



## ГІДРОТЕХНІКА

УДК 532.532.2

**Хлапук М. М., д.т.н., професор, Корнійчук В. І., аспірант,  
Безусяк О. В., к.т.н., доцент** (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)

### **ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛИ ОПОРУ СТИСНЕННЮ ПОТОКУ В МЕЖАХ ДОСКОНАЛОГО ВОДОЗЛИВУ З ТОНКОЮ СТІНКОЮ**

**В статті представлено теоретичні та експериментальні дослідження впливу висоти водозливної стінки та діючого напору на силу опору стисненню потоку в межах водозливу з тонкою стінкою, яка виникає внаслідок переформування (деформації) рівномірного потоку в струмину. Доведено достовірність гіпотези про її пропорційність втратам напору в межах водозливу та адекватність отриманої залежності для оцінки цієї сили. На графіках розкрито вплив основних діючих факторів на величину сили опору стисненню потоку. *Ключові слова:* водозлив з тонкою стінкою, кількість руху, імпульс сили, п'єзометричний тиск, сила опору стисненню потоку.**

**При проектуванні гідротехнічних споруд** доводиться часто проводити гідравлічні розрахунки водозливів, особливо у випадку водозливів з вертикальною тонкою стінкою. За його схемою розраховують шлюзи-регулятори, полігональні й шахтні водоскиди та інші споруди з автоматичним скидом води. Вони широко застосовуються у водогосподарській і меліоративній практиках, гідротехнічних лабораторіях де необхідна висока точність визначення витрати води. Водночас, вони є одним з найпростіших видів мірних засобів [1].

Дослідження пропускної здатності таких водозливів розпочалося ще на початку ХІХ ст. експериментами проведеними Кастелем та Д'Обюссоном на водопровідній мережі м. Тулузи. Ґрунтовні експериментальні дослідження були проведенні Г. Базеном на Бургундському каналі і пізніше доповненні Еґлі. Заслужують уваги роботи: Г. Кінга, К. Кіндсвотера, Р. Картера, Т. Ребока, Р.Р. Чугаєва.

Розробкою теорії руху потоку в межах водозливу займалися видатні вітчизняні та закордонні вчені: В.В. Смилов, О.Р. Березінський, М.М. Павловський, Г.І. Сухомел, М.Д. Чертоусов, Д.І. Кумін, М.Г. Бос, Г.В. Хагер, А.С. Офіцеров, В. Кригер та ін.

Але не зважаючи на великий об'єм виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, задача розрахунку водозливу, в більшості випадків, зводиться лише до визначення його пропускної здатності шляхом введення емпіричних коефіцієнтів витрати, при цьому не враховуються особливості водозливу в кожному конкретному випадку та перехід від моделей водозливів, для яких отримані емпіричні коефіцієнти, до реальних споруд. Розраховані за різними залежностями витрати для одних і тих самих умов можуть значно відрізнятися між собою.

Таким чином, теоретичні дослідження водозливів з тонкою стінкою та розробка їх теорії набувають значного методичного та практичного значення.

**Розрахункова схема** ділянки непідтопленого досконалого водозливу з вертикальною тонкою стінкою в призматичному прямокутному руслі з горизонтальним дном наведено на рис. 1. Переріз 1–1 розташований у верхньому б'єфі на достатній відстані від водозливу, де відсутній вплив кривої спаду вільної поверхні і потік можна вважати рівномірним. Глибина потоку в цьому перерізі становить  $c_B + H$ , де  $c_B$  – висота стінки зі сторони верхнього б'єфу, см;  $H$  – напір на водозлив, см. Переріз 2–2 прийнято в створі водозливної стінки, де глибина потоку на порозі водозливу становить  $h$ , см.

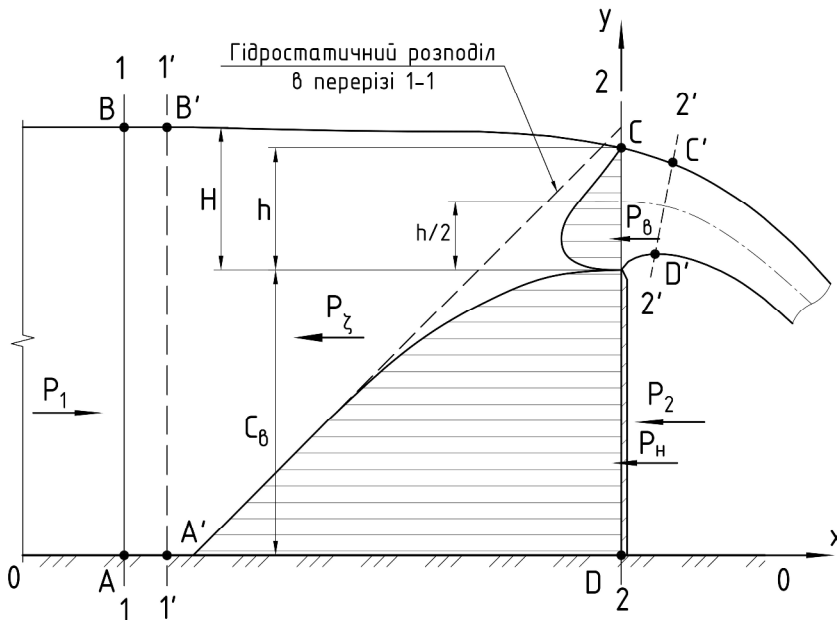


Рис. 1. Схема водозливу з вертикальною тонкою стінкою



На виділену перерізами 1–1 і 2–2 (рис. 1) ділянку потоку  $ABCD$  прикладемо сили тиску  $P_1$  і  $P_2$ , що замінять дію лівої і правої частин потоку та протидію стінки. При визначенні сил, діючих на відсік  $ABCD$ , прийнято наступні умови:

– тиск в живому перерізі 1–1 розподіляється за гідростатичним законом;

– розподіл тиску в живому перерізі 2–2 визначено автором в попередніх дослідженнях [2; 3];

– сила опору стисненню потоку  $P_\zeta$  в межах водозливу, що виникає внаслідок різкого вертикального звуження (деформації) потоку при його переформуванні з рівномірного в струмину потребує експериментальних досліджень;

– сили тертя на граничних поверхнях потоку в межах відсіку  $ABCD$  є незначними, тому ними знехтувано;

– проекція сили тяжіння на напрямок руху потоку з горизонтальним дном є незначною, тому її не враховано.

Згідно закону про приріст кількості руху рідини – проекція кількості руху  $\Delta(KP)$  на горизонтальну вісь дорівнює сумі проекцій імпульсів сил  $\Delta(IC)$  на цю ж вісь [4; 5]

$$\Delta(KP) = \Sigma(IC). \quad (1)$$

За проміжок часу  $dt$  об'єм рідини  $ABCD$  (рис. 1) під дією сил переміщується в положення  $A'B'C'D'$ . Зміна кількості руху його має вид

$$\Delta(KP) = \alpha_{02} \rho b h \frac{q^2}{h^2} dt - \alpha_{01} \rho b (c_e + H) \frac{q^2}{(c_e + H)^2} dt, \quad (2)$$

де  $\alpha_{01}, \alpha_{02}$  – корективи швидкості відповідно в перерізах 1–1 і 2–2,  $см/с$ ;  $q$  – питома витрата потоку,  $см^2/с$ ;  $\rho$  – густина води,  $г/см^3$ ;  $b$  – ширина прямокутного русла,  $см$ .

Сума проекцій імпульсів всіх прикладених до виділеного об'єму  $ABCD$  сил на горизонтальну вісь руху потоку можна визначити згідно з прийнятими вище припущеннями про неврахування сил тертя на граничних поверхнях потоку та проекції сили тяжіння на вісь руху потоку, тобто враховуємо тільки суму проекцій імпульсів сил гідростатичного тиску  $P_1$  і  $P_2$  в перерізах 1–1 і 2–2 та силу опору стисненню потоку  $P_\zeta$

$$\Sigma(IC) = P_1 dt - P_2 dt - P_\zeta dt. \quad (3)$$

Враховуючи те, що в живому перерізі 1-1 тиск розподіляється за гідростатичним законом, рівняння (3) приводимо до виду

$$\Sigma(IC) = \frac{1}{2} \rho g b (c_e + H)^2 dt - P_2 dt - P_\zeta dt. \quad (4)$$

Згідно рівнянь (1)-(4) отримаємо рівняння зміни кількості руху потоку водозливу – основне рівняння водозливу з тонкою стінкою

$$\alpha_{02} \frac{q^2}{gh} - \alpha_{01} \frac{q^2}{g(c_e + H)} = \frac{1}{2} (c_e + H)^2 - \frac{P_2}{\rho g b} - \frac{P_\zeta}{\rho g b}. \quad (5)$$

Згідно з нашими попередніми дослідженнями [2; 3] п'єзометричний тиск в створі водозливної стінки  $P_2$  складається з двох складових частин: вище кромки водозливної стінки (в струміні) та в межах вертикальної стінки. Горизонтальна складова сили п'єзометричного тиску вище кромки тонкої стінки позначена на рис. 1 –  $P_\theta$ , а в її межах –  $P_H$ . Для визначення цих сил отримано відповідні залежності

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= P_\theta + P_H \\ P_\theta &= \left( \frac{1}{R_\theta^2 + 3R_\theta + 2} \right) \left( \frac{h}{H} \right)^{R_\theta} h^2 \rho g b \\ P_H &= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{R_H^2 + 3R_H + 2} + \frac{R_H}{R_H + 1} \frac{H}{c_e} \right) c_e^2 \rho g b \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де  $R_\theta = K_\theta \frac{c_e + h}{c_e + H}$ ,  $R_H = K_H \frac{c_e + H}{H - h}$ ,  $K_\theta = 0,33$ ,  $K_H = 1,0$ .

До рівняння (6) входять невідома сила опору стисненню потоку, що виникає при деформації потоку в межах водозливу. Нами прийнято гіпотезу, що вона взаємопов'язана з втратами енергії в межах водозливу і її можна виразити через втрати напору  $h_w$

$$P_\zeta = \frac{1}{\alpha_{02}} h_w (H - h) \rho g b, \quad (7)$$

де втрати напору, згідно попередніх досліджень, визначено за залежністю

$$h_w = \zeta \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\alpha_2}{h^2} - \frac{\alpha_1}{(c_e + H)^2} \right),$$

де  $\zeta = 1,35$  – коефіцієнт, що враховує внутрішні опори руху рідини.

Формула для визначення сили опору стисненню потоку має вид



$$P_{\zeta} = \zeta \frac{q^2(H-h)}{2\alpha_{02}g} \left( \frac{\alpha_2}{h^2} - \frac{\alpha_1}{(c_6 + H)^2} \right) \rho g b. \quad (8)$$

**З метою визначення сили опору стисненню потоку  $P_{\zeta}$**  нами виконано експериментальні дослідження в гідротехнічній лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва НУВГП [2; 3]. Умови гідравлічних досліджень впливу основних діючих факторів: висоти водозливної стінки  $c_b$  та діючого напору  $H$  на силу  $P_{\zeta}$  наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Умови лабораторних гідравлічних досліджень

Фактори		Рівні варіювання									Інт. вар.
натуральний вид	кодовий вид	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	
$c_b, \text{ см}$	$X_1$	5				25				45	20
$H, \text{ см}$	$X_2$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	5
Порядок дослідів для кожного $X_1$		7	21	1	2	26	15	27	5	22	
		12	3	13	18	9	20	25	14	19	
		8	6	10	16	11	23	24	17	4	

Під час проведення експериментальних досліджень відношення основних діючих факторів  $H/c_b$  змінювалось в межах 0,11...9,0; числа Рейнольдса – 17954...764797, що відповідають квадратичній зоні опору потоку; числа Фруда – 0,003...0,93, що відповідають спокійному режиму потоку. Межі проведених експериментальних досліджень охоплюють параметри реальних споруд.

Таблиця 2

Матриця досліджень впливу діючих факторів на силу  $P_{\zeta}$ 

Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів		Осереднені значення вихідних параметрів			Розрахункові значення параметрів
$X_1$	$X_2$	висота стінки $c_b, \text{ см}$	напір $H, \text{ см}$	питома витрата $q, \text{ см}^2/\text{с}$	глибина на порозі $h, \text{ см}$	сила опору $P_{\zeta}$ за (9), $\text{Н}$	сила опору $P_{\zeta}$ за (8), $\text{Н}$
0	-1	25	5	205,76	4,29	0,21	0,22
	-0,75		10	596,65	8,63	0,82	0,82
	-0,50		15	1134,68	13,05	1,81	1,80
	-0,25		20	1777,11	17,34	3,13	3,15
	0		25	2570,96	21,84	4,88	4,86
	0,25		30	3457,50	26,22	6,97	6,95
	0,50		35	4449,69	30,59	9,44	9,42
	0,75		40	5562,86	35,02	12,34	12,28
	1		45	6705,77	39,19	15,45	15,53
Статистичні параметри							
Дисперсія відтворюваності $\bar{S}_6^2 \cdot 10^4$ при $f_a = 54, \text{ Н}^2$							9,48
Дисперсія адекватності $\bar{S}_a^2 \cdot 10^4$ при $f_a = 26, \text{ Н}^2$							9,72

продовження табл. 2

Критерій Фішера розрахунковий $\bar{F}_p$	1,025
Критерій Фішера табличний $F_m$	1,70
Похибка $\pm \bar{\varepsilon}$ , % при $\zeta = 1,35$	$\pm 3,30$

Матрицю дослідження впливу діючих факторів на осереднені значення вихідних параметрів потоку, для прикладу, при висоті стінки  $c_B = 25$  см наведено в табл. 2.

За отриманими дослідними значеннями питомої витрати  $q$  та глибини на порозі водозливу  $h$  визначались експериментальні значення сили  $P_\zeta$  для кожної точки плану експерименту згідно рівняння зміни кількості руху (5), яке приведено до виду

$$P_\zeta = \frac{1}{2}(c_\theta + H)^2 \rho g b - P_2 + \frac{q^2}{g} \left( \frac{\alpha_{02}}{h} - \frac{\alpha_{01}}{c_\theta + H} \right) \rho g b. \quad (9)$$

Дослідження впливу діючих факторів на силу  $P_\zeta$  представлено на рис. 2-4 у відносних координатах. Суцільною лінією експериментальні точки апроксимовано графіками побудованими згідно отриманої залежності (8).

Аналіз отриманих графіків на рис. 2 показав, що при збільшенні висоти водозливної стінки сила опору  $P_\zeta$  зменшується і асимптотично наближається до мінімальних значень. Характер зміни сили опору руху потоку при різних напорах зберігається.

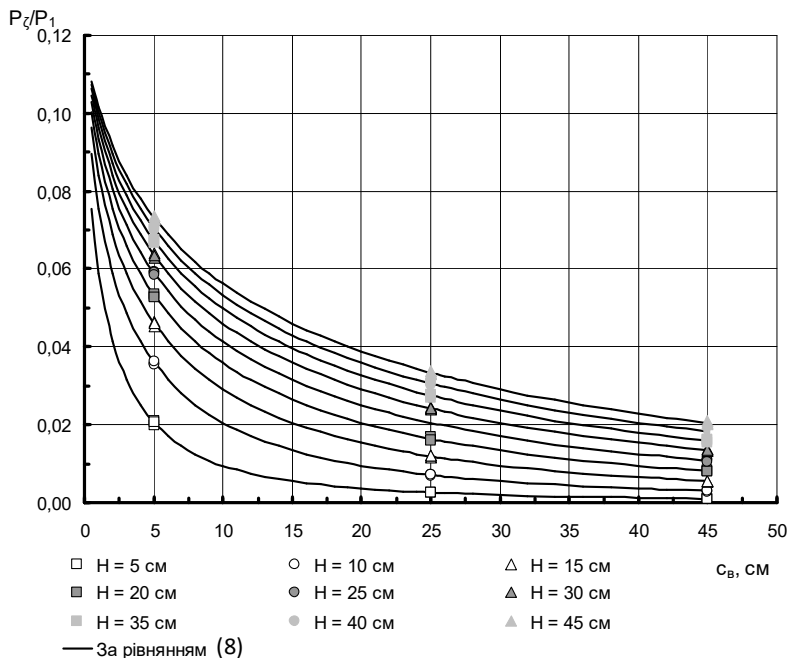


Рис. 2. Графіки залежності  $P_\zeta/P_1 = f(c_\theta, H)$

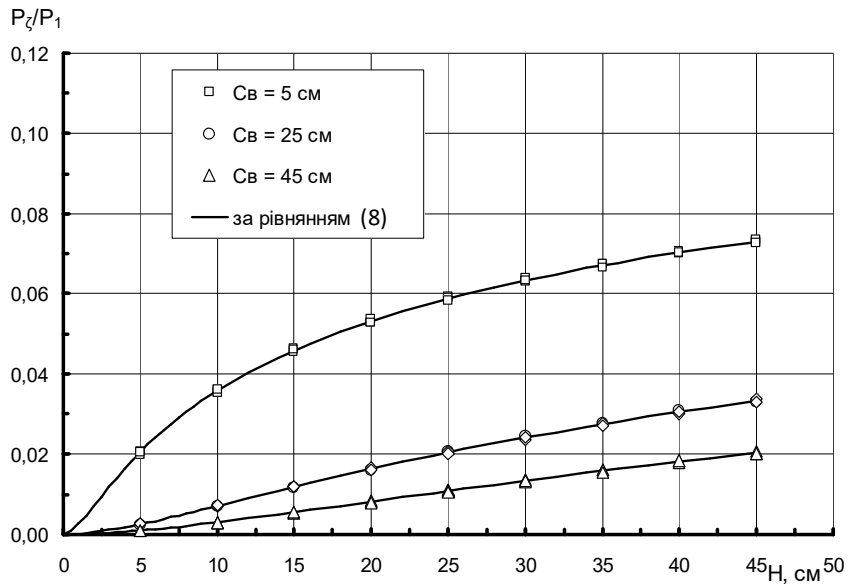


Рис. 3. Графіки залежності  $P_z/P_1 = f(H, c_w)$

Аналіз отриманих графіків на рис. 3 показав, що при збільшенні діючого напору  $H$  сила опору  $P_z$  монотонно зростає. При більших значеннях висоти стінки характер графіка наближається до прямолінійного.

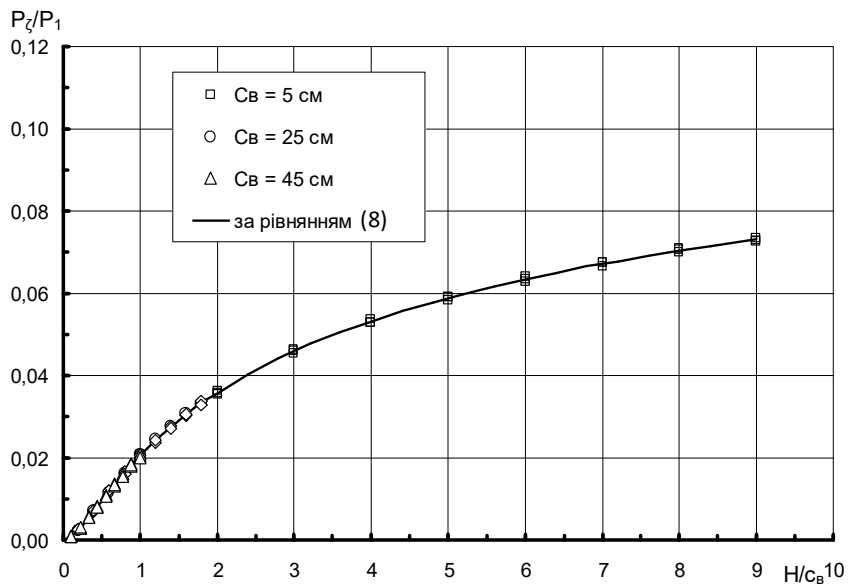


Рис. 4. Графіки залежності  $P_z/P_1 = f(H/c_w)$

Аналіз точок значень приведених експериментальних сил опору  $P_{\zeta}$  залежно від співвідношення  $H/c_B$  (рис. 4) показав, що вони адекватно апроксимуються в безрозмірних координатах універсальним графіком  $P_{\zeta}/P_1=f(H/c_B)$  розрахованим згідно запропонованої залежності (8) і не залежить від висоти стінки. Тому прийняту залежність для визначення сили опору  $P_{\zeta}$  (8) можна рекомендувати і для розрахунку реальних споруд.

**На основі проведених** теоретичних та експериментальних досліджень доведено достовірність прийнятої гіпотези про пропорційність сили опору стисненню потоку втратам напору та доведено адекватність застосування отриманої залежності для її оцінки. Розкрито вплив основних діючих факторів на цю силу опору потоку в межах водозливу з тонкою стінкою, яка виникає внаслідок переформування (деформації) рівномірного потоку в струмину.

1. Хлапук М. М. Удосконалення методу гідравлічного розрахунку пропускної здатності водозливів з тонкою стінкою / М. М. Хлапук, О. В. Безусяк, В. І. Корнійчук // Вісник НУВГП. – 2015. – Вип. 3(71). – С. 118–126.
2. Корнійчук В. І. Дослідження п'єзометричного тиску над порогом водозливу з тонкою стінкою / В. І. Корнійчук // Вісник НУВГП. – Рівне : НУВГП, 2015. – Вип. 4(72). – С. 121–131.
3. Корнійчук В. І. Дослідження п'єзометричного тиску в межах вертикальної стінки водозливу з гострою кромкою / В. І. Корнійчук // Вісник НУВГП. – 2015. – Вип. 3(71). Ч. 1. – С. 127–135.
4. Богомолов А. И. Гидравлика: учебник для вузов / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1965. – 632 с.
5. Bruce R. Munson, Alric P. Rothmayer, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch. Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th Edition / John Wiley & Sons, 2013. – 796 p.

Рецензент: д.т.н., професор Щодро О. Є. (НУВГП)

---

**Khlapuk M. M., Doctor of Engineering, Professor, Korniiichuk V. I., Post-graduate Student, Bezusiak O. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **INVESTIGATION OF THE FLOW CONTRACTION RESISTANCE FORCE WITHIN FREE SUPPRESSED SHARP-CRESTED WEIR**

**The article presents theoretical and experimental studies of the overflow wall height  $c_B$  and head  $H$  influence on the flow contraction**





resistance force within sharp-crested weir resulting from transition (deformation) of the uniform flow to the stream. It`s proved the accuracy of the hypothesis about proportionality of this force to head losses within sharp-crested weir and the adequacy of the obtained dependence for the its evaluation was confirmed. Graphs set out in the article disclose the influence of the main operating factors on the flow contraction resistance force.

**Keywords:** sharp-crested weir, kinetic momentum, linear momentum, piezometric pressure, flow contraction resistance force.

---

**Хлапук Н. Н., д.т.н., профессор, Корнейчук В. И., аспирант, Безусяк А. В., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ ПОТОКА В ПРЕДЕЛАХ СОВЕРШЕННОГО ВОДОСЛИВА С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ**

В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования влияния высоты водосливной стенки и действующего напора на силу сопротивления сжатию потока в пределах водослива с тонкой стенкой, которая возникает в результате переформирования (деформации) равномерного потока в струю. Доказана достоверность гипотезы о ее пропорциональность потерям напора в пределах водослива и адекватность полученной зависимости для оценки этой силы. На графиках раскрыто влияние основных действующих факторов на величину силы сопротивления сжатию потока.

**Ключевые слова:** водослив с тонкой стенкой, количество движения, импульс силы, пьезометрическое давление, сила сопротивления сжатию потока.

---