

Дослідження ефекту підтоплення трапецієвидних водомірів за допомогою автоматизованої системи вимірювань

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.025>

Роман Зайчук

Національний університет водного господарства та природокористування

Рівне, Україна

r.m.zaichuk@nuwm.edu.ua

Анотація – В статті наводяться приклади використання трапецієвидних водомірів у поєднанні з системами автоматизованих вимірювань для визначення фільтраційної витрати через земляні греблі гідроелектростанцій. Описані режими роботи таких водомірів та наведені результати лабораторних досліджень з визначення впливу ефекту підтоплення на пропускну здатність трапецієвидних водомірів.

Ключові слова – трапецієвидні водоміри, лабораторні дослідження, коефіцієнт підтоплення, пропускну здатність, автоматизована система.

I. ВИКОРИСТАННЯ ВОДОМІРІВ НА ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ УКРАЇНИ

Перевагою виробництва електроенергії на гідроелектростанціях є її прогнозованість та регульованість, що може гарантувати гнучкість та надійність роботи Об'єднаної енергетичної системи України. Тому сьогодні вкрай необхідним є стабільний та гармонійний розвиток гідроенергетики як основи енергетичної безпеки держави. Сучасні реалії вимагають від гідроенергетики постійного розвитку – збільшення потужності станцій та, як наслідок, щорічного виробництва електроенергії, екологічності виробництва та інноваційних рішень.

Для підвищення надійності роботи обладнання на ГЕС Дніпровського каскаду розроблені та впроваджуються відповідні заходи з підвищення рівня безпеки гідроспоруд, шляхом впровадження систем моніторингу їх стану та усунення дефектів, виявлених в процесі експлуатації.

Дренажні пристрої повинні забезпечувати ефективний збір та відведення фільтраційних вод з тіла і основи ґрунтової споруди, що сприяє покращенню умов фільтраційного режиму та загальної і місцевої стійкості низових укосів греблі. Відповідно, порушення роботи дренажних пристроїв має наслідком погіршення фільтраційного режиму та може сприяти виникненню як локального, так і більш масштабного оповзання низових укосів, а також виникнення фільтраційних деформацій. Забезпечення надійної роботи дренажу може розглядатися як один із важливих засобів забезпечення надійної роботи гідротехнічних споруд, зокрема, земляних гребель. Моніторинг

пропускну здатності фільтраційних вод як правило здійснюється за допомогою водомірів безнапірних потоків. В сучасних реаліях такі водоміри доповненні автоматичними датчиками вимірювання, найчастіше – це ультразвукові датчики відстані. Автоматичні датчики зведені в загальну систему моніторингу та дають цілодобово дані по фільтраційній витраті на гідроелектростанції.

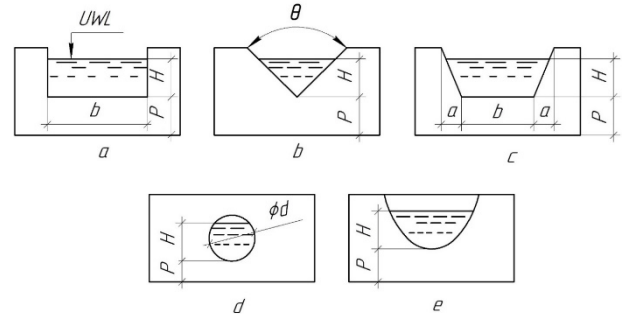


Рисунок 1 – Типи водомірів безнапірних потоків за формою поперечного перерізу: а – прямокутний, б – трикутний, с – трапецієвидний, д – круговий, е – параболічний

В натурних і лабораторних умовах найчастіше використовуються трикутні та трапецієвидні водоміри. В тілі земляних гребель ГЕС влаштована дренажна система, призначена для перехоплення фільтраційних вод і відведення їх в нижній б'єф [1-4]. Ця система складається з трубчастого дренажу, розміщеного вздовж осі греблі та водовипусків, які відводять воду у дренажний канал (рис. 2).

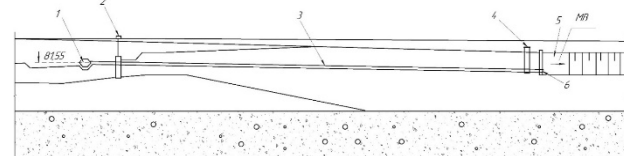


Рисунок 2 – Схема водовипуску дренажних вод: 1 - трубчастий дренаж, 2 - опускний п'єзометр, 3 - водовідвідна труба, 4 - колодязь для визначення рівня води в кінцевій частині водовідвідної труби, 5 - вихідний оголовок водовипуску, 6 - мриний водозлив

II. ТИПИ ГІДРАВЛІЧНИХ РЕЖИМІВ ТРАПЕЦІЄВИДНИХ ВОДОЗЛИВІВ

За типом гідравлічного режиму водозливи поділяються на підтоплені та непідтоплені [9]. При наявності спокійного режиму руху води

непідтопленим вважається водозлив у тонкій стінці, в якого відмітка рівня нижнього б'єфу є нижчою відмітки порогу водозливу (рис. 3). У лабораторних умовах водоміри влаштовують таким чином, щоб вони завжди працювали у непідтопленому режимі. В натурних умовах також прагнуть встановити водоміри так, щоб вони були непідтопленими.

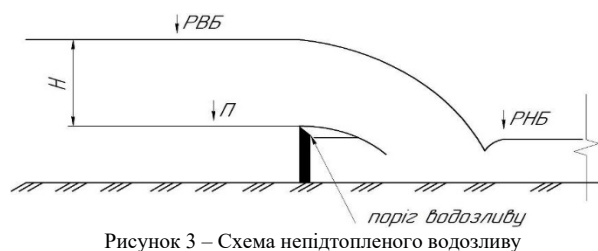


Рисунок 3 – Схема непідтопленого водозливу

Витрату води через непідтоплений симетричний трапецієвидний водомір можна знайти за формулою [1]

$$Q = mB\sqrt{2g}H^{3/2}, \quad (1)$$

В наведеній формулі (1) H – напір на порозі водозливу, m – коефіцієнт витрати водозливу, B – ширина порогу, g – прискорення вільного падіння. При цьому H та B виражаються в метрах, а витрата Q – в m^3/c .

Якщо ширину порога B і напір H виражати в метрах і прийняти $m_b = 0,42$, $g = 9,81$ м/с, то витрата Q виражається в метрах кубічних за секунду, а формула (1) приймає такий вигляд

$$Q = 1,86BH^{3/2}, \quad (2)$$

Розрахункові значення витрати Q , підраховані за формулою (2) наведені в табл.1

Таблиця 1 – Значення витрати Q трапецієвидного водоміру за формулою (2) при $m_b = 0,42$, $m_p = 0,25$, $g = 981$ см/с², $B = 100$ см

H , м	Q , м ³ /с	H , м	Q , м ³ /с	H , м	Q , м ³ /с	H , м	Q , м ³ /с
0,05	0,021	0,14	0,097	0,26	0,247	0,44	0,542
0,06	0,027	0,15	0,108	0,28	0,276	0,46	0,580
0,07	0,034	0,16	0,119	0,30	0,306	0,48	0,617
0,08	0,042	0,17	0,134	0,32	0,337	0,50	0,659
0,09	0,050	0,18	0,142	0,34	0,369	0,60	0,865
0,10	0,059	0,19	0,154	0,36	0,402	0,70	0,880
0,11	0,068	0,20	0,162	0,38	0,436	0,80	1,331
0,12	0,077	0,22	0,192	0,40	0,475	0,90	1,588
0,13	0,087	0,24	0,219	0,42	0,508	1,00	1,860

Якщо $B \neq 1,0$ м., то значення витрати Q у табл.1 необхідно помножити на дійсне значення ширини B , виражене в метрах.

Напір на порозі водозливу вимірюється за допомогою датчиків, а потім автоматично перераховується за відповідною залежністю у витрату. Необхідно підкреслити, що формули (1),

(2), а отже і результати автоматичних вимірювань, є чинними лише для непідтопленого водозливу, коли відмітка рівня води в нижньому б'єфі водозливу є нижчою відмітки його порогу (рис. 1), тобто

$$\downarrow P_{НБ} < \downarrow П \quad (3)$$

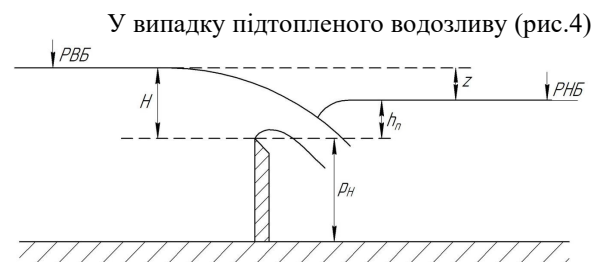


Рисунок 4 – Схема підтопленого водозливу

$$P_{НБ} > \downarrow П, \quad (4)$$

водозлив є підтопленим, а формули (1),(2) містять певну похибку, пов'язану з ефектом підтоплення. При цьому значення такої похибки залежить від ступеня підтоплення водозливу, а датчики суттєво завищують значення фактичної витрати.

III. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ПІДТОПЛЕННЯ

З метою дослідження ефекту підтоплення, мною був проведений експеримент в лабораторії кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування в прямокутному дзеркальному лотку, довжиною 15,6 м, шириною 1 м і висотою 1,2 м (рис. 5) було встановлено трапецієвидний водозлив в тонкій стінці з шириною порогу – 20см, перед і за яким були встановлені ультразвукові датчики для вимірювання рівня води [87] (рис. 5).

Отже, згідно рисунка 5 із напірного бака насосної станції вода по трубопроводу (1) поступала в голову лотка (3), проходила через вимірювальний трикутний водозлив (5), заспокійливу решітку (6), трапецієвидний вимірювальний водозлив (7), затвор (11) та шпигувальний затвор (14), резервуар для відводу води (13), після чого по системі трубопроводів знову поступала в приймальний резервуар насосної станції.

Для зміни глибини води та створення підтоплення в нижньому б'єфі експериментальної установки в кінці лотка використовується затвор та дерев'яні бруски у вигляді шпигувального затвора в кінці лотка (рис. 5).

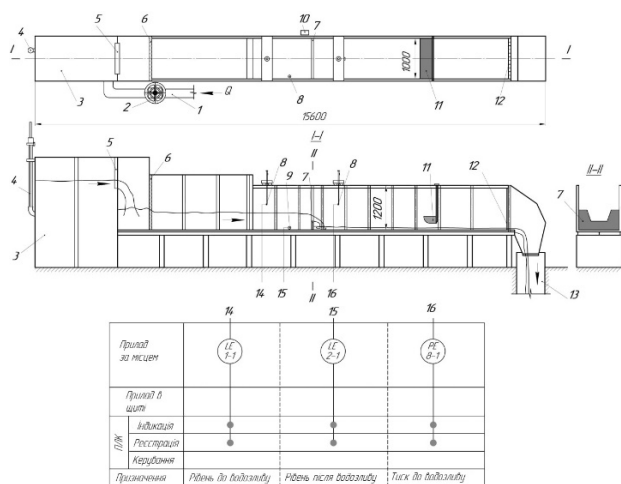


Рисунок 5 – Функціональна схема лабораторної установки: 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – голова лотка, 4 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі, 5 – вимірювальний трикутний водозлив, 6 – заспокійлива решітка, 7 – трапецієвидний вимірювальний водозлив, 8 – датчики рівня води, 9 – датчик тиску, 10 – контролер, 11 – затвор для регулювання глибини в лотку, 12 – шпигцевий затвор, 13 – резервуар для відведення води, 14 – давач відстані до води перед водозливом, 15 – давач відстані до води за водозливом, 16 – давач тиску



Рисунок 6 – Фото експериментальної установки для визначення ефекту підтоплення для водозливів, розташованих на Канівській ГЕС

Автоматичне вимірювання рівня води в лабораторній установці проводиться наступним чином: при зміні рівня води в лабораторній установці давач, який підключено до аналогового входу модуля розширення надсилає сигнал 4...20 мА (в залежності від наповнення резервуару) про відстань до води для контролера. Який перетворює його в цифрове значення та висвітлюється на екрані.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

За допомогою автоматизованої вимірювальної системи в лабораторних умовах було проведено гідравлічне моделювання трапецієвидного водозливу, який працює в підтопленому режимі наступним чином.

- В дослідах ширина порогу водозливу була постійною і становила 20,00 см.
- Фіксувалося значення витрати води на установці Q_{Δ} за допомогою трикутного водоміру, розташованим на початку експериментальної

установки

(рис. 5).

- Створювався підтоплений режим роботи трапецієвидного водоміра в нижньому б'єфі за допомогою різних типів затворів.
- Рівень води перед греблею ($\downarrow ВБ$) та рівень води після греблі ($\downarrow НБ$) вимірювався після формування усталеного потоку в лотку.
- Глибину нижче греблі збільшували декілька разів при тій самій витраті води в лотку Q_{Δ} . Для кожної глибини вимірювались нові значення $\downarrow ВБ$ та $\downarrow НБ$.
- Витрата води Q_{Δ} змінювалась і всі операції повторювались.
- На основі вимірних даних було розраховано напір H , глибину підтоплення $h_{п}$ трапецієвидного водоміра та витрату води $Q_{трап}$ за формулою:

$$Q = 0,00186BH^{3/2} \quad (5)$$

де B – ширину порога, H – напір.

- Знайдена різниця між фактичною витратою на установці та вимірною за допомогою трапецієвидного водоміра ΔQ .

Всі виміряні та розраховані параметри наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень визначення ефекту підтоплення на пропускну здатність трапецієвидного водоміру з шириною порогу 20,0 см

Q_{Δ} , дм ³ /с	$\downarrow ВБ$, см	$\downarrow НБ$, см	H , см	$h_{п.}$, см	$Q_{трап}$, дм ³ /с	ΔQ , дм ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
11.83	30.04	0	10.04	0	11.83	0
	30.25	21.07	10.25	1.07	12.12	0.29
	30.38	22.27	10.38	2.27	12.43	0.6
	30.79	23.99	10.79	3.99	13.14	1.31
	31.66	26.92	11.66	6.92	14.85	3.02
	34.68	33.05	14.68	13.05	20.92	9.09
	35.54	34.56	15.54	14.56	22.86	11.03
	37.27	36.68	17.27	16.68	26.68	14.85
18.53	43.81	43.39	23.81	23.39	43.31	31.48
	33.54	0	13.54	0	18.53	0
	34.23	25.77	14.23	5.77	19.94	1.41
	35.26	28.38	15.26	8.38	22.09	3.56
	35.93	30.94	15.93	10.94	23.64	5.11
	36.24	31.68	16.24	11.68	24.72	6.19
	37.79	34.98	17.79	14.98	28.02	9.49
	40.26	38.79	20.26	18.79	34.03	15.5
31.44	42.06	40.92	22.06	20.92	38.54	20.01
	46.27	46.15	26.27	26.15	49.97	31.44
	39.26	0	19.26	0	31.44	0
	39.28	22.96	19.28	2.96	31.66	0.22
	40.44	30.55	20.44	10.55	34.39	2.95

41.53	34.05	21.53	14.05	37.05	5.61
43.93	39.9	23.93	19.9	43.5	12.06
46.26	43.02	26.26	23.02	50.09	18.65
47.35	44.47	27.35	24.47	53.03	21.59
49.37	47.97	29.37	27.97	59.45	28.01

Аналіз даних таблиці 2 показав, що значення витрат води, виміряні за допомогою трикутного та непідтопленого трапецієвидного водоміра, близькі між собою. Характерно, що різниця між витратою води підтопленого трапецієвидного водоміра, розрахованою за формулою (5), і витратою води непідтопленого трапецієвидного водоміра (див. стовпчик 7 в табл. 2) зростає зі збільшенням глибини підтоплення водоміра (рис. 7).

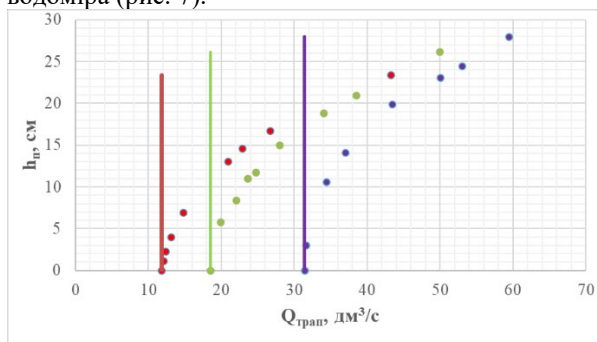


Рисунок 7 – Вплив глибини підтоплення на пропускну здатність трапецієвидного водоміра:

— – витрата непідтопленого трапецієвидного водоміра,
● – витрата підтопленого трапецієвидного водоміра

У випадку наявності підтопленого режиму водоміра робота із визначення його витрати зводиться до виконання таких операцій.

Шляхом безпосередніх вимірювань визначають H на порозі водоміру, а також глибину підтоплення h_p з боку нижнього б'єфу (див. рис. 4). Загальна залежність витрати підтопленого трапецієвидного водоміра має такий вигляд:

$$Q = m\sigma_{\Pi} B \sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (6)$$

де $m=0,42$ – витратний коефіцієнт,
 σ_{Π} – коефіцієнт підтоплення (див. нижче),
 B – ширина порогу водоміра,
 $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння,
 H – напір на порозі водоміра.

У формулі (6) використані величини мають такі розмірності: $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$; $[B] = \text{м}$; $[g] = \text{м}/\text{с}^2$; $[H] = \text{м}$.

Відомо, що коефіцієнт підтоплення трапецієвидних водомірів Чіполетті визначається такою залежністю:

$$\sigma_{\Pi} = f\left(\frac{h_p}{H}\right) \quad (7)$$

З таблиці 2 видно, якщо не враховувати вплив коефіцієнта підтоплення, то розраховані значення витрати за формулою (2) будуть набагато перевищувати реальні значення. При цьому, найбільше відхилення спостерігається при невеликих витратах і сягало більше 270%.

Таким чином, загальна крива $\sigma_{\Pi} = f(h_p/H)$ для трапецієвидних водозливів, зображена на рис. 8.

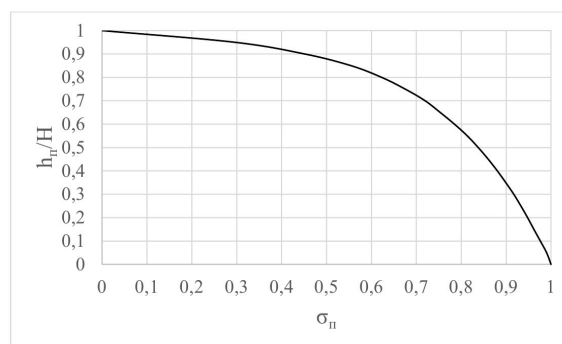


Рисунок 8 – Крива $\sigma_{\Pi} = f(h_p/H)$ для трапецієвидних водозливів з шириною порогу – 20см.

З врахуванням наведеною інформації остаточно розрахована залежність пропускну здатності підтоплених трапецієвидних водомірів матиме вигляд:

$$Q = 1,86B\sigma_{\Pi}H^{3/2} \quad (8).$$

V. ВИСНОВКИ

1. Формула (2) для визначення витрати трапецієвидного водозливу без врахування ефекту підтоплення дає похибку до 270% у розглядуваному діапазоні витрат.

2. Для отримання достовірних значень витрат трапецієвидних водомірів, які працюють в підтопленому режимі, необхідно враховувати ефект підтоплення.

3. Рекомендується визначити витрату на трапецієвидних водомірах за формулою (8), яка враховує ефект підтоплення водомірів з боку нижнього б'єфу.

4. Коефіцієнт підтоплення трапецієвидних водомірів можна визначити за кривою $\sigma_{\Pi} = f(h_p/H)$, показаною на рис. 8.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] ДБН 13.2.4-2:2014 Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення. – К. – 2014.
- [2] ДБН 13.2.4-3:2010 Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. К., Міністерство регіонального розвитку і будівництва України. 2010. 40 с.
- [3] ДБН В. 1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К. 2018.
- [4] ДБН В.2.4-3:2010 Гідротехнічні споруди. Основні положення - К., 2011. 39 с.
- [5] Korn, G. A. and Korn, T. M., Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, 2nd Edition, Dover Publications, New York, 2000.
- [6] Boiten W. Flow measuring structures. Rapport. Landbouwniversiteit, Vakgroep Waterhuishouding; No. 42, 1993, 27 p.
- [7] Description of Ultrasonic sensor UB800-18GM40-I-V1 https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_186.htm?view=productdetails&productid=39580.
- [8] Справочник по гидравлике. Под ред. Большакова В.А. К.: Вища школа. 1984. 343