https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228

УДК 625.7./8

Онищенко А. М., *д-р техн. наук, проф., https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
Гаркуша М. В., *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*
Клименко М. І., *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-7967-5881*
Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

АНАЛІЗ СПРЯЖЕННЯ Б'ЄФІВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ТРАНСПОРТНОГО БУДІВНИЦТВА З ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ В УМОВАХ ПЛОСКОЇ ЗАВДАЧІ

Анотація

Вступ. Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб використовуються для пропускання води під проїзними частинами та іншими спорудами. Деякі особливості місцевості вимагають будівництво дорожньої водопропускної труби з крутим ухилом, що збільшує швидкість води та створює потік високої енергії на виході дорожньої водопропускної труби. Ця високоенергетична вода може розмивати природне русло. Найбільш ефективним способом гасіння надмірної кінетичної енергії водного потоку є гасіння за допомогою гідравлічного стрибка.

Проблематика. Із літературного аналізу встановлено, що дорожні водопропускні труби перебувають у складних умовах експлуатації, що призводить до їх передчасного руйнування.

Мета. Полягає в аналіз спряження б'єфів гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах плоскої завдачі.

Результати. Проведено аналіз особливості спряження б'єфів для дорожніх водопропускних труб в умовах плоскої завдачі, визначено вплив ряду факторів на довжину гідравлічного стрибка та наведено 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 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. Виконаний аналіз сучасного стану проблеми дозволяє зробити висновок про недосконаліть існуючих методик розрахунку спряження б'єфів та необхідність удосконалення існуючих підходів розрахунку.

Ключові слова: автомобільна дорога, гідравлічний стрибок, дорожна водопропускна труба, гідротехнічна споруда.

Вступ

Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб використовуються для пропускання води під проїзними частинами та іншими спорудами. Деякі особливості місцевості вимагають будівництво дорожньої водопропускної труби з крутим ухилом, що збільшує швидкість води та створює потік високої енергії на виході дорожньої водопропускної труби. Ця високоенергетична вода може розмивати природне русло.

Найбільш ефективним способом гасіння надмірної кінетичної енергії водного потоку є гасіння за допомогою гідравлічного стрибка [1, 27].

При переході від надкритичного відбувається гідравлічний стрибок потоку до докритичного потоку. Він характеризується раптовим збільшенням глибини води та її втратою

в енергетиці. Поточні засоби пом'якшення наслідків розмиву включають будівництво великих басейнів з рифленням або жорсткої конструкції бетонні конструкції нижче за течією від дорожньої водопропускної труби.

Основна складністю розрахунку нижнього б'єфу гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб, полягає в тому що, дорожні водопропускні труби мають круглий поперечний переріз або переріз овального типу та недостатню довжину водопропускного шляху (тракту).

При відносно малій довжині водозливного тракту косі хвилі, що утворилися на вході в дорожню водопропускну трубу, не встигають вирівнятися, в результаті чого в початковому перетині розтікання епюрі швидкостей і глибин — нерівномірні, тому застосування методів розрахунку поля швидкостей за даним типом споруд, за дослідженням Цивіна М. Н., є не коректним [1, 2].

Розрахунок спряження б'єфів, особливо, за схиловими дорожніми водопропускними 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 точне теоретичне рішення про рух води в нижньому б'єфі дорожньої водопропускної труби, а отже, і розрахувати місце розташування та геометричні розміри конструкції гасника надлишкової кінетичної енергії та призначити розміри та тип конструкції кріплення дна відвідного русла [1].

Особливості спряження б'єфів для дорожніх водопропускних труб в умовах плоскої завдачі

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 [1].

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

Раніше багато дослідників зосереджувалися на текучих властивостях гідравлічного стрибка в горизонтальному прямокутному руслі (**рис. 1**) [3]. Умови течії хвилеподібних стрибків були класифіковані, а основні характеристики течії були досліджені Chanson, H. і Montes, J. [4], Chanson, H. і Montes, J. [5] і Ohtsu, I. [6]. Chanson, H. [7] подав огляд порівняно недавніх досягнень у вивченні турбулентних гідравлічних стрибків за допомогою лабораторних експериментів. Chanson, H. і Montes, J. [8] досліджували властивості повітряно-водяного потоку в шарі зсуву, що розвивається. Дослідження Valiani, A. [9] застосував інтегральний баланс лінійного і кутового моментів у стаціонарному гідравлічному стрибку. Авторами [10] продемонстровано, що терміни Бусінеска не впливають на результат розташування стрибка, використовуючи модель четвертого порядку. Molls, T. та Molls, F. [11] розв'язали 1D і 2D рівняння Сен-Венана гідравлічного стрибка за допомогою явної двокрокової чисельної схеми.

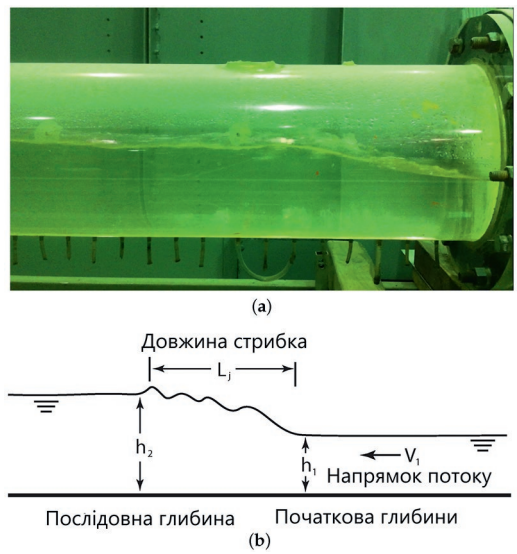
У загальному випадку, при розгляді стрибкового спряження в похилому шорсткому руслі використовують або емпіричні залежності або рівняння кількості руху, для замикання якого застосовують ті чи інші статистичні гіпотези або статистичні моделі [1].

Похиле гладке русло

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

Більш ранні дослідження гідравлічних стрибків були у похилих прямокутних руслах та застосовувалися у водозливах, та включали похилу поверхню вгорі за течією та горизонтальну

поверхню вниз за течією. Перший теоретичний підхід був представлений Ellms, R. [12]. Перше систематичне дослідження було проведено Bakhmeteff, B. і Matzke, A. [13]. Kindsvater, C.E. [14] класифікував стрибки на чотири категорії на основі положення місця стрибка. Дослідження типу D-стрибка були проведені Rajaratnam, N. [15], Ohtsu, I. та Yasuda, Y. [16], а також Gunal, M. і Narayanan, R. [17]. Автори [18] продемонстрували, що висота першої хвилі для хвилястого гідравлічного стрибка не залежить від нахилу русла. Beirami, M. та Chamani, M.R. [19] припустили, що ефектами масштабу можна знехтувати для стрибків із малими початковими глибинами.



a) фото гідравлічного стрибка в горизонтальній круглій трубі;
b) діаграма визначення гідравлічного стрибка

Рисунок 1 — Гідравлічний стрибок [3]

Хвилеподібні гідравлічні стрибки в похилому гладкому руслі безпосередньо у дорожній водопропускній трубі (**рис. 2**) являють собою хвилястість водної поверхні без поверхневих валиків [3]. Для цього типу стрибків кривизна лінії потоку, а також тертя мають важливий динамічний вплив, а бічні стінки труби також створюють важливі ефекти, що призводить до швидко зростання стінкових приграничних шарів і ударних хвиль [3].

Діаграма визначення частково заповненої ділянки труби наведена на **рис. 1**.

Коефіцієнт наповнення y оцінюється як:

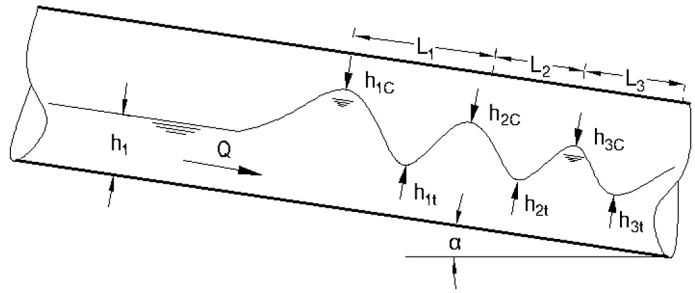
$$y = \frac{h}{D}, \tag{1}$$

де h — глибину потоку;
D — діаметр труби.

Спрощене рівняння для оцінки числа Фруда [3]:

$$Fr = \frac{Q}{(gDh^4)^{1/2}}, \tag{2}$$

де $0{,}2 < y < 0{,}95$.



h_{1c}, h_{2c} і h_{3c} — висоти першої та третьої вершин хвиль;
h_{1t}, h_{2t} і h_{3t} — хвильові западини над переворотом труби;
L_1, L_2 і L_3 — відстані між сусідніми гребнями хвиль;
h_1 – глибина підходу потоку;
α – кут нахилу каналізаційної труби від горизонталі

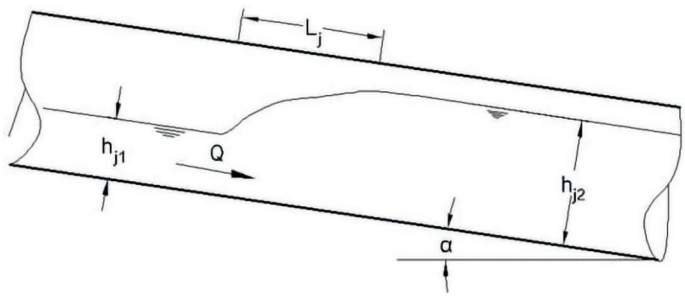
Рисунок 2 — Хвилеподібний гідравлічний стрибок у похилій водопропускній трубі

Gargano, R. та Hager, W.H. [3] запропонували емпіричну формулу для h_{1c}:

$$h_{1c} / D = (1,20 Fr_1 y_1 - 0,10), \tag{3}$$

де $Fr_1 > 1$.

Прямий гідравлічний стрибок зображено на **рис. 3** [3].



h_{j1} — глибина потоку перед стрибком;
h_{j2} — глибина потоку після стрибка;
L_j — довжина стрибка

Рисунок 3 — Прямий гідравлічний стрибок у круглій трубі, що тече частково повно

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

$$\rho Q V_1 + \rho g Y_{c1} A_1 = \rho Q V_2 + \rho g Y_{c2} A_2 - Lj \frac{A_1 + A_2}{2} \rho g \sin\alpha, \tag{4}$$

де індекси 1 і 2 відносяться до перерізів потоку до і після стрибка відповідно;
ρ — густина води;
Y_c — відстань від поверхні води до центру ваги розглянутого поперечного перерізу.

Сили тертя ігнорувалися, оскільки вони малі порівняно з потоками імпульсу та силами тиску.

Неповний гідравлічний стрибок показаний на **рис. 4** [4]. Головною особливістю є те, що потік створюється під тиском за течією від стрибка, створюється напір гідростатичного тиску, *H*, на опорі труби [3].

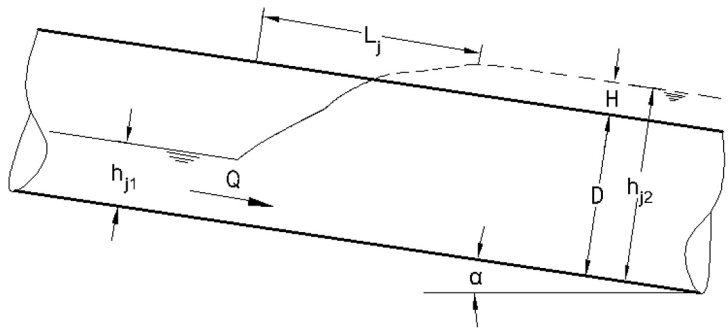


Рисунок 4 — Неповний гідравлічний стрибок в похилій трубі

Еквівалентна глибина потоку після стрибка обчислюється [3]:

$$H_{j2} = D + H. \tag{5}$$

Варто зазначити, що виникнення гідравлічного стрибка безпосередньо в дорожній водопропускній трубі можливе за умови недоліків проєктування та експлуатації нижнього б'єфа.

Крім того, спряженню в похилому гладкому руслі приділили увагу дослідники Большакова В.О., Ілчева Г.К., Косякова Г. М., Лаврентьєв М.В., Левицький Б.Ф., Скиба М. М., Чертоусова М.Д., Чуйко А. Ф. [1], Михалєва М.А. [23] та інших.

Як правило, рівняння кількість руху застосовувалося в інтегральній формі, однак Михалєв М.А. [23], використав дане рівняння у диференційній формі. Принципова відмінність у підході в різних дослідників полягала у тому, яку гіпотезу про довжину області стрибкового сполучення у похилому руслі прийняти за основу.

Косякова Г.М., Лаврентьєв М.В., Левицький Б.Ф., Скиба М.М., Чуйко А.Ф. [1] для вирішення задачі спряження в похилому гладкому руслі використовували суто емпіричні залежності Емпіричні формули, як правило, мали обмежену сферу застосування, обмежену умовами проведення експериментальних досліджень.

Шорстке горизонтальне русло

Вагомий вплив на розміри гідравлічного стрибка має шорсткість русла [1]. Виняткова складність процесу, що протікає, призвело до того, що всі розрахункові залежності були отримані, як правило, на основі експериментальних досліджень [1].

Основний внесок у вирішення цієї проблеми зробили Чуйком О.Ф., Маллаєвим Б.Г. [1] та ін. Принципова відмінність між роботами різних дослідників полягала в типі обраної шорсткості, типу споруди, за яким досліджувалося дане явище.

Спільний вплив ухилу дна та сил зовнішнього тертя на розміри стрибка практично не розглядалися. Найбільш детально висвітлив це питання Чуйко О.Ф. [1], який на основі експериментальних досліджень встановив, що вплив ухилу дна та сил зовнішнього тертя на розміри стрибка можна враховувати незалежно один від одного.

Гладке горизонтальне русло довільної форми

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:

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2, \tag{6}$$

де Q — розрахункова витрата;

y_1 та y_2 — глибина занурення центрів ваги площ живого перерізу ω_1 та ω_2 відповідно.

У роботі [1] розглянуто можливість вирішення даного рівняння для тих типів русел, площа поперечного перерізу, яких додержують такої залежності:

$$\frac{\Pi к_1}{\Pi к_2} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{x_0} = \eta^{x_0},\ \frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{m} = \eta^{m};\quad \frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{n} = \eta^{n}, \tag{7}$$

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

$$\varepsilon_1 = \left[\frac{1}{\mu}\frac{\left(\eta^{m+n}-1\right)}{\left(\eta^{m}-1\right)}\frac{1}{\eta^{m}}\right]^{\frac{1}{x_0}}, \tag{8}$$

де числові значення величин $\overline{\mu}; m; n; x_0$ для різних типів русел приведені в [1].

Дане рівняння встановлює зв'язок між величинами x_1 та h.

Цивіним М.Н. [1] встановлено, що при однакових значеннях величини h числові значення відносної глибини x_1 відрізняються досить незначно. Так при h = 10 розбіжність між величинами e, розрахованими для трикутного і прямокутного русел, становить всього 3,3 %, водночас як параметр кінетичності $П_к$ трикутного русла виявився більше $П_к$ прямокутного русла в 12,2 рази.

Варто зазначити, що дослідження Ellms, R. [12], Bakhmeteff, B. і Matzke, A. [13]. Kindsvater, C.E. [14], Rajaratnam, N. [15], Ohtsu, I. та Yasuda, Y. [16], Gunal, M. і Narayanan, R. [17], Beirami, M. та Chamani, M.R. [19] стосувалися прямокутного каналу, мало уваги приділено гідравлічному стрибку в круглому каналі, внаслідок своєї складності. Stahl, H. та Hager, W.H. [20], Reinauer, R. та Hager, W.H. [21] і Gargano, R. та Hager, W.H. [22] 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: (9) 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 (6) щодо другої спряженої глибини можливе лише для прямокутного русла:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{1+8Fr_1^2}-1\right], \tag{9}$$

де h_1 — початкова глибина;

h_2 — послідовна глибина;

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

Число Фруда є ключовим параметром у задачі про гідравлічний стрибок. Залежно від своїх значень стрибки мають різні характеристики. Вони класифікуються на два різних типи: (9)

хвилеподібні гідравлічні стрибки; прямі гідравлічні стрибки. Хвилеподібні гідравлічні стрибки виглядають як двовимірні хвилі без поперечних хвиль при низьких числах Фруда ($1 < Fr < 1{,}2$), як нерозривні хвилі з тривимірними структурами при $Fr > 1{,}2$, і як розривна хвилястість, де Fr досягає певного граничного значення c_1. Де Fr досягає певного вищого граничного значення c_2, хвилеподібні гідравлічні стрибки більше не існують і утворюються прямі гідравлічні стрибки. Не було загального консенсусу щодо двох граничних значень. Montes, J. та Chanson, H. [5] припустили, що хвилеподібні стрибки у відкритому руслі дуже чутливі до нахилу дна русла та шорсткості. Stahl, H.; Hager, W.H. [20] встановили $c_1 = 1{,}5$ і $c_2 = 2$ для круглої труби, розміщеної горизонтально. Експериментальні дослідження Gotoh, H., Yasuda, Y., Ohtsu, I. [18], для крутої труби, показали, що значення c_1 зменшується зі збільшенням ухилу дна.

Як правило, для інших типів русел (параболічного, круглого, трапецеїдального тощо) рішення основного рівняння стрибка дається у графічному вигляді.

У разі досконалого гідравлічного стрибка в гладкому горизонтальному призматичному руслі отримано теоретичне рішення на основі прийнятної ідеалізації. У разі стрибка в похилому гладкому або шорсткому горизони руслі найбільш прийнятні рішення базуються на чисто залежностях, отриманих на основі статистичної обробки експериментальних даних.

Вплив ряду факторів на довжину гідравлічного стрибка

Дослідження М.М. Скіби, М.А. Міхалева, Б.Г. Маллаева, А.К. Хапаевой, А.Ф. Чуйко та ін. [1] показали, що зі збільшенням відносної шорсткості довжина поверхневого водовороту зменшується.

Для наближеної оцінки довжини гідравлічного стрибка в шорсткому горизонтальному руслі можна користуватися наступною формулою (при $l < 0{,}04$):

$$l_n = l_{n0}\left(1 - 12{,}5\lambda\right), \tag{10}$$

де l_{n0} — довжина гідравлічного русла в гладкому руслі;
l — коефіцієнт гідравлічного тертя.

Визго М.С. і Кузьмін Ю.М. запропонував таку розрахункову формулу:

$$l_n = l_{n0}\left[1 - 0{,}65\left(\frac{\Delta}{h_2}\right)^{0{,}28}\right]. \tag{11}$$

Довжину досконалого гідравлічного стрибка, що виникає в похилому руслі, можна оцінювати по залежності, отриманої за експериментальними даними:

$$l_n = l_{n0} + k_i i, \tag{12}$$

де l_{n0} — довжина гідравлічного стрибка в гладкому руслі;
k_i — коефіцієнт значення.

Михайлов К.А. для визначення довжини стрибка в похилому руслі запропонував таку залежність:

$$l_n = m_i\,(h_2 - h_1), \tag{13}$$

де $$m_i = \frac{m\left(1 + 3i\right)}{1 + mi\left(1 + 3i\right)}.$$

Дослідження лінійних розмірів гідравлічного стрибка, перед яким сформувалася крива підпору типу c_0, вказали на істотне скорочення його довжини було досліджено Цивіним М.Н. [1] та графічно зображено.

Скиба М.М. показав, що довжина гідравлічного стрибка в першу чергу визначається силою турбулентного тертя по границі контакту поверхневого водовороту і транзитного струменя, що виникають внаслідок турбулентного масообміну [1]. Чим більше сила турбулентного тертя, тим менше довжина поверхневого виру і, тим самим, менше довжина гідравлічного стрибка. Виходячи з даної гіпотези, розглянемо, чи впливає турбулентність, що генерується на ділянці перед стрибком, на його лінійні розміри.

Гідравлічний стрибок відноситься до турбулентного виду руху, тому характеристики цього руху визначаються тензором турбулентних напружень в зоні стрибка. Турбулентність на ділянці сполучення є результатом накладення трьох видів турбулентності [1]:

– вільна, що виявляється в процесі змішування транзитного потоку з водоворотною областю;
– приграничная, що генерується в турбулентному приграничному шарі;
– конвективна, привнесена в зону змішування ззовні.

Із трьох видів вільна турбулентність генерується безпосередньо у зоні стрибка тахарактеризується критерієм Фруда *Fr*.

Приграничная та конвективна турбулентності генеруються на ділянці перед стрибком. Як окремий випадок, початкова площина ділянки розвитку турбулентного приграничного шару збігається з початковою площиною стрибка. В цьому випадку прикордонна турбулентність генерується в зоні стрибка. Можна допустити, що вплив граничних умов на поле турбулентних напружень в зоні стрибка позначається через вплив на характеристики приграничної і конвективної турбулентності.

Усі граничні умови можна умовно розділити [1]:

– за впливом на приграничну турбулентність.

Граничні умови, що формують прискорений потік $\left|\overline{u}_x^{'}\right| > \left|\overline{u}_y^{'}\right|$ (короткі швидкотоки — зона b_2, косогірні труби тощо), де $u^{'}$ — проекція пульсаційної швидкості на відповідну координатну вісь.

Граничні умови, що формують уповільнений потік $\left|\overline{u}_x^{'}\right| < \left|\overline{u}_y^{'}\right|$ (короткі швидкотоки — зона c, горизонтальні канали — зона c_o і т.д.).

Граничні умови, що формують рівномірний потік $\left|\overline{u}_x^{'}\right| = \left|\overline{u}_y^{'}\right|$ (швидкотоки значної протяжності і, як окремий випадок, стислий перетин за щитовим отвором в горизонтальному руслі).

– за впливом на конвективну турбулентність.

Граничні умови, що формують ізотропну турбулентність $\left|\overline{u}_x^{'}\right| = \left|\overline{u}_y^{'}\right|$ (заспокійливі решітки в потоці тощо).

Граничні умови, що формують анізотропну турбулентність (різка зміна шорсткості, форми русла тощо):

а) $\left|\overline{u}_x^{'}\right| > \left|\overline{u}_y^{'}\right|$;

б) $\left|\overline{u}_x^{'}\right| < \left|\overline{u}_y^{'}\right|$.

Правомірність розподілу граничних умов по впливу на приграничну турбулентність випливає, зокрема, з аналізу диференціальних рівнянь Рейнольдса, записаних для турбулентного пульсаційного руху.

Безпосередній аналіз цих рівнянь для встановлення зв'язку дотичних напружень t з середніми характеристиками потоку досить скрутний. Наближена залежність, що дозволяє виявити якісний зв'язок між величиною t і середніми характеристиками потоку, застосує рівняння кількості руху для елементарної маси рідини dM, що пройшла через елементарну площадку dS (при $b = 1$) під впливом пульсаційної складової швидкості [1].

Через площадку *dS* за час *dt* проходить маса рідини. У разі сталого, плавнозмінного руху, збільшення кількості руху цієї маси в проекції на вісь *S*-*S*, що збігається по напрямку з вектором швидкості *u* при зміні швидкості за час *dt* від *u* до *u*-*du* і пульсаційної швидкості $u_x^{'}$ до *0*, рівне:

$$(u-du-u-u_x^{'})dM=-\rho u_x^{'}u_y^{'}dSdt-\rho u_y^{'}dSdudt. \tag{14}$$

При пульсаційному русі на виділений об'єм діє тільки сила тертя, імпульс якої $-\tau^{'}dSdt$, тоді згідно з рівнянням кількості руху:

$$\tau^{'}dt=-\rho u_x^{'}u_y^{'}dt-\rho u_y^{'}dudt=-\rho u_x^{'}u_y^{'}dt(1+\frac{du}{u_x^{'}}). \tag{15}$$

У випадку рівномірного руху:

$$\tau_0 dt=-\rho u_x^{'}u_y^{'}dt. \tag{16}$$

Звідси,

$$\tau^{'}dt=\tau_0 dt(1+\frac{du}{u_x^{'}}). \tag{17}$$

При усередненні достатньо великого відрізку часу t_0:

$$\frac{1}{t_0}\int_0^{t_0}\tau^{'}dt=\tau=\tau_0(1+\frac{du}{\overline{u}_x^{'}}). \tag{18}$$

Згідно з першою гіпотезою Прандля:

$$\overline{u}_x^{'}=l\frac{du}{dy}=\aleph y\frac{du}{dy}, \tag{19}$$

де $\aleph=const$ (константа Прандля), отже,

$$\frac{du}{\overline{u}_x^{'}}=\frac{1}{\aleph}\frac{dy}{y}. \tag{20}$$

Приймаючи *y* пропорційно *h*, потримаємо:

$$\tau=\tau_0(1+\frac{1}{\aleph}\frac{dh}{h}). \tag{21}$$

За теорією нерівномірного руху при уповільненому русі прискорення $a<0$, то і $\frac{dh}{h}>0$, отже, $t>t_0$.

Таким чином, якщо порівнювати два гідравлічних стрибка, в межах яких інтенсивність вільної турбулентності однакова, що визначається умовою *Fr* = *idem*, а потік на підході до одного стрибка рівномірний ($a=0$), а в іншому випадку – уповільнений, то довжина того стрибка повинна виявитися менше, в початковому перерізі якого прискорення виявилося менше (інтенсивність приграничної турбулентності вище).

Якби приграничний турбулентність, інтенсивність якої можна умовно оцінити по величині прискорення не чинила впливу на довжину стрибка, то величина відносини $L_n/L_{nк}=Const$ і були б представлені на графіку прямою, паралельно осі абсцис [1]:

$$a = \frac{du}{dy} = u\frac{du}{dS} = -g\Pi q\frac{dh}{dS}. \quad (22)$$

Якщо для прискореного потоку a > 0 і $\frac{dh}{dS} < 0$ тоді $\frac{dh}{h} < 0$, а тому можна допустити, що довжина стрибка, в цьому випадку, більше, ніж при рівномірному потоці [1].

Методологічний підхід до вирішення завдань спряження б'єфів

Проєктування сучасних водопропускних споруд без всебічного врахування динамічних властивостей потоку, що проходять через споруду не можливо, ці потоки активно впливають на елементи споруди і при проєктуванні необхідно правильно враховувати цей вплив [1]. Особливо складна картина течії виникає на ділянці спряження б'єфів за дорожньою водопропускною трубою за широкого нижнього б'єфу і щодо слабкого підтоплення таких споруд. У цьому випадку спостерігається перетворення двовимірного в плані вільно розтікається бурхливого потоку в тривимірний з високим рівнем анізотропної турбулентності.

Можна виділити два підходи до вирішення завдань, що описують рух двовимірних бурхливих потоків від ділянки розтікання до ділянки гасіння — детермінований, статистичний.

Детермінований підхід

У даний час можна відзначити два способи розв'язання детерміністичних рівнянь: аналітичний та числовий.

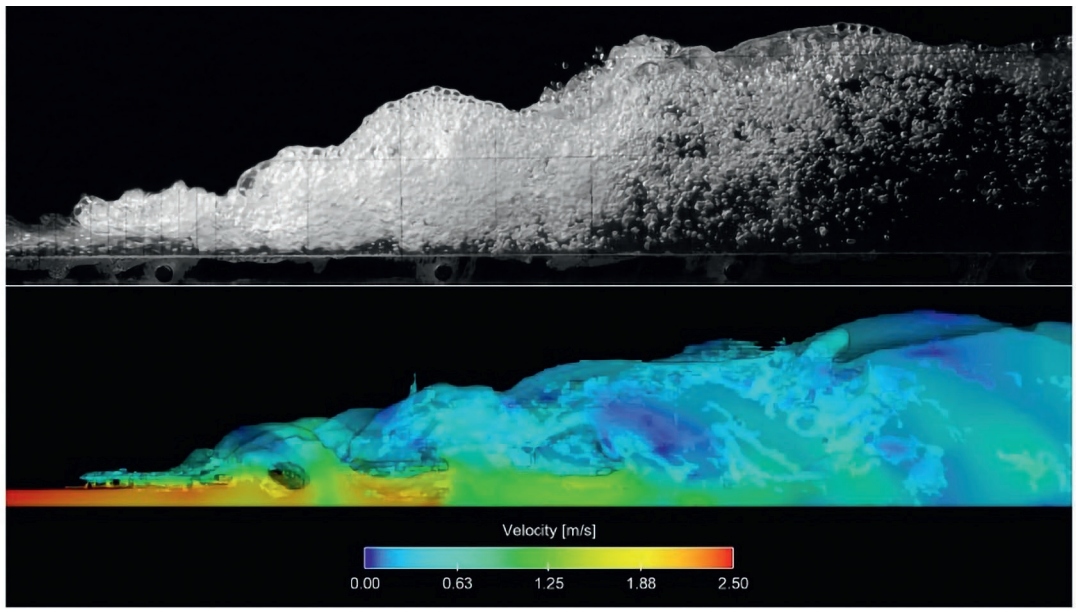
Течія на ділянці спряження двовимірного бурхливого потоку зі спокійним потоком у нижньому б'єфі відноситься до розряду тривимірних турбулентних течій [1]. У роботі [24] вказано, що розрахунок таких течій, пов'язаний з великими труднощами інтегруванням рівнянь гідродинаміки, невирішеністю проблеми турбулентності в цілому, нелінійністю рівнянь руху. Особливу складність досліджувану картину додає той факт, що актуальні швидкості (або їх пульсаційні компоненти) на ділянці пари двомірного у плані бурхливого потоку можуть у кілька разів перевищувати місцеві середні швидкості в тій же точці досліджуваного потоку.

Вирішення задачі завдяки аналоговому підході призводить до диференціальних рівнянь, вирішення яких вдається отримати або у вигляді явних елементарних залежностей або поліномів, які будучи представленими замість залежних змінних у диференціальне рівняння робить його ліву частину рівною правою [1]. Ці функції можуть бути рішенням диференціального рівняння, але найчастіше буває складно довести, що вони описують певну фізичну реальність.

Рівняння динаміки рідини залишаються незрозумілими як для дослідників, так і для практиків, а високоточні чисельні рішення були отримані унікально для дуже простих геометрії [28]. Обчислювальна гідродинаміка отримала переваги від спрощень, які в основному прийшли у формі моделей турбулентності, отже дозволяючи досліджувати великі складні проблеми. Тим не менш, основна увага приділяється точності для складних гідротехнічних завдань, для таких проблем моделювач повинен знати про пов'язані з ними невизначеності та враховувати їх на етапі проєктування. Точність обчислювальної гідродинаміки для таких специфічних проблем може відрізнятися від типових значень, отриманих у простіших потоках. Звичайні гідравлічні проблеми зазвичай включають області зсуву, окремо або взаємодіючі одна з одною, вільні поверхні та, за певних умов, залучення повітря [28]. Всі ці явища спостерігаються при гідравлічних стрибках (**рис. 5**) [28]. Хоча чисельне моделювання дозволяє легко отримати доступ до повного поля потоку, можуть мати місце відхилення від реальності.

Чисельне моделювання турбулентних течій пов'язане зі значними труднощами, пов'язаних з точним обчисленням динаміки вихору, визначенням миттєвого положення та конфігурація вільної поверхні, ефект турбулентності та залучення повітря [28, 31, 32]. 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) [33], або метод встановлення рівня та різні моделі турбулентності [28].



вгорі: експериментальна модель від авторів [29];

внизу: числова модель від авторів [30]. Прозорість була використана для візуалізації захопленого повітря

Рисунок 5 — Гідравлічний стрибок з вхідним отвором Фруда числом близько шести. Потік зліва направо [28]

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

$$\frac{df}{dt} + U_j \frac{df}{dx_j} = 0, \tag{23}$$

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) [28]. У цьому статистичному підході миттєві значення швидкості та тиску зображуються як сума середнього та флуктуаційного компонентів [34]. Будь-яка миттєва швидкість u_i при заданих координатах x і час t можна записати як:

$$u_i(x,t) = \overline{u}_i(x,t) + u_i'(x,t), \tag{24}$$

де $\overline{u}_i$ — середня швидкість;
u' — флуктуаційна швидкість.

Середня швидкість все ще має залежати від часу t, що можливо, коли усереднення часу визначається як [28]:

$$\bar{u}_i(x,t) = \frac{1}{T}\int_t^{t+T} u_i(x,t)dt, \quad T_1 << T << T_2, \tag{25}$$

де T_1 — характерний часовий масштаб турбулентних коливань;

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

Розв'язання задачі завдяки числовому підході приводить 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 [1].

Дослідження Abbott M. B. [25] свідчать, що детермінований підхід повинен ґрунтуватися на добре спланованих та ретельно проведених натурних та лабораторних досліджень. Застосування детермінованого підходу є доцільним, коли з його допомогою конкретні завдання описувалися з достатньою точністю при мінімумі витрат.

Слід зазначити, що згідно досліджень Цивіна М.Н. завдання перебігу тривимірних потоків з високим рівнем анізотропної турбулентності, які мають місце за дорожньою водопропускною трубою на ділянці спряження двовимірних у плані бурхливих потоків, в даний час не можуть бути вирішені ні чисельними, ні аналітичними методами, тому для їх вирішення найкращий статистичний підхід [1].

Статистичний підхід

У разі, коли недостатньо повно вивчено фізику досліджуваного процесу, найбільш раціональним є статистичний підхід, що базується на методах дисперсійного, регресійного та кореляційного аналізу [1].

Статистичні моделі виходять в результаті статистичної обробки експериментальних даних, зібраних на об'єкті, що досліджується. Структура статистичної моделі може бути обрана досить довільно, найчастіше вони представляються як полінома. Область застосування статистичної моделі обмежується найближчою областю точок факторного простору, де проводився експеримент [1].

При статистичному підході, умовно, можна виділити три типи завдань [26]:

– отримання статистичної моделі, коли недостатньо повні відомості про фізику явища, що вивчається;

– перевіряння правомірності гіпотез, що закладаються при вирішенні завдань аналітичним чи чисельним методом;

– уточнення констант, що входять в ту чи іншу фізичну модель.

Основою теорії планування експерименту є математична статистика, яка застосовна для аналізу результатів експерименту в тих випадках, коли його результати можуть розглядатися як випадкові величини випадкових процесів [1, 26]. Ця умова виконується у більшості досліджень, оскільки, як правило, результати експериментів пов'язані з деякою невизначеністю. Серед причин такої невизначеності можна назвати випадковий характер досліджуваних процесів (наприклад, вимірювання актуальних швидкостей у турбулентному потоці на ділянці пари), вплив неконтрольованих факторів, неконтрольованих змін умов експерименту та помилки спостережень. Сюди ставляться вимірювальні помилки, причини яких у недосконалості вимірювальних приладів, методів вимірів, котрий іноді у суб'єктивізмі дослідника [26].

Сучасна теорія планування експерименту дає досліднику точну логічну схему і спосіб вирішення завдань на різних етапах дослідження і дозволяє істотно знизити обсяг і вартість експериментальних досліджень, що проводяться.

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 недосконаліть існуючих методик розрахунку спряження б'єфів та необхідність удосконалення існуючих підходів розрахунку.

Список літератури

1. 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.

2. Цивін М.Н. Дослідження експлуатаційних характеристик погашувача енергії активного типу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: *Межвед.научн.-техн.сб.* Київ, 1999. Вип. 57. С. 209–213.

3. 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.

4. Chanson, H., Montes, J.S. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experimental apparatus and flow patterns. *J. Hydraul. Eng.* 1995. № 121. P. 129–144.

5. Montes, J., Chanson, H. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experiments and analysis. *J. Hydraul. Eng.* 1998. № 124. P. 192–205.

6. Ohtsu, I., Yasuda, Y., Gotoh, H. Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels. J. *Hydraul. Eng.* 2003. № 129. P. 948–955.

7. Chanson, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. E*ur. J. Mech. B/Fluids*. 2009. № 28. P. 191–210.

8. Chanson, H., Brattberg, T. Experimental study of the air–water shear flow in a hydraulic jump. *Int. J. Multiph. Flow* 2000. № 26. P. 583–607.

9. Valiani, A. Linear and angular momentum conservation in hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 1997. № 35. P. 323–354.

10. Gharangik, A.M., Chaudhry, M.H. Numerical simulation of hydraulic jump. J. *Hydraul. Eng.* 1991. № 117. P. 1195–1211.

11. Molls, T., Molls, F. Space-time conservation method applied to Saint Venant equations. *J. Hydraul. Eng*. 1998. № 124. P. 501–508.

12. Ellms, R. Hydraulic jump in sloping and horizontal flumes. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1932. № 54. P. 113–121.

13. Bakhmeteff, B., Matzke, A. The hydraulic jump in sloped channels. T*rans. Am. Soc. Mech. Eng*. 1938. № 60. P. 111–118.

14. Kindsvater, C.E. The hydraulic jump in sloping channels. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 1944. №109. P. 1107–1154.

15. Rajaratnam, N. The hydraulic jump in sloping channels. *Water Energy Int.* 1966. № 23. P. 137–149.

16. Ohtsu, I., Yasuda, Y. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng.* 1991. № 117. P. 905–921.

17. Gunal, M., Narayanan, R. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng*. 1996. № 122. P. 436–442.

18. Gotoh, H.; Yasuda, Y.; Ohtsu, I. Effect of channel slope on flow characteristics of undular hydraulic jumps. *J. Appl. Mech.* 2004. № 7. P. 953–960.

19. Beirami, M.; Chamani, M.R. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *J. Hydraul. Eng.* 2006. № 132. P. 1061–1068.

20. Stahl, H.; Hager, W.H. Hydraulic jump in circular pipes. Can. *J. Civ. Eng.* 1999. № 26 P. 368–373.

21. Reinauer, R.; Hager, W.H. Non-breaking undular hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 1995. № 3. P. 683–69.

22. Gargano, R.; Hager, W.H. Undular hydraulic jumps in circular conduits. *J. Hydraul. Eng.* 2002. № 128. P. 1008–1013.

23. Михалев М.А. Гидравлический расчет потоков с водоворотом. Львів, 1971. 184 с.

24. Савенко В. Я. Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков: дис...д-ра техн. наук: 05.23.12. Київ, 1992. 367 с.

25. Abbott, M. B., Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free-Surface Flows, Pitman Publishing Ltd., London, 1979.

26. Цивин М.Н. Многофакторный эксперимент: графическая интерпретация данных. Київ, 2003. 102 с.

27. 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. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.215.

28. Viti N, Valero D, Gualtieri C. Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook. *Water.* 2019; 11(1): 28. DOI: https://doi.org/10.3390/w11010028.

29. Valero, D.; Fullana, O.; Gacía-Bartual, R.; Andrés-Domenech, I.; Valles, F. Analytical formulation for the aerated hydraulic jump and physical modeling comparison. *In Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress*. Porto, Portugal. 14–16 April 2014.

30. Bayon, A.; Valero, D.; García-Bartual, R.; Vallés-Morán, F.J.; López-Jiménez, P.A. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environ. Model. Softw.* 2016, 80. P. 322–335.

31. Bombardelli, F. Computational multi-phase fluid dynamics to address flows past hydraulic structures. *In Proceedings of the 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*. Porto, Portugal, 9–11 February 2012.

32. Carvalho, R.; Lemos, C.; Ramos, C. Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins. *J. Hydraul. Res.* 2008, 46. P. 739–752.

33. Hirt, C.W.; Nichols, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 2008, 39 P. 201–225.

34. Rodi, W. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, 3rd ed.; IAHR Monograph; Taylor & Francis: New York, NY, USA, 1993.

References

1. Onyshchenko A.M., Bashkevych I.V., Harkusha M.V., Tsyvin M.N., Kozharin S.V.. Hidravlika: praktychnyy kurs iz zastosuvannyam Mathcad: pidruchnyk [Hydraulics: a practical course using Mathcad: a textbook]. Kyiv, 2022. 264 p. [in Ukrainian].

2. Tsyvin M.N. Doslidzhennya ekspluatatsiynykh kharakterystyk pohashuvacha enerhiyi aktyvnoho typu (Study of operational characteristics of an active type energy quencher). *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo: Mezhved.nauchn.-tekhn.sb*. Kyiv, 1999. Iss. 57 P. 209–213 [in Ukrainian].

3. 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].

4. Chanson, H., Montes, J.S. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experimental apparatus and flow patterns. *J. Hydraul. Eng.* 1995. № 121. P. 129–144 [in English].

5. Montes, J., Chanson, H. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experiments and analysis. *J. Hydraul. Eng*. 1998. № 124. P. 192–205 [in English].

6. Ohtsu, I., Yasuda, Y., Gotoh, H. Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels. *J. Hydraul. Eng.* 2003. № 129. P. 948–955 [in English].

7. Chanson, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. *Eur. J. Mech. B/Fluids* 2009. № 28. P. 191–210 [in English].

8. Chanson, H., Brattberg, T. Experimental study of the air–water shear flow in a hydraulic jump. *Int. J. Multiph. Flow* 2000. № 26. P. 583–607 [in English].

9. Valiani, A. Linear and angular momentum conservation in hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 1997. № 35. P. 323–354 [in English].

10. Gharangik, A.M., Chaudhry, M.H. Numerical simulation of hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 1991. № 117. P. 1195–1211 [in English].

11. Molls, T., Molls, F. Space-time conservation method applied to Saint Venant equations. *J. Hydraul. Eng.* 1998. № 124. P. 501–508 [in English].

12. Ellms, R. Hydraulic jump in sloping and horizontal flumes. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1932. № 54. P. 113–121 [in English].

13. Bakhmeteff, B., Matzke, A. The hydraulic jump in sloped channels. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng*. 1938. № 60. P. 111–118 [in English].

14. Kindsvater, C.E. The hydraulic jump in sloping channels. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 1944. № 109. P. 1107–1154 [in English].

15. Rajaratnam, N. The hydraulic jump in sloping channels. *Water Energy Int.* 1966. № 23. P. 137–149 [in English].

16. Ohtsu, I., Yasuda, Y. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng.* 1991, № 117. P. 905–921 [in English].

17. Gunal, M., Narayanan, R. Hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Eng*. 1996, № 122. P. 436–442 [in English].

18. Gotoh, H.; Yasuda, Y.; Ohtsu, I. Effect of channel slope on flow characteristics of undular hydraulic jumps. J. Appl. Mech. 2004, № 7. P. 953–960 [in English].

19. Beirami, M.; Chamani, M.R. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *J. Hydraul. Eng.* 2006. № 132. P. 1061–1068 [in English].

20. Stahl, H.; Hager, W.H. Hydraulic jump in circular pipes. Can. J. Civ. Eng. 1999. № 26 P. 368–373 [in English].

21. Reinauer, R.; Hager, W.H. Non-breaking undular hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 1995. № 33. P. 683–69 [in English].

22. Gargano, R.; Hager, W.H. Undular hydraulic jumps in circular conduits. *J. Hydraul. Eng.* 2002. № 128. P. 1008–1013 [in English].

23. Mykhalev M.A. Hidravlichnyy rozrakhunok potokiv z vodovorotom [Hydraulic calculation of flows with a vortex] Lviv, 1971. 184 p. [in Ukrainian].

24. Savenko V. Matematycheskye modely y metody rascheta kvazytrekhmernykh beznapornykh potokov [Mathematical models and methods of calculation of quasi-three-dimensional pressureless flows]. D.Sc. (Ing.) Kyiv, 1992. P. 367 [in Ukrainian].

25. Abbott, M. B. Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free-Surface Flows, Pitman Publishing Ltd., London, 1979 [in England].

26. Tsyvyn M.N. Mnohofaktornyy eksperyment: hrafycheskaya ynterpretatsyya dannykh [Multifactorial experiment: graphical interpretation of data]. Kyiv, 2003. 102 p. [in Ukrainian].

27. Onyshchenko A . M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analiz konstruktyvnykh zakhodiv z ukriplennya nyzhnikh biyefiv hidrotekhnichnykh sporud u transportnomu budivnytstvi z dorozhnikh vodopropusknykh trub [Analysis of constructive measures to strengthen the lower banks of hydraulic structures in transport construction from road culverts]. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2022. Iss. 26. P. 215–227. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.215 [in Ukrainian].

28. Viti N, Valero D, Gualtieri C. Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook. Water. 2019; 11(1): 28. DOI: https://doi.org/10.3390/w11010028 [in English].

29. Valero, D.; Fullana, O.; Gacía-Bartual, R.; Andrés-Domenech, I.; Valles, F. Analytical formulation for the aerated hydraulic jump and physical modeling comparison. *In Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress*. Porto, Portugal. 14–16 April 2014 [in English].

30. Bayon, A.; Valero, D.; García-Bartual, R.; Vallés-Morán, F.J.; López-Jiménez, P.A. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environ. Model. Softw.* 2016, 80. P. 322–335 [in English].

31. Bombardelli, F. Computational multi-phase fluid dynamics to address flows past hydraulic structures. *In Proceedings of the 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*. Porto, Portugal, 9–11 February 2012 [in English].

32. Carvalho, R.; Lemos, C.; Ramos, C. Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins. *J. Hydraul. Res.* 2008, 46. P. 739–752 [in English].

33. Hirt, C.W.; Nichols, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 2008. 39 P. 201–225 [in English].

34. Rodi, W. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, 3rd ed.; IAHR Monograph; Taylor & Francis: New York, NY, USA, 1993 [in English].

Artur Onyshchenko, *D.Sc., Prof., https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
Mykola Harkusha, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*
Mykola Klymenko, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-7967-5881*
National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE COUPLING OF REACH OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES OF TRANSPORT CONSTRUCTION FROM CULVERTS IN THE CONDITIONS OF A FLAT BUILDING

Abstract

Introduction. Hydraulic structures of transport construction from road culverts are used to pass water under roadways and other structures. Some terrain features require the construction of a road culvert with a steep slope, which increases the velocity of the water and creates a high-energy flow at the outlet of the road culvert. This high-energy water can erode a natural riverbed. The most effective method of extinguishing excessive kinetic energy of the water flow is extinguishing with the help of a hydraulic jump.

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

Goal. It consists in the analysis of the conjugation of reach of hydrotechnical structures of transport construction from road culverts in the conditions of a flat task.

Results. The analysis of the peculiarities of the conjugation of reach for road culverts in the conditions of a flat task was carried out, the influence of a number of factors on the length of the hydraulic jump was determined, and a methodological approach to solving the problems of conjugation of reach was given.

Conclusions. The most effective method of extinguishing excessive kinetic energy of the water flow is extinguishing with the help of a hydraulic jump. However, the issues related to the kinematics of the flow in the area of the formation of the hydraulic jump and the question of its stability have been practically investigated, the controlling influence on the flow in the spreading zone of the structural elements of active type extinguishers for relatively wide and relatively narrow channels has been poorly studied. The performed analysis of the current state of the problem allows us to draw a conclusion about the imperfection of the existing methods of calculating the conjugation of biefs and the need to improve the existing calculation approaches.

Keywords: highways, hydraulic jump, road culverts, hydraulic structures.