

УДК 681.121/532.57

Волинська Я.В.

ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ, Україна

ІТЕРАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТО-НАПІРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОМІРНИХ ЛОТКІВ

Volins'ka Ja.

SE "Ukrmetrteststandard", Kyiv, Ukraine

THE ITERATIVE APPROACH TO DETERMINING THE STAGE-DISCHARGE RELATIONSHIP OF FLUMES

Актуальним є підвищення точності вимірювання об'ємної витрати та об'єму води на водогосподарських і гідромеліоративних системах, що реалізується шляхом подальшого розвитку теоретичної бази визначення витрати за допомогою водомірних лотків, враховуючи реальні умови їх експлуатації. Аналізується узагальнений алгоритм розрахунку витратної характеристики водомірних лотків різної просторової конфігурації, що ґрунтується на теорії критичної глибини. Проведено уточнення коефіцієнтів витрати та швидкості, які функціонально залежать від рівня заповнення лотка і визначаються методом послідовних ітераційних операцій. Наведено результати уточнення витрато-напірної характеристики лотка Вентури. Проведено аналіз та здійснено порівняння витратних характеристик стандартизованого лота Вентури, які отримано із використанням узагальненої залежності витрати від напору, та ітераційним методом за уточненими коефіцієнтами витрати і швидкості.

Ключові слова: об'єм та об'ємна витрата, водомірний лоток, витрато-напірна характеристика, відкритий канал, вимірювання

Вступ. Постановка проблеми

Систематичний і точний облік води на водогосподарських та гідромеліоративних системах є головною умовою її раціонального використання. У зв'язку із постійним зростанням вартості енергоресурсів, надзвичайно важливим стає питання приладного обліку не тільки водоспоживання, а й водовідведення. Актуальним є технічне оснащення вузлів обліку стічних вод, результати вимірювання якими в подальшому використовуються для комерційних розрахунків [1]. Мешканці, підприємства та організації оплачують послуги водовідведення пропорційно об'єму води, що відводиться. Комерційні розрахунки за водовідведення здійснюються на підґрунті опосередкованих даних, які визначаються шляхом зіставлення об'єму стоків з об'ємом водоспоживання, які, в наслідок технологічних та побутових особливостей, можуть значно відрізнятися. Виходячи із цього, організація реального приладного обліку стічних вод на сьогодні є важливим завданням [2, 3].

У зв'язку із постановкою на комерційну основу розрахунків за водокористування і водовідведення, нині гостро стоїть проблема технічного оснащення вузлів визначення об'єму та об'ємної витрати у відкритих каналах, а також їх метрологічного забезпечення [4].

Постановка задачі

На сьогодні при визначенні витрати рідини у відкритих каналах використовується ряд опосередкованих методів вимірювання, які несуть у собі похибки як приладів так і самих методів [4, 5]. Пріоритетним напрямом коректного метрологічного забезпечення вимірювальних систем для відкритих потоків є підвищення рівня теоретичної бази по кожному з існуючих методів вимірювань і врахування усіх реальних умов експлуатації приладів обліку при визначенні витрато-напірної характеристик та похибок вимірювання.

Методи та технічні засоби вимірювання витрати у відкритих каналах

Залежно від експлуатаційних та гідравлічних умов плинності рідини, вимог щодо точності обліку, на практиці використовують русловий, гідравлічний, електродинамічний та акустичний методи вимірювання параметрів водного потоку [2]. Найбільшого поширення на сьогодні отримали русловий метод, що ґрунтується на використанні стійкої функціональної залежності величини витрати від рівня води у певному поперечному перетині русла, та гідравлічний, що ґрунтується на використанні тарованої гідротехнічної споруди або спеціальної стандартизованої гідрометричної споруди чи пристрою (водозливи, водомірні лотки, звужуючі пристрої та ін.) [6].

Вузли обліку води у відкритих мережах складаються із спеціальної гідротехнічної споруди (водозлив, водомірний лоток тощо), що є первинним перетворювачем гідравлічних характеристик потоку до вигляду, зручного для їх реєстрації засобами вимірювання, та додаткового обладнання для автоматизації і диспетчеризації вимірювального процесу (рис.1). Зазвичай в таких системах в якості вимірювальних пристроїв використовують датчики рівня, що базуються на певному фізичному ефекті (ультразвукові, емнісні, поплавкові, манометричні тощо).

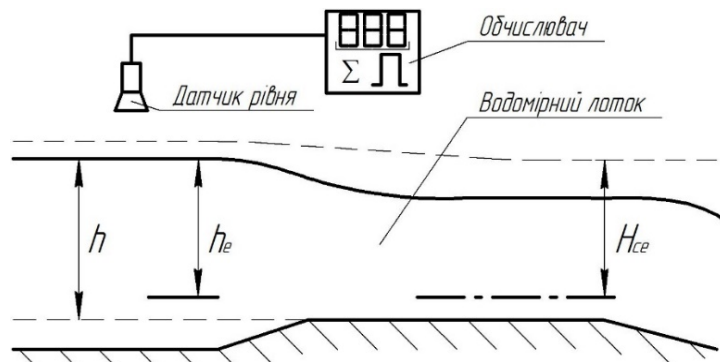


Рис. 1. Схема вузла обліку води із використанням водомірного лотка

Методи вимірювань витрати і об'єму рідини за допомогою лотків відносяться до опосередкованих методів. Витрата рідини при незатопленому (вільному) витіканні пропорційна напору відносно дна лотка. Значення об'єму рідини, що пройшла по каналу, отримують шляхом інтегрування значень витрати за певний проміжок часу [6].

Загальне рівняння витрати

Для виведення рівняння вільного витікання рідини крізь обтічні конструкції може бути застосована теорія критичної глибини, яка доповнюється емпіричними даними [7].

Питома енергія E потоку у відкритому каналі виражається рівнянням

$$E = \beta d + \frac{\alpha \bar{v}^2}{2g}, \quad (1)$$

де d – рівень заповнення лотка; \bar{v} – середнє значення швидкості потоку у поперечному перетині; α – коефіцієнт корекції кінетичної енергії, що враховує неоднорідність розподілу швидкостей; β – коефіцієнт, що залежить від середньої кривизни ліній обтікання.

Основне рівняння витрати для лотка можна отримати із загального рівняння енергії [7]

$$E = d + \frac{\bar{v}^2}{2g} = d + \frac{Q^2}{2gA^2},$$

де Q – об'ємна витрата; A – площа поперечного перетину потоку; g – прискорення вільного падіння.

Враховуючи рівняння нерозривності потоку $Q = A\bar{v}$, з виразу (1), отримаємо залежність, що описує його питому енергію

$$E = \beta d + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}. \quad (2)$$

При мінімальному значенні питомої енергії для певної величини витрати, рівня заповнення лотка d і змоченого периметру A , який безпосередньо пов'язаний з d для будь-якого заданого поперечного перерізу, створюється критичний потік. При диференціюванні виразу (2) по рівню заповнення лотка для критичного режиму витікання отримуємо вираз, при якому питома енергія буде мінімальною

$$Q^2 = \frac{\beta g A_c^3}{\alpha w_c}, \quad (3)$$

де w_c – ширина поверхні води.

За певних умов (рівномірний розподіл швидкостей, співвідношення ширини підвідної частини до ширини горловини 1,5) коефіцієнтами α та β можна знехтувати. Рівняння витрати (3) набуває вигляду

$$Q = \sqrt{\frac{g A_c^3}{w_c}}, \quad (4)$$

де індекс c означає, що розрахунки здійснюються у ділянці лотка із критичним потоком.

Узагальнюючи рівняння (4), з метою його застосування для лотків різної форми поперечного перетину вводяться додаткові коефіцієнти і воно набуває виду

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2g}{3}} C_D C_S C_V b h^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

де C_D – коефіцієнт витрати, що враховує властивості потоку, відмінні від ідеальних умов, а також частково ефект примежового шару у звуженій частині лотка; C_S – коефіцієнт форми, що враховує ефект потоку із формою поперечного перетину, відмінною від прямокутної; C_V – коефіцієнт швидкості, що пов'язує рівень заповнення лотка у підвідній частині h (напір рідини над дном лотка) із загальним напором H , b – ширина лотка у підвідній частині (рис.2).

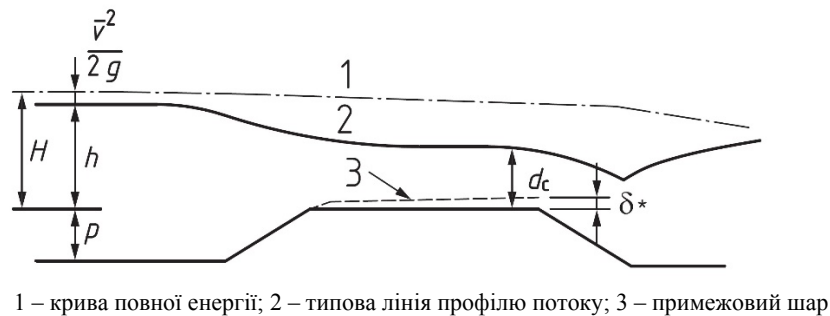


Рис. 2. Параметри профілю потоку рідини крізь звужену частину лотка прямокутної форми поперечного перетину

Коефіцієнт витікання, що враховує ефект примежового шару, визначається за виразом [7]

$$C_D = \left(\frac{D_e}{D} \right) \left(\frac{h_e}{h} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

де D_e , h_e – ефективні діаметр основи лотка та напір рідини відповідно.

Коефіцієнт форми враховує геометричні параметри горловини лотка

$$C_S = f \left(\frac{H_{ce}}{D_e} \right), \quad (7)$$

де H_{ce} – ефективний загальний напір у критичній секції лотка.

Коефіцієнт, що пов'язує рівень заповнення лотка у підвідній частині h із загальним напором H (характеризує співвідношення швидкостей у підвідній та звуженій частинах лотка), можна виразити рівнянням

$$\frac{4}{27} \left(\frac{D_e h_e}{A_a} C_S \right)^2 \alpha C_V^2 - C_V^{\frac{3}{2}} + 1 = 0, \quad (8)$$

Для реєстрації витрати рідини у відкритих каналах використовуються вимірювальні системи, що реалізують метод визначення рівня рідини у стандартизованих лотках Вентурі, Паршала, або просто у колодязях безнапірних трубопроводів при відомих ухилі, формі поперчного перетину каналу і заданому коефіцієнті шорсткості його поверхні [8]. При цьому вважається, що витрата пропорційна рівню з певним постійним коефіцієнтом, визначеним для кожного місця вимірювань. Узагальнена витрато-напірна характеристика має вигляд [6]

$$Q = \tilde{N} (h^\phi + \gamma h^\psi),$$

де \tilde{N} – масштабний коефіцієнт; ϕ , ψ – показники степені; γ – ваговий коефіцієнт.

Коефіцієнти ϕ , ψ , γ отримані напівемпіричним шляхом для водомірних лотків певної форми.

Нині існує значна кількість стандартизованих водомірних лотків, які реалізують певну витрато-напірну характеристику (рис.3) [6].

Уточнення витрато-напірної характеристики

Аналіз виразів (6)-(8) вказує на те, що коефіцієнти витікання, форми та швидкості функціонують залежать від рівня заповнення лотка. Пропонується застосовувати уточнену витрато-напірну характеристику, що реалізується ітераційним методом, для якої за кожного значення рівня заповнення лотка виконується розрахунок усіх коефіцієнтів, які входять у рівняння витрати (7) (табл. 1).

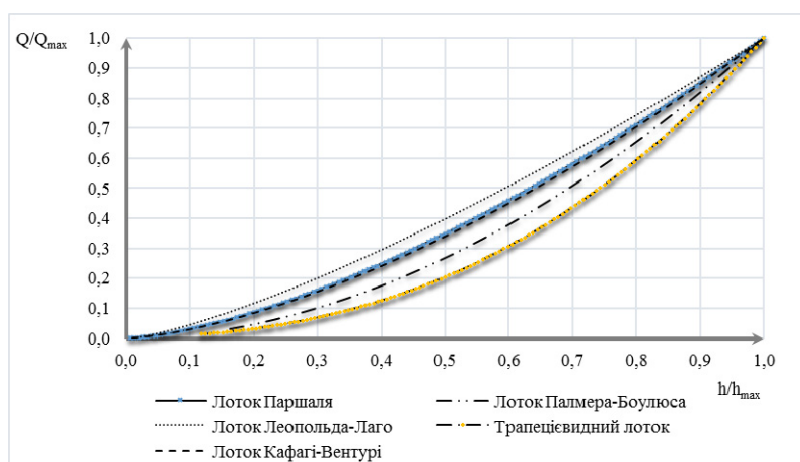


Рис. 3. Узагальнені витрато-напірні характеристики стандартизованих лотків

Таблиця 1

Алгоритм визначення уточненої витрато-напірної характеристики

Крок	Опис	Параметр
1	Визначення площі змоченого периметру підвідної частини лотка	A_a
2	Визначення числового коефіцієнту відносного нахилу стінок звуженої частини лотка (для лотків з прямокутним поперечним перетином звуженої частини $\eta=1$)	η
3	Визначення відносної товщини примежового шару	δ^*/L
4	Визначення коефіцієнту витікання	C_D
5	Визначення коефіцієнту швидкості	C_v
6	Визначення параметру відносної ширини звуженої частини лотка	w_c/b
7	Визначення числа Рейнольдса	Re
8	Уточнення товщини примежового шару через число Re	δ^*
9	Визначення ефективного вимірюваного напору	h_e
10	Визначення ефективного загального напору	H_e
11	Визначення ефективного ширини дна звуженої частини	b_e
12	Визначення коефіцієнту форми	C_S
13	Уточнення коефіцієнту швидкості, використовуючи отримані значення ефективного вимірюваного напору, ефективного ширини дна звуженої частини та коефіцієнту форми	C_v
14	Визначення числа Фруда	Fr
15	Визначення витрати, яка відповідає виміряному рівню заповнення лотка	Q

Метод реалізується n -ю кількістю ітерацій. Критерієм зупинки ітераційного процесу є значення ΔQ , що визначається як різниця значень витрати, отриманих на послідовних ітераціях [7]

$$\Delta Q = Q_i - Q_{i-1}$$

Числове значення ΔQ задається залежно від умов експлуатації вимірювальної системи та нормованих значень метрологічних характеристик, що висуваються до таких систем.

Застосування ітераційного підходу для уточнення витрато-напірної характеристики водомірних лотків із прямокутною формою поперечного перетину

Для лотка із прямокутною формою поперечного перетину алгоритм запропонованого підходу уточнення витрато-напірної характеристики складається із ряду послідовних операцій.

При першій ітерації визначаються такі параметри:

1) площа змоченого периметру для лотка з прямокутним поперечним перетином визначається за формулою:

$$A_a = B(h + p);$$

2) для першої ітерації товщина примежового шару береться сталою та залежить від шорсткості поверхні лотка;

3) коефіцієнт витікання визначається за виразом

$$C_{Di} = \left(1 - 2\eta_i \frac{\delta_i^* L}{L b} \right) \left(1 - \frac{\delta_i^* L}{L h} \right)^{\frac{3}{2}};$$

4) коефіцієнт швидкості для першої ітерації приймається рівним $C_V = 1,05$ [7];

5) визначення ефективного вимірюного напору проводиться за формулою

$$h_e = h - \delta_i^*;$$

6) ефективний загальний напір визначається за формулою:

$$H_e = h_{ei} C_{vi}^{\frac{3}{2}};$$

7) ефективна ширина звуженої частини визначається за формулою:

$$b_{ei} = b - 2\eta_i \delta_i^*;$$

8) для лотків із прямокутним поперечним перетином коефіцієнт форми $C_S = 1$.

9) уточнення коефіцієнту швидкості, використовуючи отримані на першій ітерації значення коефіцієнту форми, ефективного вимірюного напору та ефективної ширини звуженої частини

$$C_{vi} = \left(1 + \frac{4}{27} \alpha \left(\frac{C_{S_{ei}} b_{ei} h_{ei} C_{v(i-1)}}{A_a} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}};$$

10) визначення витрати

$$Q_i = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{g} C_{vi} C_{Si} C_{Di} b h^{\frac{3}{2}}.$$

Для другої та наступних ітерацій:

1) площа змоченого периметру для лотка із прямокутним поперечним перетином визначається за формулою

$$A_a = B(h + p);$$

2) визначається уточнене значення товщини примежового шару δ_i^* ;

3) коефіцієнт витікання визначається за формулою

$$C_{Di} = \left(1 - 2\eta_i \frac{\delta_i^* L}{L b} \right) \left(1 - \frac{\delta_i^* L}{L h} \right)^{\frac{3}{2}};$$

4) значення уточненого коефіцієнту швидкості беремо з попередньої ітерації $C_{v(i-1)}$;

5) визначається параметр ширини потоку у звуженій частині за виразом

$$\frac{w_c}{b} = 1,599 \frac{H}{b} + 0,8849.$$

6) визначається значення числа Рейнольдса за формулою

$$Re_i = \frac{L}{\nu} \left(\frac{g Q_i - 1}{w_{ci}} \right)^{\frac{1}{3}};$$

7) уточнюється товщина примежового шару, використовуючи значення числа Рейнольдса, отримане на попередній ітерації [9];

8) визначення ефективного вимірюного напору здійснюється за виразом

$$h_{ei} = h - \delta_i^*;$$

6) ефективний загальний напір визначається за формулою

$$H_{ei} = h_{ei} C_{vi}^{\frac{3}{2}};$$

7) ефективна ширина звуженої частини визначається за виразом

$$b_{ei} = b - 2\eta_i \delta_i^*;$$

8) визначення коефіцієнту форми C_S . Для лотків з прямокутним поперечним перетином $C_S = 1$.

9) уточнення коефіцієнту швидкості, використовуючи отримані на першій ітерації значення коефіцієнту форми, ефективного вимірюного напору та ефективної ширини звуженої частини

$$C_{vi} = \left(1 + \frac{4}{27} \alpha \left(\frac{C_s b_e h_e C_{v(i-1)}}{A_a} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}};$$

10) визначення витрати

$$Q_i = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{g} C_{vi} C_{Si} C_{Di} b h^{\frac{3}{2}};$$

11) визначення числа Фруда за формулою

$$Fr_i = Q_i \sqrt{\alpha \frac{w_a}{g A_a^3}};$$

12) проводиться перевірка критерію зупинки ітераційного процесу

$$\Delta Q = Q_i - Q_{i-1}.$$

Для стандартизованого лотка Вентурі із шириною звуженої частини $w=0,267$ м узагальнене рівняння витрати (9) набуде виду [6]

$$Q = 0,059 \left(h^{1,6} - 0,25 h^{1,7} \right). \quad (9)$$

З метою тестування запропонованого алгоритму уточнення витрато-напірної характеристики водомірних лотків різної геометричної конфігурації ітераційним методом, здійснено розрахунок пристрою формування потоку (стандартизований лоток Вентурі) для подальшої реєстрації рівня заповнення у підвідній частині, що є інформативною вихідною величиною для визначення об'єму та об'ємної витрати рідинофазних потоків з вільною поверхнею (табл.2).

Дослідження здійснювалися для лотка Вентурі із такими геометричними параметрами: ширина звуженої частини $w=0,267$ м, ширина підвідної частини $w_a=0,4$ м . Рівень заповнення стандартизованого лотка Вентурі у підвідній частині становив $h=0,6$ м.

Таблиця 2

Результати визначення витрати для лотка Вентурі ($w=0,267$ м, $h=0,6$ м)

Крок	Опис	Позначення	Ітерація				
			1	2	3	4	5
1	Площа підвідного каналу	A_a	0,2400	0,2400	0,2400	0,2400	0,2400
2	Числовий коефіцієнт	η	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
3	Відносна товщина примежового шару	d^*/L	0,0028	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027
4	Коефіцієнт витікання	C_D	0,9774	0,9774	0,9780	0,9780	0,9780
5	Коефіцієнт швидкості	C_v	1,0500	1,1119	1,1259	1,1292	1,1299
6	Параметр нахилу стінок	mH/b		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	Відносна ширина звуженої частини	w_e/b		0,8849	0,8849	0,8849	0,8849
8	Число Рейнольдса ($\times 10^6$)	Re		1,701	1,708	1,710	1,7105
9	Товщина примежового шару	d^*		2,2099	2,2104	2,2106	2,2106
10	Ефективний вимірний рівень заповнення	h_e	0,5977	0,5978	0,5978	0,5978	0,5978
11	Ефективний загальний напір	H_e	0,6175	0,6416	0,6470	0,6482	0,6485
12	Ефективна ширина дна горловини	b_e	0,2625	0,2626	0,2626	0,2626	0,2626
13	Уточнений параметр нахилу стінок	mH_e/b_e	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	Коефіцієнт форми	C_s	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
15	Проміжний параметр	$C_s b_e h_e / A_a$	0,6537	0,6540	0,6540	0,6540	0,6540
16	Уточнений коефіцієнт швидкості	C_v	1,1119	1,1259	1,1292	1,1299	1,1301
17	Витрата	Q	0,2299	0,2328	0,2336	0,23375	0,23379
18	Число Фруда	Fr	0,4046	0,4097	0,4112	0,4114	0,4115
19	Відхилення	ΔQ		0,0051	0,0014	0,0003	0,0001

Витрато-напірні характеристики лотка Вентурі, які отримані із узагальненого рівняння (12) та за допомогою уточненого ітераційного підходу (табл. 2), наведено на рис.4. Похибка визначення витрати за уточненим ітераційним методом і через узагальнене рівняння (12) у верхньому діапазоні сягає до 3% (рис.5).

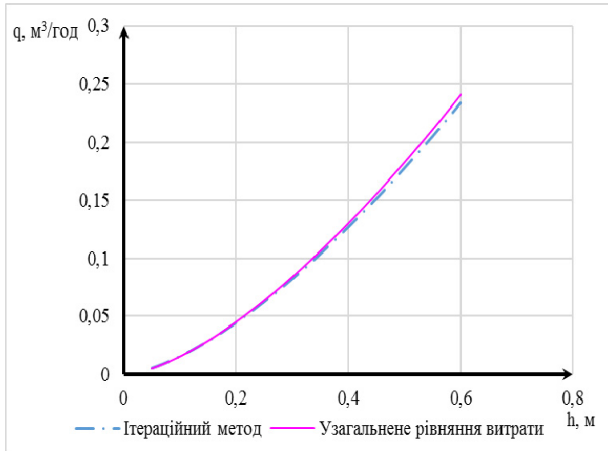


Рис. 4. Витрато-напірні характеристики лотка Вентурі витрати від рівня заповнення лотка

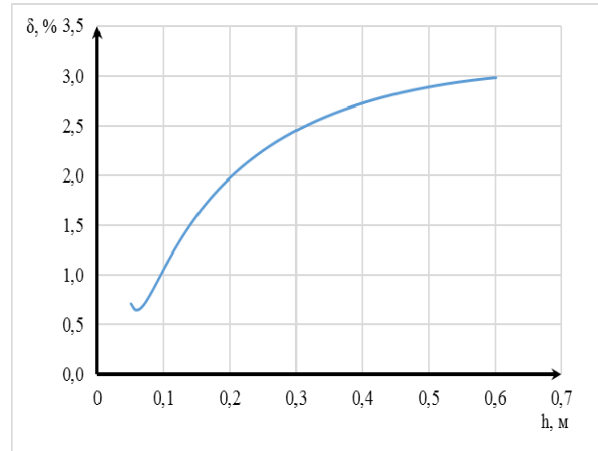


Рис. 5. Залежність приведеної похибки визначення

Оскільки комерційною величиною є не витрата, а об'єм рідини, що пройшла по каналу (стічні води, вода на гідромеліоративних системах), то при інтегруванні витрати по часу для отримання фактичного значення об'єму, похибка вимірювання витрати буде мати значну величину і використання ітераційного підходу до визначення витрато-напірної характеристики водонапірних лотків дає змогу підвищити точність реєстрації об'єму води у відкритих каналах.

Висновки

Одним із підходів до підвищення точності вимірювання витрати у відкритих каналах за допомогою водомірних лотків є уточнення витрато-напірної характеристики. Ітераційний метод дозволяє визначити уточнені коефіцієнти, які входять до рівняння витрати, а саме коефіцієнти витрати та швидкості, а також значення товщини примежового шару, що є функцією числа Рейнольдса.

Отримані дані для стандартизованого лотка Вентурі свідчать, що уточнення витрато-напірної характеристики дозволяє значно підвищити точність визначення витрати рідини у відкритих каналах.

Подальші дослідження будуть направлені на імплементацію запропонованого підходу до уточнення витрато-напірних характеристик водмірних лотків різної просторової конфігурації за різних умов експлуатації.

Анотация. Актуальным является повышение точности измерения объемного расхода и объема воды на водохозяйственных и гидромелиоративных системах, что реализуется путем дальнейшего развития теоретической базы определения расхода с помощью водомерных лотков, учитывая реальные условия их эксплуатации. Анализируется обобщенный алгоритм расчета расходной характеристики водомерных лотков различной пространственной конфигурации, основанный на теории критической глубины. Проведено уточнение коэффициентов расхода и скорости, которые функционально зависят от уровня заполнения лотка и определяются методом последовательных итерационных операций. Приведены результаты уточнения расходо-напорной характеристики лотка Вентури. Проведен анализ и сравнение расходных характеристик стандартизованного лота Вентури, полученных с использованием обобщенной зависимости расхода от напора, и итерационным методом по уточненным коэффициентами расхода и скорости.

Ключевые слова: объем, объемный расход, водомерный лоток, расходо-напорная характеристика, открытый канал, измерение

Abstract. Increasing of the accuracy of measuring of volumetric flow and volume on hydroeconomic and irrigation systems is urgent today. It can be implemented by further development of the theoretical basis for determining the flow using flumes, given the actual conditions of operation. Analyzed the generalized algorithm for calculating discharge characteristics of flumes with different spatial configurations, based on the theory of critical depth. Clarifying of discharge and velocity coefficients, which functionally depend on the gauge in the approach part of flume and determined by successive iterative operations, was made. The results of clarifying stage-discharge relationship of Venturi-flume is given. The comparison and analysis of the discharge characteristics standardized Venturi-flume, obtained using a generalized flow depending on the head, and iterative method for clarified discharge and velocity coefficients, is conducted.

Keywords: volume, volumetric flow, flume, stage-discharge relationship, open channel, measurement

References

1. Pro zatverdžennja Porjadku vedennja deržavnoho obliku vodokorystuvannja, nakaz Minpryrody Ukrainy vid 16.03.2015. No. 78. Available at: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0382-15>.
2. Slobodjan, Je., O. Kovalenko, V. Rozhon, S. Xorjev (2010), *Posibnyk z vedennja vodoobliku na objektax vodohospodars'ko-melioratyvnoho kompleksu* [Manual maintenance of water metering facilities on Water Management and reclamation complex], Ukrvodservis, Kyjiv, Ukraine.
3. Volynska, Ja.V. (2016), "Metody ta texnični zasoby vymirjuvannja vytraty ridyny u vidkrytyx kanalah", *Tezy dop., VIII mižnarod. nauk.-texn. konf. Informatsiyno-komp'yuterni Tekhnolohiyi 2016*, Žytomyr, Ukraine.
4. Trofimov, V.V. (2011), [Custody transfer of wastewater in free-flow channels], *Informatizacija i Sistemy Upravljenja v Promyshlennosti*, no. 5(35), pp. 25–32.
5. Dabrowski, W. and Polak, U. (2012), "Improvements in Flow Rate Measurements by Flume", *Journal of Hydraulic Engineering*, no. 138(8), pp.757-763.
6. Douglas, M. (2013), *Grant ISCO open channel flow measurement handbook*, Lincoln, NE: Teledyne Isco.
7. ISO 4359:2013. Flow measurement structures – Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
8. ISO 748:2007. Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
9. Tang, X. and Knight, D. (2009), "Analytical models for velocity distributions in open channel flows", *Journal of Hydraulic Research*, no. 47(4), pp. 418-428.
10. Rashod zhidkosti v beznapornyx kanalah sistem vodosnabzhenija i kanalizacii, Metodika vypolnenija izmerenij pri pomoshhi standartnyx vodoslivov i lotkov, MI 2406-97 [Fluid flow in free-flow channels, water supply and sewerage systems. Methods of measurement using standard weirs and flumes], VNIIMS, 1997.05.15, Moscow, Russian.

Подана до редакції 31.10.2016