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

УДК 625.745.1/.2

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 КОНСТРУКТИВНИХ ЗАХОДІВ З УКРІПЛЕННЯ НИЖНІХ Б'ЄФІВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД У ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ З ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ

Анотація

Вступ. Одними із найбільш масових гідротехнічних споруд у транспортному будівництві України є дорожні водопропускні труби.

Нижній б'єф таких споруд працює у складних експлуатаційних умовах: при значній нерівномірності розподілу питомих витрат; високій кінетичності скидного потоку і його насиченості наносами, сміттям; малим підтопленням відвідного русла тощо.

Основна складність проблеми полягає в тому, що на ділянці вільного розтікання має місце двомірний потік, а на ділянці гасіння надлишкової кінетичної енергії даний двомірний потік перетворюється в тривимірний турбулентний потік, що робить практично неможливим одержати теоретичний розв'язок щодо руху води в нижньому б'єфі гідротехнічної споруди.

Необхідність удосконалення конструкцій укріплення нижнього б'єфа дорожніх водопропускних труб є актуальним питанням, беручи до уваги, що існуючі підходи не приводять до бажаних позитивних результатів.

Проблематика. Із літературного аналізу встановлено, що укріплення нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб є важливою складовою для довговічності самої споруди та її належного функціонування.

Мета. Полягає в аналізі конструктивних заходів з укріплення нижніх б'єфів гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх гофрованих металевих водопропускних труб.

Результати. Проведено аналіз основних підходів до укріплення нижніх б'єфів гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб. Виконано аналіз розрахунку конструктивних елементів гасників енергії активного типу.

Висновки. На сьогоднішній день існує два найпоширеніших підходи до вирішення проблеми укріплення нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб: повна відмова від улаштування конструкцій гасників енергії, що зпричиняє зсув на значну відстань вирви розмиву від дорожнього насипу або використання гасників енергії реактивного типу (типу водобійних колодязів, утворених уступом або стінкою), розсікачів або розсіювачів різного типу. Однак обидва підходи не вирішують повністю проблему гасіння енергії водного потоку.

Гідравлічні розрахунки звичайних бетонних (умовно гладких) труб і металевих гофрованих труб (з підвищеною шорсткістю внутрішньої поверхні) виконують за однаковою методикою, різниця тільки в константах, які використовують при розрахунку: коефіцієнт шорсткості, ухил тертя, глибина на вході в трубу тощо, що, у свою чергу, свідчить про необхідність проведення додаткових розрахунків та експериментальних досліджень.

Крім того, існуючі методики розрахунку з оптимізації конструкцій гасників енергії в нижніх б'єфах потребують експериментального уточнення.

Ключові слова: автомобільна дорога, гідротехнічна споруда, дорожня водопропускна труба, гасник енергії, русло.

Актуальність роботи

Розрахунок сполучення нижніх б'єфів гідротехнічних споруд у транспортному будівництві з дорожніх водопропускних труб є складною проблемою, тому що на ділянці вільного розтікання має місце двомірний потік, а на ділянці гасіння надлишкової кінетичної енергії двомірний потік перетворюється в тривимірний турбулентний потік. Це робить практично неможливим дати певний теоретичний розв'язок про рух води в нижній частині дорожніх водопропускних труб, а отже, і розрахувати місце розташування і геометричні розміри конструкції гасника надлишкової кінетичної енергії і призначити розміри і тип конструкції укріплення дна відвідного русла.

Існуючі підходи з розрахунку конструктивних елементів гасників енергії активного типу потребують уточнень і проведення додаткових лабораторних і натурних досліджень.

Основні підходи з укріплення нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб

При розробленні конструктивних заходів укріплення нижнього б'єфу можна виділити два основних підходи [1]:

– надлишкову кінетичну енергію, що пропускається водним потоком гасити не слід, рекомендується виконати такі конструктивні заходи, при яких воронка розмиву за спорудою формувалася як можна нижче за течією, була стабільною і не загрожувала стійкості споруди;

– надлишкову кінетичну енергію водного потоку необхідно погасити на укріпленній частині водоскидної споруди.

Найпоширенішими схемами вихідних русел можна виділити [2]:

– тип 1 — кам'яний накид, укладений біля фундаменту споруди;
– тип 2 — омонолічування кам'яного накиду;
– тип 3 — монолітне укріплення з кам'яним накидом після нього;
– тип 4 — укріплення та вертикальна стінка («зуб») в кінці;
– тип 5 — укріплення, що закінчується запобіжним схилом;
– тип 6 — укріплення, що закінчується запобіжним схилом з кам'яним накидом.

Форми просторового сполучення бурхливого потоку за водопропускними спорудами визначаються ухилом відвідного русла, а також співвідношенням глибин розтікання потоку і потоку в звичайних умовах, які визначають характер розтікання в зворотному руслі: вільне розтікання бурхливого потоку або збійних перебіг. У цьому випадку в нижньому б'єфі потрібно спільне вирішення питань вирівнювання питомих витрат і швидкостей, попередження збійності течії і гасіння надлишкової кінетичної енергії. Найбільш поширеними і вивченими засобами, що забезпечують гасіння надлишкової кінетичної енергії при недостатньому для затоплення гідравлічного стрибка рівні нижнього б'єфу, є водобійний колодязь, утворений уступом або стінкою [3].

Перші підходи для розрахунку руйнівної здатності потоку води були запропоновані у США [4] та базувалися на випробуваннях, проведених для визначення максимального розмиву для заданих умов, і тому представляють те, що можна було б назвати геометрією розмиву найгіршого випадку. Рівняння були отримані в результаті випробувань, проведених Корпусом інженерів [5] та Університетом штату Колорадо [6–9].

Загальне рівняння для визначення геометрії розмиву в незв'язних ґрунтах на виході з водопропускної труби [4]:

$$\left[\frac{h_s}{R_c},\frac{W_s}{R_c},\frac{L_s}{R_c},\frac{V_s}{R_c}\right]=C_s,C_h\left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/3}}\right)\left(\frac{Q}{\sqrt{g\left(R_c^{2,5}\right)}}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta}, \quad (1)$$

де h_s — глибина розмиву, м;
W_s — ширина розмиву, м;
L_s — довжина розмиву, м;
V_s — об'єм розмиву, м^3;
R_c — гідравлічний радіус у кінці дорожньої водопропускної труби (за умови повного потоку);
Q — витрата, м^3/с;
g — прискорення сили тяжіння, 9,81 м/с^2;
t — час, хв;
σ — стандартне відхилення матеріалу (якщо $\sigma < 1,5$, матеріал вважається однорідним, якщо $\sigma > 1,5$, матеріал класифікується як неоднорідний, наприклад, σ = 2,10 становить для гравію, σ = 1,87 — для піску), згідно з [4];
α, β, θ — коефіцієнти, згідно з [4];
C_s — коригуючий коефіцієнт нахилу, згідно з [4];
C_h — коефіцієнт регулювання висоти падіння, згідно з [4].

Загальне рівняння для визначення геометрії розмиву в зв'язних ґрунтах на виході з дорожньої водопропускної труби круглого перерізу [4]:

$$\left[\frac{h_s}{D},\frac{W_s}{D},\frac{L_s}{D},\frac{V_s}{D}\right]=C_s,C_h\left(\alpha\right)\left(\frac{\rho V^2}{\tau_c}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta}; \quad (2)$$

іншого перерізу

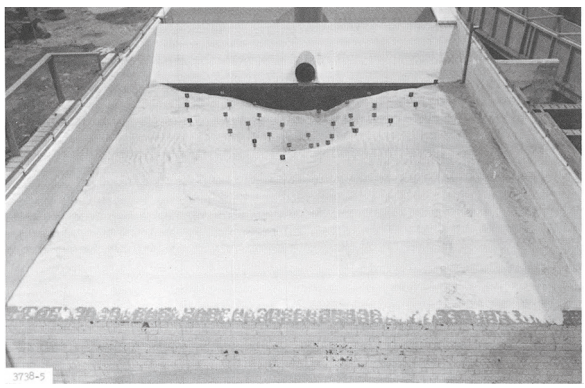
$$\left[\frac{h_s}{y_e},\frac{W_s}{y_e},\frac{L_s}{y_e},\frac{V_s}{y_e}\right]=C_s,C_h\left(\alpha_e\right)\left(\frac{\rho V^2}{\tau_c}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta}, \quad (3)$$

де D — діаметр дорожньої водопропускної труби, м;
y_e — еквівалентна глибина $(A/2)^{1/2}$, м;
A — площа поперечного перерізу потоку, м^2;
V — середня вихідна швидкість, м/с;
τ_c — критичне зсувне напруження, Н/м^2;
ρ — щільність рідини води, 1 000 кг/м^3;
$(\rho V^2)/_c$ — модифіковане число зсуву;
$\alpha_e = \alpha/0,63$ для h_s, W_s і L_s та $\alpha_e = \alpha/(0,63)^3$ для V_s;
$\alpha, \beta,$ — коефіцієнти, згідно з [4];
θ, α_e — коефіцієнти, згідно з [4].

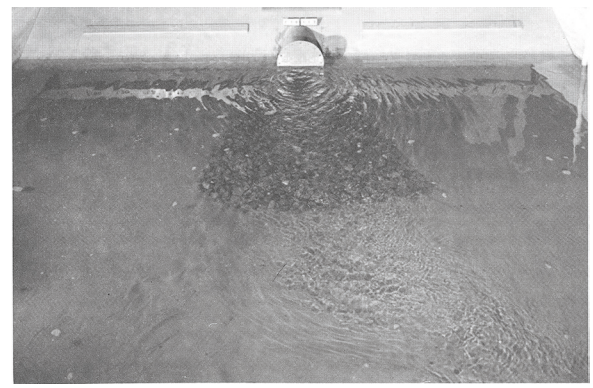
Перші експериментальні дослідження визначення розмивів нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб в світовій практиці належать вченим зі США та були проведені протягом 1963 – 1969 рр. [5].

Дані дослідження проводилися в експериментальних установках для визначення характеристик розмивів нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб з вивченням характеристик розмиву незв'язних ґрунтів з подальшим розробленням рекомендацій щодо захисту нижніх б'єфів.

Досліджувалися розмиви утворені скиданням потоків води через дорожні водопропускні труби різних форм та розмірів при застосуванні різних варіантів захисту нижніх б'єфів (**рис. 1**). Результати були використані для розробки узагальнених співвідношень для опису розміру каменю та відповідної конфігурації захисту нижнього б'єфу, необхідного для запобігання руйнуванню захисної споруди та ерозії ґрунту.



а)



б)

а) піщана засипка;

б) кам'яна засипка.

Рисунок 1 — Перші експериментальні дослідження розмивів нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб

Встанолено [4], що при прогнозуванні розмиву на виході з дорожніх водопропускних труб впливає витрата, форма водопропускної труби, вид ґрунту, тривалість стоку, нахил водопропускної труби, її висота над дном і глибина нижнього б'єфу, крім того встановлено, що певний вплив має стан та утримання водопропускної труби.

Ліліцкий Г. А. [10] запропонував конструкцію гасника енергії, що складається з водобійної стінки з розташованим за нею полігональним в плані водобійним колодязем. За твердженням розробника, такий гасник сприяє більш інтенсивному розтіканню потоку і перешкоджає виникненню збійних течій.

Однак ще Кіенчук А. Ф. [2] відзначав, що водобійний колодязь у звичайному його виконанні не забезпечує вирівнювання швидкостей і питомих витрат по ширині відвідного русла в умовах просторового розтікання при $B > 1{,}25b$. При пропуску через водопропускну споруду потоку, що несе велику кількість наносів, можливе замулення водобійного колодязя і зменшення його розрахункової глибини.

Сиромятников С. І. запропонував конструкцію розтікача у вигляді відбійних ребер, за допомогою яких забезпечується віялоподібне розтікання потоку, недоліком конструкції є необхідність влаштування другого каскаду гасників енергії.

Кузьменко В. І. розробив комбінований гасник, що складається з похилих розсіювачів, що встановлюються під кутом 190 ºС до осі потоку, стінки-гасника за розсіювачами, встановлені під кутом 90 ºС до осі потоку, така система ефективно працює тільки в досить вузьких руслах [1, 3].

Куминов Д. І. запропонував гасник-розсіювач у вигляді клиноподібної в плані стінки, розташованої вершиною кута в сторону споруди. Такий розсіювач влаштовується з двох стінок, які мають поперечний переріз у вигляді трапеції і з'єднаних під кутом 120 ºС. Висота розсіювача зменшується від вершини клина до країв. Згідно з даними Кумина Д.І. такий тип гасника є ефективним при установці його за водопропускними спорудами круглого перерізу [1, 3].

Йордан Мечкарскій запропонував конструкцію гасника, який нагадує конструкцію гасника Кумина Д. І. з тією різницею, що в його конструкції гасник має в вершині прямолінійну вставку. Як гасник Кумина Д. І., так і гасник Мечкарского Й. володіють загальним недоліком — вони вимагають влаштування другого каскаду гасників енергії [2, 10].

Існує окрема група гасників енергії, що розділяє потік в горизонтальній площині.

Принципово новий напрямок гасника енергії водного потоку відкрив Ємцев Б. Т., який запропонував конструкцію гасника, який умовно можна віднести до групи гасників активного типу і названий ним — «безнапірним енергозагасаючим дифузором». Ємцев Б. Т. запропонував гасити надлишкову кінетичну енергію одновимірного бурхливого потоку в прямому гідравлічному стрибку, створюваному за допомогою симетричного звуження русла [2, 10].

Для просторових умов в запропонованому вигляді конструкція непридатна, тому що за твердженням Кольченко О. Л. [11] звуження ширини відвідного русла косими стінками при малих глибинах потоку викликає велику концентрацію питомих витрат і швидкостей по осі відвідного русла, внаслідок чого за гасником виникає необхідність в кріпленні дна на значній відстані.

Дані дослідження свідчать, що найбільш поширеними є гасники за типом водобійного колодязя, утвореного уступом або суцільними чи прорізними стінками, однак вони не завжди є ефективними.

Розрахунок конструктивних елементів гасників енергії активного типу

Потік, що виходить з дорожньої водопропускної труби в нижньому б'єфі має швидкості, які в кілька разів перевищують нерозмивні швидкості для ґрунтів, що складають русло відведення. Для запобігання розмивів споруди з боку нижнього б'єфу, що працює в таких умовах, передбачається влаштування гасників надлишкової кінетичної енергії потоку. Розрахунок конструктивних елементів гасників, як правило, проводиться, на пропуск одныэї розрахункової витрати води, що визначається за даними гідрологічних спостережень. Гідрологічні розрахунки базуються на імовірнісному підході, тому є наближеними, а значить, існує і ймовірність перевищення пропускної витрати над розрахунковою витратою.

При проєктуванні конструкції гасника енергії активного типу визначальними є такі параметри [1]:

- параметр витрати $П_q$;
- величина відносного розширення;
- ширина отвору в горловині дифузора a;
- кут звуження стінок дифузора α;
- висота стінок дифузора h_{cm}.

Для спрощення аналізу й однорідності три останні чинники приводимо до безрозмірного виду: $\frac{a}{d}; \frac{\alpha}{\alpha_n}; \frac{h_{cm}}{d}$ (де α_n — кут сходу косих гідравлічних стрибків при граничному розширенні бурхливого потоку).

За початковий створ установки стінок і мінімальний кут були прийняті відповідно переріз повного розтікання ($L_{пр}$) і кут сходу косих гідравлічних стрибків при граничному розширенні бурхливого потоку ($\alpha_{\min} = \alpha_n$).

Величину граничного розширення β_n рекомендується визначати за такими залежностями:

$$i_T = 0,1 - \beta_n = 15,56\,Пq + 1,52; \quad (4)$$

$$i_T = 0,0 - \beta_n = 24,88\,Пq + 1,55. \quad (5)$$

Сфера застосування залежностей:

$$2,0 \le \beta_n \le 10,0. \quad (6)$$

Для проміжних значень ухилу дна труби допускається лінійна інтерполяція числових значень β_n.

Для визначення значень $L_{пр}$ та α_n були проведені додаткові експериментальні дослідження, результати яких наведено в **табл. 1** [1].

Таблиця 1

Вплив величини граничного розширення β_n на α_n та $L_{пр}/d$

β_n	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
α_n	13,2	12,3	12,9	13,9	14,8	16,0
$L_{пр}/d$	1,04	1,30	1,76	2,15	2,63	3,16

В якості чинника, що характеризує вплив параметра витрати на роботу дифузора, що енергогасить, було прийнято відношення [12]:

$$Кп_q = \frac{\exp(Пq)}{\exp(Пq_{\min})}, \quad (7)$$

де $Пq_{min}$ — параметр витрати, що відповідає величині граничного розширення нижнього б'єфу β_n.

Діапазон зміни параметра $Кп_q$ і значення параметрів витрати, що відповідають йому, при різній величині відносної ширини нижнього б'єфу наведено в **табл. 2** [1].

Таблиця 2

Діапазон зміни параметра $Кп_q$

$Кп_q$	Параметр витрати $Пq$		
	$\beta = 3,0$	$\beta = 5,5$	$\beta = 8,0$
2,234	0,904	1,060	1,250
1,617	0,508	0,740	0,926
1,000	0,100	0,258	0,446

Розрахунок елементів виконується в такій послідовності [12]:

1. Вибирають початкові дані для розрахунку — витрата води, що проходить через трубу Q; діаметр труби d; ухил дна труби i_m; ширину русла, що відводить B; режим роботи труби (безнапірний або напівнапірний) [13].

2. Підраховують числове значення параметра витрати:

$$Пq = \frac{Q}{q^{0,5} d^{2,5}}. \tag{8}$$

3. Підраховують відносну ширину нижнього б'єфу:

$$\beta = \frac{B}{d}. \tag{9}$$

4. Вважаючи, що $\beta_n = \beta$, рахують величину $Пq_{min}$.

5. Обчислюють Kn_q.

6. З урахуванням **табл. 2** масштабують підраховані змінні, використовуючи залежність [13]:

$$X_i = \frac{x_i - x_i}{\Delta x_i}, \tag{10}$$

де X_i — безрозмірне значення змінної;

x_i — натуральне значення змінної;

$\overline{x_i}$ — середнє значення змінної в даному діапазоні її зміни (основний рівень змінної):

$$\overline{x_i} = \frac{x_{i\min} - x_{i\max}}{2}, \tag{11}$$

Δx_i — інтервал зміни даної змінної (інтервал варіювання):

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}. \tag{12}$$

Значення $\overline{x_i}$ та Δx_i розраховують, використовуючи такі співвідношення:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{Kn_q - 1,617}{0,618}, \\ X_2 &= \frac{\beta - 5,5}{2,5}, \\ X_3 &= \frac{\frac{a}{d} - 0,50}{0,25}, \\ X_4 &= \frac{\frac{\alpha}{\alpha_n} - 2}{1}, \\ X_5 &= \frac{\frac{h_{CT}}{d} - 0,5}{0,3}. \end{aligned} \tag{13}$$

7. Якщо отримані масштабовані значення чинників $X_i > |1|$, означає натуральне значення чинника було взято за межами зміни чинників, за якими отримано розрахункові залежності. Діапазони зміни чинників наведено в **табл. 3** [1].

Таблиця 3

Рівні варіювання чинників

Фактори		Рівні чинників		
		x_{min}	$\bar{x}$	x_{max}
Натур	Код	мінус 1	0	+1
Kn_q	X_1	1,000	1,617	2,234
β	X_2	3,000	5,500	8,000
a/d	X_3	0	0,500	1,000
α/α_n	X_4	1,000	2,000	3,000
h_{cm}/d	X_5	0,200	0,500	0,800

8. Підставивши значення змінних X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 у відповідні розрахункові залежності (12) і (13) отримаємо значення параметра Y_1, відносного скорочення площі укріплення, що характеризує величину, і параметра Y_2, потоку, що характеризує нерівномірність, у відвідному руслі:

$$\begin{aligned} Y_1 = W/W_k = {} & 1,6092 + 0,1629X_1 - 0,5278X_2 - 0,1186X_3 - 0,2295X_4 + 0,0374X_5 - 0,0776X_1X_3 - \\ & -0,0733X_1X_4 + 0,0694X_1X_5 + 0,1628X_2X_3 + 0,1167X_2X_4 - 0,1299X_2X_5 - 0,4974X_3X_4 - \\ & -0,2935X_3X_5 + 0,1695X_4X_5 - 0,2984X_1^2 + 0,2835X_2^2 + 0,3269X_3^2 - 0,1681X_5^2 + 0,2966X_1^2X_4 + \\ & +0,0576X_4^2X_2 - 0,2851X_4^2X_3 + 0,0914X_4^2X_5 - 0,1106X_5^2X_1; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} Y_2 = {} & 0,0540 + 0,0220X_1 - 0,04130X_2 - 0,0043X_3 + 0,00845X_4 + 0,0047X_5 + 0,0061X_1X_2 - \\ & -0,0118X_1X_3 + 0,0179X_1X_4 + 0,0011X_2X_3 - 0,0107X_2X_4 - 0,0177X_2X_5 + 0,0061X_3X_5 + \\ & +0,0097X_4X_5 - 0,0182X_1^2 - 0,0322X_3^2 + 0,0360X_4^2 + 0,0143X_5^2 + 0,01114X_1^2X_3 - \\ & -0,0517X_1^2X_4 + 0,0507X_3^2X_1 + 0,0270X_3^2X_2 - 0,0059X_3^2X_5 . \end{aligned} \tag{15}$$

Варто зазначити, запропонований емпіричний підхід має складність виконання розрахунку та певну ймовірність отримання похибки, що спричинить отримання хибних результатів. А також для виконання розрахунків необхідне застосування програмних комплексів, що, у свою чергу, ще більше ускладнює проведення розрахунку.

Відносна глибина воронки розмиву, у першому наближенні, пов'язана з параметром оптимізації Y_1 таким співвідношенням [1, 10, 12]:

$$Y_1 = \left(\frac{W}{W_k}\right)^{2,5}, \tag{16}$$

де W і W_k — відповідно об'єм воронки розмиву при вільному розтіканні бурхливого потоку і за наявності в нижньому б'єфі труби дифузора, що гасить енергію потоку.

Звідси, імовірний об'єм воронки розмиву за наявності пропонованої конструкції гасника можна порахувати:

$$W_k = \frac{W}{(Y_1)^{0,4}} \cdot \tag{17}$$

Величину об'єму воронки розмиву за гладким нижнім б'єфом W слід уточнити на основі експериментальних і натурних досліджень, так як підходи [2] запропоновані для її визначення частково застарілі і мають ряд неточностей.

Якщо отримані значення параметрів Y_1 і Y_2 не задовільняють, тоді завдання необхідно вирішувати методом підбору, що, у свою чергу, має ймовірність отримання похибки при подальшому розрахунку.

Як правило, величина витрати, що пропускається, діаметр труби і відносна ширина русла, що відводить, у кожному конкретному випадку є величинами заданими, отже, підбирати, на стадії розрахунку, можна значення наступних чинників: ширина отвору в горловині дифузора a; кут звуження стінок дифузора α; висота стінок дифузора h_{cm}.

При цьому вирішується стандартне завдання оптимізації з накладеними обмеженнями. Додатковою умовою оптимізації конструкції є необхідність підібрати такі розміри елементів гасника, щоб конструкція ефективно працювала в широкому діапазоні зміни витрат. Цій вимозі відповідає умова [10]:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_1} \to 0. \tag{18}$$

При підборі оптимальних розмірів елементів конструкції (розв'язок задачі оптимізації) буде отримано декілька варіантів:

$$\begin{aligned}\partial Y_1 / \partial X_1 = 0{,}1629 - 0{,}5968X_1 - 0{,}776X_3 - 0{,}0733X_4 + 0{,}0694X_5 + 0{,}5932X_1X_4 - 0{,}1106X_5^2 + \\ + 0{,}3499X_2X_5 + 0{,}0970X_3X_4 .\end{aligned} \tag{19}$$

Якщо після підбору оптимальних розмірів було встановлено, що величина має бути меншою, ніж виходить в реальних умовах, конструкцію гасника можна скоригувати (**рис. 2**) [1, 12].

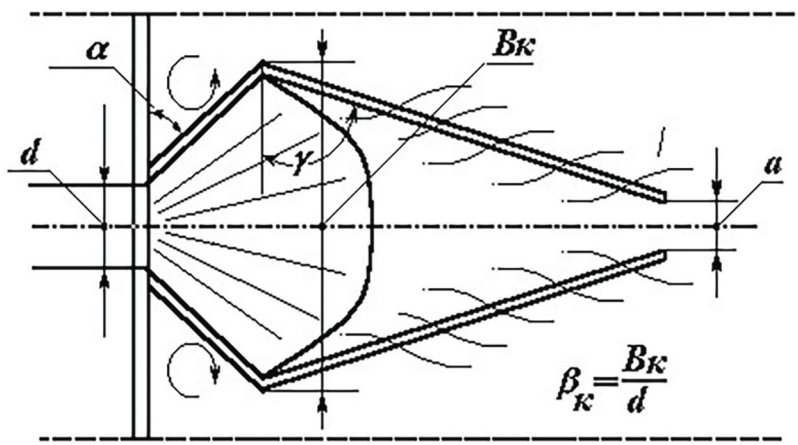


Рисунок 2 — Модернізована конструкція дифузора, що загашує енергію

Орієнтовні розміри цього варіанта конструкції можна прийняти за даними **табл. 4** [1].

Програмна реалізація завдання оптимізації змінних була запропонована Цивіним М. Н., що в подальшому увійшла в документ [11].

Пошук оптимального співвідношення чинників за рівняннями (12), (13) або (17) можна реалізувати на будь-якій мові програмування.

Аналіз наведених розрахункових залежностей (12), (13) і (17) показує, що максимальний ефект гасіння можна забезпечити при величині відносного розширення $\beta \leq 5$.

Таблиця 4

Оптимальний діапазон зміни параметрів дифузора, що гасить енергію

Фактори	α, град	γ, град	β_n	$\frac{a}{d}$	$\frac{h_n}{d}$	η
Діапазон зміни	27,6 — 38,5	66,0 — 71,1	3,4 — 4,8	0,08 — 0,30	0,37 — 0,58	0 — 0,34
де h_n — висота стінок, що сходяться; η — відношення висоти стінок, що сходяться, до висоти стінок, що розходяться.						

Для забезпечення ефективної роботи гасника в широкому діапазоні витрат, що пропускаються, необхідно вибирати висоту стінок меншої висоти, що сходяться, при мінімальній величині вихідного отвору.

Пропозиції та розрахунок вихідних ділянок споруди для забезпечення її надійності наведено в роботі [13].

Варто зазначити, що дані підходи базуються на теоретичних рішеннях і були частково вивчені при проведенні експериментальних досліджень Цивіним М. Н. та Клименком М. І., однак дане питання залишається актуальним і повністю не вирішеним, так як експериментальні дослідження були проведені на малих моделях, а натурні дослідження та порівняння не проводилися.

Висновки

На сьогоднішній день існує два найпоширеніших підходи до вирішення проблеми укріплення нижніх б'єфів дорожніх водопропускних труб: повна відмова від улаштування конструкцій гасників енергії, що зпричиняє зсув на значну відстань вирви розмиву від дорожнього насипу або використання гасників енергії реактивного типу (типу водобійних колодязів, утворених уступом або стінкою), розсікачів або розсіювачів різного типу. Однак обидва підходи не вирішують повністю проблему гасіння енергії водного потоку.

Гідравлічні розрахунки звичайних бетонних (умовно гладких) труб і металевих гофрованих труб (з підвищеною шорсткістю внутрішньої поверхні) виконують за однаковою методикою, різниця тільки в константах, які використовують при розрахунку: коефіцієнт шорсткості, ухил тертя, глибина на вході в трубу тощо, що, у свою чергу, свідчить про необхідність проведення додаткових розрахунків та експериментальних досліджень.

Крім того, існуючі методики розрахунку з оптимізації конструкцій гасників енергії в нижніх б'єфах потребують експериментального уточнення.

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. Волченков Г.Я. Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений. Москва, 1974. 296 с.

3. Цивін М.Н. Дослідження експлуатаційних характеристик погашувача енергії активного типу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 1999. Вип. 57. С. 209–213.

4. Philip L. Thompson, Roger T. Kilgore (2006). FHWA-NHI-06-086 Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels Hydraulic Engineering Circular Number 14, Third Edition. Federal Highway Administration National Highway Institute. 287 p.

5. Bohan, J. P., 1970. Erosion and Riprap Requirements at Culvert and Storm-Drain Outlets, Research Report H-70-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

6. Abt, S. R., P. L. Thompson, and T. M. Lewis, 1996. Enhancement of the Culvert Outlet Scour Estimation Equations, Transportation Research Record 1523.

7. Doehring F. K. and S. R. Abt, 1994. Drop Height Influence on Outlet Scour, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(12), December.

8. Donnell, C. A. and S. R. Abt, 1983. Culvert Shape Effects on Localized Scour, Hydrographic Engineering Publications CER82-83CAD-SRA42, Colorado State University, Fort Collins, CO.

9. Ruff, J. F., S. R. Abt, C. Mendoza, A. Shaikh, and R. Kloberdanz, 1982. Scour at Culvert Outlets in Mixed Bed Materials, FHWA-RD-82-011, Offices of Research and Development, Washington D.C. 20590, September.

10. Цивин М. Н. Статистический подход к планированию гидравлического эксперимента: Задачи управления двумерными бурными потоками. Київ, 2001. 122 с.

11. Кольченко О.Л. Управление кинематической структурой двухмерного бурного потока за трубчатыми водосбросными сооружениями: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Київ, 1987. 20 с.

12. Р А.2.1-218-02070915-706:2007 Рекомендації з оптимізації конструкції гасників енергії в нижніх б`єфах дорожніх труб. Київ, 2007. 48 с. (Інформація та документація).

13. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проблем забезпечення надійностіа довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації. *Дороги і мости*. Київ, 2022. Вип. 25. С. 190–202. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190.

References

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

2. Volchenkov H.Ia. Rukovodstvo po hydravlycheskym raschetam malykh iskusstvennykh sooruzhenii [Guidelines for hydraulic calculations of small artificial structures]. Moscow, 1974. 296 p. [in Russian].

3. Tsyvin M.N. Doslidzhennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk pohashuvacha enerhii aktyvnoho typu [Guidelines for hydraulic calculations of small artificial structures]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*. Iss. 57. Kyiv, 1999. P. 209–213 [in Ukrainian].

4. Philip L. Thompson, Roger T. Kilgore (2006). FHWA-NHI-06-086 Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels Hydraulic Engineering Circular Number 14, Third Edition. Federal Highway Administration National Highway Institute. 287 p. [in English].

5. Bohan, J. P., 1970. Erosion and Riprap Requirements at Culvert and Storm-Drain Outlets, Research Report H-70-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi [in English].

6. Abt, S. R., P. L. Thompson, and T. M. Lewis, 1996. Enhancement of the Culvert Outlet Scour Estimation Equations, Transportation Research Record 1523 [in English].

7. Doehring F. K. and S. R. Abt, 1994. Drop Height Influence on Outlet Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 120(12). December [in English].

8. Donnell, C. A. and S. R. Abt, 1983. Culvert Shape Effects on Localized Scour, Hydrographic Engineering Publications CER82-83CAD-SRA42, Colorado State University, Fort Collins, CO [in English].

9. Ruff, J. F., S. R. Abt, C. Mendoza, A. Shaikh, and R. Kloberdanz, 1982. Scour at Culvert Outlets in Mixed Bed Materials, FHWA-RD-82-011, Offices of Research and Development, Washington D.C. 20590, September [in English].

10. Tsivin M. N. Statisticheskiy podkhod k planirovaniyu gidravlicheskogo eksperimenta: Zadachi upravleniya dvumernymi burnymi potokami [Statistical Approach to Designing a Hydraulic Experiment: Problems of Controlling Two-Dimensional Violent Flows]. Kyiv, 2001. 122 p. [in Russian].

11. Kolchenko O.L. Upravleniye kinematicheskoy strukturoy dvukhmernogo burnogo potoka za trubchatymi vodosbrosnymi sooruzheniyami [Control of the kinematic structure of a two-dimensional turbulent flow behind tubular spillways]. PhD (Ing.). Kyiv, 1987. 20 p. [in Russian].

12. R A.2.1-218-02070915-706:2007 Rekomendatsii z optymizatsii konstruktsii hasnykiv enerhii v nyzhnikh byefakh dorozhnikh trub [Recommendations (R A.2.1-218-02070915-706:2007) Recommendations for optimizing the design of energy extinguishers in the lower biefs of road pipes]. Kyiv, 2007. 48 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

13. Artur Onyshchenko, Mykola Harkusha, Mykola Klymenko. Analysis of problems of ensuring reliability and durability of hydraulic structures of transport construction from road waterways. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2022. Iss. 25. P. 190–202 DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190 [in Ukrainian].

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 CONSTRUCTIVE MEASURES FOR STRENGTHENING THE LOWER BEEFS OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES OF TRANSPORTATION CONSTRUCTION FROM CULVERTS

Abstract

Introduction. Road culverts are one of the most massive hydraulic structures of transport construction in Ukraine.

The bottom beef of such structures works in difficult operating conditions: with significant unevenness of the distribution of specific costs; high kinetics of the discharge flow and its saturation with sediments, floating garbage; small flooding of the diversion channel, etc.

The main difficulty of the problem lies in the fact that a two-dimensional flow takes place in the area of free spreading, and in the area of quenching of excess kinetic energy, this two-dimensional flow turns into a three-dimensional turbulent flow, which makes it practically impossible to obtain a theoretical solution for the movement of water in the lower bay of hydrotechnical structures .

The need to improve the structures of the lower bief of hydraulic structures of transport construction from road culverts is urgent, taking into account that the existing approaches do not lead to the desired

positive results.

Problems. From the literature analysis, it was established that the strengthening of the lower biefs of hydraulic structures of transport construction from road culverts is an important component for the durability of the structure itself and its proper functioning.

Goal. It consists in the analysis of constructive measures to strengthen the lower banks of hydraulic structures of transport construction from road corrugated metal culverts.

The results. An analysis of the main approaches to strengthening the lower beams of hydraulic structures of transport construction from road culverts was carried out. The analysis of the calculation of the structural elements of active type energy extinguishers was performed.

Conclusions. To date, there are two most common approaches to the solution of the problem of fixing the lower biefs of hydraulic structures of transport construction from road culverts: complete rejection of the arrangement of energy extinguishing structures, which causes a significant shift of the erosion gap from the road embankment; or the use of jet-type energy quenchers (of the water well type formed by a ledge or wall), breakers or dispersants of various types. However, both approaches do not completely solve the problem of extinguishing the energy of the water flow behind the structures of road culverts.

The method of hydraulic calculations of ordinary concrete (conditionally smooth) pipes and metal corrugated pipes (with increased roughness of the inner surface) is performed according to the same method, the difference is only in the constants used in the calculation: roughness coefficient, friction slope, depth at the entrance to the pipe, etc. d., which in turn indicates the need for additional calculations and experimental studies.

In addition, the existing methods of calculation for the optimization of the structures of energy quenchers in the lower biefs need experimental clarification.

Keywords: road, hydraulic structure, road culvert, structure of energy extinguisher, channel.