

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ НАПОРУ В МЕЖАХ ВОДОЗЛИВУ З ТОНКОЮ СТІНКОЮ

**Корнійчук В.І.**, аспірант,  
**Хлапук М.М.**, д.т.н., професор,  
**Безусяк О.В.**, к.т.н., доцент,  
*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне*  
v.i.korniichuk@nuwm.edu.ua

**Анотація.** В статті представлено теоретичні та експериментальні дослідження втрат напору в межах водозливу з тонкою стінкою. Встановлено основні діючі фактори: висота водозливної стінки  $s_e$  та напір  $H$ . Відзначено, що в межах водозливу, внаслідок наявності водозливної стінки, відбувається різке вертикальне стиснення потоку та його переформування в струмину, що призводить до втрат напору. Доведено адекватність застосування формули Хіндса для оцінки величини цих втрат. Приведено рівняння збереження питомої енергії потоку для водозливу з врахуванням втрат напору. На графіках розкрито вплив основних діючих факторів на величину відносних втрат напору.

**Ключові слова:** водозлив з тонкою стінкою, струмина, напір, питома енергія потоку, втрати напору.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА В ПРЕДЕЛАХ ВОДОСЛИВА С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

**Корнейчук В.И.** аспирант,  
**Хлапук Н.Н.**, д.т.н., профессор,  
**Безусяк А.В.**, к.т.н., доцент,  
*Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно*  
v.i.korniichuk@nuwm.edu.ua

**Аннотация.** В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования потерь напора в пределах водослива с тонкой стенкой. Установлены основные действующие факторы: высота водосливной стенки  $s_e$  и напор  $H$ . Отмечено, что в пределах водослива, вследствие наличия водосливной стенки, происходит резкое вертикальное сжатие потока и его переформирования в струю, что приводит к потерям напора. Доказано адекватность применения формулы Хиндса для оценки величины этих потерь. Приведено уравнение сохранения удельной энергии потока для водослива с учетом потерь напора. На графиках раскрыто влияние основных действующих факторов и их отношение на величину относительных потерь напора.

**Ключевые слова:** водослив с тонкой стенкой, струя, напор, удельная энергия потока, потери напора.

## SHARP-CRESTED WEIR HEAD LOSSES INVESTIGATION

**Korniichuk V.I.**, Ph.D. student,  
**Khlapuk M.M.**, Doctor of Engineering, Professor,  
**Bezusyak A.V.**, Ph.D., Associate Professor,  
*The National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*  
v.i.korniichuk@nuwm.edu.ua

**Abstract.** The work is devoted to the sharp-crested weir calculation methods improvement. This can be realized by using mathematical model developed on energy and momentum conservation principles. In order to get energy conservation law within sharp-crested weir we need to study head losses and this article presents theoretical and experimental investigations of the sharp-crested weir head losses. The height of the overflow wall  $c_e$  and head  $H$  are estimated as main operating factors that determine hydraulic weir outbound parameters: threshold depth  $h$  and the specific weir flow  $q$ . The flow moving across sharp-crested weir suffers abrupt vertical contraction and transforms from the steady flow to the nappe. The above mentioned causes sharp-crested weir head losses. To determine these losses, we propose to use Hind's equation that describes similar contraction losses in the channel. Experimental investigations proved Hind's equation application adequacy to evaluate these losses. An energy equation for sharp-crested weir that include head losses is determined. Graphs set out in the article disclose the influence of the main operating factors and their ratio on the fractional head losses.

**Keywords:** sharp-crested weir, nappe, head, specific flow energy, head losses.

**Водозлив з тонкою стінкою** – це гідротехнічна споруда, в якій рух потоку відбувається шляхом переливу через його кромку. За його схемою розраховують шлюзи-регулятори, полігональні й шахтні водоскиди та інші споруди з автоматичним скидом води. Цей водозлив є найпростішим видом мірних засобів, який широко використовується у водогосподарській і меліоративній практиці, на каналах та гідротехнічних лабораторіях де необхідна висока точність визначення витрати води [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Значний вклад в теорію руху потоку через водозлив з тонкою стінкою зробили відомі вітчизняні вчені: О. Р. Березинський, Д. І. Кумін, Ф. І. Пікалов, Г. І. Сухомел, М. Д. Чертоусов, Р. Р. Чугаев, В. В. Смыслов, П. Г. Кісільов, А. І. Богомолів так і закордонні: П. Буале, Г. Базен, Д. Френсіс, А. Фтелі, Ф. Стерн, Т. Ребок, К. Кіндсвотер, Р. Картер, К. Сваммі 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, що отримані при дослідженні моделей водозливів малих розмірів при зміні діючих факторів в незначному діапазоні, 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 відрізняються між собою.

Дослідження проведенні різними вченими показали, що існуючі теорії не відображають з достатньою повнотою та точністю усіх явищ характерних для водозливу з тонкою стінкою і, для отримання більш точних та конкретних рішень необхідно отримати таку математичну модель, яка б дозволила ув'язати всі діючі фактори для рішення задачі руху потоку в межах водозливу. Така математична модель може бути побудована на основоположних законах збереження механічної енергії у вигляді рівнянь збереження питомої енергії потоку та зміни кількості руху потоку. Для отримання рівняння збереження питомої енергії потоку необхідно визначити втрати напору в межах водозливу.

**Розрахункова схема** ділянки непідтопленого водозливу з вертикальною тонкою стінкою в призматичному прямокутному руслі з горизонтальним дном наведена на рис. 1. Переріз 1–1 розташовано у верхньому б'єфі на достатній відстані від водозливу, де відсутній вплив кривої спаду вільної поверхні і потік рівномірний. Глибина потоку в цьому перерізі становить  $c_e + H$ , де  $c_e$  – 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.

Енергія потоку в перерізі 1–1 відносно площини порівняння 0–0, що проходить через відмітку дна водозливу (рис. 1), згідно з інтегралом Д. Бернуллі [2] становить:

$$E_1 = c_e + H + \frac{\alpha_1 q^2}{2g(c_e + H)^2}, \quad (1)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт кінетичної енергії в перерізі 1–1.

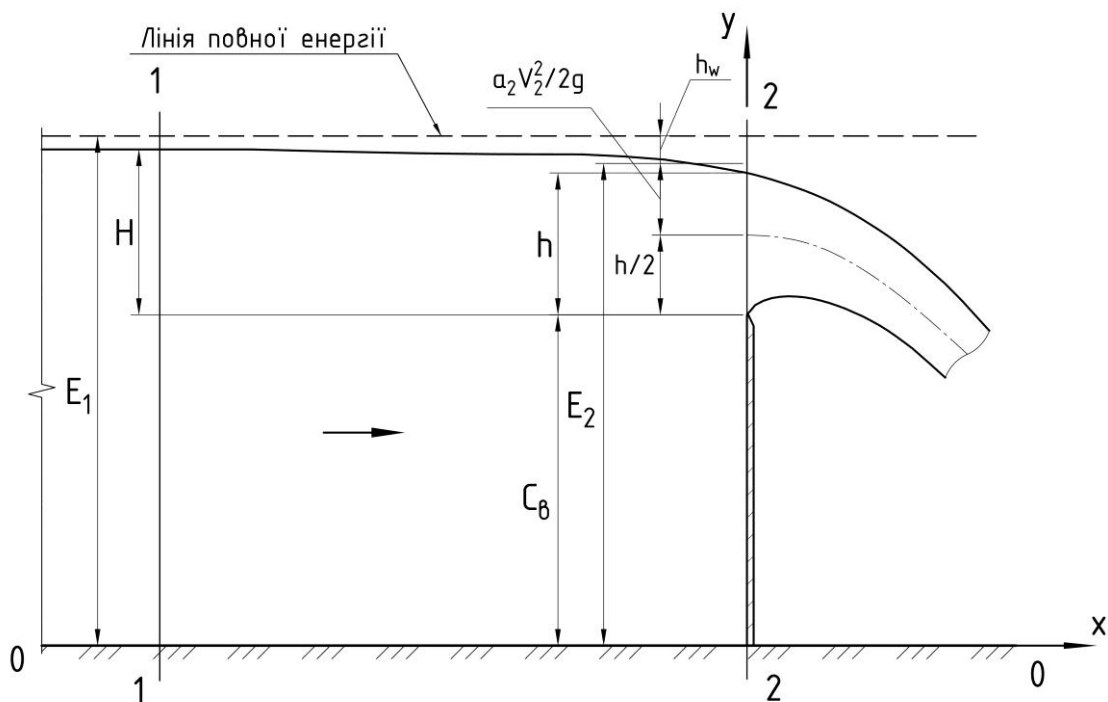


Рис.1. Схема водозливу з вертикальною тонкою стінкою

В межах водозливу відбувається різке вертикальне стиснення потоку та переформування рівномірного потоку в струмину, тому в перерізі 2–2 потік зверху і знизу знаходиться під атмосферним тиском та у зваженому стані, тому його можна розглядати як струмину. Питома енергія струмини в перерізі 2–2 відносно площини порівняння 0–0 становить [3, 4]:

$$E_2 = c_e + \frac{h}{2} + \frac{\alpha_2 q^2}{2gh^2}, \quad (2)$$

де  $c_e + \frac{h}{2}$  – висотне положення осі струмини;  $\frac{\alpha_2 q^2}{2gh^2}$  – кінетична енергія струмини;  $\alpha_2$  – коефіцієнт кінетичної енергії в перерізі 2–2.

Рівняння збереження питомої енергії потоку в межах водозливу, яке враховує втрати напору  $h_w$ , що виникають при вертикальному стисненні потоку та переформування рівномірного потоку (в перерізі 1–1) до вільної струмини (в перерізі 2–2) відносно площини порівняння 0–0 має вид:

$$c_e + H + \frac{\alpha_1 q^2}{2g(c_e + H)^2} = c_e + \frac{h}{2} + \frac{\alpha_2 q^2}{2gh^2} + h_w. \quad (3)$$

Для визначення втрат напору  $h_w$  нами прийнято гіпотезу, що їх можна оцінити формулою Хіндса (I. Hinds) [5], яка описує втрати напору при раптовому звуженні потоку в каналі:

$$h_w = \zeta \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\alpha_2}{h^2} - \frac{\alpha_1}{(c_e + H)^2} \right), \quad (4)$$

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

Враховуючи формулу (4), запропоноване нами рівняння збереження питомої енергії потоку в межах водозливу прийме вид:

$$H + \frac{\alpha_1 q^2}{2g(c_e + H)^2} = \frac{h}{2} + \frac{\alpha_2 q^2}{2gh^2} + \zeta \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\alpha_2}{h^2} - \frac{\alpha_1}{(c_e + H)^2} \right). \quad (5)$$

З метою визначення невідомого коефіцієнта  $\zeta$ , що входить у формулу з визначення втрат напору  $h_w$ , нами виконані експериментальні дослідження в гідротехнічній лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва НУВГП [6]. Умови гідравлічних досліджень впливу основних діючих факторів на параметри водного потоку водозливу з тонкою стінкою наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови експериментальних 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	
$c_e, \text{см}$	$X_1$	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  $H/c_e$  змінювалось в межах 0,11...9,0; числа Рейнольдса  $Re - 17954...764797$ , що відповідають квадратичній зоні опору потоку; числа Фруда  $Fr - 0,003...0,930$ , що відповідають спокійному режиму потоку.

Під час виконання експериментів змінювалась висота вертикальної водозливної стінки згідно наведених в табл. 1 умов, а необхідний діючий напір забезпечували шляхом зміни витрати через водозлив. Матрицю дослідження впливу діючих факторів на осереднені значення вихідних параметрів потоку, для прикладу при висоті стінки  $c_e = 25 \text{ см}$ , наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця досліджень впливу діючих факторів на втрати напору  $h_w$

Значення факторів				Осереднені дослідні значення параметрів		Розрахункові значення параметрів	
кодовані		натуральні		питома витрата $q$	глибина на порозі $h$	втрати напору $h_w$	
$X_1$	$X_2$	$c_e$	$H$			дослідні (6)	теор. (4)
		<i>см</i>	<i>см</i>	$\text{см}^2/\text{с}$	<i>см</i>	<i>см</i>	<i>см</i>
0	-1	25	5	205,76	4,29	1,63	1,64
	-0,75		10	596,65	8,63	3,25	3,26
	-0,50		15	1134,68	13,05	4,89	4,88
	-0,25		20	1777,11	17,34	6,47	6,49
	0		25	2570,96	21,84	8,12	8,10
	0,25		30	3457,50	26,22	9,73	9,72
	0,50		35	4449,69	30,59	11,34	11,33
	0,75		40	5562,86	35,02	12,98	12,95
	1		45	6705,77	39,19	14,52	14,56
Статистичні параметри							
Дисперсія відтворюваності $\bar{S}_g^2 \cdot 10^4$ при $f_g = 54, \text{см}^2$						285,52	
Дисперсія адекватності $\bar{S}_a^2 \cdot 10^4$ при $f_a = 26, \text{см}^2$						292,50	
Критерій Фішера розрахунковий $\bar{F}_p$						1,025	
Критерій Фішера табличний $F_m$						1,70	
Похибка $\pm \bar{\varepsilon}$ , % при $\zeta = 1,35$						$\pm 1,70$	

За отриманими дослідними значеннями питомої витрати  $q$  та глибини на порозі водозливу  $h$  визначались експериментальні значення втрат напору  $h_w$  для кожної точки плану експерименту згідно формули (3), яку приведено до виду:

$$h_w = H - \frac{h}{2} + \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\alpha_1}{(c_e + H)^2} - \frac{\alpha_2}{h^2} \right). \quad (6)$$

Для перевірки адекватності прийнятої гіпотези визначенні втрати напору  $h_w$  за формулою Хіндса (4) було співставлено з експериментальними даними.

Невідомий в рівнянні (4) коефіцієнт  $\zeta$ , на основі статистичної обробки експериментальних даних, з ймовірністю 95 %, прийнято рівним  $\zeta=1,35$ .

Дослідження впливу діючих факторів: висоти водозливної стінки  $c_e$ , діючого напору  $H$  та їх відношення  $H/c_e$  на втрати напору  $h_w$  виконано за відносними втратами напору  $h_w/E_1$  – відношення втрат напору в межах водозливу до повної питомої енергії потоку в перерізі 1–1

$$h_w/E_1 = h_w / \left( c_e + H + \frac{\alpha_1 q^2}{2g(c_e + H)^2} \right). \quad (7)$$

Відносні втрати напору  $h_w/E_1$  визначено за значеннями втрат напору  $h_w$  отриманих для дослідних даних за рівнянням (6) та теоретичних значень за формулою Хіндса (4).

На рис. 2-4 наведено експериментальні точки значень відносних втрат напору залежно від основних діючих факторів: висоти стінки  $c_e$ , напору  $H$  та їх співвідношення  $H/c_e$ . Суцільною лінією апроксимовані експериментальні точки, графіками побудованими за формулою Хіндса.

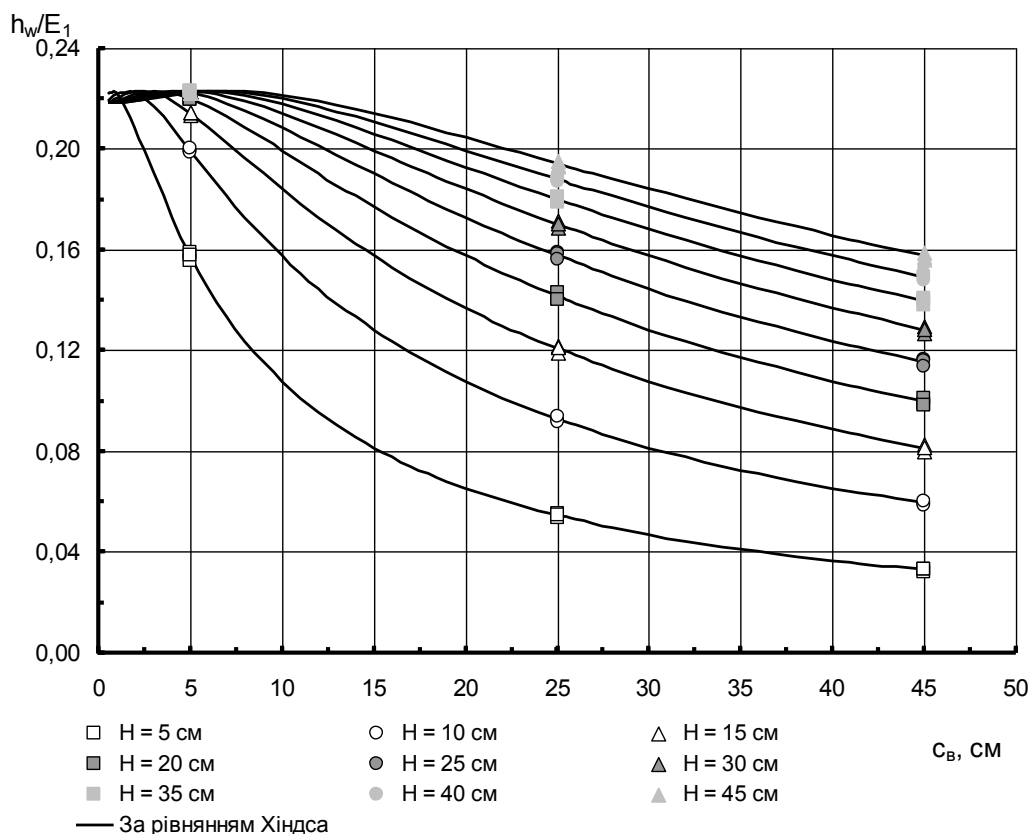


Рис. 2. Графіки залежності  $h_w/E_1 = f(c_e, H)$

Аналіз отриманих графіків на рис. 2 показав, що при малих значеннях висоти стінки відносні втрати напору збільшуються і при певній висоті стінки досягають свого максимального значення, далі ці втрати зменшуються. Характер зміни відносних втрат особливо виражений при малих напорах.

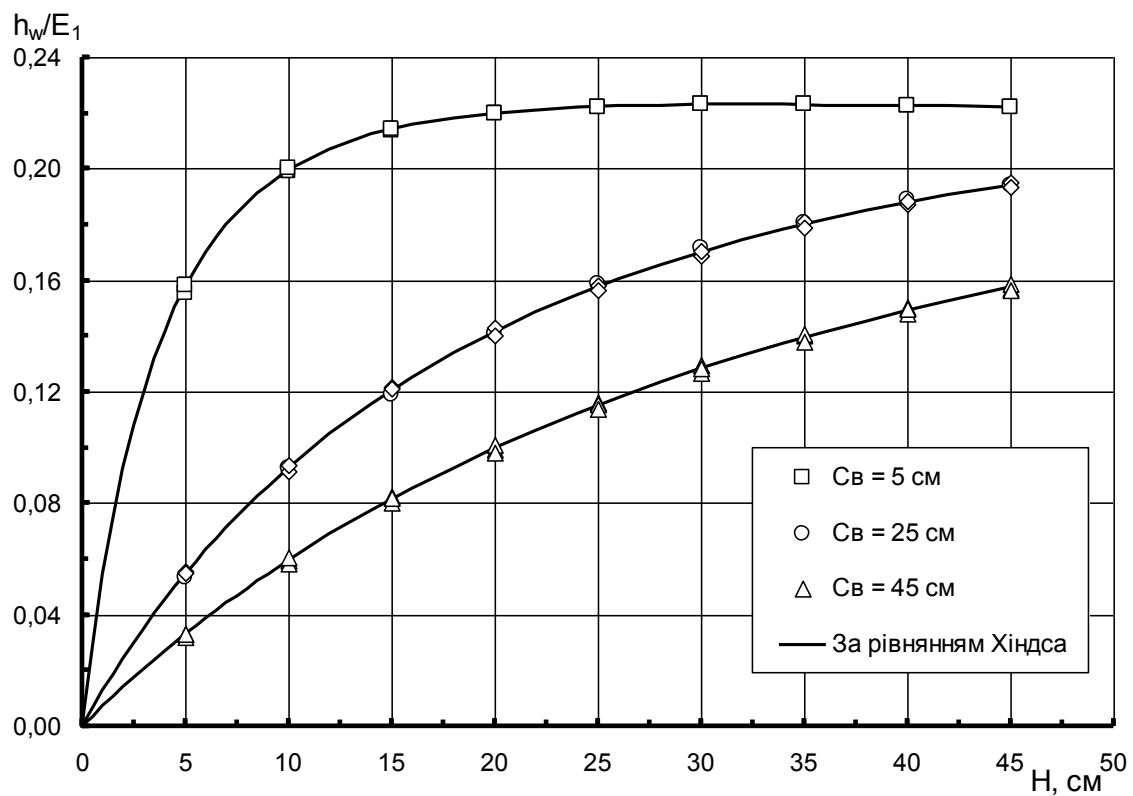


Рис. 3. Графіки залежності  $h_w/E_1 = f(H, c_b)$

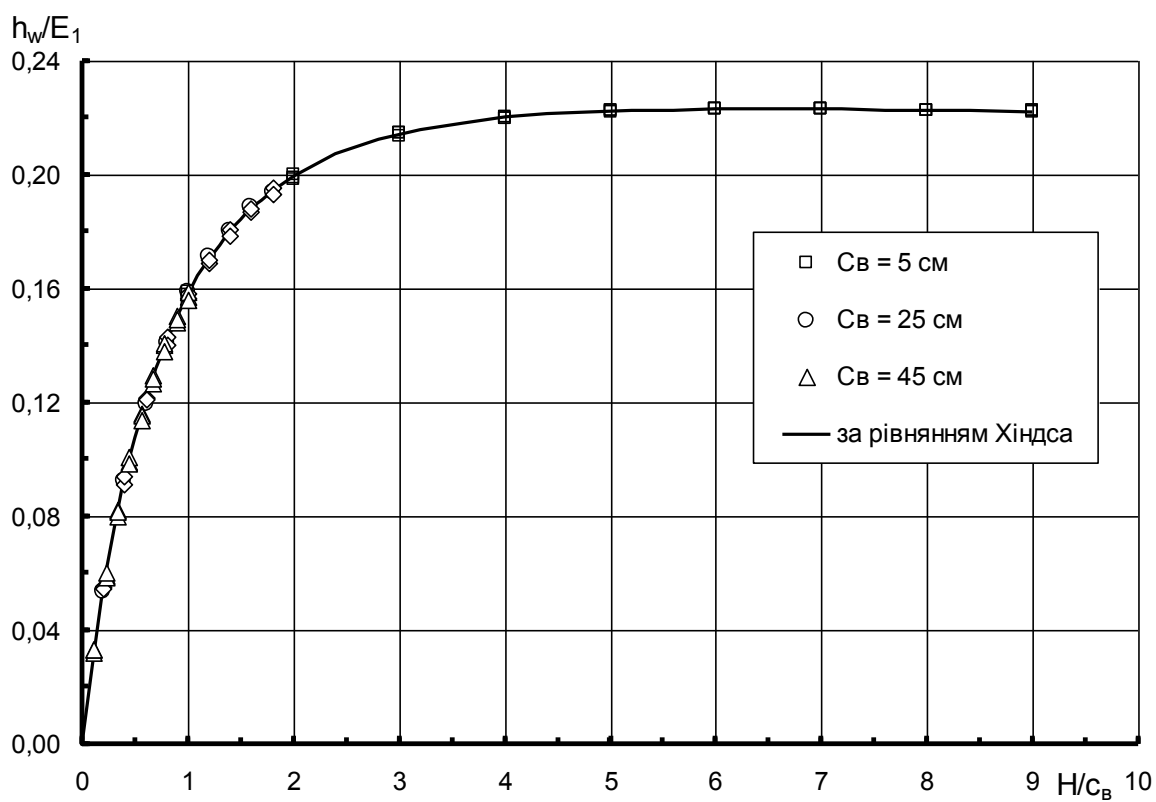


Рис. 4. Графіки залежності  $h_w/E_1 = f(H/c_b)$

Аналіз отриманих графіків на рис. 3 показав, що при збільшенні діючого напору  $H$  відносні втрати монотонно зростають. Характер зміни відносних втрат особливо виражений при незначній висоті стінки ( $c_6=5$  см), тут вони, при малих напорах, різко зростають, а при подальшому його збільшенні – асимптотично наближуються до свого максимального значення.

Аналіз точок значень приведених експериментальних відносних втрат напору залежно від відношення  $H/c_6$  (рис. 4) показав, що вони апроксимуються в безрозмірних координатах універсальним графіком  $h_w/E_1 = f(H/c_6)$  розрахованим за формулою Хіндса, який не залежить від висоти стінки. При відношенні  $0 < H/c_6 \leq 2$  відносні втрати різко збільшуються, при подальшому зростанні  $H/c_6$  вони асимптотично наближуються до свого максимального значення  $h_w/E_1 \approx 22\%$ .

**На основі проведених** теоретичних та експериментальних досліджень отримано рівняння збереження питомої енергії потоку в межах водозливу з врахуванням втрат напору. Доведена адекватність застосування формули Хіндса для оцінки величини втрат напору  $h_w$  та розкрито вплив основних діючих факторів: висоти водозливної стінки  $c_6$ , напору  $H$  та їх відношення на втрати напору відносно повної енергії потоку в перерізі перед водозливом. Отримане рівняння збереження питомої енергії потоку є складовою частиною математичної моделі руху потоку в межах водозливу, що дозволить ув'язати всі діючі фактори при рішення задачі розрахунку водозливу з тонкою стінкою.

### Література

1. Хлапук М.М. Удосконалення методу гідравлічного розрахунку пропускної здатності водозливів з тонкою стінкою / М.М. Хлапук, О.В. Безусяк, В.І. Корнійчук // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2015. – В. 3(71). – С. 118–126.
2. Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
3. Chaudhry Н.М. Open-Channel Flow / Hanif Chaudhry. – Columbia: Springer Science+Business Media, 2008. – 540 p.
4. Willi Н. Н. Wastewater Hydraulics: Theory and Practice / Hager Willi. – Heidelberg: Springer Science+Business Media, 2010. – 664 p.
5. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972. – 316 с.
6. Корнійчук В.І. Дослідження п'єзометричного тиску над порогом водозливу з тонкою стінкою / В.І. Корнійчук // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2015. – В. 4(72). – С. 121–131.

Стаття надійшла 25.04.2017