

**УДК 624.2**

**Ткачук С.Г.**, докт. техн. наук.

## **ТЕОРЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДОВЖИНИ ПІДПЕРТОГО ГІДРАВЛІЧНОГО СТРИБКА**

**Анотація.** При конструюванні гасителів енергії типу водобійного колодязя і водобійного уступу допускається визначати їх довжину в залежності від довжини підпертого гідравлічного стрибка. Існуючі рекомендації М.Д.Чертоусова дозволяють скорочувати довжину досконалого стрибка на 20...30%. Ці суто емпіричні границі стиснення не супроводжуються аналізом умов, за яких вони доцільні і в якій мірі допустимі.

Користуючись рівнянням підпертого гідравлічного стрибка і постулатом про еквівалентність втрат енергій в стрибку і роботи сил інерції, виводиться теоретична формула для довжини підпертого стрибка. Наводиться аналіз залежності довжини підпертого стрибка від гідравлічних параметрів потоку.

**Ключові слова:** гасителі енергії, підпертий гідравлічний стрибок, втрати енергії в стрибку, гідравлічні параметри потоку.

**УДК 624.2**

**Ткачук С.Г.**, докт. техн. наук.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ ПІДПЕРТОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА**

**Аннотация.** При конструировании гасителей энергии по типу водобойного колодца и водобойного уступа допускается назначать их длину в зависимости от длины подпертого гидравлического прыжка. Существующие рекомендации М.Д.Чертоусова позволяют сократить длину совершенного прыжка на 20...30%. Эти сугубо эмпирические границы сжатия не сопровождаются анализом условий, для которых они целесообразны и в какой мере допустимы.

Руководствуясь уравнением подпертого гидравлического прыжка и постулатом об эквивалентности потерь энергии в прыжке и работой сил инерции, выводится теоретическая формула для длины подпертого прыжка. Приводится анализ зависимости длины подпертого прыжка от гидравлических параметров потока.

**Ключевые слова:** гасители энергии, подпертый гидравлический прыжок, потери энергии в прыжке, гидравлические параметры потока.

**UDC 624.2**

**Тkachuk S.H, Dr. Tech. Sci.**

## **THE THEORETICAL DEPENDENCE OF THE LENGTH OF THE HYDRAULIC JUMP PAPERTOLE**

**Abstract.** In the design of energy absorbers according to the type of stilling basin the stilling basin and the ledge is allowed to appoint their length depending on the length of the hydraulic jump is backed. References M. D. Chertousov reduce the length of the perfect jump by 20...30%. These purely empirical boundary compression are not accompanied by analysis of the conditions for which they are suitable and to what extent valid.

Backed guided by the equation of the hydraulic jump and the postulate of the equivalence of the energy loss in the jump and the work of the inertia forces, is derived a theoretical formula for the length of the jump is backed. The analysis depends on the length backed jump from the hydraulic parameters of the flow.

**Keywords:** energy absorbers, backed by a hydraulic jump, energy loss in jump, the hydraulic parameters of the flow.

Гідравлічний стрибок являє собою унікальний елемент відкритого потоку, якому властива певна «пружність», тобто він піддається стисненню, що використовується при конструюванні гасителів енергії. Такий скорочений по довжині стрибок називається підпертим. Довгий час для визначення довжини підпертого гідравлічного стрибка у водобійних уступах і колодязях послуговувались емпіричною рекомендацією М.Д.Чертоусова [1], за якою

довжину досконалого гідравлічного стрибка можна скоротити на 20...20 %. Але за відсутності на той час теоретичного обґрунтування довжини стрибка, такий підхід до її визначення видається не досить переконливим. Рекомендація М.Д.Чертоусова не враховує зв'язок між довжиною підпертого стрибка  $l_{с.п}$  з глибиною водобійного колодзя (уступа)  $d$  і нормальною глибиною  $y$  у відвідному руслі  $h_0$ .

Основне рівняння підпертого гідравлічного стрибка, так як і досконалого, виводиться з фундаментального закону збереження кількості руху (імпульсу) і на прикладі водобійного уступу (рис. 1) має вид

$$\frac{Q^2}{g \omega_1} + y_1 \omega_1 = \frac{Q^2}{g \omega_0} + y_2 \omega_2 \quad (1)$$

де  $\omega_1$  та  $\omega_0$  – площі живого перерізу для першої спряженої глибини та нормальної  $y$  у відвідному руслі;  $\omega_2$  – площа живого перерізу для другої спряженої глибини;  $y_1$  та  $y_2$  – глибини занурення центрів ваги перерізів із спряженими глибинами  $h_1$  та  $h_2$ .

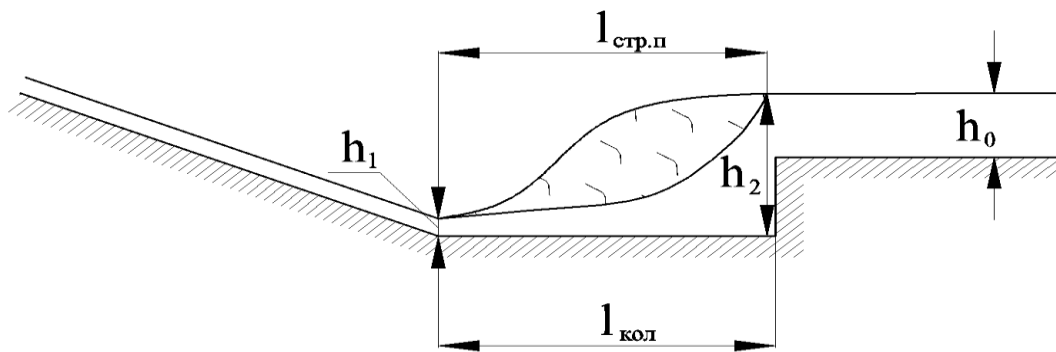


Рисунок 1 – Схема підпертого гідравлічного стрибка

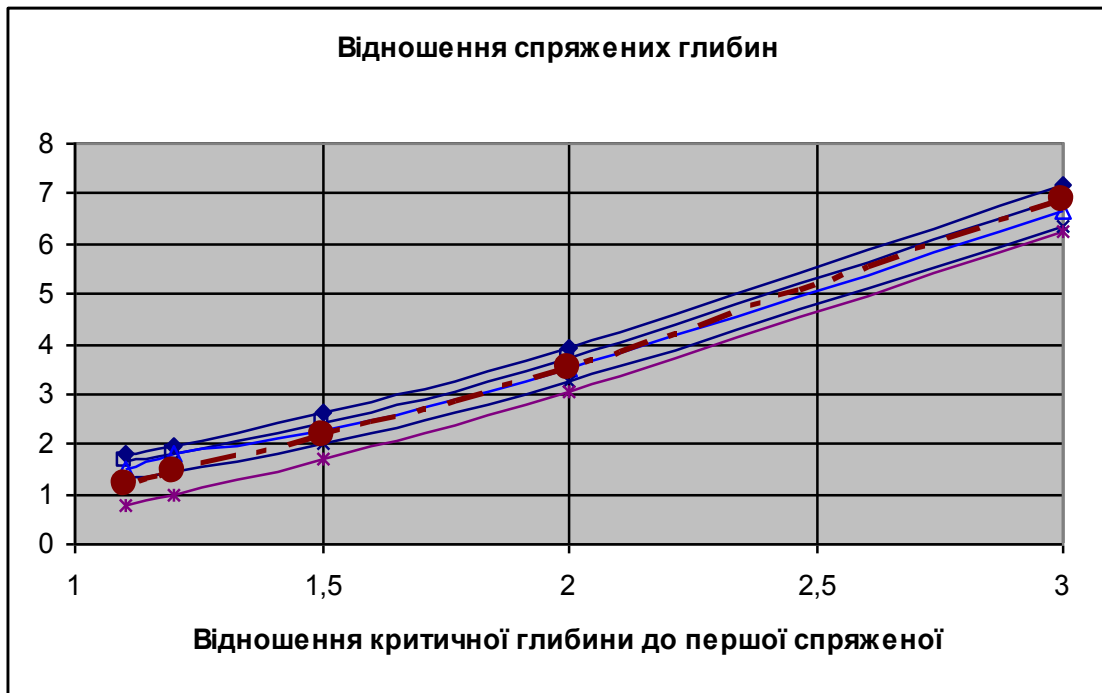
Для русел з прямокутним живим перерізом  $\omega = bh$ . Поділивши всі доданки на ширину русла  $b$  і врахувавши, що  $Q^2/gb^2 = h_k^3$ , отримаємо іншу форму основного рівняння підпертого гідравлічного стрибка

$$\frac{h_k^3}{h_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{h_k^3}{h_0} + \frac{h_2^2}{2} \quad (2)$$

Звідси відношення спряжених глибин підпертого стрибка становить:

$$\eta_{с.п} = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{1 + 2h_K^3 \left( \frac{1}{h_1^3} - \frac{1}{h_0 h_1^2} \right)}, \quad (3)$$

Суцільні тонкі криві на рис. 2 відповідають залежності (3) для різних значень відношення критичної глибини до нормальної  $h_K/h_0 = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,85$ .



**Рисунок 2** – Відношення спряжених глибин для підпертого і досконалого гідравлічних стрибків

Штрих-пунктирна товста лінія на рис. 2 відтворює відношення спряжених глибин досконалого гідравлічного стрибка:

$$\eta_{с.д} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_K}{h_1} \right)^3} - 1 \right]. \quad (4)$$

Отримані теоретичні і графічні залежності (рис. 2) свідчать про незначний вплив нормальної глибини в нижньому б'єфі на відношення спряжених глибин для підпертого гідравлічного стрибка. Крім того, залежність (4) практично накладається на сукупність кривих для підпертого стрибка, що

підтверджує ідентичність співвідношення спряжених глибин для підпертого і досконалого гідравлічних стрибків.

Для визначення довжини підпертого гідравлічного стрибка застосовується постулат про тотожність втрат енергії і роботи сил інерції в стрибку, справедливості якого була доведена в [2]. Отже вважається, що питомі втрати енергії витрачаються на питому роботу сил інерції:

$$\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = \frac{a}{g} (Q_2 - h_1) \quad (5)$$

де  $a$  – середнє уповільнення поступального руху води в гідравлічному стрибку:

$$a = \frac{V_0 - V_1}{t},$$

а середнє значення часу  $t$  необхідного для переміщення потоку в стрибку на відстань, що становить його довжину дорівнює:

$$t = \frac{2 \ell_{с.п.}}{V_0 + V_1}$$

Причому цей час буде однаковим для подолання неплавнозмінним потоком відстані  $\ell_{с.п.}$  і для збільшення його глибини від  $h_1$  до  $h_2$ .

Таким чином, враховуючи ці міркування, довжина підпертого гідравлічного стрибка в руслах довільного поперечного профілю буде такою:

$$\ell_{с.п.} = \frac{(V_0^2 - V_1^2) (Q_2 - h_1)}{2g (Q_2 - \mathcal{E}_1)} \quad (6)$$

Використовуючи теоретичну залежність питомих втрат енергії у гідравлічному стрибку в руслах прямокутного живого перерізу, останню формулу можна записати в такому виді:

$$\ell_{с.п.} = \frac{4\eta (Q_0^2 - 1) V_0^2}{\eta - 1 \cdot 2g}, \quad (7)$$

де:  $\eta = h_2 / h_1$  - відношення спряжених глибин;  $\eta_0 = h_0 / h_1$  - відношення нормальної глибини в нижньому б'єфі до першої спряженої.

Порівнюючи довжину підпертого (7) і досконалого гідравлічних стрибків в руслах з прямокутним живим перерізом, формула для якої була отримана С.Г.Ткачуком [2]

$$\ell_{с.п.} = \frac{4\eta (Q + 1) V_2^2}{\eta - 1 \cdot 2g},$$

матимемо їх відношення:

$$\Theta = \frac{\ell_{с.п}}{\ell_{с.д}} = \frac{\zeta_0^2 - 1}{\zeta^2 - 1} \frac{\eta^2}{\eta_0^2} \quad (8)$$

Аналіз останньої залежності свідчить, що коли  $\eta_0 = \eta$ , то  $\theta = 1$ , тобто довжина досконалого і підпертого гідравлічних стрибків дорівнюють один одному  $\ell_{с.д} = \ell_{с.п}$ . За таких умов гідравлічний стрибок відбувається в потоці при відсутності будь-яких гасників енергії. Фіксована величина  $\theta = 1$  може відповідати різним абсолютним значенням  $\eta_0$  і  $\eta$ , що чітко простежується на рис. 3. Але в усіх цих випадках здійснюється насунутий досконалий стрибок в стиснутому перерізі без будь яких гасників енергії.

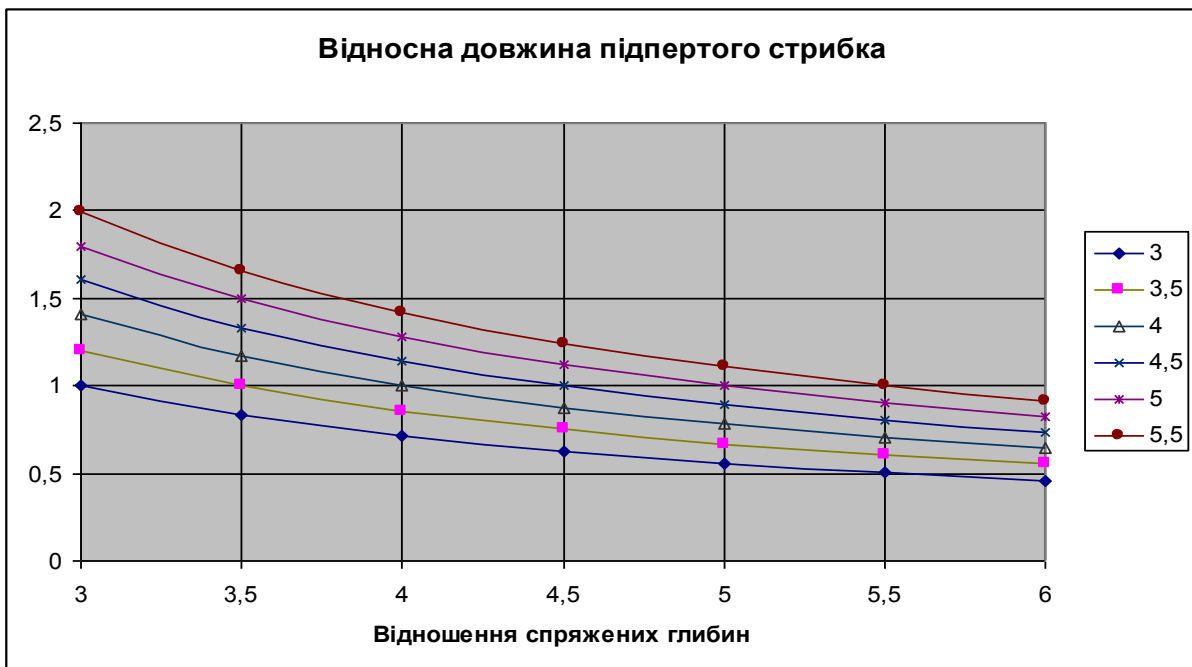


Рисунок 3 – Відношення довжин підпертого і досконалого гідравлічних стрибків

Глибина водобійного уступу і водобійного колодязя визначається однаково і дорівнює

$$d = \sigma h_2 - h_0 = \sigma h_1 (\zeta - \eta_0) \quad (9)$$

де  $\sigma = 1,05 \dots 1,10$  – коефіцієнт запасу. Остання формула показує, що при умові  $\eta_0 = \eta$  глибина водобійного уступу (колодязя) дорівнює нулю  $d = 0$ , тобто гасник енергії відсутній, а гідравлічний стрибок насунутий до стиснутого перерізу. Якщо  $\eta_0 > \eta$ , то згідно формули (9) глибина водобійного уступу (колодязя) стає від'ємною, що є абсурдним і у фізичному сенсі означає

затоплення гідравлічного стрибка. І, нарешті, коли  $\eta_0 < \eta$  глибина водобійного уступа (колодязя) набуває конкретного значення в залежності від співвідношення  $\eta_0$  і  $\eta$ .

Скорочення довжини досконалого гідравлічного стрибка в гаснику енергії типу водобійного уступу для різних  $\eta_0$  і  $\eta$  можна обчислити по формулі (8), або знайти по графікам на рис. 3. Наприклад, при  $\eta_0$  матимемо довжину підпертого гідравлічного стрибка для  $\eta = 4,5$ :  $l_{c.п} \approx 0,7l_{c.д}$ , а для  $\eta = 5,5$ :  $l_{c.п} \approx 0,4l_{c.д}$ .

Габаритні розміри гасника енергії повинні забезпечувати гасіння надлишкової кінетичної енергії. Тому скорочення довжини підпертого гідравлічного стрибка компенсується втратами енергії на удар потоку по уступу.

### Література

1. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. М-Л., Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.
2. Ткачук С.Г. Теоретична формула довжини гідравлічного стрибка та постулат про втрати енергії. // Гідравліка і гідротехніка: Науково-технічний збірник НТУ, 2011. – Вип.65. – С. 3-9.

#### **Рецензенти:**

Савенко В.Я., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.  
Кузло М.Т., д-р техн. наук, Національний університет водного господарства та природокористування.

#### **Reviewers:**

Savenko V., Ya., Dr. Tech. Sci., National Transport University.  
Kuzlo M. T., Dr. Tech. Sci., National University of Water and Environmental Engineering.

Стаття надійшла до редакції: **21.01.2017 р.**