion Control Using CFD Platform FLOW-3D Numerical Simulation Modeling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.* 2023. 14. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1373> [in English].
38. Wei, G., J. Brethour, M. Grünzner, and J. Burnham. The sedimentation scour model in FLOW-3D. *Flow Science Rep.* 2014. No. 03-14. Santa Fe, NM: Flow Science Inc [in English].
39. Hirt, C. W., and B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 1981. 39 (1): 201–225. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5) [in English].
40. Flow Science, FLOW-3D version 11.2 user manual. Los Alamos, NM: Flow Science. 2016 [in English].
41. Christopher J. G. OpenFOAM User Guide version 5.0. OpenFOAM Foundation Ltd, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License. 2017 [in English].
42. Rajaratnam, N. Hydraulic jumps in advances in hydroscience, V. T. Chow, ed., Academic Press, New York, N.Y., 1967. 197–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2> [in English].
43. Mosselman E. Basic equations for sediment transport in CFD for fluvial morphodynamics. In Bates PD, Lane SN, Ferguson RI, editors, Computational fluid dynamics; applications in environmental hydraulics. Chichester: Wiley. 2005. P. 71–89 [in English].

Mykola Harkusha, Ph.D., Assoc. Prof., <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF LOW WATER STREAM CROSSING STRUCTURES MADE OF METAL CORRUGATED CONSTRUCTIONS

Abstract

Introduction. Low water crossing structures made of corrugated metal constructions (hereinafter referred to as CMP), despite having a history of over a century of use, are still quite a new type of structure in Ukraine and are gaining widespread use in transportation construction as an alternative to traditional steel or concrete bridge structures. The well-known advantages that justify the choice of such a solution mainly

include the short construction period and relatively low cost. Construction, provided the appropriate technological process is followed, does not pose significant challenges. However, the current design and construction process of low water crossing structures with CMp is imperfect and constantly improving. Some local features require the construction of a low water crossing pipe with a steep slope, which increases the speed of the water and creates a high-energy flow at the exit of the low water crossing pipe. This high-energy water can erode the natural streambed. The most effective method for dissipating excess kinetic energy from the water flow is by using a hydraulic jump. An analysis of the characteristics of the junctions of the pools for road water-crossing pipes in flat problems was conducted, the impact of various factors on the length of the hydraulic jump was determined, and a methodological approach to solving the junction problems was presented.

Problems. It has been established that there is a need to refine the existing approaches to the junction of pools for road water-crossing structures made of corrugated metal constructions, taking into account global practices.

Objectives. The main objectives of this scientific work are to study the junction of pools for low water crossing pipes in the context of a flat problem, to determine the influence of a number of factors on the length of the hydraulic jump, and to present a methodological approach to solving the problems of pool junctions.

Results. An analysis of the operational experience and the features of the functioning of water crossing structures made of corrugated metal constructions on highways has been conducted. The characteristics of the junction of pools for low water crossing pipes in the context of a flat problem have been studied. A methodological approach to solving the problems of pool junctions has been established.

The most effective way to dissipate excess kinetic energy of the water flow is through the use of a hydraulic jump. However, the issues related to the kinematics of the flow at the formation of the hydraulic jump and its stability are poorly researched. The controlling influence on the flow in the spreading zone of active-type dissipator structural elements for relatively wide and narrow channels has not been well studied.

Since in the area of the two-dimensional flow in plan the flow transforms into a three-dimensional one with a high level of anisotropic turbulence, at the current stage, only a statistical approach using methods from the theory of mathematical experiment design is possible for solving such problems.

When forming the flow with specified hydraulic characteristics, it is advisable to use the control principle – targeted influence on the flow using structural elements of the lower pool.

Using the differential form of the liquid motion equation allows for the derivation of the equation for the ideal hydraulic jump in the form explicitly related to the unknown second conjugate depth in the case of rough water conduits with a sloping bed.

The analysis of the general solution equation for the hydraulic jump showed that the influence of external friction forces and the sloping bed on the height of the hydraulic jump can be considered separately, independently of each other.

The analysis of the current state of the problem leads to the conclusion that the existing methods for calculating the junction of pools are imperfect, and there is a need to improve the current approaches to the calculations.

Key words: highways, hydraulic jump, road culverts, hydraulic structures.