

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства і
природокористування
Навчально-науковий інститут
енергетики, автоматики та водного господарства
Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки

01-04-83М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи
із навчальної дисципліни «ГІДРАВЛІКА»,
розділ «ВОДОЗЛИВИ»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за освітньо-професійною програмою 194
«Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні
технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво,
водна інженерія і водні технології»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІЕАВГ
Протокол № 3 від 26.11.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи із навчальної дисципліни «Гідравліка», розділ «Водозливи» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Токар Л. О. – Рівне : НУВГП, 2024. – 30 с.

Укладач: Токар Л. О., кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Відповідальний за випуск – Волк Л. Р., в.о. завідувача кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Керівник групи забезпечення спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології» – Клімов С. В.

Попередня версія методичних вказівок 083-32.

© Л. О. Токар, 2024
© НУВГП, 2024

ЗМІСТ

ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ВОДОЗЛИВИ	4
1. Загальні поняття	4
2. Гідравлічний розрахунок водозливів	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14. <i>Пропускна здатність водозливу з тонкою стінкою</i>	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15. <i>Витікання через водозлив практичного профілю</i>	16
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16. <i>Витікання через водозлив з широким порогом</i>	23
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА	28
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	30

ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ВОДОЗЛИВИ

1. Загальні поняття

Водозливом називається безнапірний отвір (водозливний отвір) – виріз, зроблений в стінці, через який протікає вода (див. рис.1).

Водозлив може бути зображений як великий отвір з неповним стисканням струмини, що зливається (рис.1).

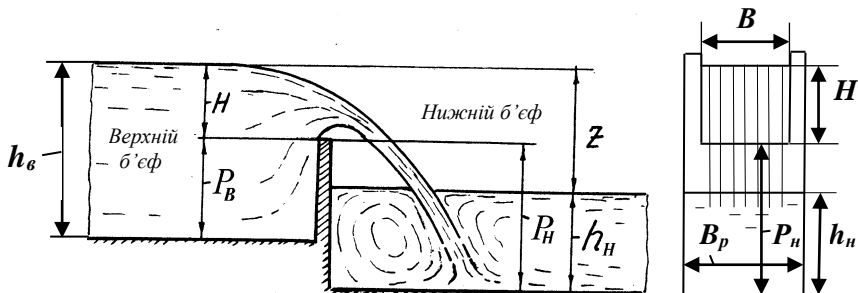


Рис. 1. Схема водозливу

Введемо основні позначення, що застосовуються при дослідженні витікання через водозливи:

H – геометричний напір на порозі водозливу;

b – ширина водозливу по гребеню;

δ – товщина стінки (гребеня, порога) водозливу;

P_v – висота водозливу зі сторони верхнього б'єфа;

P_n – висота водозливу зі сторони нижнього б'єфа;

h_v – глибина води у верхньому б'єфі;

h_n – глибина води у нижньому б'єфі;

Залежно від форми поперечного профілю та товщини водозливу (рис. 2) розрізняють такі водозливи:

а) водозлив з тонкою стінкою, коли товщина стінки водозливу δ є відносно малою по відношенню до напору H і не впливає на форму нижньої поверхні струмини, що переливається через стінку (рис. 2.а), в цьому випадку

$$\delta \leq (0,1 \dots 0,67)H ; \quad (1)$$

б) прямокутний водозлив практичного профілю, коли товщина стінки водозливу δ впливає на форму нижньої поверхні струмини, що переливається через стінку (рис. 2.б), в цьому випадку

$$0,67H < \delta < 2H ; \quad (2)$$

в) водозлив з широким порогом (рис. 2.в), коли

$$2H < \delta < 8H ; \quad (3)$$

г) криволінійний водозлив практичного профілю (рис. 2.г).

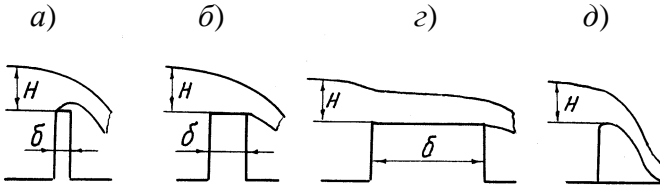


Рис. 2. Схеми водозливів

Залежно від глибини води в нижньому б'єфі h_n розрізняють підтоплені та непідтоплені водозливи (рис.3):

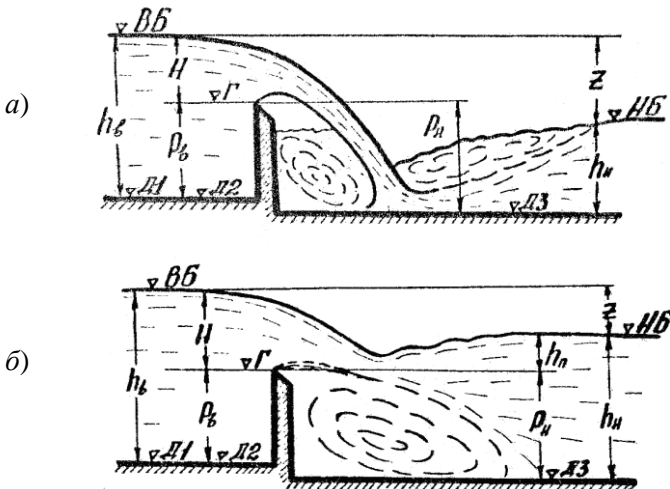


Рис. 3. Підтоплений (а) та непідтоплений (б) водозливи

а) непідтоплений водозлив, коли глибина в нижньому б'єфі h_n не впливає на величину витрати Q або величину напору H (рис. 3.а);

б) підтоплений водозлив, коли глибина в нижньому б'єфі h_n впливає на Q або H (рис. 3.б).

2. Гідралічний розрахунок водозливів

Головним питанням гідралічного розрахунку водозливів є знаходження витрати рідини, що пропускається через водозлив.

В загальному випадку витрата через непідтоплений водозлив визначається за формулою

$$Q = \varepsilon \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}, \quad (4)$$

де ε – коефіцієнт бокового стиснення струмини. При відсутності бокового стиснення $\varepsilon = 1$;

H_0 – повний напір на порозі водозливу

$$H_0 = H + \frac{\alpha V_0^2}{2g}, \quad (5)$$

де V_0 – середня швидкість підходу води до водозливу;

m – коефіцієнт витрати водозливу, який залежить від ряду факторів: типу і геометричних розмірів водозливу, гідралічних параметрів потоку та ін.

Витрату через підтоплений водозлив в загальному випадку можна визначити за формулою

$$Q = \sigma_n \cdot \varepsilon \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}, \quad (6)$$

де σ_n – коефіцієнт підтоплення водозливу рівнем нижнього б'єфа. Для непідтопленого водозливу $\sigma_n = 1$.

В загальному випадку водозлив з тонкою стінкою, а також водозлив практичного профілю вважається підтопленим зі сторони нижнього б'єфу, якщо одночасно виконуються такі дві умови:

1) $P_n < h_n$,

$$2) \left(\frac{z}{P_n} \right) < \left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр}, \quad (7)$$

де z – гідравлічний перепад рівнів верхнього і нижнього б'єсів (рис.3.);

$\left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр}$ – відносний критичний гідравлічний перепад рівнів, що

залежить від типу водозливу і коефіцієнта витрати.

Величини коефіцієнтів σ_n , ε , m і значення $\left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр}$ знаходять із

графіків, таблиць та за формулами, складеними на основі експериментальних досліджень. Більш детально вони будуть розглянуті у наступних лабораторних роботах.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

Пропускна здатність водозлива з тонкою стінкою

14.1. Основні поняття

Витрату рідини через невідтоплений прямокутний водозлив із тонкою стінкою при вільному доступі повітря під струмину знаходять за формулою

$$Q = m_0 \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (8)$$

де m_0 – коефіцієнт витрати, обчислений з урахуванням швидкості підходу.

В проектних розрахунках для водозливів без бокового стиснення при вільному доступі повітря під падаючу струмину, величину m_0 можна визначити за формулою Базена:

$$m_0 = 0,405 + \frac{0,0027}{H} \quad (9)$$

де H – геометричний напір в метрах,

або за формулою Р.Р. Чугаєва, яка застосовується при $P_g > 0,5H$ і

$$H \geq 0,1 \text{ м:} \quad m_0 = 0,4 + 0,05 \frac{H}{P_g} \quad (10)$$

Якщо під падаючу струмину немає вільного доступу повітря, то під струминою утворюється вакуум і коефіцієнт витрати m_0 збільшується. Проте, це збільшення є невизначеним і часто нестійким.

Тому, при проектуванні водозливів з тонкою стінкою, витікання намагаються зробити вільним, тобто забезпечують вільний доступ повітря під струмину.

У випадку підтопленого водозливу з вільним витіканням витрату знаходять за формулою (6), записаною у вигляді:

$$Q = \sigma_n \cdot m_0 \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}. \quad (11)$$

У проектних розрахунках величину коефіцієнта підтоплення визначають за формулою Базена:

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_n}{P_n} \right) \sqrt[3]{\frac{z}{H}}, \quad (12)$$

де h_n – глибина підтоплення водозливу,

$$h_n = h_n - P_n. \quad (13)$$

Водозлив буде підтопленим, якщо виконується критерій (7).

Величину $\left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр}$ можна знаходити з таблиці 14.1.

Величини залежності $\left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр} = f \left(\frac{H}{P_n} \right)$ Таблиця 14.1.

$\left(\frac{H}{P_n} \right)$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр}$	0,92	0,8	0,78	0,75	0,73	0,71	0,70	0,67	0,67	0,67
$\left(\frac{H}{P_n} \right)$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
$\left(\frac{z}{P_n} \right)_{кр}$	0,67	0,68	0,68	0,69	0,71	0,73	0,75	0,78	0,82	0,85

14.2. Склад роботи

1. Визначити дослідним шляхом коефіцієнт витрати і коефіцієнт підтоплення прямого водозливу з тонкою стінкою без бокового стиснення потоку.
2. Визначити значення цих же коефіцієнтів для умов досліду за існуючими довідниковими даними.
3. Зробити оцінку точності проведення досліду.

14.3. Дослідна установка

Схема дослідної установки зображена на рис. 4, де: 1 – скляний лоток; 2 – напірний трубопровід; 3 – засувка; 4 – резервуар у голові лотка; 5 – мірний трикутний водозлив; 6 – п'єзометр; 7 – плоский затвор; 8 – скидний канал; 9 – водозлив з тонкою стінкою; 10 – пересувна каретка з вимірювачем рівнів і глибин – тастер; 11, 12 – тарувальна таблиця мірного трикутного водозливу.

14.4. Порядок проведення дослідів

Дослідне визначення коефіцієнта витрати m_0 і підтоплення σ_n необхідно виконати при двох витратах. Хід виконання досліду при кожній витраті наступний. За допомогою засувки 3 забезпечують необхідний напір H_m на порозі мірного трикутного водозливу 5. Досліди доцільно починати з малих витрат ($H_m = 8 \dots 10$ см) з подальшим їх збільшенням (приріст напору H_m може складати 2-3 см). Величину H_m вимірюють п'єзометром 6 (по нижньому меніску). За допомогою затвора 7 забезпечують необхідну глибину в нижньому б'єфі h_n . Для однієї і тієї ж витрати (спочатку першої, а потім другої) необхідно мати дві глибини h_n . У першому випадку $h_n < P_n$, а в другому $h_n > P_n$, де P_n – висота водозливу зі сторони нижнього б'єфа (рис. 4).

Замір глибин виконують тастером (мірною голкою) 11. Для цього у кожному випадку заміряють відмітку вільної поверхні і відмітку дна лотка 1. Різниця між ними є глибина води у відповідному створі. При $h_n < P_n$ в створі 1-1, розміщеному на віддалі $R_g \geq 4H$ від передньої грані водозливу, тастером 11

заміряють глибину води у верхньому б'єфі h_e . Для цього вимірюють відмітку вільної поверхні ∇BB і відмітку дна лотка ∇D_1 . Тоді

$$h_e = \nabla BB - \nabla D_1. \quad (14)$$

Пересунувши каретку 10 в нижній б'єфі, визначають глибину h_n . Для цього беруть відмітки вільної поверхні ∇HB і дна ∇D_3 . Тоді

$$h_n = \nabla HB - \nabla D_3. \quad (15)$$

Зауважимо, що створ $II-II$ повинен бути розміщений на віддалі P_n від водозливу. Якщо у нижньому б'єфі формується стрибок, то створ $II-II$ необхідно вибрати за стрибком.

Після цього, не змінюючи витрати, за допомогою затвора 7 забезпечують глибину в нижньому б'єфі $h_n > P_n$ і повторюють вимірювання глибин h_e і h_n . Потім переходять до другого досліду, тобто змінюють витрату за допомогою засувки 3.

При новій витраті необхідно всі вимірювання повторити, тобто виміряти напір над гребнем мірного водозливу H_m , глибини h_e і h_n , причому знову потрібно мати $h_n < P_n$ і $h_n > P_n$.

У кінці всіх дослідів необхідно виміряти висоту водозливу P_e і P_n (див. рис. 4.). Для цього тастером II визначають відмітку дна лотка ∇D_2 і відмітку гребня водозливу $\nabla \Gamma$. Тоді

$$P_e = \nabla \Gamma - \nabla D_2. \quad (16)$$

Зауважимо, що в нашому випадку висота водозливу зі сторони верхнього б'єфу дорівнює висоті водозливу зі сторони нижнього б'єфу, тобто $P_e = P_n$.

Позначимо всі гідравлічні параметри, що відповідають випадку невідтопленого водозливу, індексом 1, тобто $h_{e1}, h_{n1}, H_1, h_{n1}, z_1$, а для випадку підтопленого водозливу – індексом 2: $h_{e2}, h_{n2}, H_2, h_{n2}, z_2$.

14.5. Обробка дослідних даних

Користуючись дослідними даними необхідно визначити зміну коефіцієнта витрати m_0 і коефіцієнта підтоплення σ_n залежно від зміни витрати і глибини води в нижньому б'єфі.

Покажемо послідовність обробки дослідних даних для однієї витрати.

1) Знаючи напір над гребнем мірного водозливу H_m , по тарувальній таблиці визначаємо витрату Q (л/с).

2) Для випадку, коли глибина в нижньому б'єфі $h_{н1} < P_n$, знаходимо напір над гребенем водозливу з тонкою стінкою

$$H_1 = h_{e1} - P_e. \quad (17)$$

3) За формулою (8) визначаємо коефіцієнт витрати водозливу

$$m_0 = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H_1^{3/2}}. \quad (18)$$

4) Для цієї витрати, але для випадку, коли $P_n < h_{н2}$, знаходимо гідравлічний перепад

$$z_2 = h_{e2} - P_{н2}. \quad (19)$$

5) Визначаємо відносний перепад $\frac{z_2}{P_n}$ і відносний напір $\frac{H_2}{P_n}$,

де

$$H_2 = h_{e2} - P_e. \quad (20)$$

6) У таблиці 14.1 залежно від $\frac{H_2}{P_n}$ знаходимо величину $\left(\frac{z_2}{P_n}\right)_{кр}$ і

порівнюємо її з обчисленою величиною $\frac{z_2}{P_n}$. Якщо

$$\left(\frac{z_2}{P_n}\right) < \left(\frac{z_2}{P_n}\right)_{кр},$$

то водозлив підтоплений і за формулою (11) знаходимо коефіцієнт підтоплення

$$\sigma_n = \frac{Q}{m_0 b \sqrt{2g} H_2^{3/2}}, \quad (21)$$

де m_0 – коефіцієнт витрати, обчислений за формулою (18), пункт 3.

7) У тій же послідовності як було описано раніше, визначають величину m_0 і σ_n для іншої витрати.

8) Для умов дослідів обчислюють коефіцієнти витрати за емпіричними формулами (9), (10), а коефіцієнт підтоплення – за формулою (12).

Примітка: за 100% брати значення m_0 і σ_n , обчислені за формулами (9), (10), (12).

14.6. Оцінка точності визначення коефіцієнтів витрати і підтоплення

1. Точність визначення коефіцієнта m_0

Для водозливу з тонкою стінкою коефіцієнт витрати знаходять за формулою

$$m_0 = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H_1^{3/2}}. \quad (22)$$

Таким чином $m_0 = f(Q, b, H)$. У цьому випадку максимальна абсолютна похибка може бути обчислена за формулою повного диференціала функції $m_0 = f(Q, b, H)$

$$m_0 = \frac{\partial m_0}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial m_0}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial m_0}{\partial H} \Delta H, \quad (23)$$

де ΔQ , Δb , ΔH – максимальні абсолютні похибки відповідно витрати, ширини водозливу і напору.

Продиференціювавши (22), отримаємо

$$\Delta m_0 = \frac{1}{b\sqrt{2g}H_1^{3/2}} \left(\Delta Q + Q \frac{\Delta b}{b} + \frac{3}{2} Q \frac{\Delta H}{H} \right). \quad (24)$$

З огляду на те, що тарувальна таблиця витрат складена за формулою

$$Q = 1,343H_M^{2,47}, \quad (25)$$

значення ΔQ буде дорівнювати

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial H} \Delta H_M = 1,343 \cdot 2,47 \cdot H_M^{2,47} \cdot \Delta H_M, \quad (26)$$

де величини H_M і ΔH_M – в метрах, а витрата – в м³/с. Більш зручно витрату обчислювати за формулою Томсона, яку можна подати як

$$Q = 4,43H_M^{5/2}, \quad (27)$$

звідки після диференціювання будемо мати

$$\Delta Q = 11H_M^{3/2} \cdot \Delta H_M. \quad (28)$$

У формулах (27) і (28) величини H_m і ΔH_m в дециметрах, а Q і ΔQ – в л/с.

Похибка вимірювання напору H_m за допомогою п'езометра може складати $\Delta H_m = 0,5 \dots 1 \text{ мм}$. Величина максимальної абсолютної похибки при вимірюванні ширини водозливу за допомогою лінійки знаходиться в межах $\Delta b = 1 \dots 2 \text{ мм}$.

Максимальну абсолютну похибку вимірювання напору на гребені водозливу можна оцінити із залежності

$$H = h_g - P_g. \quad (29)$$

$$\text{Звідки} \quad \Delta H = \Delta h_g + \Delta P_g, \quad (30)$$

де Δh_g і ΔP_g – максимальні абсолютні похибки при вимірюванні тастером глибини води у верхньому б'єфі і висоти водозливу. Вважаючи, що $\Delta h_g = 1 \text{ мм}$ і $\Delta P_g = 1 \text{ мм}$, будемо мати $\Delta H = 2 \text{ мм}$.

Використавши залежності (22) і (24), максимальна відносна похибка визначення коефіцієнта витрати m_0 буде дорівнювати

$$\beta_{m_0} = \frac{\Delta m_0}{m_0} \cdot 100\% - \left(\frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{3}{2} \frac{\Delta H}{H} \right) \cdot 100\%. \quad (31)$$

Нехай $H_m = 20 \text{ см}$, $\Delta H_m = 1 \text{ мм}$, $b = 30 \text{ см}$, $\Delta b = 2 \text{ мм}$, $H = 15 \text{ см}$, $\Delta H_m = 2 \text{ мм}$.

За формулами (27) і (28) знаходимо Q і ΔQ

$$Q = 4,43 H_m^2 \sqrt{H_m} = 4,43 \cdot 2^2 \cdot \sqrt{2} = 25 \text{ л/с},$$

$$\Delta Q = 11 \cdot H_m \sqrt{H_m} \Delta H_m = 11 \cdot 2 \sqrt{2} \cdot 0,01 = 0,31 \text{ л/с}.$$

Тоді максимальна відносна похибка визначення коефіцієнта витрати буде рівною

$$\beta_{m_0} = \frac{\Delta m_0}{m_0} \cdot 100\% - \left(\frac{0,31}{25} + \frac{0,2}{30} + \frac{3}{2} \frac{0,2}{15} \right) \cdot 100\% = 3,8\%.$$

2. Точність визначення коефіцієнта підтоплення σ_n

Коефіцієнт підтоплення визначається за формулою

$$\sigma_n = \frac{Q}{m_0 b \sqrt{2gH}^{3/2}}. \quad (32)$$

Тоді максимальна абсолютна похибка величини σ_n буде дорівнювати

$$\Delta\sigma_n = \frac{\partial\sigma_n}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial\sigma_n}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial\sigma_n}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial\sigma_n}{\partial m_0} \Delta m_0. \quad (33)$$

Диференціюючи залежність (32) по Q , b , H , m_0 і підставляючи частинні похідні з рівняння (33), будемо мати

$$\Delta\sigma_n = \frac{1}{m_0 b \sqrt{2gH_1^{3/2}}} \left(\Delta Q + Q \frac{\Delta b}{b} + \frac{3}{2} Q \frac{\Delta H}{H} + Q \frac{\Delta m_0}{m_0} \right), \quad (34)$$

де величина максимальних похибок витрати ΔQ , ширина водозливу Δb , напору ΔH і коефіцієнт витрати Δm_0 беруться із попереднього розрахунку.

Максимальна відносна похибка коефіцієнта підтоплення для умов досліду

$$\beta_{\sigma_n} = \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma_n} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{3}{2} \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta m_0}{m_0} \right) \cdot 100\%. \quad (35)$$

Примітка: Необхідно вказати на відповідність дослідних значень величин m_0 і σ_n величинам цих же коефіцієнтів m_0 і σ_n обчислених за формулами Базена і Р.Р. Чугаєва.

Якщо виявиться, що відхилення дослідних даних будуть більші точності вимірів, тобто максимальних похибок β_{m_0} і β_{σ_n} , то необхідно пояснити причину таких відхилень.

14.7. Контрольні питання

1. Дати класифікацію водозливів по товщині стінки.
2. Записати основну формулу водозливу.
3. Що таке коефіцієнт витрати і від чого він залежить?
4. Вільне і невільне витікання через водозлив з тонкою стінкою. Як зміниться пропускна спроможність водозливу, якщо під падаючу струмину не буде вільного доступу повітря?
5. В якому випадку водозлив з тонкою стінкою буде підтопленим? Назвати критерії підтоплення водозливу.
6. Як зміниться напір на гребені водозливу при пропуску однієї і тієї ж витрати, якщо непідтоплений водозлив стане підтопленим?
7. Які приблизні значення коефіцієнта витрати водозливу з тонкою стінкою.
8. Назвати граничні значення коефіцієнта підтоплення водозливу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

Витікання через водозлив практичного профілю

15.1. Основні поняття

Водозливи практичного профілю залежно від форми поперечного перерізу бувають (рис. 5.):

- а) прямокутні (рис. 5., а);
- б) трапецеїдальні (рис. 5., б);
- в) трикутні (рис. 5., в);
- г) криволінійного профілю, безвакуумні та вакуумні (рис.5.,г).

Найбільшу пропускну спроможність мають водозливи вакуумного криволінійного профілю, яка забезпечується за рахунок утворення вакууму на гребені і деякій частині водозливної поверхні при всіх можливих напорах (рис. 5., г).

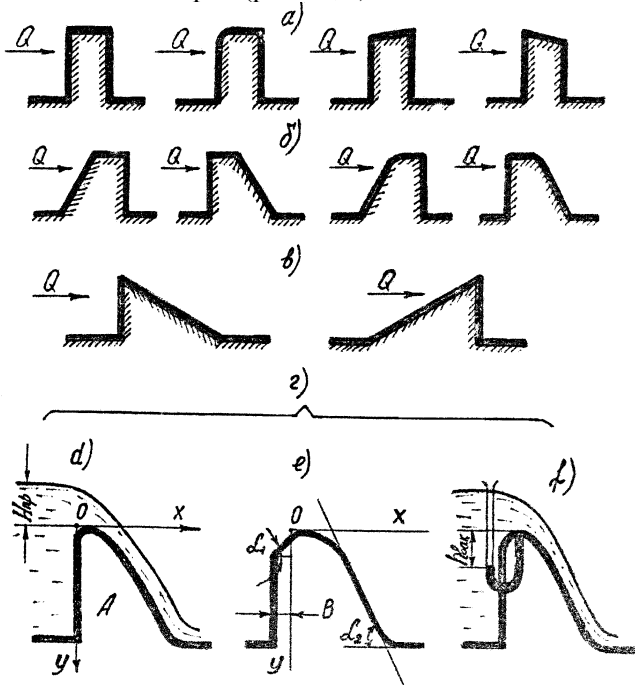


Рис. 5. Водозливи практичного профілю

У лабораторній роботі досліджуватимемо витікання через водозлив практичного безвакуумного криволінійного профілю.

Водозлив безвакуумного криволінійного профілю інколи називають водозливом нормального профілю. Водозлив нормального профілю – це такий водозлив, коли при профілюючому напорі, тобто при напорі H_{np} будується водозливна поверхня, на якій немає ні надлишкового, ні пониженого тиску (вакууму) (рис. 6. а).

Проте, при напорах $H > H_{np}$, тиск на гребені відрізняється від атмосферного.

Якщо $H > H_{np}$ (рис. 6., б), то на гребені буде деякий вакуум.

Якщо ж $H < H_{np}$ (рис. 6., в), то на гребені буде надлишковий тиск.

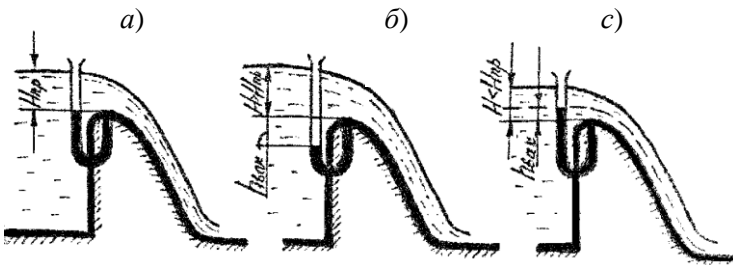


Рис. 6. Водозливи криволінійного профілю

В групі безвакуумних водозливів криволінійного профілю розрізняють водозливи профілю “А” (рис. 5., d) і водозливи профілю “В” (рис. 5., e), які утворюються від профілю “А” за рахунок потовщення водозливної стінки.

Витрата через невідтоплений водозлив практичного профілю без бокового стиснення потоку визначають за формулою

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}, \quad (36)$$

де m – коефіцієнт витрати. За пропозицією М.М. Павловського

$$m = m_{np} \cdot m_{nn} \cdot m_{\phi}, \quad (37)$$

тут m_{np} – коефіцієнт витрати, що відповідає водозливу досліджуваного профілю. Наприклад, для водозливу профілю “А” $m_{np}=0,504$;

m_{nn} – коефіцієнт, що враховує зміну коефіцієнта витрати у випадку, коли напір на гребені водозливу не дорівнює профілюючому напіру, тобто $H \gg H_{np}$. Коефіцієнт m_{nn} називають коефіцієнтом повноти напіру. Величину коефіцієнта m_{nn} для водозливу з профілем “А” можна визначити за формулою М.П. Розанова:

$$m_{nn} = 0,62 + 0,383 \sqrt{\frac{H}{H_{np}}}, \quad (38)$$

де H_{np} – профілюючий напір і H – дійсний напір на гребені водозливу.

m_ϕ – дослідний коефіцієнт, що враховує зміну коефіцієнта витрати залежно від зміни форми водозливу. Через це коефіцієнт m_ϕ називають коефіцієнтом форми. Наприклад, коефіцієнт форми для профілю “В” (див. рис. 5., е) є функцією кутів α_1 , α_2 і товщини стінки δ . Величину m_ϕ знаходять у спеціальних таблицях [3].

У лабораторній роботі ми будемо досліджувати водозлив профілю “А”, для якого $m_\phi=1$.

Витрату через непідтоплений водозлив практичного профілю знаходять за формулою (36).

Із введенням коефіцієнта σ_n , що враховує зменшення пропускної спроможності за рахунок підтоплення водозливу рівнем нижнього б’єфа:

$$Q = \sigma_n \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}, \quad (39)$$

де σ_n – коефіцієнт підтоплення водозливу, який є функцією відносної глибини підтоплення $\frac{h_n}{H_0}$ і коефіцієнт витрати m .

Для водозливу профілю “А” величину коефіцієнта підтоплення можна визначити з таблиці 15.1.

В загальному випадку величину σ_n можна визначити за формулою Г.К. Дерюгіна [4]:

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \left[\left(1 - \frac{h_n}{H_0} \right) \cdot N \right]^2}, \quad (40)$$

де

$$N = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{m}{0,69}\right)^{\frac{2}{5}}}. \quad (41)$$

Таблиця 15.1

Величини залежності $\sigma_n = f\left(\frac{h_n}{H_0}\right)$

$\frac{h_n}{H_0}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
σ_n	1,0	1,0	1,0	0,999	0,990	0,985	0,980	0,975	0,970	0,965
$\frac{h_n}{H_0}$	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,99	1,0
σ_n	0,95	0,93	0,90	0,87	0,82	0,72	0,60	0,40	0,10	0,0

Критеріями підтоплення водозливу практичного профілю є співвідношення (7).

При цьому відносний критичний перепад рівнів $\left(\frac{z}{P_n}\right)_{кр}$ можна приблизно визначити за таблицею 15.2.

Таблиця 15.2

Величини залежності $\left(\frac{z}{P_n}\right)_{кр} = f\left(\frac{H}{P_n}\right)$

$\left(\frac{H}{P_n}\right)$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$\left(\frac{z}{P_n}\right)_{кр}$	0,89	0,86	0,74	0,70	0,67	0,67	0,68	0,70	0,73	0,74	0,77
$\left(\frac{H}{P_n}\right)$	2,25	2,50	2,75	3,0	3,25	3,50	3,75	4,0	4,25	4,80	4,80
$\left(\frac{z}{P_n}\right)_{кр}$	0,83	0,88	0,95	1,03	1,08	1,20	1,30	1,40	1,53	1,68	1,85

15.2. *Склад роботи*

1. Визначити дослідним шляхом коефіцієнт витрати і коефіцієнт підтоплення водозливу практичного профілю криволінійного обрису.

2. Визначити значення цих же коефіцієнтів для умов досліду за існуючими довідниковими даними. В даній роботі коефіцієнт витрати потрібно обчислювати за формулою (45), а коефіцієнт підтоплення знаходити за таблицею 15.1 або за формулою (40).

3. Зробити оцінку точності проведення досліду.

15.3. *Дослідна установка*

Дослідна установка складається із тих же елементів, що і установка для лабораторної роботи № 14 (див. рис. 4.), де на місце водозливу з тонкою стінкою встановлюють водозлив практичного профілю.

15.2. *Порядок проведення дослідів*

Підготовка дослідної установки і вимірювання всіх необхідних гідравлічних і геометричних параметрів виконується так само, як і при проведенні лабораторної роботи № 14. Прийmemo, що всі гідравлічні параметри, що відповідають випадку непідтопленого водозливу, позначатимемо індексом 1, тобто h_{e1} , h_{n1} , H_1 , h_{n1} , z_1 , а для випадку підтопленого водозливу – індексом 2: h_{e2} , h_{n2} , H_2 , h_{n2} , z_2 .

15.4. *Обробка дослідних даних*

Послідовність обробки дослідних даних для довільної витрати.

1) Знаючи напір над гребенем мірного водозливу H_m , по тарувальній таблиці визначаємо витрату Q (л/с).

2) Для випадку коли глибина води в нижньому б'єфі $h_{n1} < P_e$, знаходимо напір над гребенем водозливу практичного профілю

$$H_1 = h_{e1} - P_e. \quad (42)$$

3) Знаходимо повний напір

$$H_{01} = H_1 + \frac{\alpha V_0^2}{2g} = H_1 + \frac{\alpha Q^2}{2g(h_{e1} \cdot b)^2}, \quad (43)$$

де α – коефіцієнт кінетичної енергії ($\alpha=1,1$);

h_{e1} – глибина води у верхньому б'єфі у випадку, коли $h_{n1} < P_n$;

b – ширина лотка, в якому розміщено водозлив.

4) За формулою (36) визначаємо коефіцієнт витрати

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H_{01}^{3/2}}. \quad (44)$$

5) Маючи на увазі, що коефіцієнт витрати $m = m_{np} \cdot m_{nn}$, знаходимо коефіцієнт витрати за довідниковими рекомендаціями

$$m = m_{np} \cdot m_{nn} = 0,504 \left(0,62 + 0,383 \sqrt{\frac{H_1}{H_{np}}} \right), \quad (45)$$

де H_1 – напір визначений за формулою (42), а H_{np} – профільюючий напір досліджуваного водозливу ($H_{np}=10$ см).

6) Із тією ж витратою, але для випадку, коли $P_n < h_{n2}$, знаходимо гідравлічний перепад

$$z_2 = h_{e2} - h_{n2}. \quad (46)$$

7) Приймаємо $z = z_2$ і визначаємо відносний гідравлічний перепад $\frac{z}{P_n}$.

8) Знаходимо геометричний напір над гребенем водозливу

$$H_2 = h_{e2} - h_e. \quad (47)$$

9) Визначаємо повний напір над гребенем водозливу

$$H_{02} = H_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g(h_{e2} \cdot b)^2}. \quad (48)$$

10) Приймаємо $H = H_2$, знаходимо відносний напір $\frac{H}{P_n}$ і за

таблицею 15.2 – величину $\left(\frac{z}{P_n}\right)_{кр}$. Якщо $\left(\frac{z}{P_n}\right) < \left(\frac{z}{P_n}\right)_{кр}$, то водозлив підтоплений і за формулою (39) обчислюємо коефіцієнт підтоплення

$$\sigma_n = \frac{Q}{m \cdot b \sqrt{2g} H_{02}^{3/2}}, \quad (49)$$

де m – коефіцієнт витрати, обчислений за формулою (44), пункт 4.

11) Визначаємо глибину підтоплення

$$h_{n2} = h_{n2} - P_n. \quad (50)$$

12) Приймаємо $h_n = h_{n2}$, знаходимо відносну глибину підтоплення $\frac{h_{n2}}{H_{02}}$ і за таблицею 15.1 або за формулою (40)

визначаємо довідникове значення коефіцієнта σ_n .

13) Приймаємо за 100% довідникові значення коефіцієнтів m і σ_n та обчислюємо відхилення у відсотках дослідних величин m і σ_n від довідникових.

Примітка: оцінку точності визначення коефіцієнтів витрати m і підтоплення σ_n дослідним шляхом можна виконати за методикою, приведеною в лабораторній роботі № 14.

15.5. Контрольні питання

1. Перелічити типи водозливів практичного профілю.
2. Який водозлив називають безвакуумним, а який вакуумним?
3. Що таке профілюючий напір?
4. Як зміниться пропускна спроможність водозливу практичного профілю, якщо дійсний напір над гребнем водозливу буде більшим або меншим профілюючого напору?
5. Чи може безвакуумний водозлив стати вакуумним?
6. Назвати умови, при яких водозлив буде підтопленим.
7. Чому дорівнює коефіцієнт підтоплення водозливу, якщо він не підтоплений?
8. Як визначити витрату водозливу практичного профілю?
9. Назвати приблизні значення коефіцієнта витрати водозливів практичного профілю.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

Витікання через водозлив з широким порогом

16.1. Основні поняття

Залежно від форми поперечного перерізу розрізняють наступні типи водозливу з широким порогом (рис. 7.):

- а) з гострим входним ребром;
- б) зі скошеним входним ребром;
- в) із заокругленим входним ребром;
- г) з похилим входним ребром

Як і водозливи інших типів, водозливи з широким порогом бувають без бокового стиснення і з боковим стисненням потоку (рис. 8.).

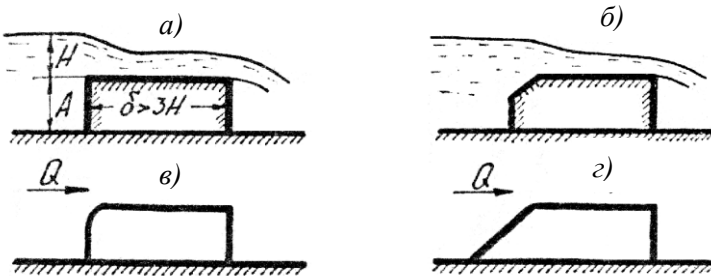


Рис. 7. Типи водозливів з широким порогом

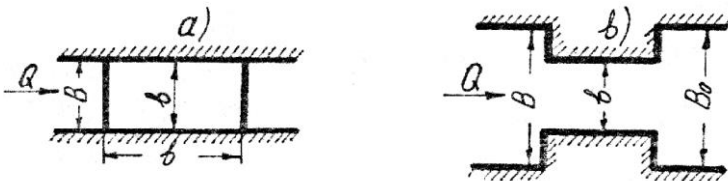


Рис. 8. Водозливи з широким порогом без бокового стиснення (а) та з боковим стисненням (б)

Очевидно, що форма вхідного ребра і бокове стиснення струмин впливають на пропускну спроможність водозливу.

У лабораторній роботі досліджуватимемо водозлив з широким порогом типу *в* (рис. 7., *в*) без бокового стиснення (рис. 8., *а*).

Дослідами доведено, що залежно від глибини потоку у нижньому б'єфі можливі три основні форми протікання води через водозлив з широким порогом (рис. 9.).

Глибина води на порозі водозливу h менше критичної глибини h_k , обчисленої за формулою

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}. \quad (51)$$

У цьому випадку маємо невідтоплений водозлив .

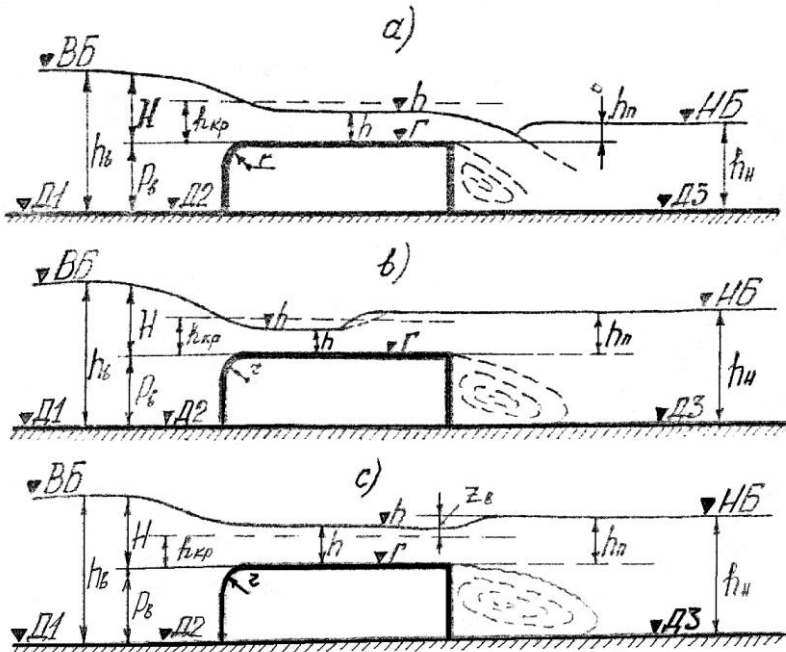


Рис. 9. Основні форми протікання води через водозлив з широким порогом

а) Глибина потоку в нижньому б'єфі h_n така, що настає поступове збільшення глибини h на порозі водозливу. Якщо при цьому відбувається перехід через критичну глибину h_k , то на гребені водозливу виникне гідравлічний стрибок (рис. 9., *b*).

б) Глибина на порозі водозливу $h > h_k$ (рис. 9., *c*). В цьому випадку при пропуску однієї і тієї ж витрати відбувається збільшення глибини h_e у верхньому б'єфі, тобто водозлив стає підтопленим. Критерії підтоплення водозливу з широким порогом будуть розглянуті пізніше. Витрату води через непідтоплений водозлив з широким порогом визначають за формулою (4)

$$Q = \varepsilon \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2},$$

де всі позначення мають той же зміст, що і у формулі (4).

Коефіцієнт витрати m для даного типу водозливу є функцією $m = f\left(\frac{P_e}{H}; \frac{r}{H}\right)$, де параметри P_e , показані на рисунку 9., *a*. Згідно з дослідженнями Д.І. Куміна [4] величину коефіцієнта витрати m для типу водозливу, що розглядається, без бокового стиснення потоку можна знайти за таблицею 16.1.

Таблиця 16.1

Величини залежності $m = f\left(\frac{P_e}{H}; \frac{r}{H}\right)$

m		$\frac{r}{H}$					
		0	0,025	0,05	0,2	0,6	1,0
$\frac{P_e}{H}$	0,0	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385
	0,2	0,366	0,372	0,374	0,377	0,380	0,382
	0,4	0,356	0,365	0,368	0,374	0,377	0,381
	0,6	0,350	0,361	0,364	0,370	0,376	0,380
	0,8	0,345	0,357	0,361	0,368	0,375	0,379
	1,0	0,342	0,355	0,359	0,366	0,374	0,378
	2,0	0,333	0,349	0,354	0,363	0,371	0,377
	6,0	0,322	0,344	0,349	0,359	0,369	0,376
∞	0,320	0,340	0,346	0,357	0,358	0,375	

Витрату через підтоплений водозлив з широким порогом визначають за формулою

$$Q = \varphi_n \cdot b \cdot h \sqrt{2g(H_0 - h)}, \quad (52)$$

де φ_n – коефіцієнт швидкості, що враховує величину гідравлічних опорів на вході підтопленого водозливу з широким порогом.

Таким чином, в загальному випадку коефіцієнт φ_n є функцією тих же параметрів, що і коефіцієнт витрати m , тобто можна написати, що $\varphi_n = f(m)$. Згідно досліджень Д.І. Куміна [4] величину φ_n можна знайти за таблицею 16.2.

Таблиця 16.2

m	0,30	0,305	0,31	0,315	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38
φ_n	0,77	0,79	0,808	0,826	0,84	0,87	0,90	0,93	0,96	0,98	0,99

Глибина на порозі водозливу

$$h = h_n - z_\epsilon, \quad (53)$$

де h_n – глибина підтоплення водозливу (рис. 9., с)

$$h_n = h_n - P_n; \quad (54)$$

z_ϵ – перепад відновлення

$$z_\epsilon = \zeta_\epsilon \cdot h_k, \quad (55)$$

де h_k – критична глибина, що визначається за формулою (51);

ζ_ϵ – відносний перепад відновлення.

За даними Р.Р. Чугаєва [4]

$$\zeta_\epsilon = f(\xi_n; \nu_n) \quad (56)$$

де

$$\xi_n = \frac{h_n}{h_k}, \quad \nu_n = \frac{h_n \cdot b}{h_n \cdot B_0}, \quad (57)$$

тут b і B_0 – відповідно ширина гребня водозливу і ширина русла нижнього б'єфу (рис. 8.).

Вище відзначалося, що водозлив з широким порогом може бути підтопленим, коли глибина на порозі h більша критичної глибини h_k , тобто $h > h_k$. Очевидно, що підтоплення настає тільки при певному перевищенні глибини h над глибиною h_k . Дослідами доведено, що підтоплення буде мати місце, якщо

$$h_n > n \cdot H_0, \quad \text{або} \quad h_n > \frac{n \cdot h_k}{\sqrt[3]{m^2}}, \quad (58)$$

$n = 0,85 \dots 0,75$; h_n – глибина підтоплення, що визначається за формулою (54); m – коефіцієнт витрати; h_k – критична глибина.

16.2. Склад роботи

1. Визначити дослідним шляхом коефіцієнт витрати і коефіцієнт швидкості для водозливу з широким порогом.

2. Визначити значення цих же коефіцієнтів для умов дослідіу за існуючими довідниковими даними. Для умов дослідіу коефіцієнт витрати потрібно знаходити за таблицею 16.1, а коефіцієнт швидкості – за таблицею 16.2.

16.3. Дослідна установка

Установка складається із тих же елементів, що і дослідна установка для лабораторної роботи № 14 (див. рис. 4.), де на місце водозливу з тонкою стінкою встановлюють водозлив з широким порогом.

Проте потрібно мати на увазі наступне. Для того, щоб бути впевненим, що водозлив з широким порогом буде невідтопленим, необхідно у дослідіах створити глибину в нижньому б'єфі $h_n < (h + P_n)$. Збільшуючи глибину в нижньому б'єфі h_n , потрібно стежити за зміною глибини на порозі водозливу h . Якщо вона збільшилась, то відбулось підтоплення водозливу і потрібно при даній витраті виконати вимірювання глибини в нижньому б'єфі h_n , у верхньому б'єфі h_e , на порозі водозливу h .

Приймемо, що всі гідравлічні параметри, що відповідають випадку невідтопленого водозливу, позначатимемо індексом 1, тобто h_{e1}, h_{n1}, H_1, h_1 , а у випадку відтопленого водозливу – індексом 2, тобто h_{e2}, h_{n2}, H_2, h_2 .

16.4. Порядок проведення дослідіів

Підготовка дослідної установки і вимірювання всіх необхідних гідравлічних і геометричних параметрів виконується такими ж інструментами і точно так, як і при проведенні лабораторної роботи № 14.

16.5. Обробка дослідних даних

Послідовність обробки дослідних даних для довільної витрати.

1) Знаючи напір над гребенем мірного водозливу H_m , по тарувальній таблиці визначаємо витрату Q (л/с).

2) Для випадку не підтопленого водозливу визначаємо геометричний напір

$$H_1 = h_{e1} - P_e. \quad (59)$$

3) Обчислюємо повний напір

$$H_{01} = H_1 + \frac{\alpha Q^2}{2g(h_{e1} \cdot b)^2}, \quad (60)$$

де h_{e1} – глибина води у верхньому б'єфі;

b – ширина лотка і водозливу.

4) Використовуючи формулу (4) визначаємо коефіцієнт витрати

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2gH_{01}^{3/2}}}. \quad (61)$$

5) Маючи на увазі функцію $m = f\left(\frac{P_e}{H}; \frac{r}{H}\right)$, знаходимо $\frac{P_e}{H_1}$ та

$\frac{r}{H_1}$ та за таблицею 16.1 визначаємо довідникове значення

коефіцієнта витрати m для даного дослідження.

6) Для цієї ж витрати, але для випадку підтопленого водозливу знаходимо

$$h_{n2} = h_{n2} - P_n, \quad (62)$$

і глибину на порозі водозливу (рис. 9., *c*)

$$h_2 = \Delta h - \Delta \Gamma \quad (63)$$

7) Обчислюємо критичну глибину

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} \quad (64)$$

і порівнюємо її з h_2 , переконуючись при цьому, що підтоплення водозливу відбулось.

Використовуючи нерівність (58), перевіряємо стан водозливу, дізнаючись підтоплений він чи непідтоплений.

8) Використовуючи формулу (52), обчислюємо коефіцієнт швидкості

$$\varphi_n = \frac{Q}{bh_2\sqrt{2g(H_{02} - h_2)}}, \quad (65)$$

де H_{02} – повний напір при глибині потоку у верхньому б'єфі h_{e2} , що відповідає випадку підтоплення водозливу

$$H_{02} = H_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g(h_{e2} \cdot b)^2}. \quad (66)$$

9) Маючи значення коефіцієнта витрати m , обчислене за формулою (61) і, використовуючи таблицю 16.2, знаходимо довідникове значення коефіцієнта швидкості φ_n і порівнюємо його з обчисленим за формулою (65).

10) Приймаємо за 100% довідникові значення коефіцієнтів m і φ_n та обчислюємо відхилення у відсотках дослідних величин m і φ_n від довідникових.

Примітка: оцінку точності визначення коефіцієнтів витрати m і швидкості φ_n дослідним шляхом можна виконати за методикою, приведеною в лабораторній роботі № 14.

16.6. Контрольні питання

1. Який водозлив називають водозливом з широким порогом?
2. Перелічити всі параметри, які впливають на пропускну спроможність водозливу з широким порогом.
3. Назвати критерії підтоплення водозливу з широким порогом.
4. Чи може глибина на порозі водозливу бути рівною критичній глибині?
5. Який водозлив з широким порогом стає підтопленим та як, в цьому випадку, змінюється глибина на порозі по відношенню до критичної?
6. Як знайти витрату водозливу з широким порогом?
7. Назвати приблизні значення коефіцієнта витрати водозливу з широким порогом.
8. Пояснити причини утворення перепаду відновлення підтопленого водозливу з широким порогом.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Технічна механіка рідину і газу» для студентів напрямів підготовки: 6.060103 «Гідротехніка(водні ресурси)», 6.060101 «Будівництво», 6.170202 «Охорона праці» денної та заочної форм навчання / Кравчук Р. М., Токар Л. О. Рівне : НУВГП, 2012. 52 с. 083-1.
2. Силабус навчальної дисципліни «Гідравліка» для здобувачів вищої освіти першого(бакалаврського) рівня, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології», спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології». Рівне : НУВГП, 2022. 19 с. 01-04-20S.
3. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу. Рівне : НУВГП, 2009. 376 с.
4. Рогалевич Ю. П. Гідравліка. К. : Вища школа, 2010. 255 с.
5. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу. РДТУ, 2000. 528 с.
6. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу. Рівне : НУВГП, 2008. 128 с.
7. Константінов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу. К. : Вища школа, 2002. 277 с.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу в тестах і задачах : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2015. 194 с.
2. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2008. 128 с.
3. Рогалевич Ю. П. Гідравліка : підручник. Київ : Вища школа, 2010. 255 с.
4. Науменко І. І. Гідравліка : підручник. Рівне : НУВГП, 2005. 475 с.
5. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу. Рівне : НУВГП, 2009. 376 с.
6. Константінов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу. К. : Вища школа, 2002. 277 с.