

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних і лабораторних занять та виконання
розрахунково-графічної і самостійної робіт
з навчальної дисципліни

«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»

*(для для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво,
водна інженерія та водні технології)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2022

Методичні рекомендації до проведення практичних і лабораторних занять та виконання розрахунково-графічної і самостійної робіт з навчальної дисципліни «Інженерна гідравліка» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. П. Галкіна, Т. О. Шевченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 143 с.

Укладачі: канд. техн. наук О. П. Галкіна,
канд. техн. наук Т. О. Шевченко

Рецензент

В. О. Ткачов, кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очищення вод, протокол № 1 від 01 вересня 2021 р.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 5 |
| 1 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ..... | 6 |
| ЗМ 1 РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ..... | 6 |
| Тема 1 Витікання рідини з отворів і насадок..... | 6 |
| Тема 2 Усталений рух рідини у відкритих руслах..... | 9 |
| Тема 3 Рівномірний рух рідини у відкритих руслах..... | 9 |
| 3.1 Визначення елементів живого перерізу потоку і допустимих середніх швидкостей течії | 10 |
| 3.2 Формула Шезі, коефіцієнт Шезі | 12 |
| 3.3 Перевірка каналу на розмив і замулення | 15 |
| 3.4 Основні залежності для гідравлічного розрахунку каналів..... | 19 |
| 3.5 Розрахунки каналів з неоднорідною шорсткістю..... | 22 |
| Тема 4 Гідравлічно найвигідніший переріз каналу..... | 23 |
| 4.1 Визначення нормальної глибини і середньої в перерізі швидкості потоку..... | 26 |
| 4.2 Розрахунок русел для русел замкнутого перерізу..... | 33 |
| Тема 5 Нерівномірний рух у відкритих руслах..... | 36 |
| Тема 6 Водозливи, їх класифікація..... | 40 |
| 6.1 Пропускна здатність непідтоплених водозливів з тонкою стінкою..... | 40 |
| 6.2 Пропускна здатність підтоплених водозливів з тонкою стінкою..... | 42 |
| 6.3 Пропускна здатність водозливів практичного профілю..... | 43 |
| 6.4 Гідравлічні розрахунки бокових водозливів..... | 43 |
| ЗМ 2 СПОЛУЧЕННЯ Б'ЄФІВ..... | 51 |
| Тема 7 Сполучення б'єфів | 51 |
| 7.1 Визначення найменшої глибини за спорудою в нижньому б'єфі | 51 |
| 7.2 Гідравлічний розрахунок водобійної стінки..... | 54 |
| 7.3 Гідравлічний розрахунок водобійного колодязя..... | 56 |
| Тема 8 Гідравлічний стрибок..... | 61 |
| 8.1 Рівняння стрибкової функції..... | 63 |
| 8.2 Довжина гідравлічного стрибка. Геометричні розміри хвилястого стрибка. Втрати енергії в стрибку..... | 65 |
| ЗМ 3 РУХ ҐРУНТОВИХ ВОД..... | 70 |
| Тема 9 Види фільтрації. Основний закон фільтрації..... | 70 |
| 9.1 Методи визначення коефіцієнта фільтрації..... | 70 |
| 9.2 Приплив води до горизонтальної галереї..... | 73 |
| 9.3 Приплив води до вертикального колодязя..... | 74 |
| 2 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ | 76 |
| 3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ..... | 77 |
| Лабораторна робота №1 Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| Лабораторна робота №2 Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стиснення й опору при витіканні рідини через насадок при сталому напорі..... | 85 |
| Лабораторна робота №3 Визначення гідравлічних параметрів усталеного потоку, що рухається у відкритому руслі..... | 90 |
| Лабораторна робота №4 Визначення гідравлічних параметрів рівномірного потоку, що рухається у відкритому руслі | 97 |
| Лабораторна робота №5 Вивчення форм та параметрів водозливів..... | 103 |
| Лабораторна робота №6 Вивчення фільтраційних властивостей різних типів ґрунтів | 108 |
| 4 САМОСТІЙНА РОБОТА..... | 115 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 120 |
| ДОДАТКИ..... | 121 |
| ДОДАТОК А..... | 121 |
| ДОДАТОК Б..... | 122 |
| ДОДАТОК В..... | 122 |
| ДОДАТОК Г..... | 123 |
| ДОДАТОК Д..... | 123 |
| ДОДАТОК Е..... | 124 |
| ДОДАТОК Ж..... | 127 |
| ДОДАТОК И..... | 128 |
| ДОДАТОК К..... | 128 |
| ДОДАТОК Л..... | 129 |
| ДОДАТОК М..... | 129 |
| ДОДАТОК Н..... | 130 |
| ДОДАТОК П..... | 132 |
| ДОДАТОК Р..... | 135 |
| ДОДАТОК С..... | 136 |
| ДОДАТОК Т..... | 139 |
| ДОДАТОК У..... | 139 |
| ДОДАТОК Ф..... | 139 |
| ДОДАТОК Х..... | 140 |
| ДОДАТОК Ц..... | 140 |
| ДОДАТОК Ш..... | 141 |
| ДОДАТОК Щ..... | 141 |
| ДОДАТОК Ю..... | 142 |

ВСТУП

Вирішення більшості завдань у галузі водопостачання і водовідведення ґрунтується на законах гідравліки. До цих завдань відносяться завдання, пов'язані із загальними питаннями подачі і розподілу води, методами розрахунку мереж, водопропускних і водорозбірних споруд тощо.

Найголовніші завдання курсу «Інженерної гідравліки»:

– встановлення законів розподілу швидкостей і тиску під час руху рідини;

– вивчення взаємодії між рідиною і твердими тілами, розміщеними в ній.

Мета вивчення дисципліни:

1) розглянути гідравлічні закони руху рідини, їх застосування у практиці водопостачання та водовідведення;

2) підготувати фахівця, який володітиме знаннями, пов'язаними з вирішенням технічних питань у галузі водопостачання, водовідведення та очистки води.

Призначення методичних рекомендацій до виконання практичних та лабораторних занять та розрахунково-графічної і самостійної робіт – допомогти здобувачам, які вивчають навчальну дисципліну «Інженерна гідравліка», придбати навички застосування теорії у вирішенні конкретних задач, засвоїти методику гідравлічних розрахунків.

Методичні рекомендації містять різні за тематикою та ступенем складності приклади, які відтворюють основні розділи курсу «Інженерна гідравліка», а також основні формули й довідкові дані, необхідні для розв'язання прикладів, а також індивідуальні завдання у вигляді розрахунково-графічного завдання.

1 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

ЗМ 1 РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ

Тема 1 Витікання рідини з отворів і насадок

Класифікація отворів характеризується:

- за розміром виділяють малі та великі отвори;
- за товщиною стінки, у якій зроблено отвір (отвори в тонкій стінці та товстій стінці);
- за формою – круглі, квадратні, прямокутні, трикутні тощо.

Насадки – це приєднані до отвору короткі патрубки зазвичай завдовжки 2–4 d , які дозволяють істотно змінювати швидкість і витрату при витіканні рідини. До насадків вдаються у разі, коли потрібно збільшити пропускну спроможність отвору або для збільшення чи зменшення кінетичної енергії витікаючого струменя.

Швидкість при витіканні з малих отворів у тонкій стінці при постійному напорі визначають за формулою:

$$V = \varphi \sqrt{2gH} . \quad (1.1)$$

Якщо витрата $Q = \omega M$; тоді $\omega = \varepsilon \omega_0$.

Таким чином, витрата при витіканні з малих отворів у тонкій стінці при постійному напорі визначають за формулою:

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2gH} , \quad (1.2)$$

де $\varepsilon \varphi = \mu$.

Зазвичай при вільному витіканні води з малих отворів у тонкій вертикальній стінці приймають такі середні значення коефіцієнтів:

$$\varphi = 0,97; \xi = 0,06; \varepsilon = 0,64; \mu = 0,62.$$

Коефіцієнти, які характеризують витікання з отворів, залежать від різновиду рідини, товщини стінки, температури, форми і розміру отвору, величини напору.

Одержані залежності (1.1) та (1.2) справедливі для будь-яких інших малих отворів за умови, що витікання відбувається при постійному напорі. Розрахункові залежності при витіканні з насадок аналогічні залежностям для малого отвору.

Відмінність одержаних формул полягає у величинах коефіцієнтів швидкості та витрати. Середні значення коефіцієнтів для найбільш поширених насадок приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Середнє значення коефіцієнтів для насадок

| № з/п | Тип насадка | Коефіцієнти | | |
|-------|--|----------------------|---------------------------------|----------------|
| | | швидкості, φ | стиснення струму, ε | витрати, μ |
| 1 | Зовнішній циліндричний: якщо $l = 3-4d$ | 0,82 | 1 | 0,82 |
| | якщо $l = 20d$ | 0,73 | 1 | 0,73 |
| 2 | Внутрішній циліндричний: якщо $l = 0,5d$ | 0,98 | 0,52 | 0,51 |
| | якщо $l = 3-4d$ | 0,71 | 1 | 0,71 |
| 3 | Конічний, що сходиться, якщо $\alpha = 5^\circ$ | 0,92 | 1 | 0,92 |
| 4 | Конічний, що розходиться, якщо $\alpha = 5^\circ$ | 0,48 | 1 | 0,48 |
| 5 | Коноїдальний | 0,96 | 1 | 0,96 |

За менших чисел Рейнольдса вказані коефіцієнти залежать від його значень. Їх наведено на графіку А. Д. Альтшуля (рис. 1.1).

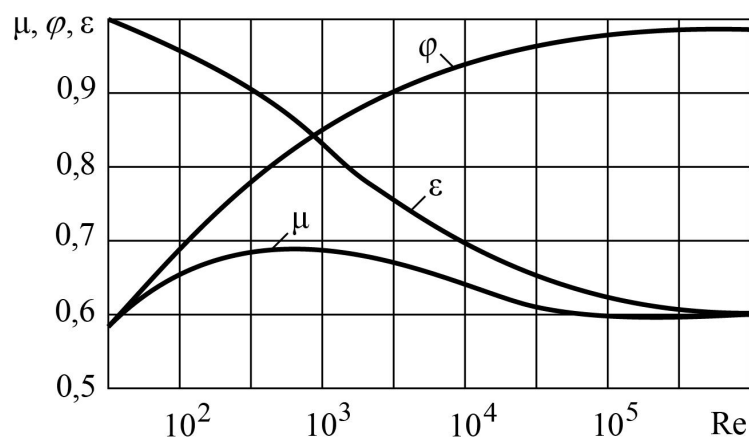


Рисунок 1.1 – Значення коефіцієнтів залежно від числа Рейнольдса

Як правило, малі числа Рейнольдса характеризують витікання рідини з підвищеною в'язкістю (нафта, машинні мастила, бітум тощо).

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити витрату води через круглий отвір в тонкій стінці, а також витрату води через зовнішню циліндричну насадку при постійному напорі H . Відомо, що діаметр отвору і насадки $d = 3$ см, $H = 60$ см.

Розв'язання:

1. Витрата через отвір у тонкій стінці визначають за формулою (1.2):

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2gH}$$

$$Q = 0,62 \cdot 0,707 \cdot 10^{-4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} = 15 \text{ л/с},$$

де площа отвору дорівнює: $\omega_0 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} = 7,065 \text{ см}^2$.

2. Тоді витрата через зовнішню циліндричну насадку

$$Q = 0,82 \cdot 0,707 \cdot 10^{-4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} = 20 \text{ л/с}.$$

Таким чином, за однакових умов витрата через отвір у тонкій стінці на 25 % менше, ніж витрата через зовнішню циліндричну насадку.

Приклад 2. Визначити витрату і швидкість витікання нафти з малого круглого отвору діаметром $d_1 = 20$ мм, якщо напір над центром отвору $H = 2$ м, кінематична в'язкість нафти $\nu = 0,3$ см²/с.

Розв'язання.

1. Визначаємо число Рейнольдса: $Re = \frac{\sqrt{2gHd}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 0,02}}{0,3 \cdot 10^{-4}} = 4176$.

2. Згідно з графіком (рис.1.1) знаходимо: $\varphi = 0,9$; $\mu = 0,68$.

3. Швидкість витікання нафти з отвору: $V = \varphi \sqrt{2gH} = 0,9 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 5,64$ м/с.

4. Витрата нафти:

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2gH} = 0,68 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 0,00134 \text{ м}^3/\text{с} = 1,34 \text{ л/с}.$$

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 3. У верхню посудину (рис. 1.2) надходить вода з витратою $Q = 0,25$ л/с, яка потім перетікає через малий отвір у дні діаметром $d_1 = 10$ мм у нижню посудину, яка також має малий отвір у дні діаметром $d_2 = 15$ мм. Визначити напори H_1 і H_2 у двох посудинах, а також при якому діаметрі d_2 напір H_2 буде удвічі менше, ніж напір H_1 .

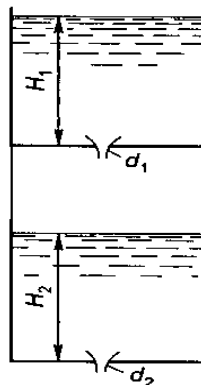


Рисунок 1.2 – Посудина з отворами (завдання до прикладу 3)

Приклад 4. Вода витікає з баку через конічний насадок, що сходиться діаметром $d = 80$ мм, який знаходиться на глибині $H = 1$ м від поверхні. Рівень води у баці підтримується постійним завдяки поповненню з водопровідної мережі. Визначити, яка кількість води витече через насадку за три хвилини.

Приклад 5. З малого отвору в тонкій стінці діаметром $d = 5$ мм витікає вода за температури $t = 10$ °С ($\nu = 0,0131$ см²/с). Напір над центром отвору $H = 20$ см. Знайти витрату води та порівняти її з витратою: а) нафти ($\nu = 0,50$ см²/с); б) мазуту $\nu = 0,8$ см²/с за тих самих умов витікання.

Приклад 6. Вода витікає з резервуара через малий отвір у тонкій стінці за напору $H = 16$ м. Як зміниться витрата, якщо до отвору приєднати

- а) зовнішній циліндричний насадок того ж діаметра;
- б) внутрішній циліндричний насадок того ж діаметра;
- в) коноїдальний насадок того ж діаметра.

Тема 2 Усталений рух рідини у відкритих руслах

Усталеним рухом рідини називають рух, під час якого його характеристики (швидкість, тиск, глибина тощо) не змінюються з часом. За неусталеного руху вказані характеристики змінюються з часом.

Сталий рух рідини, що плавно змінюється, у відкритих руслах, характеризується плавною зміною основних параметрів потоку за його довжиною, тому при виведенні рівнянь руху можна знехтувати складовими місцевих швидкостей у площині живого перерізу потоку й прийняти розподіл тиску в цій площині відповідно до гідростатичного закону.

Усталений потік у відкритому руслі може бути рівномірним або нерівномірним.

Рівномірний потік за всією довжиною має однакову середню швидкість. Тому за всією довжиною потоку залишається однаковою і площа живого перерізу.

У нерівномірному потоці уздовж потоку змінюється середня швидкість, тому, хоча витрата і залишається постійною, за довжиною потоку змінюються площі живих перерізів.

Тема 3 Рівномірний рух рідини у відкритих руслах

Рівномірний рух води – це рух, при якому витрата і розміри живого перетину потоку незмінні за його довжиною.

Рівномірний рух у відкритих руслах зустрічається тільки у штучних водотоках – каналах і лотках. Рух у річках – нерівномірний, що обумовлено тим, що гідравлічні елементи потоку в природних руслах змінюються вздовж водотоку.

До основних гідравлічних елементів потоку відносять: площа живого перетину, змочений периметр, гідравлічний радіус, нахил, швидкість, витрата.

3.1 Визначення елементів живого перерізу потоку і допустимих середніх швидкостей течії

Штучним земляним каналам із практичних міркувань надають трапецієподібного поперечного перерізу з шириною каналу по дну b , глибиною каналу h , і закладенням відкосів a (рис. 1.3).

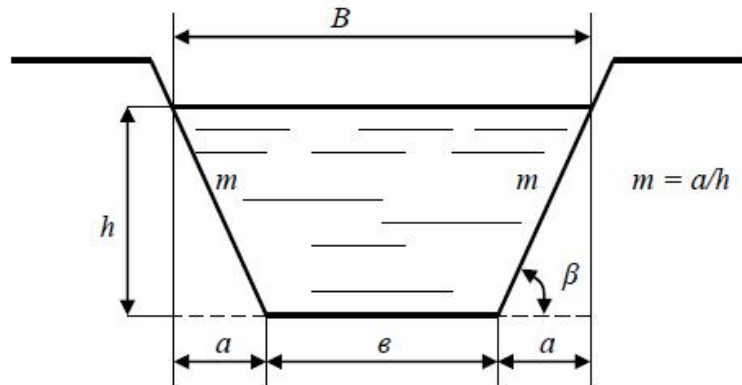


Рисунок 1.3 – Основні елементи живого перерізу каналу за однакової крутизни відкосів

У руслах трапецеїдального поперечного перерізу за однакової крутизни відкосів площа живого перерізу

$$\omega = (b + mh)h . \quad (1.3)$$

Змочений периметр – довжина частини лінії периметра живого перетину, змоченого водою,

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} . \quad (1.4)$$

Ширина русла за вільною поверхнею рідини

$$B = b + 2mh . \quad (1.5)$$

Гідравлічний радіус – відношення площі живого перетину до змоченого периметру

$$R = \frac{\omega}{\chi} , \quad (1.6)$$

де b – ширина русла по дну;

m – коефіцієнт закладення відкосів ($m = ctg\beta$) – відношення закладення відкосів до глибини потоку. Призначається залежно від характеру ґрунту, в якому проходить канал: $m = \frac{a}{h} = ctg\beta$;

h – глибина течії в цьому перерізі.

За різної крутизни відкосів площа живого перерізу (рис. 1.4)

$$\omega = (b + m_{cp}h)h, \quad (1.7)$$

а коефіцієнт закладення відкосів визначають за формулою

$$m_{cp} = \frac{m_1 + m_2}{2}. \quad (1.8)$$

Змочений периметр визначають за формулою

$$\chi = b + h(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}). \quad (1.9)$$

Ширина русла за вільною поверхнею

$$B = b + 2m_{cp}h. \quad (1.10)$$

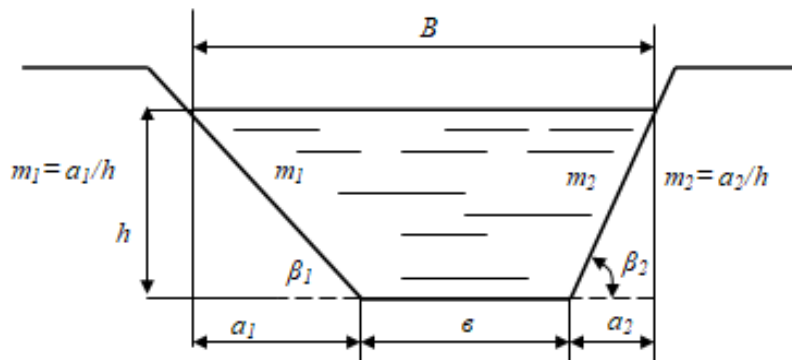


Рисунок 1.4 – Основні елементи живого перерізу каналу за різної крутизни відкосів

При визначенні геометричних елементів русел прямокутного і трикутного поперечного перерізу (рис. 1.5) використовують ті ж залежності, що і для русел трапецеїдального поперечного перерізу, маючи на увазі що $m = 0$ (для прямокутного), або $\epsilon = 0$ (для трикутного).

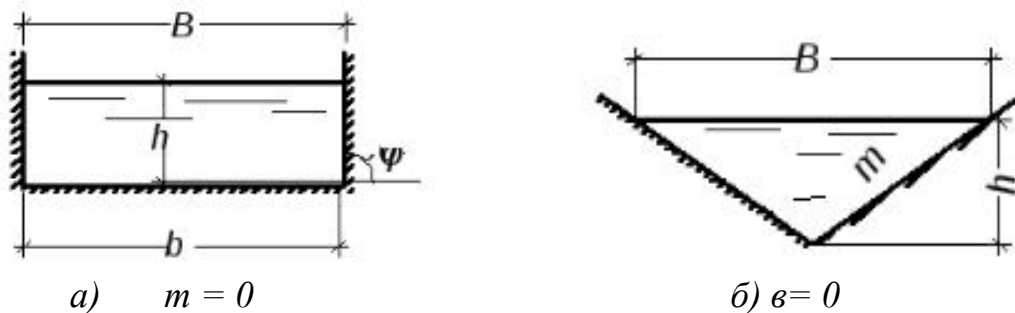


Рисунок 1.5 – Перетини каналів прямокутної (а) і трикутної (б) форми поперечного перерізу

3.2 Формула Шезі, коефіцієнт Шезі

При рівномірній течії витрата Q , глибина h , а також форма і розміри поперечного перерізу ω є незмінними за довжиною течії. Нахил вільної поверхні рідини J дорівнює нахилу дна русла i .

Для визначення середньої швидкості *безнапірного рівномірного* потоку у відкритих руслах використовують формулу Шезі, у якій враховується геометричний нахил:

$$V = C \cdot \sqrt{Ri}, \quad (1.11)$$

де V – середня швидкість, м/с;

R – гідравлічний радіус, м;

i – нахил дна русла;

C – коефіцієнт Шезі, пов'язаний із коефіцієнтом гідравлічного тертя λ

залежністю $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \rightarrow \lambda = \frac{8g}{C^2}$.

Коефіцієнт Шезі також визначають за формулою
– Павловського:

$$C = \frac{R^y}{n}, \quad (1.12)$$

де y – змінний показник ступеня функція ($y = f(n; R)$), яка дорівнює $y = 1,5\sqrt{n}$, якщо $R < 1$ м та $y = 1,3\sqrt{n}$, якщо $R > 1$ м;

n – коефіцієнт шорсткості. Шорсткість – сукупна нерівномірність твердої поверхні, що позначається на виникненні сил тертя потоку об дно і стінки русла. Залежить від абсолютного розміру нерівномірностей і їх взаємного розташування, яке характеризується коефіцієнтом шорсткості n ;

– *Маннінга* (при орієнтовних розрахунках використовують постійні значення y . Зазвичай приймають, що $y = 1/6$):

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}; \quad (1.13)$$

– *Альтиуля*:

$$C = 20 \lg \frac{R}{\varepsilon + 0,385 \cdot \nu / \sqrt{g \cdot R \cdot i}}, \quad (1.14)$$

де ε – наведена лінійна шорсткість;

ν – кінематична в'язкість рідини (для холодної води $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$).

У формулі (1.14) R і ε – в мм; C – в $\text{м}^{1/2}/\text{с}$.

Значення наведеної лінійної шорсткості ε та значення коефіцієнта Шезі у формулі (1.14) наведені в додатку П.

Критерій зони турбулентності:

– $\varepsilon\sqrt{Ri} \geq 0,04$, то коефіцієнт Шезі для шорстких русел: $C = 20 \lg \frac{R}{\varepsilon}$;

– $\varepsilon\sqrt{Ri} \leq 0,0005$, то для гідравлічно гладеньких русел: $C = 20 \lg R\sqrt{Ri} + 48$.

Для річок, які формують русло в піщано-гравійному ложі, в каналах, що проходять в природних ґрунтах і несучих наносів коефіцієнт Шезі визначають за формулою:

$$C = \frac{14,8}{i^{1/6}} - 26. \quad (1.15)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити витрату води в каналі трапецеїдального перерізу. Ширина каналу піднято $b = 10$ м, глибина води в каналі $h = 3$ м, коефіцієнт закладання укосів $m = 2$, поздовжній нахил каналу $i_0 = 0,0016$. Дно і укоси каналу укріплені грубої цегляною кладкою ($n = 0,015$).

Розв'язання. Витрату води в каналі визначають за формулою: $Q = \omega v$, де швидкість визначають за формулою Шезі: $v = C\sqrt{Ri}$.

Тоді витрата $Q = \omega C\sqrt{Ri_0}$:

1. Площа поперечного перерізу каналу: $\omega = (b + mh)h = (10 + 2 \cdot 3)3 = 48 \text{ м}^2$.

2. Змочений периметр $\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 10 + 2 \cdot 3\sqrt{1 + 2^2} = 23,4 \text{ м}$.

3. Гідравлічний радіус $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{48}{23,4} = 2,05 \text{ м}$.

4. Коефіцієнт Шезі визначають за формулою $C = \frac{R^y}{n}$, якщо $R > 1$ м, тоді

$$y = 1,3\sqrt{n} = 1,3\sqrt{0,015} = 0,159; \quad C = \frac{2,05^{0,159}}{0,015} = 74,7 \frac{\text{м}^{1/2}}{\text{с}};$$

5. Витрата $Q = 48 \cdot 74,7\sqrt{2,05 \cdot 0,0016} = 205 \text{ м}^3 / \text{с}$.

Приклад 2. Визначити, який нахил треба надати лотку прямокутного перетину для того, щоб він міг пропустити витрату води $2 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина лотка $b = 1,2$ м, глибина води в лотку $h = 0,8$ м, дно і стінка лотка виконані зі струганих дощок.

Розв'язання. Витрату води в каналі визначають за формулою $Q = \omega C\sqrt{Ri_0}$, при цьому нахил лотка $i_0 = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}$.

1. Площа поперечного перерізу лотка прямокутної форми

$$\omega = bh = 1,2 \cdot 0,8 = 0,96 \text{ м}^2.$$

2. Змочений периметр $\chi = b + 2h = 1,2 + 2 \cdot 0,8 = 2,8 \text{ м}$.

3. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,96}{2,8} = 0,343 \text{ м}.$

4. Коефіцієнт Шезі: $C = \frac{R^y}{n}$, якщо $R < 1 \text{ м}$, тоді $y = 1,5\sqrt{n} = 1,5\sqrt{0,010} = 0,150$;

$$C = \frac{0,343^{0,150}}{0,010} = 85,1 \frac{\text{м}^{1/2}}{\text{с}}.$$

5. Лотку прямокутного перерізу необхідно надати нахил для того, щоб він міг пропустити витрату води $2 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$i_0 = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} = \frac{2^2}{0,96^2 \cdot 85,1^2 \cdot 0,343} = 0,00175.$$

Приклад 3. Визначити швидкість руху води в лотку трикутного перетину. Глибина води в лотку $h = 0,4 \text{ м}$. Коефіцієнт закладання укосів $m = 1,75$. Повздовжній нахил дна лотка $i_0 = 0,0158$. Укоси каналу укріплені грубою тесовою кладкою ($n = 0,013$).

Розв'язання. Швидкість руху води визначається за формулою Шезі: $v = C\sqrt{Ri}$.

1. Площа каналу трикутного перерізу ($b = 0$): $\omega = mh^2 = 1,75 \cdot 0,4^2 = 0,28 \text{ м}^2.$

2. Змочений периметр ($b = 0$): $\chi = 2h\sqrt{1+m^2} = 2 \cdot 0,4\sqrt{1+1,75^2} = 1,61 \text{ м}.$

3. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,28}{1,61} = 0,174 \text{ м}.$

5. Коефіцієнт Шезі: $C = \frac{R^y}{n}$, якщо $R < 1 \text{ м}$, тоді $y = 1,5\sqrt{n} = 1,5\sqrt{0,013} = 0,171$;

$$C = \frac{0,174^{0,171}}{0,013} = 57,1 \frac{\text{м}^{1/2}}{\text{с}}.$$

б) швидкість руху води дорівнює: $v = C\sqrt{Ri} = 57,1\sqrt{0,174 \cdot 0,0158} = 2,99 \text{ м/с}.$

Приклад 4. Водопровідний і озалізнений канал прямокутного перерізу має ширину $v = 2 \text{ м}$ і нахил дна $i = 0,0001$. Яка буде витрата Q при наповненні $h = 2,4 \text{ м}$?

Розв'язання. Витрату води знаходимо за формулою: $Q = \omega c \sqrt{Ri}$.

1. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{2 \times 2,4}{2 + 2,4} = 0,705 \text{ м}.$

2. Значення лінійної шорсткості беремо $\varepsilon = 0,02$.

3. Визначаємо коефіцієнт C за формулою:

$$c = 20 \lg \frac{R}{\varepsilon + 0,004/\sqrt{Ri}} = 20 \lg \frac{705}{0,02 + \frac{0,004}{\sqrt{705 \cdot 0,001}}} = 86,6 \text{ м/с}.$$

4. Витрата води: $Q = 2 \cdot 2,4 \cdot 86,6 \sqrt{0,705 \cdot 0,0001} = 3,49 \text{ м}^3/\text{с}.$

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 5. Велика рівнинна ріка, русло якої сформовано з дрібного гравію і крупного піску, має відносно рівномірну течію. Ширина ріки $b = 200$ м, середня глибина на ділянці $h = 2,5$ м, нахил водної поверхні $i = 0,00014$. Визначити середню швидкість течії і витрату води.

Вказівки: коефіцієнт Шезі за формулою (1.15). Відповідь: $Q = 950$ м³/с.

Приклад 6. Визначити витрату води в річці шириною $b = 32,0$ м, середній глибині $h = 1,2$ м, з нахилом вільної поверхні ріки $i = 0,0001$. Грунт ложа – середній пісок. Вказівки: коефіцієнт Шезі за формулою (1.15).

Відповідь: $Q = 168,6$ м³/с.

Приклад 7. Трикутний лоток з кутом при вершині 90° , виконаний з бетонних озалізнених плит, відводить воду від насоса, який відкачує ґрунтову воду з траншеї. Визначити притік ґрунтової води на 1 м траншеї, якщо її довжина $l = 15$ м, наповнення лотка $h = 0,1$ м, нахил лотка $i = 0,00001$. Вказівки: притік на 1 м траншеї $g = Q \times 3600 / l$.

Відповідь: $g = 0,0624$ м³/год.

3.3 Перевірка каналу на розмив і замулення

Для нормальної роботи каналу середня швидкість ($V = Q / w$) повинна знаходитися у наступних межах:

$$V_{min} \leq V_{сер} \leq V_{max}. \quad (1.16)$$

Під допустимою нерозмиваючою середньою швидкістю руху води у відкритих руслах розуміють найбільше значення середньої швидкості руху води, при якій потік не може викликати неприпустимого для нормальної експлуатації розмиву (руйнування) русла.

Допустимі нерозмиваючі середні в перерізі швидкості руху води $V_{дон}$ залежать від різновиду ґрунту або типу укріплення русла і глибини водотоку (додаток Ж, значення швидкостей інтерполювати не треба). Якщо на початку розрахунку глибина потоку невідома, тоді приймають значення $V_{дон} = 0,4$ м/с.

Під замулюючою швидкістю розуміють найменше значення середньої швидкості руху, при якій потік здатний транспортувати без осадження наносів, які знаходяться у ньому.

Допустимі замулюючі середні в перерізі швидкості протікання води V_{min} залежать від кількості завислих речовин, їх розмірів, витрати і глибини течії.

Якщо насиченість течії наносами з діаметром частинок, які більше 0,25 мм і не перевищують 0,01 % за вагою, то

$$V_{min} = a\sqrt{R}, \quad (1.17)$$

де R дано в метрах, а значення множителя (додаток И).

a – залежить від середнього діаметру частинок, переважної маси завислих наносів.

Допустимі незамулюючі швидкості можна визначати за залежністю А. С. Гіршкана:

$$V_{\min} = AQ^{0,2}, \quad (1.18)$$

де Q – витрата, в $\text{м}^3/\text{с}$;

A – коефіцієнт, який залежить від гідравлічної крупності наносів – швидкості падіння частинок у ґрунті в чистій воді ω (дод. Л). Допустимі незамулюючі середні в перерізі швидкості V_{\min} в $\text{м}/\text{с}$ за даними В. Н. Гончарова (дод. Л).

Якщо $\omega < 1,5 \text{ мм}/\text{с}$, тоді $A = 0,33$;

$\omega = 1,5\text{--}3,5 \text{ мм}/\text{с}$, $A = 0,44$;

$\omega > 3,5 \text{ мм}/\text{с}$, $A = 0,55$.

Допустиму нерозмиваючу середню в перерізі швидкість руху води $V_{\text{дон}}$ визначають за формулою Леві:

$$V_{\max} = 3\sqrt{gd} \lg \frac{R}{7d}, \quad (1.19)$$

де d – діаметр частинок, що складають русло.

Вибір допустимих швидкостей має велике економічне значення під час проектування й експлуатації штучних водотоків.

Приклади розв'язання задач та самостійної підготовки

Приклад 8. Визначити чи відбуватиметься розмив або замулення каналу трапецеїдального перерізу при наступних умовах:

а) ширина русла по дну $b = 1,4 \text{ м}$, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,0$, глибина потоку $h = 0,8 \text{ м}$, розрахункова витрата $Q = 0,88 \text{ м}^3/\text{с}$, кріплення – одерновка в стінку, лоток несе середньопісчані наноси;

б) ширина русла по дну $b = 0 \text{ м}$, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,5$, глибина потоку $h = 1,0 \text{ м}$, розрахункова витрата $Q = 2,1 \text{ м}^3/\text{с}$, русло прорито у щільних лесовидних ґрунтах, наноси – крупнопіщані;

в) ширина русла по дну $b = 1,2 \text{ м}$, глибина потоку $h = 0,9 \text{ м}$, розрахункова витрата $Q = 1,3 \text{ м}^3/\text{с}$, русло укріплене кладкою зі звичайної цегли на цементному розчині, наноси – із середнім діаметром частинок $d_{cp} = 0,4 \text{ мм}$.

Розв'язання (а). Визначають такі показники:

1. Площа поперечного перерізу: $\omega = (b + mh)h = (1,4 + 1 \cdot 0,8)0,8 = 1,76 \text{ м}^2$.

2. Швидкість руху води: $v = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,8}{1,76} = 0,45 \text{ м}/\text{с}$.

3. За додатком Ж: $U_{don} = 2,5$ м/с.

4. За заданою характеристикою наносів (середньопіщані) знаходимо $V_{min} = 0,6$ м/с.

5. Русло не схильне до розмивання ($V < V_{don}$), але буде підтверджене замулюванню ($V < V_{min}$).

Розв'язання (б) і (в) виконати самостійно.

Приклад 9. Визначити за формулою $V_{min} = a\sqrt{R}$ чи буде русло замулюватися за таких умов:

а) ширина русла по дну $b = 0$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 2$, глибина потоку $h = 1$ м, розрахункова витрата $Q = 3,0$ м³/с, наноси діаметром $d_{cp} = 0,6$ мм;

б) ширина русла по дну $b = 2,0$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 0$, глибина потоку $h = 1,2$ м, розрахункова витрата $Q = 4,8$ м³/с, наноси діаметром $d_{cp} = 0,2$ мм;

в) ширина русла по дну $b = 0,8$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1$, глибина потоку $h = 1,6$ м, розрахункова витрата $Q = 0,84$ м³/с, русло укріплено кладкою зі звичайної цегли на цементному розчині, наноси – із середнім діаметром частинок $d_{cp} = 0,2$ мм.

Розв'язання (а). Визначають такі показники:

1. Мінімальна замулююча швидкість:

$$V_{min} = a\sqrt{R} = 0,82\sqrt{0,45} = 1,34 \text{ м/с.}$$

2. Відповідно до додатка И середній діаметр частинок: $d_{cp} = 0,6$ мм, тоді $a = 0,82$ м^{1/2}/с.

3. Площа поперечного перерізу: $\omega = (b + mh)h = (0 + 2 \cdot 1,0)1,0 = 2,0$ м².

4. Змочений периметр: $\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 0 + 2 \cdot 1,0\sqrt{1 + 2^2} = 4,47$ м.

5. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{2}{4,47} = 0,45$ м.

6. Середня швидкість руху води в руслі: $v = \frac{Q}{\omega} = \frac{3}{2} = 1,5$ м/с.

Відповідь: русло замулюватися не буде.

Розв'язання (б) і (в) виконати самостійно.

Приклад 10. Установити глибину протікання потоку і забезпеченість русла від замулювання за наступних умов:

а) площа поперечного перерізу $\omega = 2,5$ м², ширина русла по дну $b = 1,0$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,5$, швидкість $v = 2,0$ м/с, гідравлічна крупність наносів $\varpi = 2,0$ мм/с;

б) площа поперечного перерізу $\omega = 3,68 \text{ м}^2$, ширина русла по дну $b = 1,6 \text{ м}$, коефіцієнт закладення відкосів $m = 0$, швидкість $v = 0,4 \text{ м/с}$, гідравлічна крупність наносів $\varpi = 4,0 \text{ мм/с}$;

в) площа поперечного сечення $\omega = 0,5 \text{ м}^2$, ширина русла по дну $b = 0 \text{ м}$, коефіцієнт закладення відкосів $m_1 = 3$, $m_2 = 1$, швидкість $v = 1,5 \text{ м/с}$, гідравлічна крупність наносів $\varpi = 1,8 \text{ мм/с}$.

Розв'язання (а). Визначають такі параметри:

1. Глибина потоку:
$$h = \frac{\sqrt{b^2 + 4\omega m} - b}{2m} = \frac{\sqrt{1^2 + 4 \cdot 2,5 \cdot 1,5} - 1}{2 \cdot 1,5} = 0,96 \approx 1,0 \text{ м};$$

2. Мінімальна незамулююча швидкість : $V_{\min} = A Q^{0,2} = 0,44 \cdot 5^{0,2} = 0,6 \text{ м/с}$, де $A=0,44$;

3. Витрата води: $Q = \omega \cdot v = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ м}^3 / \text{с}$.

Відповідь: русло не замулюється.

Приклад 11. Визначити витрату при рівномірному русі води в трапецеїдальному земляному каналі (суглинок), якщо ширина по дну $b = 5,5 \text{ м}$, глибина $h = 1,8 \text{ м}$, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1$ і нахил $i = 0,0004$.

Розв'язання:

1. Швидкість знаходимо за формулою Шезі: $V = c\sqrt{Ri}$.

2. Площу живого перерізу: $\omega = (b + mh)h = (5,5 + 1 \times 1,8) \times 1,8 = 13,14 \text{ м}^2$.

3. Змочений периметр : $X = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 5,5 + 2 \times 1,8\sqrt{1 + 1^2} = 10,58 \text{ м}$.

4. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{13,14}{10,58} = 1,24 \text{ м}$.

5. Визначаємо коефіцієнт Шезі за формулою Павловського. Коефіцієнт шорсткості $n = 0,025$ (додаток П) при $R = 1,25 \text{ м} > 1 \text{ м}$: $\chi = 1,3\sqrt{n} = 1,3\sqrt{0,025} = 0,206$, тоді коефіцієнт Шезі:

$$c = \frac{1}{n} R^y = \frac{1}{0,025} \cdot 1,24^{0,206} = 41,8 \text{ м}^{1/2} / \text{с};$$

6. Швидкість: $V = c\sqrt{Ri} = 41,8\sqrt{1,24 \cdot 0,0004} = 0,93 \text{ м/с}$.

Порівняємо отриману швидкість з максимальною нерозмиваючою середньою швидкістю і найменшою допустимою незамулюючою швидкістю. Згідно з додатком Ж швидкість при глибині $h = 1,8 \text{ м}$, $V_{\max} = 1,2 \text{ м/с}$. $V_{\min} = 0,5\sqrt{R}$, $V_{\min} = 0,5\sqrt{1,24} = 0,56 \text{ м/с}$. Таким чином, $0,56 \text{ м/с} < 0,93 \text{ м/с} < 1,2 \text{ м/с}$ маємо зробити висновок, що канал ні розмиву, ні замулюванню не підлягає.

3.4 Основні залежності для гідравлічного розрахунку каналів

При рівномірному русі потоку у відкритому руслі середня в перерізі швидкість:

$$V = W\sqrt{i}, \quad (1.20)$$

де i – нахил дна русла;

W – швидкісна характеристика.

З урахуванням формули М. М. Павловського:

$$W = \frac{1}{n} R^z, \quad (1.21)$$

де n – коефіцієнт шорсткості, значення якого наведені у додатку Е;

z – показник ступеня, рівний $z = y + 0,5$. При значеннях y , які знаходимо за формулою М. М. Павловського:

$$Z = 0,37 + 2,5\sqrt{n} - 0,75(\sqrt{n} - 0,1)\sqrt{R}. \quad (1.22)$$

Значення швидкості характеристики W наведені в додатку Н.

До основних залежностей для гідравлічного розрахунку каналів відносять наступні параметри.

Витрата води у відкритих руслах і каналах визначають за:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}. \quad (1.23)$$

Нахил і падіння каналу за довжиною (втрати напору):

$$i = \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} = \frac{Q^2}{K^2}; \quad \Delta Z = i \cdot l = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} l = \frac{Q^2}{K^2} l. \quad (1.24)$$

Витратна характеристика (модуль витрати) – витрата при нахилі, рівному

1

$$K = \omega C \sqrt{R} = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (1.25)$$

Швидкісна характеристика (модуль швидкості) – швидкість при нахилі, рівному 1:

$$W = C \sqrt{R} = \frac{V}{\sqrt{i}}. \quad (1.26)$$

Приклади розв'язання задач та самостійної підготовки

Приклад 12. Визначити середню швидкість потоку і його витрату в каналі, якщо відомі:

а) нахил дна каналу $i = 0,0025$, ширина русла по дну $b = 0,8$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,5$, коефіцієнт шорсткості $n = 0,011$, глибина рівномірного руху потоку $h_0 = 0,38$ м;

б) $i = 0,0036$; $b = 2,0$ м; $m = 0$; $n = 0,014$; $h_0 = 0,56$ м;

в) $i = 0,0049$; $b = 0$ м; $m = 1,25$; $n = 0,0225$; $h_0 = 0,82$ м.

Розв'язання (а). Визначають наступні параметри:

1. Площа поперечного перерізу: $\omega = (b + mh_0)h_0 = (0,8 + 1,5 \cdot 0,38) \cdot 0,38 = 0,52 \text{ м}^2$.

2. Змочений периметр: $\chi = b + 2h_0\sqrt{1+m^2} = 0,8 + 2 \cdot 0,38\sqrt{1+1,5^2} = 2,17 \text{ м}$.

3. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,52}{2,17} = 0,24 \text{ м}$.

4. За додатком Н швидкісна характеристика $W = 37 \text{ м/с}$.

5. Швидкість руху води $V = W\sqrt{i} = 37,0\sqrt{0,0025} = 1,85 \text{ м/с}$.

6. Витрата води $Q = \omega V = 0,52 \cdot 1,85 = 0,96 \text{ м}^3/\text{с}$.

Відповідь: б) $V = 2,19 \text{ м/с}$, $Q = 2,45 \text{ м}^3/\text{с}$;

в) $V = 1,33 \text{ м/с}$, $Q = 1,13 \text{ м}^3/\text{с}$.

Приклад 13. Визначити, який нахил треба надати дну каналу, якщо:

а) $v = 0$; $m_1 = 1,5$, $m_2 = 2,0$; $n = 0,018$; $Q = 0,079 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_0 = 0,37 \text{ м}$;

б) $v = 0,66$; $m = 0$; бетонування в середніх умовах; $Q = 1,63 \text{ м}^3/\text{с}$; $h = 0,5 \text{ м}$;

в) $v = 0,7$; $m = 1,5$, канал вкритий товстим ілистим шаром, $Q = 2,19 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_0 = 0,57 \text{ м}$.

Розв'язання (а). Визначають такі параметри:

1. Коефіцієнт закладення відкосів $m_{cp} = \frac{m_1 + m_2}{2} = \frac{1,5 + 2}{2} = 1,75$.

2. Площа поперечного перерізу $\omega = (b + mh)h = m_{cp}h^2 = 1,75 \cdot 0,37^2 = 0,24 \text{ м}^2$.

3. Змочений периметр:

$$\chi = b + h(\sqrt{1+m_1^2} + \sqrt{1+m_2^2}) = 0 + 0,37(\sqrt{1+1,5^2} + \sqrt{1+2^2}) = 1,5 \text{ м}.$$

4. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,24}{1,5} = 0,16 \text{ м}$.

5. За додатком Н визначають швидкісну характеристику $W = 15,5 \text{ м/с}$.

6. Гідравлічний нахил: $i = \left(\frac{Q}{\omega W}\right)^2 = \left(\frac{0,079}{0,24 \cdot 15,5}\right)^2 = 0,00045 \text{ м/с}$.

Відповідь: б) $i = 0,04$; в) $i = 0,01$.

Приклад 14. Визначити глибину протікання потоку і нахил, таким чином, щоб рівномірний рух води відбувався із заданою швидкістю:

а) $v = 2,0$; $m = 0$; $n = 0,011$; $Q = 2,66 \text{ м}^3/\text{с}$; $v_{cp} = 2 \text{ м/с}$;

б) $v = 2,0$; $m_1 = 1,0$, $m_2 = 3,0$; $n = 0,012$; $Q = 12,0 \text{ м}^3/\text{с}$, $v_{cp} = 3 \text{ м/с}$.

Розв'язання (а). Визначають наступні параметри:

1. Витрата води $Q = \omega V$, тоді площа поперечного перерізу складе:

$$\omega = \frac{Q}{v} = \frac{2,66}{2} = 1,33 \text{ м}^2.$$

2. Площа поперечного перерізу: $\omega = hb$, тоді глибина потоку у руслі:

$$h = \frac{\omega}{b} = \frac{1,33}{2} = 0,67 \text{ м}.$$

3. Змочений периметр: $\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2} = b + 2h = 2 + 2 \cdot 0,67 = 3,34 \text{ м}$.

4. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{1,33}{3,34} = 0,4 \text{ м}$.

5. За додатком Н визначають швидкісну характеристику: $W = 51,1 \text{ м/с}$;

6. Гідравлічний нахил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{2^2}{51,1^2} = 0,00153$.

Розв'язання (б). Визначають наступні параметри:

1. Коефіцієнт закладення відкосів: $m_{cp} = \frac{m_1 + m_2}{2} = \frac{1+3}{2} = 2$.

2. Глибина потоку: $h = \frac{\sqrt{b^2 + 4\omega m_{cp}} - b}{2m} = \frac{\sqrt{2^2 + 4 \cdot 4 \cdot 2} - 2}{2 \cdot 2} = 1,5 \text{ м}$.

3. Площа поперечного перерізу: $\omega = \frac{Q}{v} = \frac{12}{3} = 4 \text{ м}^2$.

4. Змочений периметр: $\chi = b + h(\sqrt{1+m_1^2} + \sqrt{1+m_2^2}) = 2 + 1,5(\sqrt{2} + \sqrt{10}) = 8,5 \text{ м}$.

5. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{4}{8,5} = 0,47 \text{ м}$.

6. За додатком Н визначають швидкісну характеристику: $W = 53,5 \text{ м/с}$.

7. Гідравлічний нахил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{3^2}{53,5^2} = 0,0031$.

Приклад 15. Визначити ширину русла по дну і нахил дна каналу, щоб швидкість була допустимою нерозмиваючою:

а) $Q = 3,9 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 1,25$; одерновка плазом на малосвязанній основі: $n = 0,0275$; $h = 1 \text{ м}$;

б) $Q = 360 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 0$; облицювання бетонне в середніх умовах $n = 0,017$; $h = 3 \text{ м}$;

в) $Q = 1,9 \text{ м}^3/\text{с}$; $m_1 = 1,0$, $m_2 = 1,5$; ґрунт стабілізований бітумом $n = 0,018$; $h = 0,5 \text{ м}$.

Розв'язання (а). Визначають такі параметри за умови, що $v_{дон} = 2 \text{ м/с}$:

1. Площа поперечного перерізу: $\omega = \frac{Q}{v} = \frac{3,9}{2} = 1,95 \text{ м}^2$.

2. Далі $\omega = (b + mh)h$; $\omega - mh^2 = bh$, тоді ширина каналу по дну $b = \frac{\omega - mh^2}{h} = \frac{1,95 - 1,25}{1} = 0,7 \text{ м}$.

3. Змочений периметр: $\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2} = 0,7 + 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{1+1,25^2} = 3,9 \text{ м}$.

4. Гідравлічний радіус: $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{1,95}{3,9} = 0,5 \text{ м}$.

5. За додатком Н визначають швидкісну характеристику: $W = 21,6 \text{ м/с}$.

6. Гідравлічний нахил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{2^2}{21,6^2} = 0,0086$.

Відповідь: б) $i = 0,012$; в) $i = 0,0087$.

Приклад 16. По металевому лотку прямокутного перерізу шириною $b = 0,6$ м скидають нафту. Поздовжній нахил лотка $i = 0,0125$. Визначити, яку витрату пропустить лоток при глибині $h = 0,2$ м. Кінематична в'язкість нафти $\nu = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 1 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Відповідь: $Q = 0,175 \text{ м}^3/\text{с}$.

Приклад 17. Визначити нахил водостічного колектора прямокутного перерізу шириною $b = 1,4$ м, який забезпечує при глибині $h = 1,3$ м витрату $Q = 2,1 \text{ м}^3/\text{с}$. Колектор виконаний із збірного залізобетону.

Відповідь: $i = 0,00087$.

Приклад 18. Визначити витрату води в каналі трапецеїдального поперечного перерізу. Ширина каналу по дну $b = 10$ м, глибина води $h = 3$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 2$. Поздовжній нахил каналу $i_0 = 0,0016$. Дно і відкоси каналу укріплені грубою цегляною кладкою.

Відповідь: $Q = 205 \text{ м}^3/\text{с}$.

3.5 Розрахунки каналів з неоднорідною шорсткістю

На практиці зустрічаємо водотоки, в яких стінки і дно мають різну шорсткість. У таких випадках розрахунки ведуть за середнім коефіцієнтом шорсткості n_{cp} .

При співвідношенні найбільшого і найменшого коефіцієнтів шорсткості $\frac{n_{max}}{n_{min}} < 1,5 - 2$ середній коефіцієнт знаходимо за формулою:

$$n_{cp} = \frac{X_1 n_1 + X_2 n_2 + \dots + X_m n_m}{X}. \quad (1.27)$$

При співвідношенні $\frac{n_{max}}{n_{min}} > 1,2 - 2$ середній коефіцієнт визначаємо за формулою:

$$n_{cp} = \left(\frac{X_1}{X} n_1^{3/2} + \frac{X_2}{X} n_2^{3/2} + \dots + \frac{X_m}{X} n_m^{3/2} \right)^{2/3}, \quad (1.28)$$

де X – повна довжина змоченого периметра; $X_1; X_2 \dots X_m$ – довжина частин змоченого периметра з коефіцієнтами шорсткості, відповідно $n_1; n_2 \dots n_m$.

Середній коефіцієнт шорсткості змінюється зі зміною глибини. Нормальна глибина h_0 для каналів з неоднорідною шорсткістю визначаємо методом підбору.

За допустиму швидкість для таких каналів приймаємо нерозмиваючу середню в перерізі швидкість для найбільш слабкого типу укріплення.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 19. Визначити глибину в каналі трапецеїдального перерізу. Ширина по дну $b = 2,5$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,5$. Нахил каналу $i_0 = 0,001$ 9. Дно і стіни каналу закріплені грубою бутовою кладкою.

Вказівки: будуємо графік $K = f(n)$, при K_0 знаходимо h_0 .

Приклад 20. Визначити середню швидкість течії і витрату води річки в зимових умовах, якщо ширина річки по вільній поверхні $b = 80$ м, площа живого перерізу $\omega = 264$ м², нахил вільної поверхні $i = 0,0001$, коефіцієнт шорсткості русла дорівнює $n_p = 0,033$, коефіцієнт шорсткості нижньої поверхні льодового покриву $n_l = 0,012$.

Вказівки: довжину змоченого периметра перерізу ріки x приймаємо рівною ширині вільної поверхні річки. Відповідь: $V = 0,6$ м/с; $Q = 158$ м³/с.

Приклад 21. Як зміниться площа живого перерізу ріки зимою при нахилі $i = 0,0001$, при коефіцієнті шорсткості льоду $n_l = 0,0012$ порівняно з літніми умовами, якщо витрата і ширина ріки по вільній поверхні в обох випадках однакові. При розрахунках виходити з таких умов: $Q = 135$ м³/с, $b = 75$ м, $\omega = 225$ м², $i = 0,000081$.

Відповідь: ω збільшиться на 9 м².

Тема 4 Гідравлічно найвигідніший переріз каналу

Це такий переріз каналу, який здатний за заданої площі забезпечити максимальну пропускну здатність. При заданій площі такий перетин має максимальний гідравлічний радіус, тобто мінімальний змочений периметр.

$$R_{MAX} = \frac{1}{2} h_0 \text{ і } h_0 = 2R_{MAX} \quad (1.29)$$

Цій вимозі задовольняє напівкруглий перетин (найменшим периметром є коло з геометрії). За заданою площею меншими периметрами володіють правильні багатокутники, довжина їх периметру буде тим менше, чим більше число сторін.

На практиці частіше зустрічаються канали трапецеїдального перетину. У руслах трапецеїдального перерізу гідравлічно найвигіднішого профілю співвідношення ширини русла по дну до глибини потоку h_0 при рівномірному русі або, як її називають, відносну ширину русла визначаємо за формулою:

$$\beta_{Г,Н} = \left(\frac{b}{h}\right)_{Г,Н} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right) \quad (1.30)$$

Необхідно виходити з умов, що при заданому коефіцієнті закладення відкосів m повинне бути співвідношення:

$$\frac{\beta}{h_0} = \beta_{Г,Н} \cdot \quad (1.31)$$

Якщо задається площа живого перерізу, невідомі ширина русла по дну і глибина протікання потоку по дну, тобто b , h – невідомо, а задано ω , тоді:

$$v = \frac{\beta_{Г,Н.}}{\sqrt{\beta_{Г,Н.} + m}} \sqrt{\omega} \quad \text{і} \quad h_0 = \frac{1}{\sqrt{\beta_{Г,Н.} + m}} \sqrt{\omega}. \quad (1.32)$$

Для полегшення розрахунків значень відносної ширини русла використовують таблиці (додаток Ц, Ч).

Якщо для розрахунків задаються витрата Q , тип укріплення русла і його нахил то використовують формулу:

$$Q = \omega W \sqrt{i} = (b + mh_0)h_0 \cdot \frac{1}{n} R^Z \sqrt{i}. \quad (1.32)$$

Підставляючи $b = h_0 \beta_{Г,Н.}$, і $R = \frac{1}{2} h_0$, знайдемо глибину потоку

$$h_0 = \left(\frac{2^Z}{\beta_{Г,Н.} + m} \right)^{\frac{1}{2+Z}} \left(\frac{nQ}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2+Z}}. \quad (1.33)$$

Приймаючи показник степеня $Z = 0,700$, маємо

$$h_0 = A \left(\frac{nQ}{\sqrt{i}} \right)^{0,37}, \quad (1.34)$$

де

$$A = \left(\frac{2^{0,7}}{\beta_{Г,Н.} + m} \right)^{0,37}. \quad (1.35)$$

Значення A наведені в додатку Ц.

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити тип укріплення і поздовжній нахил дна каналу, профіль якого повинен бути гідравлічно найвигіднішим за таких умов:

а) витрата $Q = 107 \text{ м}^3/\text{с}$, коефіцієнт закладення відкосів $m = 2,5$, а ширина русла по дну $b = 1,4 \text{ м}$;

б) $Q = 1,28 \text{ м}^3/\text{сек}$; $m = 0$; $b = 0,8 \text{ м}$;

в) $Q = 1,53 \text{ м}^3/\text{сек}$; $m = 1,5$; $b = 0,4 \text{ м}$.

Розв'язання.

1. За додатком Ц визначаємо $\beta_{Г,Н.} = 0,39$.

$$2. \quad h_0 = \frac{b}{\beta_{Г,Н.}} = \frac{1,4}{0,39} = 3,6 \text{ м}.$$

3. Площа поперечного перерізу: $\omega = h_0(b + mh_0) = 3,6(1,4 + 2,5 \cdot 3,6) = 37,5 \text{ м}^2$.

4. Швидкість руху потоку: $V = \frac{Q}{\omega} = \frac{107}{37,5} = 2,85 \text{ м/с}$.

5. За додатком Ж визначаємо укріплення: дерна на зв'язній основі.

6. За додатком Е знаходять коефіцієнт шорсткості: $n = 0,0275$.

7. Гідравлічний радіус: $R = \frac{1}{2} h_0 = \frac{1}{2} \cdot 3,6 = 1,8 \text{ м}$.

8. За табл. швидкісна характеристика $W=55,5 \text{ м/с}$.

9. Нахил $i = \left(\frac{V}{W}\right)^2 = \left(\frac{2,85}{55,5}\right)^2 = 0,0026$.

Відповідь: б) укріплення – кладка з цегли на цементному розчині; значення нахилу залежатиме від коефіцієнта шорсткості;

в) укріплення – дерен на малозв'язній основі; $i = 0,019$.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 2. Визначити розміри земляного каналу гідравлічно найвигіднішого перерізу, який при нахилі $i = 0,001$ має витрату $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$. Канал має трапецеїдальну форму перерізу із закладенням відкосів $m = 2$.

Вказівки: ширину по дну b визначаємо за формулою $b = 2h(\sqrt{1+m^2} - m)$.

Відповідь: $h = 1,32$; $b = 0,62$,

Приклад 3. Визначити тип укріплення і поздовжній нахил, який повинно мати русло, щоб його профіль був гідравлічно найвигіднішим при умовах:

а) $Q = 56,4 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 1,0$; $h_0 = 2,0 \text{ м}$;

б) $Q = 39,2 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 0,5$; $h_0 = 1,6 \text{ м}$;

в) $Q = 3,76 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 3,0$; $h_0 = 0,56 \text{ м}$.

Відповідь: а) укріплення – бутова кладка з середніх порід; i залежить від шорсткості n ; б) укріплення – кладка квінкера; i залежить від шорсткості n ; в) укріплення – дерен на зв'язній основі; $i = 0,019$.

Приклад 4. Визначити ширину русла по дну, глибину рівномірного руху і нахил, який повинно мати русло, щоб при гідравлічно найвигіднішому профілі його середня в перерізі швидкість протікання потоку відповідала б для даного типу укріплення допущеній швидкості, якщо:

а) $Q = 34,4 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 2,0$; русло закріплюємо доброю бутовою кладкою (бруківкою) з середніх порід;

б) $Q = 2,6 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 2,5$; русло укріплюють дерен в стіну;

в) $Q = 3,26 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 1,5$; ґрунт просочують бітумом.

Відповідь: а) $i = 0,012$; б) $i = 0,022$; в) $i = 0,0061$.

Приклад 5. Визначити ширину русла, глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку, профіль русла гідравлічно найвигідніший при умовах: а) $Q = 4,0 \text{ м}^3/\text{с}$; $i = 0,001$; $m = 2,0$; канал прокладають у щільній глині;

б) $Q = 1,84 \text{ м}^3/\text{с}$; $i = 0,0025$; $m = 0$; русло закріплено доброю сухою кладкою;

в) $Q = 4,14 \text{ м}^3/\text{с}$; $i = 0,08$; $m = 1,0$; добре оброблена скеля.

Відповідь: а) $h_0 = 1,26\text{м}$; $V = 1,02\text{м/с}$; б) $h_0 = 0,9\text{м}$; $V = 1,14\text{м/с}$;
в) $h_0 = 0,44\text{ м}$; $V = 7,4\text{ м/с}$.

Приклад 6. Визначити глибину води в каналі h , що відповідає гідравлічно найвигіднішому перерізу, якщо ширина каналу $b = 0,8\text{ м}$; коефіцієнт закладення відкосів $m = 2$.

Відповідь: $h = 1,7\text{ м}$.

Приклад 7. Знайти найвигідніші розміри трапецеїдального каналу довжиною $L = 8000\text{ м}$, який з'єднує дві водойми на різних рівнях $H = 4\text{ м}$, якщо витрата каналу $Q = 1\text{ м}^3/\text{с}$, закладення відкосів $m = 1,5$; ґрунт – земля ($n = 0,013$).

4.1 Визначення нормальної глибини і середньої в перерізі швидкості потоку

При визначенні нормальної (побутової) глибини h_0 і середньої в перерізі швидкості протікання потоку заданими є:

- форма і розміри поперечного перерізу;
- поздовжній нахил дна;
- коефіцієнт шорсткості n ;
- розрахункова витрата.

Визначення нормальної глибини потоку вирішують різними методами, деякі з них наведені нижче.

Метод підбору. При цьому задаються рядом одиниць $h_1; h_2; h_3; \dots h_n$, розраховують відповідні їм площі живого перерізу потоку, змочений периметр, гідравлічний радіус, за таблицями знаходять швидкісну характеристику і розраховують витратні характеристики $K = \omega \cdot W$, які порівнюють із заданою витратною характеристикою:

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (1.36)$$

Якщо $K_n = K_0$, тоді нормальна глибина $h_0 = h_n$. Цей процес можна спростити, побудувавши за декількома значеннями глибин графік залежності $K = f(h)$ (рис. 1.6), за яким знаходимо відповідну глибину за розрахованим K_0 .

Розрахунки можна спростити використавши *показниковий закон*, відповідно до якого

$$\frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{x_1}. \quad (1.37)$$

У цьому випадку, за двома значеннями глибин розраховують відповідні їм витратні характеристики знаходять показник степені за формулою:

$$X_1 = \frac{\lg \frac{K_2}{K_1}}{\lg \frac{h_2}{h_1}}. \quad (1.38)$$

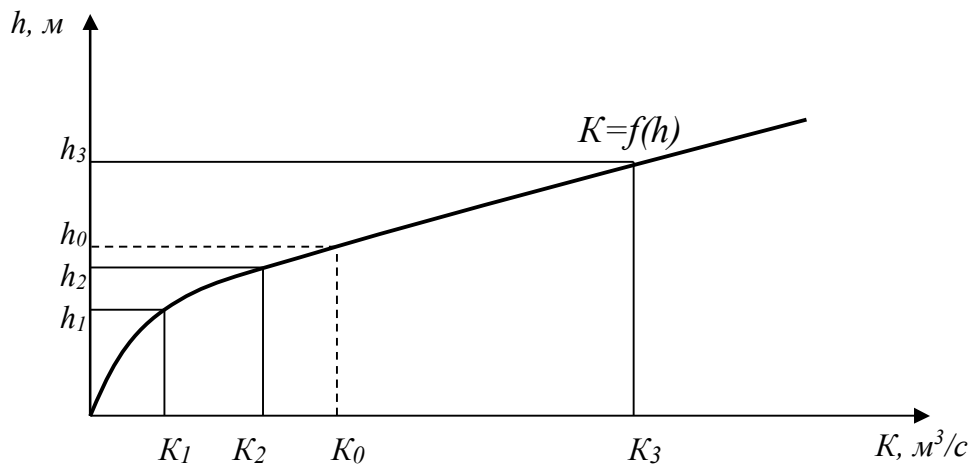


Рисунок 1.6 – Графік залежності витратної характеристики від глибини потоку

Маючи значення витратної характеристики, шукаємо нормальну глибину за формулою:

$$h_0 = h_1 \left(\frac{K_0}{K_1} \right)^{\frac{1}{X_1}}. \quad (1.39)$$

При розрахунках велику допомогу надають спеціальні графіки й таблиці.

Для стандартних русел з невеликим діапазоном змін основних параметрів і шорсткості використовують таблиці, побудовані з урахуванням змін z за формулою М.М. Павловського (1.12). Прикладом може бути додаток Т для труб круглого перерізу з різним наповненням і різних коефіцієнтах шорсткості.

Послідовність розрахунку наступна:

- 1) розраховуємо значення витратної характеристики: $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}$;
 - 2) за додатком Т для труби з прийнятим радіусом визначаємо відповідні величини відносної глибини наповнення Δ і швидкісної характеристики W ;
 - 3) визначаємо середні в перерізі швидкості $V = W\sqrt{i}$;
 - 4) розраховуємо необхідну нормальну глибину протікання потоку $h_0 = \Delta \cdot r$.
- Таблиці з додатку Ф при різних значеннях коефіцієнта шорсткості n можна скласти для будь-яких стандартних труб.

Інші способи розрахунків нормативної глибини, що базуються на використанні таблиць, виходять з допущення, що показник ступеня у формулі $W = \frac{1}{n} R^z$ є величина постійна. Звичайно приймають:

$$z = 0,667 \text{ (при } y \approx 1/6);$$

$$z = 0,700 \text{ (при } y \approx 1/5).$$

Вибір орієнтованого значення z залежно від коефіцієнта шорсткості при різних гідравлічних радіусах виконуємо за додатком Ф.

У руслах трапецеїдального поперечного перерізу нормальна глибина протікання при $z = 0,667$ (при $y \approx 1/6$), може бути визначена *способом безрозмірної функції В. Г. Лобачова*, який полягає в тому, що за заданими величинами розраховують допоміжну безрозмірну функцію:

$$\varphi(\Psi) = \frac{b^2 \sqrt[3]{b^2} \sqrt{i}}{nQ}. \quad (1.40)$$

Знаючи $f(\psi)$ додатку Ф, можна знайти відносну глибину ψ і нормальну глибину протікання потоку $h_0 = \psi v$.

При $z = 0,700$ (при $y \approx 1/5$) нормальна глибина протікання потоку може бути визначена *способом абстрактної моделі І. І. Агроскіна*. При цьому розраховуємо допоміжну функцію:

$$f(\Psi) = \lg \frac{\sqrt{i}}{n} + \lg b^{2,7} - \lg Q. \quad (1.41)$$

Знаючи $f(\psi)$, за додатком Ф можна визначити відносну глибину ψ і розрахувати нормальну глибину: $h_0 = \psi v$.

Розрахунки *труб, колекторів, тоннелей криволінійного контуру* при $z = const$ можна вести за таблицями відносних швидкісних і витратних характеристик. Наприклад, за додатком Ф для труб круглого поперечного перерізу при коефіцієнті шорсткості $n = 0,015$ і $n = 0,017$.

Послідовність розрахунку нормальної глибини і середньої швидкості у цьому випадку така:

- 1) розраховуємо значення відносної витратної характеристики:

$$\frac{K}{Z^{2+2}} = \frac{Q}{\sqrt{i} Z^{2+2}};$$

- 2) за додатком Ф знаходимо відносну глибину наповнення Δ і відносну швидкісну характеристику W' ;

- 3) глибина рівномірного руху: $h = \Delta \cdot r$;

- 4) середня в перерізі швидкість потоку: $V = W' z^z z \sqrt{i}$.

Приклади розв'язання задач

Приклад 8. Визначити нормальну глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку при рівномірному русі в руслі трапецеїдального поперечного перерізу, ширина по дну $b = 1,0$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,0$, поздовжній нахил дна $i = 0,002$, коефіцієнт шорсткості русла $n = 0,025$, витрата $Q = 0,824$ м³/с.

Розв'язання:

а) метод підбору

1. Розраховуємо витратну характеристику, яка відповідає нормальній глибині: $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{0,824}{\sqrt{0,002}} = 18,4 \text{ м}^3 / \text{с};$

1. Визначаємо $h_1 = 0,21$ м, тоді:

$$\omega_1 = (b + mh_1)h_1 = (1 + 1 \times 0,21)0,21 = 0,254 \text{ м}^2,$$

$$\chi_1 = b + h_1 2\sqrt{1 + m^2} = 1,0 + 0,21 \times 2\sqrt{1 + 1,0^2} = 1 + 0,21 \times 2,83 = 1,594 \text{ м},$$

$$R_1 = \frac{\omega_1}{\chi_1} = \frac{0,254}{1,594} = 0,16 \text{ м}.$$

За Додатком Н: швидкісна характеристика $W_1 = 102$ м/с; тоді витратна характеристика: $K_1 = w_1 \cdot W_1 = 0,254 \cdot 10,2 = 2,6$ м³/с, при цьому $K_1 < K_0$.

2. Визначаємо K_2 при $h_2 = 0,82$ м:

$$\omega_2 = (1 + 1 \cdot 0,82) \cdot 0,82 = 1,49 \text{ м}^2;$$

$$\chi_2 = 1 + 2,83 \cdot 0,82 = 3,32;$$

$$R_2 = 22,2 \text{ м/с};$$

$$K_2 = 1,49 \cdot 22,2 = 33 \text{ м}^3/\text{с} > K_0.$$

4. Визначаємо K_3 при $h_3 = 0,44$ м:

$$\omega_3 = (1,0 + 1,0 \cdot 0,44) \cdot 0,44 = 0,634 \text{ м}^2;$$

$$\chi_3 = 1,0 + 2,83 \cdot 0,44 = 2,242 \text{ м};$$

$$R_3 = \frac{0,634}{2,242} = 0,28 \text{ м};$$

$$W_3 = 15,6 \text{ м/с};$$

$$K_3 = 0,634 \cdot 15,6 = 9,9 \text{ м}^3/\text{с} < K_0.$$

5. Визначаємо K_4 при $h_4 = 0,61$ м:

$$\omega_4 = (1,0 + 1,0 \cdot 0,61) \cdot 0,61 = 0,98 \text{ м}^2;$$

$$\chi_4 = 1,0 + 2,83 \cdot 0,61 = 2,725 \text{ м};$$

$$R_4 = \frac{0,98}{2,725} = 0,36 \text{ м};$$

$$W_4 = 18,8 \text{ м/с};$$

$$K_4 = 0,98 \cdot 18,8 = 18,4 \text{ м}^3/\text{с} = K_0.$$

Тоді нормальна глибина дорівнює $h_0 = h_4 = 0,61\text{ м}$, а середня швидкість:
 $V = \omega \sqrt{i} = 18,8 \cdot \sqrt{0,0020} = 0,84 \text{ м/с}$.

б) побудова графіку залежності $K = f(h)$

1. Знаходимо розраховане значення витратної характеристики за формулою

$$(3.29): K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{0,824}{\sqrt{0,002}} = 18,4 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Визначаємо глибини: $h_1 = 0,21 \text{ м}$; $h_2 = 0,44 \text{ м}$; $h_3 = 0,82 \text{ м}$ і знаходимо відповідні їм значення та зводимо дані розрахунку до таблиці 1.2:

$$\omega_n = (b + mh_n) \cdot h_n;$$

$$\chi_n = b + 2h_n \sqrt{1 + m^2};$$

$$R_n = \frac{\omega_n}{X_n}.$$

За додатком Н знаходимо W_n і розраховуємо $K_n = \omega_n W_n$ (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків

| $h, \text{ м}$ | $\omega, \text{ м}^2$ | $X, \text{ м}$ | $R, \text{ м}$ | $W, \text{ м/с}$ | $K, \text{ м}^3/\text{с}$ |
|----------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|---------------------------|
| 0,21 | 0,254 | 1,594 | 0,16 | 10,2 | 2,6 |
| 0,44 | 0,634 | 2,242 | 0,28 | 15,6 | 9,9 |
| 0,82 | 1,49 | 3,32 | 0,45 | 22,2 | 33,0 |

3. Будуємо графік $K = f(h)$ і за графіком знаходимо глибину, яка відповідає $K_0 = 18,4 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 1.7).

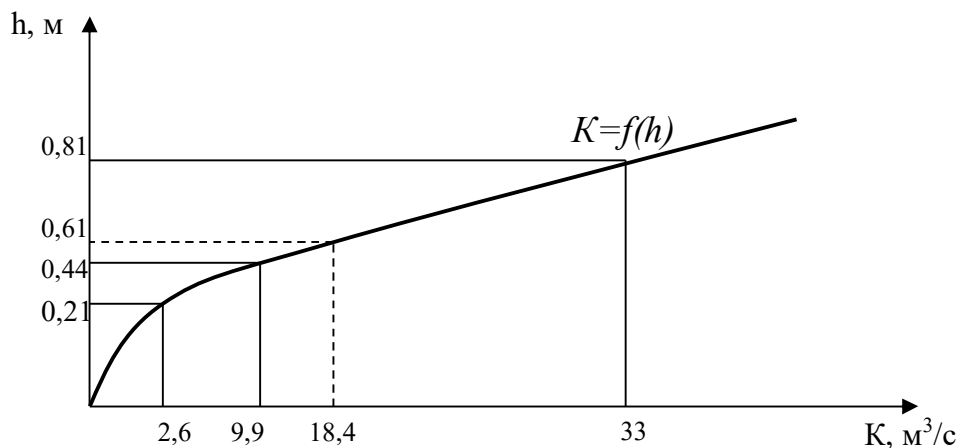


Рисунок 1.7 – Графік $K = f(h)$ для визначення нормальної глибини

Таким чином, з графіка (рис. 1.7) маємо, що при $K_0 = 18,4 \text{ м}^3/\text{с}$, нормальна глибина $h_0 = 0,61 \text{ м}$, а швидкість руху $V = W\sqrt{i} = 0,84 \text{ м/с}$.

в) «Показникоовий» закон:

1. Знаходимо $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = 18,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

2. Визначаємо глибину $h_1 = 0,44 \text{ м}$; $h_2 = 0,82 \text{ м}$ і розраховуємо значення витратних характеристик: $K_1 = 9,9 \text{ м}^3/\text{с}$; $K_2 = 33 \text{ м}^3/\text{с}$.

3. Розраховуємо $X_1 = \frac{\lg \frac{K_2}{K_1}}{\lg \frac{h_2}{h_1}} = \frac{\lg \frac{33}{9,9}}{\lg \frac{0,82}{0,44}} = \frac{\lg 3,34}{\lg 1,86} = \frac{0,524}{0,27} \approx 1,94$.

4. Тоді нормальна глибина $h_0 = h_1 \left(\frac{K_0}{K_1} \right)^{\frac{1}{X_1}}$ і дорівнює

$$h_0 = 0,44 \left(\frac{18,4}{9,9} \right)^{\frac{1}{1,94}} = 0,606.$$

Відповідь: $h_0 = 0,606 = 0,61 \text{ м}$, а швидкість руху $V = W\sqrt{i} = 0,84 \text{ м/с}$.

в) *Абстрактная модель*. Враховуючи, що коефіцієнт шорсткості $n = 0,025$ і гідравлічний радіус $R < 1,0 \text{ м}$, можна використати рекомендації наведені у теоретичних викладах. Приблизно приймаємо показник ступеня $z = 0,700$, який є основою даного методу:

1. $\lg b^{2,7} = \lg 1,0^{0,27} = 0$;

$$\lg \frac{\sqrt{i}}{n} = \lg \frac{\sqrt{0,002}}{0,025} = 0,253;$$

$$\lg Q = \lg 0,824 = 1,916 = -0,084.$$

2. Функція $\varphi(\psi) = \lg \frac{\sqrt{i}}{n} + \lg b^{2,7} - \lg Q = 0,253 + 0 + 0,084 = 0,337$.

3. За додатком Ф (при $m = 1,0$): $\Psi = 0,60$.

4. $h_0 = \Psi v = 0,60 \cdot 1,0 = 0,60 \text{ м}$.

5. $\omega = (b + mh_n) h_n = (1,0 + 1,0 \cdot 0,60) \cdot 0,60 = 0,96 \text{ м}^2$, швидкість дорівнює:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,804}{0,96} = 0,86 \text{ м/с}.$$

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 9. Визначити підбором, побудовою графіка $K = f(h)$ і використовуючи «показний закон», нормальну глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку в руслі при таких умовах:

а) ширина по дну $v = 4,0 \text{ м}$, коефіцієнт закладання відкосів $m = 0$, нахил $i = 0,0009$, дно і стіни русла облицьовані тесаним каменем (в середніх умовах), витрата $Q = 16,0 \text{ м}^3/\text{с}$;

б) $v = 8,0$ м; $m = 1,5$; $i = 0,0001$; канал у щільній глині; $Q = 28,0$ м³/с;

в) $v = 0$; $m = 2,0$; $i = 0,0025$; ґрунт, що просочений бітумом; $Q = 1,66$ м³/с;

Приклад 10. Визначити, використовуючи метод «абстрактної моделі» або безрозмірної функції (залежно від середнього значення показника ступеня Z), нормальну глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку в каналі:

а) $b = 1,6$ м; $m = 0$; $i = 0,006$; дно і стіни русла закріплені цегляною кладкою (в середніх умовах), $Q = 2,8$ м³/с;

б) $b = 1,2$ м; $m = 2,5$; $i = 0,005$; русло закріплене дерен плазом; $Q = 4,29$ м³/с.

Відповідь: а) $h_0 = 0,8$ м, $V = 2,19$ м/с; б) $h_0 = 0,84$ м, $V = 1,55$ м/с.

Приклад 11. При якому наповненні h бетонний канал трапецеїдального перерізу матиме витрату $Q = 38$ м³/с, якщо ширина його $b = 25$ м, закладення відкосів $m = 0,5$, нахил $i = 0,00025$. Вказівки: для вирішення використовуємо формулу (2.29), будуємо графік $K = f(h)$.

Відповідь: $h = 1,2$ м.

Приклад 12. Бетонний канал трапецеїдального перерізу, який пропускає витрату $Q = 7,5$ м³/с, за гідрологічними умовами може мати глибину не більше $h \leq 1,2$ м. Визначити ширину каналу b , необхідну для пропускання необхідної витрати при нахилі $i = 0,0004$ і закладенні відкосів $m = 1$.

Вказівки: будуємо графік $K = f(b)$. **Відповідь:** $b = 3,45$ м.

Приклад 13. Визначити нормальну глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку в тунелі круглого перерізу радіусом $r = 2,0$ м, нахил дна $i = 0,0016$, коефіцієнт шорсткості $n = 0,015$, витрата $Q = 30,4$ м³/с.

Вказівки: визначаємо k_0 та приймаємо декілька значень відповідної глибини $\Delta_1; \Delta_2; \dots \Delta_n$ і знаходимо $\omega^1; R$; далі розраховуємо $\omega_1; R$, знаходимо W_1 ; і за формулою $K = \omega_1 W_1$. Порівнюємо K_0 з $k_1, k_2 \dots k_n$, якщо воно співпадає розраховуємо $n_0 = \Delta_n \cdot r$, або будуємо графік $K = f(\Delta)$, за K_0 знаходимо Δ і далі розраховуємо $h_0 = \Delta \cdot r$.

Приклад 14. Визначити, використовуючи додаток 10, нормальну глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку при рівномірному русі в трубі круглого перерізу:

а) при радіусі $r = 1,6$ м з нахилом $i = 0,0049$; коефіцієнт шорсткості $n = 0,015$; витрата $Q = 24,5$ м³/с;

б) $r = 1,5$ м; $i = 0,0081$; бетонування поверхні труби відносно груба; $Q = 32,0$ м³/с.

Відповідь: а) $h_0 = 2,08$ м; $V = 4,44$ м/с; б) $h_0 = 2,55$ м; $V = 5,0$ м/с.

Приклад 15. Визначити нормальну глибину і середню в перерізі швидкість протікання потоку при рівномірному русі у круглій стандартній трубі:

а) $r = 1,0$ м, якщо труба – водостійка, у нормальних умовах з нахилом $i = 0,01$, а витрата $Q = 16,4$ м³/с;

б) $r = 2,0$ м, труба з доброї цегляної кладки; $i = 0,0001$; $Q = 6,48$ м³/с.

Відповідь: а) $h_0 = 1,8$ м; $V = 5,5$ м/с; б) $h_0 = 2,4$ м; $V = 0,82$ м/с.

Приклад 16. При якому наповненні h земляний канал ($n = 0,025$) трапецеїдальної форми з шириною дна $b = 10$ м, закладенням відкосів $m = 1,5$ при нахилі $i = 0,0003$, витрата води $Q = 40$ м³/с. Вказівки: побудувати графік $Q = f(h)$.

Відповідь: $h = 2,65$ м.

4.2 Розрахунок русел для русел замкнутого перерізу

Для русел криволінійного поперечного перерізу безпосереднє визначення елементів живого перерізу течії дуже складне (рис. 1.8).

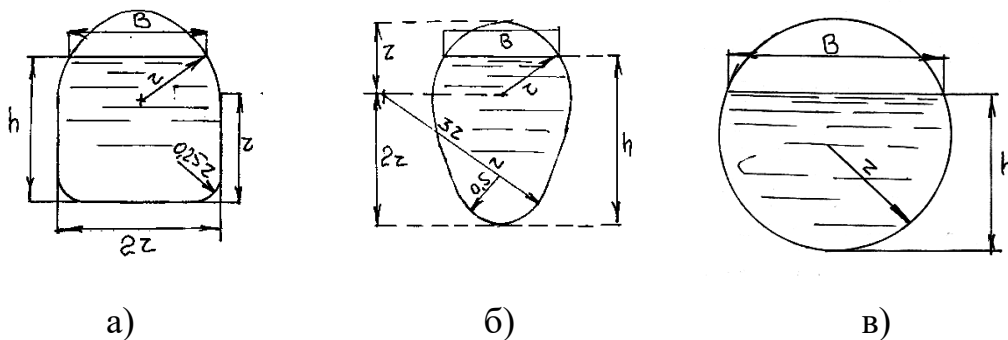


Рисунок 1.8 – Криволінійні перерізи русел:
а – коритоподібний; б – овоїдальний; в – круглий

Для типових перерізів, таких як коло, коритоподібний, овоїдальний тощо складають допоміжні таблиці (дод. С1, С2, С3). У таких таблицях залежно від відносної глибини наповнення $\Delta = h/r$ подаються такі параметри:

– відносна площа живого перерізу:

$$\omega' = \frac{\omega}{r^2}; \quad (1.42)$$

– відносний змочений периметр:

$$\chi' = \frac{\chi}{2}; \quad (1.43)$$

– відносна ширина русла по вільній поверхні рідини:

$$B' = \frac{B}{r}; \quad (1.44)$$

– відносний гідравлічний радіус:

$$R' = \frac{R}{r}. \quad (1.45)$$

Гідравлічний радіус і середня в перерізі швидкість для русел будь-якого поперечного перерізу визначають за формулами:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (1.46)$$

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (1.47)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 17. Визначити середню швидкість і витрату потоку, якщо:

а) у водостічній забрудненій трубі круглого поперечного перерізу, радіусом $r = 0,6$ м при нахилі дна $i = 0,0004$ рівномірний рух потоку при глибині $h_0 = 0,67$ м;

б) тунель коритоподібного поперечного перерізу облицьований тесаним каменем (у середніх умовах), $z = 1,7$ м; $i = 0,0064$; $h_0 = 3,06$ м.

Розв'язання (а). Визначають такі параметри:

1. Відносна глибина наповнення: $\Delta = \frac{h_0}{r} = \frac{0,67}{0,6} = 1,12$.

2. За додатком С $\omega' = 1,81$; $R' = 0,535$.

3. Відносна площа живого перерізу: $\omega' = \frac{\omega}{r^2}$; $\omega = \omega' \cdot r^2 = 1,81 \cdot 0,6^2 = 0,65$ м².

4. Відносний гідравлічний радіус: $R' = \frac{R}{r}$; $R = R' \cdot r = 0,53 \cdot 0,6 = 0,32$ м.

5. За додатком Е: коефіцієнт шорсткості $n = 0,014$.

6. За додатком Н знаходять швидкісну характеристику $W = 33,1$ м/с.

7. Швидкість руху води: $V = W \sqrt{i} = 33,1 \sqrt{0,0004} = 0,662$ м/с.

8. Витрата потоку у водостічній забрудненій трубі круглого поперечного перерізу становить: $Q = \omega V = 0,65 \cdot 0,66 = 0,43$ м³/с.

Розв'язання (б). Відповідь: б) $V = 5,34$ м/с, $Q = 52,2$ м³/с.

Приклад 18. Визначити, який нахил необхідно надати трубі овоїдального перерізу з радіусом $r = 1,8$ м, $n = 0,017$, витрата $10,6$ м³/с, глибина $h_0 = 5,04$ м.

Розв'язання. Визначають такі параметри:

1. Відносна глибина наповнення $\Delta = \frac{h_0}{r} = \frac{5,04}{1,8} = 2,8$.

2. Відносна площа перерізу: $\omega' = 2,978$; тоді $R' = 0,596$.

3. Відносна площа живого перерізу $\omega' = 4,431$;
 $\omega = \omega' \cdot r^2 = 4,431 \cdot 1,8^2 = 14,36 \text{ м}^2$.

4. Відносний гідравлічний радіус: $R' = 0,667$; $R = R' \cdot r = 0,667 \cdot 1,8 = 1,2 \text{ м}$.

5. Швидкісна характеристика: $W = 66,5 \text{ м/с}$.

6. Витрата потоку: $Q = \omega V$, тоді швидкість руху: $v = \frac{Q}{\omega} = \frac{10,6}{14,36} = 0,76 \text{ м/с}$.

7. Гідравлічний нахил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{0,76^2}{66,5^2} = 0,00013$.

Приклад 19. Визначити глибину рівномірного руху і нахил, який слід надати трубі овоїдального поперечного перерізу.

Розв'язання.

1. Площа поперечного перерізу: $\omega = \frac{Q}{v} = \frac{11,8}{2} = 5,9 \text{ м}^2$.

2. Відносна площа живого перерізу: $\omega' = \frac{\omega}{r^2} = \frac{5,9}{1,5^2} = 2,61$.

3. Відносна глибина наповнення: $\Delta = \frac{h_0}{r} = 1,8$; $R' = 0,598$; $\chi' = 4,39$.

4. Змочений периметр: $\chi = \chi' r = 4,39 \cdot 1,5 = 6,59 \text{ м}$.

5. Відносний гідравлічний радіус визначають за формулою $R' = \frac{R}{r}$, тоді гідравлічний радіус $R = R' \cdot r = 0,598 \cdot 1,5 = 0,9 \text{ м}$.

6. Тоді глибина $h = \Delta \cdot r = 1,8 \cdot 1,5 = 2,7 \text{ м}$.

7. За додатком Н: $W = 71,9 \text{ м/с}$.

8. Гідравлічний нахил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{2^2}{71,9^2} = 0,00077$.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 20. Визначити необхідний радіус перерізу й нахил, який необхідно надати дну тунелю:

а) круглого перерізу (з хорошого монолітного бетону), $Q = 592 \text{ м}^3/\text{с}$;
 $\Delta = 1,7$; $v = 19 \text{ м/с}$;

б) овоїдального перерізу (добра бутова кладка $n=0,017$), $Q = 53 \text{ м}^3/\text{с}$;
 $\Delta = 2,8$; $v = 8,3 \text{ м/с}$.

Відповідь: а) $r = 3,3 \text{ м}$, $i = 0,0215$; б) $r = 1,2 \text{ м}$, $i = 0,027$.

Приклад 21. Визначити, чи захищена труба від замулювання і розмиву кріплення, якщо:

а) коритоподібний поперечний переріз має радіус $r = 0,6 \text{ м}$, бутову кладку середніх порід, швидкість течії, яка несе дрібні насоси з середнім діаметром часток $d_{cp} = 0,2 \text{ мм}$; $V = 1,5 \text{ м/с}$, а витрата $Q = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 3.4, а);

б) овоїдальний переріз (рис. 3.4, б) $r = 0,7$ м, облицьований бетоном, насоси $d_{cp} = 2,0$ мм; $V = 8,0$ м/с, $Q = 5,0$ м³/с,

в) поперечний переріз коло (рис. 3.4, в), $r = 0,9$ м, кладка з кліпкеру, насоси $d_{cp} = 3,0$ мм; $V = 0,5$ м/с, $Q = 0,8$ м³/с.

Вказівки: визначити w , w^l , за таблицями – Δ , R' ; $h = \Delta r$; $R = R'r$, V_{min} і V_{don} .

Відповідь: а) захищена від замулювання і розмиву; б) буде розмиватися облицювання; в) буде йти замулювання труби.

Приклад 22. Визначити середню швидкість течії у трубі, переріз – коло, радіус $r = 2,0$ м і встановити, чи буде захищена труба від замулення, якщо глибина течії у перерізі $h = 2,24$ м, витрата $Q = 10,86$ м³/с, а гідравлічна крупність наносів $u = 2$ мм/с.

Приклад 23. Порівняти пропускну можливість каналів (перерізи: напівтрикутник, напівтрапеція, напівквадрат, напівколо) з однаковою площею $\omega = 1,0$ м² і різною формою живого перерізу при бетонному облицюванні ($n = 0,017$) і нахилі $i = 0,005$

Вказівки:

– сторона трикутника $a^2 = \frac{4F}{\sqrt{3}}$;

– переріз каналу – напівквадрат $\frac{b^2}{2} = F$;

– переріз каналу – напівтрикутник $e^2 = \frac{4\omega}{3\sqrt{3}}$, $R = \frac{\omega}{x}$;

– напівколо – переріз каналу $\omega = \frac{\pi r^2}{2}$.

Тема 5 Нерівномірний рух у відкритих руслах

Нерівномірний рух – це рух, при якому швидкості частинок рідини змінюються уздовж їхньої траєкторії.

У відкритих руслах нерівномірний рух спостерігається, коли ширина або глибина потоку, або одночасно й те, й інше по довжині русел є величинами змінними. Нерівномірний рух у відкритому руслі може бути плавно змінним або відносно різко змінним.

Критична глибина необхідна не тільки для оцінки стану потоку, але і для виконання ряду гідравлічних розрахунків, які розглядатимуться в подальшому.

У загальному випадку критичну глибину визначають з основного рівняння критичного стану потоку:

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = \frac{\alpha Q^2}{g}, \quad (1.48)$$

де ω_k^3 - площа перерізу потоку при глибині, рівній критичній;

B_k - ширина русла по вільній поверхні потоку при тій же глибині;
 α - коефіцієнт кінетичної енергії зазвичай приймається рівним 1,1;
 g - прискорення вільного падіння.

Для русел довільного поперечного перерізу критична глибина може бути визначена підбором. З цією метою задаються глибини $h_1; h_2; h_3; \dots h_n$, розраховують відповідні їм площі поперечного перерізу, ширини русла за вільною поверхнею потоку і визначають співвідношення $\frac{\omega_1^3}{B_k}; \frac{\omega_2^3}{B_k}$ тощо, які порівнюють з постійною для умов розрахунку величиною $\frac{\alpha Q^2}{g}$.

За умови рівенства $\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_n^3}{B_n}$ шукана величина критичної глибини $h_{к.} = h_n$.

Для пришвидшення підбору, задаючись декількома глибинами, будують графік (рис. 1.9) залежності $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$ і за його даними визначають критичну глибину $h_{к.}$, яка відповідає співвідношенню (1.48).

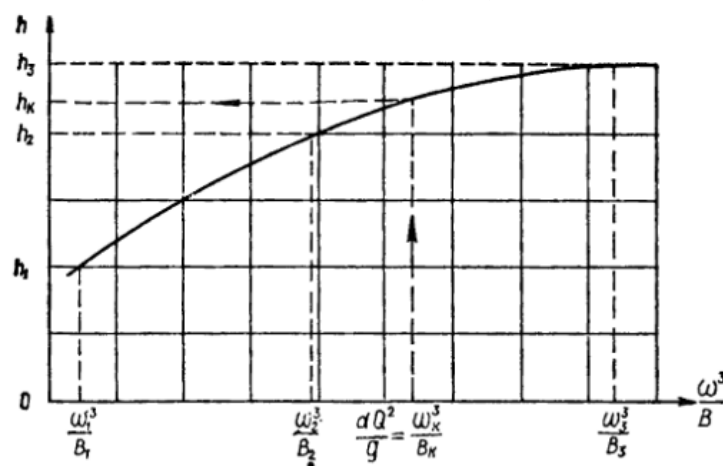


Рисунок 1.9 – Графік залежності $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$

Виходячи із загальної залежності (1.48) маємо:

– для русел прямокутного перерізу, критична глибина

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}; \quad (1.49)$$

– для русел трикутного перерізу, критична глибина

$$h_k = \sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g m^2}}; \quad (1.50)$$

або

$$h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g}; \quad (1.51)$$

де q – питома витрата: для прямокутного перерізу $q = Q / b$, а для трикутного – $q = Q / m$: $\alpha = 1,1$.

– для трапецієвидного перерізу розраховують значення допоміжної функції:

$$f(\mu) = \left(\frac{Q}{b}\right)^2 \left(\frac{m}{b}\right)^3. \quad (1.52)$$

Далі, за допоміжними таблицями [2, 3] знаходять відповідне значення множника μ . Тоді критична глибина визначається за формулою:

$$h_k = \mu \frac{b}{m}. \quad (1.53)$$

Критичний нахил – це нахил, який необхідно надати руслу, щоб нормальна глибина дорівнювала критичній: $h_0 = h_k$.

Якщо нормальна глибина в каналі дорівнює критичній, то повздовжній нахил такого каналу називається **критичним** і позначається через i .

Величину критичного нахилу можна одержати з рівняння Шезі для рівномірного руху і рівняння (1.48):

$$i_k = \left(\frac{Q}{\omega_k W_k}\right). \quad (1.54)$$

Якщо відомі критична глибина, а витрата не задана, тоді критичний нахил розраховують так:

$$i_k = \frac{g \omega_k}{\alpha W_k^2 B_k} = \frac{2g W_k}{B_k \alpha C_k^2 R_k}. \quad (1.55)$$

При розрахунках стандартних труб, якщо відомі значення витратної характеристики K при різних наповненнях, критичний нахил визначають так:

$$i_k = \left(\frac{Q}{K_k}\right)^2. \quad (1.56)$$

Залежно від співвідношення h_0 і h_k , а також від нахилу дна водотоку та критичного нахилу i та i_k на ділянці, що розглядається, визначають форму кривої вільної поверхні.

Якщо глибина потоку h менше h_k , то потік рухається доволі швидко; такий стан потоку називається **бурхливим**; при глибинах потоку h більше h_k , потік рухається з відносно малими швидкостями й стан потоку при цьому називають **спокійним**.

$h < h_k$ – потік у бурхливому стані;

$h = h_k$ – потік у критичному стані;

$h > h_k$ – потік у спокійному стані.

Якщо при розрахунку критична глибина невідома, то для аналізу характеристики стану потоку можна використовувати такі залежності:

$$\frac{\omega^3}{B_K} < \frac{\alpha Q^2}{g} - \text{потік у бурхливому стані}; \quad \frac{\omega^3}{B_K} = \frac{\alpha Q^2}{g} - \text{потік у критичному стані};$$

$$\frac{\omega^3}{B_K} > \frac{\alpha Q^2}{g} - \text{потік у спокійному стані}.$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити критичну глибину в руслі прямокутного перерізу $Q = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла $b = 0,6 \text{ м}$.

Розв'язання. Для русел прямокутного перерізу критичну глибину розраховують так:

$$1. h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g} \text{ або за формулою: } h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha 1,8^2}{g 0,6^2}} = 1 \text{ м.}$$

2. При визначенні модуля витрати $q = Q/b = 1,8/0,6 = 3 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ використовують допоміжні таблиці, за якими критична глибина дорівнює $h_k = 1,003 \text{ м}$.

Приклад 2. Визначити критичну глибину в руслі трикутного перерізу $Q = 0,23 \text{ м}^3/\text{с}$, коефіцієнт заложення відкосів $m = 1,5$.

Розв'язання. Для русел трикутного перерізу, критична глибина дорівнює:

$$1. h_k = \sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g m^2}} = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 1,1 \cdot 0,23^2}{9,81 \cdot 1,5^2}} = 0,347 \text{ м.}$$

2. Модуль витрати $q = Q/m = 0,23/1,5 = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$ використовують допоміжні таблиці, за якими критична глибина дорівнює $h_k = 0,347 \text{ м}$.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 1. Визначити критичну глибину в руслі прямокутного перерізу:

а) $Q = 0,98 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла $b = 2 \text{ м}$; б) $Q = 0,87 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла $b = 1,5 \text{ м}$;

Приклад 2. Визначити критичну глибину в руслі трикутного перерізу:

а) $Q = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, коефіцієнт заложення відкосів $m = 1$;

б) $Q = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$, коефіцієнт заложення відкосів $m = 2$.

Приклад 3. При якій ширині русла прямокутного поперечного перерізу критична глибина буде становити $h_k = 0,22 \text{ м}$, а витрата $Q = 0,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Приклад 4. Визначити різними способами (підбором, побудовою графіка $\frac{\omega^3}{B_K} = f(h)$ тощо) критичну глибину у руслі трапеційдального поперечного перерізу, якщо:

а) розрахункова витрата $Q = 1,1 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла по дну $b = 1 \text{ м}$, коефіцієнт заложення відкосів $m = 1$;

б) $Q = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$, $b = 0,5 \text{ м}$, $m = 1,5$; в) $Q = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, $b = 0,4 \text{ м}$, $m = 2$.

Приклад 5. Побудувати графік $\frac{\omega^3}{B_k} = f(h)$ і визначити критичну глибину у

руслі трапецийдального поперечного перерізу, якщо:

а) витрата $Q = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла по дну $b = 1 \text{ м}$, коефіцієнт заложення відкосів $m = 1,5$; б) $Q = 1,5 \text{ м}^3/\text{с}$, $b = 0,5 \text{ м}$, $m = 1,5$.

Тема 6 Водозливи, їх класифікація

6.1 Пропускна здатність непідтоплених водозливів з тонкою стінкою

Водозливом називається перешкода в потоці, яка стискає його знизу та з боків (рис. 1.10).

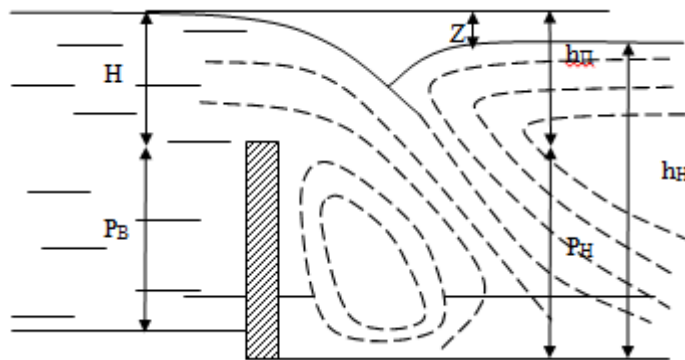


Рисунок 1.10 – Схема руху рідини через водозлив

Таким чином, перед водозливом глибина водотоку зростає в порівнянні з глибиною, що була до пристрою водозливу. Відстань від гребеня водозливу до найвищої позначки вільної поверхні називається **статичним напором** на водозливі. Уведемо такі поняття:

P – висота водозливу;

H – статичний напір на водозливі, що заміряють вище водозливу на відстані $3H$;

V_0 – швидкість підходу;

t – нормальна глибина в нижньому б'єфі;

z – різниця рівнів води до й після водозливу.

Широке застосування водозливів в інженерній практиці вимагає певної класифікації для них. Їх класифікують за рядом показників. За типом стінок, через які переливається вода виділяють наступні типи водозливів:

1) водозливи з тонкою стінкою – це водозливи, по периметру вирізу яких укріплений металевий аркуш із гострою крайкою;

2) водозливи практичного профілю, або гребля – це такі водозливи, в яких товщина гребеня в межах $(0,67-2,0)H$. Часто низова грань таких водозливів має

обрис траєкторії вільно падаючого струменя при висоті падіння, що дорівнює висоті водозливу;

3) водозливи із широким порогом – це такі водозливи, в яких товщина стінки $\delta = (2-3)H$.

Водозлив з тонкою стінкою є не підтопленим за таких умов:

$$h_n < 0; \quad \frac{z}{P_H} > \left(\frac{z}{P_H} \right)_K, \quad (1.57)$$

де h_n – глибина підтоплення.

$$h_n = h_n - P_n, \quad (1.58)$$

Витрату через непідтоплений водозлив з тонкою стінкою визначають за формулою:

$$Q = m_0 \cdot B \sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (1.59)$$

де m_0 – коефіцієнт витрати, який враховує швидкість підходу потоку до водозливу.

Значення коефіцієнта витрати m_0 для водозливу без бокового стиснення при вільному витіканні рідини, можна визначити за такими формулами:

– *Базена:*

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,003}{H} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \cdot \left(\frac{H}{H + P_B} \right)^2 \right], \quad (1.60)$$

де H і P_B – напір та висота водозливу з боку верхнього б'єфу, м;

– *Р. Р. Чугуєва*, якщо $H \geq 0,1$ м і $P_B > 0,5H$:

$$m_0 = 0,402 + 0,054 \cdot \frac{H}{P_B} \quad (1.61)$$

– *формулою Еглі* (за наявності бокового стиснення потоку) коефіцієнт витрати можна визначити так:

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} - 0,03 \frac{B_p - B}{B} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + P_B} \right)^2 \left(\frac{B}{B_p} \right)^2 \right]. \quad (1.62)$$

За дослідженнями Базена коефіцієнт витрати водозливу з нахилом водозливної стінки:

$$m_{0H} = m_0 \cdot m_\beta, \quad (1.63)$$

де m_0 – коефіцієнт витрати, який визначається за формулою (1.60);

m_β – коефіцієнт, залежить від кута нахилу β (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнтів m_β залежно від кута нахилу

| | | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-------|-------|------|------|----|-------|-------|-------|------|
| β | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 135 |
| m_β | 1,1 | 1,088 | 1,062 | 1,04 | 1,02 | 1 | 0,983 | 0,967 | 0,952 | 0,93 |

6.2 Пропускна здатність підтоплених водозливів з тонкою стінкою

Підтоплення водозливу з тонкою стінкою відбувається за наявності таких умов:

$$h_{II} = (h_H - P_H) > 0; \quad (1.64)$$

$$\frac{z}{P_H} < \left(\frac{z}{P_H} \right)_k, \quad (1.65)$$

де $\left(\frac{z}{P_H} \right)_k$ – відносний критичний перепад, який визначається за графіком рисунку 1.11;

h_{II} – глибина підтоплення (рис. 1.10).

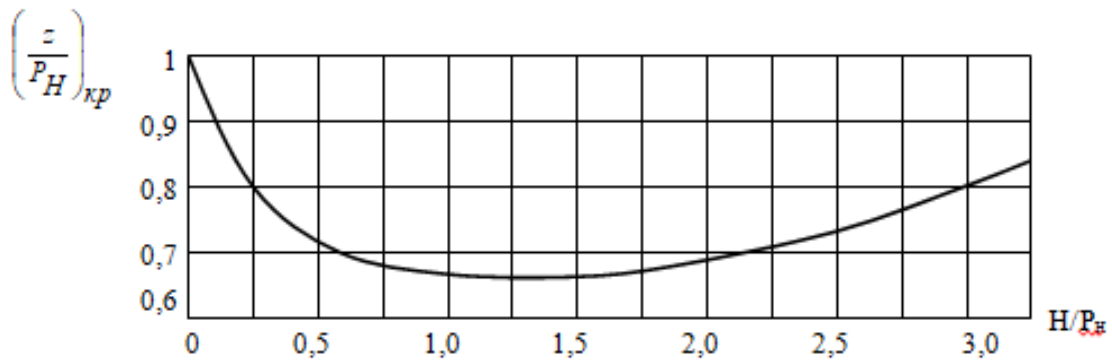


Рисунок 1.11 – Графік $\left(\frac{z}{P_H} \right)_k = fun\left(\frac{H}{P_H} \right)$ для водозливу з тонкою стінкою

Витрату через підтоплений водозлив з тонкою стінкою визначають за формулою:

$$Q = \sigma_n \cdot m_0 \cdot B \sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (1.66)$$

де m_0 – коефіцієнт витрати, який визначається за формулами (1.60) – (1.62);

σ_n – коефіцієнт підтоплення водозливу, який можна визначити за формулою Базена:

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_{II}}{P_H} \right) \cdot \left(\frac{z}{H} \right)^{1/3}. \quad (1.67)$$

Варто зазначити, що для не підтопленого водозливу застосовують коефіцієнт $\sigma_n = 1$, а для підтопленого – $\sigma_n < 1$.

6.3 Пропускна здатність водозливів практичного профілю

Якщо водозлив не підтоплений, то $\sigma_n = 1$. Для підтопленого водозливу $\sigma_n < 1$.

Коефіцієнт підтоплення водозливів практичного профілю при $h_{\Pi} / H_0 > 0,35$ можна визначити за формулою Г. К. Дерюгіна:

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{h_n}{H_0} \right) \cdot \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{m}{0,59} \right)^{0,4}} \right]^2}, \quad (1.68)$$

де h_{Π} – глибина підтоплення; якщо $h_{\Pi} / H_0 \leq 0,35$, то $\sigma_n = 1$;

H_0 – повний напір;

m – коефіцієнт витрати водозливу, який визначається за пропозицією М.М. Павловського:

$$m = m_{\phi} \cdot \sigma_n \cdot \sigma_{\phi}, \quad (1.69)$$

де m_{ϕ} – коефіцієнт витрати вихідної форми водозливу;

σ_n – коефіцієнт повноти напору, який враховує зміну пропускної здатності водозливу при відхиленнях дійсного напору H від профілюючого напору H_{np} , при якому $m_{\phi} = const$. Наприклад, для водозливу $m_{\phi} = 0,42$, а коефіцієнт σ_n :

$$\sigma_n = 0,7 + 0,185 \frac{H}{\delta}, \quad (1.70)$$

де σ_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує зміну пропускної здатності водозливу при зміні вихідної форми водозливу. Наприклад, для водозливу коефіцієнт σ_{ϕ} можна визначити за формулою:

$$\sigma_{\phi} = 1 + \frac{r}{H}. \quad (1.71)$$

Коефіцієнт витрати водозливів є функцією $m = f(H, P_B, \delta, \beta_1, \beta_2)$. Детальні рекомендації до визначення коефіцієнта витрати водозливів наводяться у спеціальних довідниках [2–5].

6.4 Гідравлічні розрахунки бокових водозливів

У багатьох випадках практики розрахунок бокового водозливу (або бокового водоскиду) зводиться до розрахунку довжини бокового водозливу.

Для розрахунку бокових водозливів можна використати наближені методи інтегрування рівнянь (це рівняння математичної моделі руху рідини на ділянці бокового водозливу:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - i_f - \frac{\alpha_0 \cdot (1 - \psi) \cdot Q}{g \cdot \omega^2} \cdot \frac{dQ}{dl}}{1 - \frac{\alpha_0 \cdot Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}} \quad (1.72)$$

та

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - i_f - \frac{\alpha \cdot Q}{g \cdot \omega^2} \cdot \frac{dQ}{dl}}{1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}} \quad (1.73)$$

За допомогою цих рівнянь можна дослідити втрати механічної енергії у руслі на ділянці бокового водозливу.

Наближений метод інтегрування рівняння (1.72) ґрунтується на таких припущеннях: $i \approx i_f$; $\psi = const$ ($\psi = 0$; $\psi = 1$ або $\psi = 1,1$); питома енергія живих перерізів є сталою, тобто

$$E = h_i + \frac{\alpha \cdot Q_i^2}{2g \cdot \omega_i^2} = const. \quad (1.74)$$

Рівняння (1.72) та (1.73) розв'язуються разом з рівнянням бокового водозливу:

$$\frac{dQ}{dl} = -\sigma_n \cdot m_H \sqrt{2g(h-P)}^{3/2}, \quad (1.75)$$

де σ_n, m_H – відповідно, коефіцієнт підтоплення і коефіцієнт витрати прямого водозливу;

h – глибина води в каналі (змінна величина);

P – висота водозливу.

Використовуючи залежності (1.74) та (1.75), інтеграл рівнянь (1.72) та (1.73) при $\psi = 1$ Науменко І. І. запропонував у такому вигляді:

$$L_B = \frac{1}{m_H} [C_1 \cdot (A_2 - A_1) - C_2 \cdot (\arctg A_2 - \arctg A_1) - C_3 (h_2 A_2 - h_1 A_1)], \quad (1.76)$$

$$C_1 = \frac{b(2E - 3P) + mP(6,5E - 7,5P)}{E - P}; \quad (1.77)$$

$$C_2 = \frac{3m(5P - E) + 6b}{2}; \quad (1.78)$$

$$C_3 = 2,5m; \quad (1.79)$$

$$A_1 = \sqrt{\frac{E - h_1}{h_1 - P}}; \quad A_2 = \sqrt{\frac{E - h_2}{h_2 - P}}; \quad (1.80)$$

де m – коефіцієнт закладення відкосів каналу;

b – ширина дна каналу;

$h_1; h_2$ – глибини води.

Рівняння (1.76) придатне для оцінки довжини бокового водозливу в трапецеїдальних, трикутних і прямокутних руслах, для спокійних і бурхливих потоків.

Для спокійних потоків глибина h_2 є відомою і визначається з кривої $Q = f(h)$ для каналу. Глибину h_1 визначають за допомогою формули (1.75):

$$h_1 + \frac{\alpha Q_1^2}{2g\omega_1^2} = h_2 + \frac{\alpha Q_2^2}{2g\omega_2^2}. \quad (1.81)$$

На підставі дослідних даних А. М. Курганов для розрахунків бокових водозливів пропонує такі залежності:

а) спокійний потік в каналі і на водозливі:

$$Q_B = m_H \cdot k_B \cdot L_B \sqrt{2g} \cdot (h_2 - P)^{3/2}, \quad (1.82)$$

де m_H – коефіцієнт витрати прямого водозливу;

L_B – довжина водозливу;

k_B – коректуючий коефіцієнт, який для не підтопленого водозливу визначається за формулою:

$$k_B = 1 - \frac{0,42}{H_2} \left(1 + 1,5 \frac{Q_2}{Q_1} \right) \cdot \left(\frac{Q_1^2}{2g\omega_n^2} - \frac{Q_2^2}{2g\omega_2^2} \right), \quad (1.83)$$

де ω_n – площа перерізу потоку на початку водозливу при глибині h_2 (для призматичного каналу $b_1 = b_2$ і $\omega_n = \omega_2$); $H_2 = h_2 - P$.

Якщо водозлив підтоплений, то

$$k_B = 0,9 \sqrt{1 - \left(\frac{h_n}{H_2} \right)^2}, \quad (1.84)$$

де $h_n = (h_n - P)$ – глибина підтоплення водозливу;

h_n – глибина води в нижньому б'єфі водозливу;

$H_2 = (h_2 - P)$ – напір на водозливі.

б) бурхливий потік на водозливі:

$$Q_B = m_H \cdot k_B \cdot L_B \sqrt{2g} \cdot (h_{к1} - P)^{3/2}, \quad (1.85)$$

де k_B – коректуючий коефіцієнт, величина якого для прямокутних каналів при $0,6 < (L_B / b) < 6,5$, та нахил дна $i = 0 - 0,0005$, обчислюється за формулою

$$k_B = \frac{1}{1,7 + 0,45 \frac{L_B}{b}}, \quad (1.86)$$

де b – ширина дна каналу.

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити ширину водозливу з тонкою стінкою, якщо відомі: витрата $Q = 8 \text{ м}^3/\text{с}$, висота водозливу з боку верхнього б'єфу $P_B = 2 \text{ м}$, а з боку нижнього б'єфу $P_H = 2,8 \text{ м}$, глибина воді и верхньому б'єфі $h_B = 3,5 \text{ м}$, а в нижньому б'єфі – $h_H = 2,5 \text{ м}$, ширина русла перед водозливом у верхньому б'єфі $B_p = 4 \text{ м}$. Дно русла в межах розташування водозливу – горизонтальне. Водозлив з боковим стисненням.

Розв'язання. Порівнюючи h_H та P_H , бачимо, що водозлив не підтоплений ($h_H < P_H$).

1. У першому наближенні приймаємо, що коефіцієнт витрати водозливу $m_0 = 0,40$.

2. Тоді за формулою (1.59) ширина водозливу:

$$B = \frac{Q}{m_0 \sqrt{2gH}^{3/2}} = \frac{8}{0,4 \sqrt{19,62 \cdot 1,5}^{3/2}} = 2,45 \text{ м.}$$

3. За формулою (6.5) уточнюємо коефіцієнт витрати:

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,0027}{1,5} - 0,03 \frac{4 - 2,45}{2,45} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{1,5}{1,5 + 2} \right)^2 \left(\frac{2,45}{4} \right)^2 \right] = 0,4025.$$

Оскільки уточнений коефіцієнт витрати відрізняється від коефіцієнта витрати першого наближення всього на 0,6 %, то ширина водозливу $B = 2,45 \text{ м}$ буде достатньою для пропуску витрати $Q = 8 \text{ м}^3/\text{с}$ при напорі $H = 1,5 \text{ м}$.

Приклад 2. За вихідними даними прикладу 1 визначити витрату за умови, що глибина потоку в нижньому б'єфі $h_H = 3,5 \text{ м}$.

Розв'язання.

1. Оскільки $h_H > P_H$, то водозлив може бути підтопленим. За умовою (1.74): $h_{II} = 3,5 - 2,8 = 0,7 \text{ м}$.

2. Перевіряємо умову (1.75). Для цього визначають:

– гідравлічний перепад: $Z = P_H - P_B + h_B - h_H = 2,8 - 2 + 3,5 - 3,5 = 0,8 \text{ м}$;

– відносний гідравлічний перепад: $\frac{Z}{P_H} = \frac{0,8}{2,8} = 0,286$;

– відносний напір: $\frac{H}{P_H} = \frac{1,5}{2,8} = 0,536$.

3. За графіком (рис. 1.11) визначають $\left(\frac{Z}{P_H} \right)_K = 0,7$. Отже, $\frac{z}{P_H} \left\langle \left(\frac{z}{P_H} \right)_K \right\rangle$.

Оскільки виконуються умови (1.74) та (1.75), то водозлив є підтопленим.

4. За формулою (1.77) обчислюємо коефіцієнт підтоплення водозливу:

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{0,7}{2,8} \right) \cdot \left(\frac{0,8}{1,5} \right)^{1/3} = 0,905.$$

5. За формулою (1.76) визначаємо витрату водозливу при $B = 2,45$ м і $m_0 = 0,402$: $Q = 0,905 \cdot 0,402 \cdot 2,45 \cdot \sqrt{19,62} \cdot 1,5^{3/2} = 7,25$ м³/с.

Отже, при підтопленні водозливу витрата зменшилась на 9,5 %.

Приклад 3. Визначити довжину бокового водозливу для забирання об'єму води $Q_B = 22,8$ м³/с із каналу з параметрами: $Q_1 = 82,5$ м³/с, ширина дна $b = 8$ м, коефіцієнт закладення укосів каналу $m = 2$, похил дна $i = 0,00048$. після бокового водозливу в каналі залишається витрата $Q_2 = 59,7$ м³/с при глибині води $h_2 = 2,74$ м. Висота бокового водозливу $P = 1$ м (рис. 1.12). Коефіцієнт витрати $m_H = 0,34$.

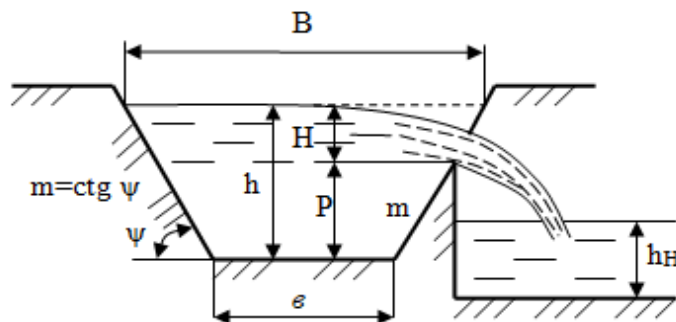


Рисунок 1.12 – Схема бокового водозливу

Розв'язання.

1. Визначаємо стан бурхливості потоку в каналі:

$$h_K = N \left(\sqrt{1 + M h_{KП}} - 1 \right), \text{ де } N = 1,3 \frac{b}{m}; M = 1,54 \frac{m}{b};$$

$$h_{KП} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}.$$

2. Критичні глибини при $Q_1 = 82,5$ м³/с і $Q_2 = 59,7$ м³/с:

$$h_{KП1} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_1^2}{g b^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,05 \cdot 82,5^2}{9,81 \cdot 8^2}} = 2,249 \text{ м};$$

$$M = 1,54 \frac{m}{b} = 1,54 \cdot \frac{2}{8} = 0,385; N = 1,3 \frac{b}{m} = 1,3 \cdot \frac{8}{2} = 5,2;$$

$$h_{K1} = 5,2 \left(\sqrt{1 + 0,385 \cdot 2,249} - 1 \right) = 1,9 \text{ м};$$

$$h_{KП2} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_2^2}{g b^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,05 \cdot 59,7^2}{9,81 \cdot 8^2}} = 1,81 \text{ м};$$

$$h_{K2} = 5,2 \left(\sqrt{1 + 0,385 \cdot 1,81} - 1 \right) = 1,57 \text{ м}.$$

3. За формулою знаходять глибину води в каналі на початку бокового водозливу:

$$E_1 = E_2 = h_2 + \frac{\alpha Q_2^2}{2g\omega_2^2} = 2,74 + \frac{1,05 \cdot 59,7^2}{19,62 \cdot 36,94^2} = 2,88 \text{ м.}$$

4. Тоді методом наближень за формулою (1.80) одержимо $h_l = 2,554$ м.

5. Оскільки $h_{kl} = 1,9 < h_l = 2,554$ м і $h_{k2} = 1,81 < h_2 = 2,74$ м, то потік знаходиться в спокійному стані.

Для визначення довжини бокового водозливу використаємо формули (1.81) та (1.82).

6. За формулою (1.82) визначаємо коефіцієнт:

$$\begin{aligned} k_B &= 1 - \frac{0,42}{H_2} \left(1 + 1,5 \frac{Q_2}{Q_1} \right) \cdot \left(\frac{Q_1^2}{2g\omega_n^2} - \frac{Q_2^2}{2g\omega_2^2} \right) = \\ &= 1 - \frac{0,42}{2,74 - 1} \left(1 + 1,5 \frac{59,7}{82,5} \right) \cdot \left(\frac{82,5^2}{19,62 \cdot 36,94^2} - \frac{59,7^2}{2g\omega_2^2} \right) = 0,939 \end{aligned}$$

7. З формули (1.76) довжина бокового водозливу:

$$L_B = \frac{22,8}{0,939 \cdot 0,34 \cdot \sqrt{19,62} \cdot (2,74 - 1)^{3/2}} = 7,02 \text{ м.}$$

8. Обчислимо довжину бокового водозливу. Для цього визначаємо параметри:

$$C_1 = \frac{8(2 \cdot 2,88 - 3 \cdot 1) + 2 \cdot 1 \cdot (6,5 \cdot 2,88 - 7,5 \cdot 1)}{2,88 - 1} = 23,68 \text{ м;}$$

$$C_2 = \frac{3 \cdot 2(5 \cdot 1 - 2,88) + 6 \cdot 8}{2} = 30,36 \text{ м;}$$

$$C_3 = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ м;}$$

$$A_1 = \sqrt{\frac{2,88 - 2,554}{2,554 - 1}} = 0,4580; \quad A_2 = \sqrt{\frac{2,88 - 2,74}{2,74 - 1}} = 0,2836.$$

9. Тоді маємо:

$$\begin{aligned} L_B &= \frac{1}{0,34} \left[\begin{aligned} &23,68 \cdot (0,2836 - 0,4580) - 30,36 \cdot \\ &\cdot (\arctg 0,2836 - \arctg 0,4580) - \\ &- 5(2,74 \cdot 0,2836 - 2,554 \cdot 0,4580) \end{aligned} \right] = \\ &= \frac{1}{0,34} [-4,1298 - 30,36(0,2763 - 0,4295) + 1,9633] = 7,3 \text{ м.} \end{aligned}$$

Отже, довжина $L_B = 7,3$ м, усього на 4,2 % більша, ніж довжина $L_B = 7,02$ м, визначена за формулою (1.76).

Такі розбіжності містяться в межах похибок коефіцієнтів k_B та m_H .

Приклад 4. Виконати порівняння довжини бокового водозливу L_B , яку можна отримати за формулами (1.85) та (1.82), та в результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь (1.82) та (1.84). Забір води здійснюється з каналу, параметри якого наведені в прикладі 3. Коефіцієнт шорсткості каналу $n = 0,02$. Боковий водозлив виконаний у вигляді водозливу з широким порогом. Висота водозливу $P = 0$; коефіцієнт витрати водозливу $m_H = 0,32$. Потік в каналі і на водозливі спокійний. Параметр $\psi = u / V = 1$.

Розв'язання.

1. Використовуючи рівняння (1.72) та (1.74), складають розрахунковий алгоритм для обчислення довжини водозливу:

$$\Delta Q = \frac{m_H \cdot \sqrt{2g} \cdot (h-P)^{3/2} \left(1 - \frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot \omega^3}\right) \cdot (h_{i+1} - h_i)}{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} + \frac{Q}{g \omega^2} \left[m_H \cdot \sqrt{2g} \cdot (h-P)^{3/2}\right]}; \quad (1.87)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta Q}{m_H \cdot \sqrt{2g} \cdot (h-P)^{3/2}}. \quad (1.88)$$

2. У формулах (1.87) і (1.88): h , Q – середні значення, відповідно, глибини і витрати на ділянці ΔL між глибинами h_i та h_{i+1} :

$$h = \frac{1}{2}(h_i + h_{i+1}); \quad (1.89)$$

$$Q = Q_i + \frac{\Delta Q}{2}, \quad (1.90)$$

де $\Delta Q = Q_B / N$; $N = 10 - 15$ – кількість ділянок довжини водозливу;

R , C – гідравлічний радіус і коефіцієнт Шезі, що обчислені при глибині h .

3. При виконанні розрахунків коефіцієнт Шезі обчислюємо за формулою І. Й. Агроскіна:

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \cdot \lg R. \quad (1.91)$$

4. Результати розрахунків довжини водозливу за наведеним алгоритмом наведені в таблиці 1.4. У другому стовпчику таблиці 1.4: h_I , м – це глибина води в каналі на початку бокового водозливу, яку отримуємо в результаті розв'язання рівняння (1.87).

Порівнюючи значення довжин водозливу у таблиці 1.4 (стовпчики 7, 8, 9), бачимо, що крім дуже вузького водозливу при $Q_B = 7 \text{ м}^3/\text{с}$, усі результати добре між собою погоджуються. Відхилення не перевищують 5 %.

Таблиця 1.4 – Порівняльний розрахунок довжини бокового водозливу

| h_1 , м при $E=const$ | h_1 , м | h_2 , м | Q_1 , $м^3/с$ | Q_B , $м^3/с$ | Q_B / Q_1 | L_B за формулами | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------|--------|
| | | | | | | (1.87), (1.88) | (1.74) | (1.80) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 2,320 | 2,3396 | 2,60 | 80,0 | 30,0 | 0,375 | 5,38 | 5,45 | 5,42 |
| 2,552 | 2,5700 | 2,74 | 82,5 | 22,8 | 0,276 | 3,70 | 3,85 | 3,74 |
| 2,940 | 2,9353 | 3,00 | 82,5 | 11,8 | 0,143 | 1,63 | 1,67 | 1,64 |
| 3,060 | 3,0643 | 3,10 | 82,5 | 7,0 | 0,085 | 0,91 | 1,00 | 0,92 |
| 2,768 | 2,7834 | 3,00 | 100,7 | 30,0 | 0,298 | 4,27 | 4,34 | 4,32 |

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 1. Визначити ширину водозливу з тонкою стінкою, якщо відомі: витрата $Q = 18 \text{ м}^3/\text{с}$, висота водозливу з боку верхнього б'єфу $P_B = 2,2 \text{ м}$, а з боку нижнього б'єфу $P_H = 3,0 \text{ м}$, глибина води в верхньому б'єфі $h_B = 3,9 \text{ м}$, а в нижньому б'єфі – $h_H = 2,5 \text{ м}$, ширина русла перед водозливом у верхньому б'єфі $B_p = 6,5 \text{ м}$. Дно русла в межах розташування водозливу – горизонтальне. Водозлив з боковим стисненням.

Приклад 2. Визначити довжину бокового водозливу для забирання об'єму води $Q_B = 33,5 \text{ м}^3/\text{с}$ із каналу з параметрами: $Q_1 = 100 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина дна $b = 11 \text{ м}$, коефіцієнт закладення укосів каналу $m = 1,5$, похил дна $i = 0,00036$. Після бокового водозливу в каналі залишається витрата $Q_2 = 65 \text{ м}^3/\text{с}$ при глибині води $h_2 = 3,10 \text{ м}$. Висота бокового водозливу $P = 1,2 \text{ м}$. Коефіцієнт витрати $m_H = 0,34$.

Приклад 3. Визначити напір H на порозі трикутного водозливу з тонкою стінкою з кутом при вершині 90° , встановленого в каналі, якщо витрата $Q = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$. Ширина водозливу $b = 0,7 \text{ м}$, висота $p = 0,4 \text{ м}$.

ЗМ 2 СПОЛУЧЕННЯ Б'ЄФІВ

Тема 7 Сполучення б'єфів

Питання сполучення б'єфів складають один з основних розділів інженерної гідравліки, який пов'язаний із дослідженням потоку за тією або іншою гідротехнічною спорудою: водозливною греблею, перепадом тощо.

Із проходженням води через гідротехнічні споруди різко змінюється величина потенційної енергії потоку, переходячи у кінетичну енергію, де швидкість потоку різко збільшується, стан його стає бурхливим.

Характер сполучення потоку, що пройшов через гідротехнічну споруду, з потоком у нижньому б'єфі залежить від стану потоку в нижньому б'єфі. При спокійному стані потоку в нижньому б'єфі сполучення відбувається за допомогою *гідравлічного стрибка*, при бурхливому стані потоку в нижньому б'єфі – сполучення б'єфів відбувається без стрибка.

Глибині в стисненому перерізі h_e відповідає друга сполучена глибина h_e'' при якій стрибкові функції рівні:

$$\theta(h_e) = \theta(h_e''). \quad (1.92)$$

Глибина h_e'' зможе дорівнювати, бути більшою або меншою глибини t .

7.1 Визначення найменшої глибини за спорудою в нижньому б'єфі

Для визначення глибини h_c в нижньому б'єфі споруд використаємо рівняння Бернуллі, яке запишемо для перерізів 1–1 та С–С відносно площини порівняння 0–0 (рис. 1.13).

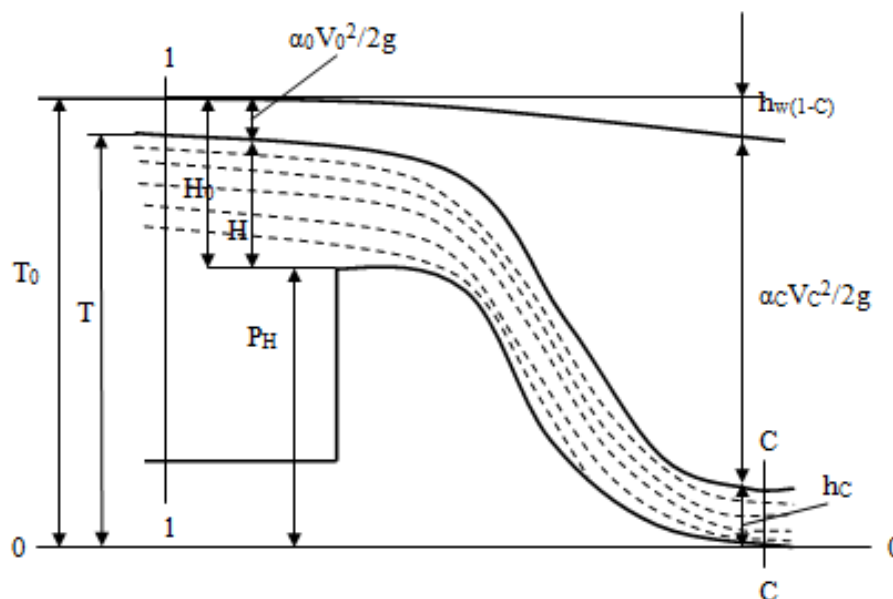


Рисунок 1.13 – Схема визначення глибини потоку h_c

Припустимо, що в живих перерізах 1–1 та С–С рух плавно змінний і п'єзометричні напори:

$$\left. \begin{aligned} H_{m1} &= z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = T; \\ H_{m2} &= z_2 + \frac{P_2}{\rho g} = h_c. \end{aligned} \right\} \quad (1.93)$$

Тоді рівняння Бернуллі відносно площини 0–0 набуває такого вигляду:

$$T + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha_c V_c^2}{2g} + h_{w(1-c)} \quad (1.94)$$

або

$$T_0 = h_c + \frac{V_c^2}{2g} (\alpha_c + \xi), \quad (1.95)$$

де T_0 – повна питома енергія потоку в перерізі 1–1:

$$T_0 = T + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g}, \quad (1.96)$$

де V_0 – середня швидкість потоку в перерізі 1–1;

$V_c = Q / \omega_c$ – середня швидкість потоку в перерізі С–С;

ω_c – площа живого перерізу потоку при глибині h_c ;

ξ – коефіцієнт гідравлічних опорів між перерізами 1–1 та С–С.

З рівняння (1.95) одержимо:

$$V_c = \varphi_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}, \quad (1.97)$$

де φ_c – коефіцієнт швидкості:

$$\varphi_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \xi}}. \quad (1.98)$$

Величина коефіцієнта φ_c залежить від типу і геометричних розмірів споруди та гідравлічних параметрів потоку. Наприклад, для водозливу зі щитом

$$\varphi_1 = 0,98 \cdot \varphi_c, \quad (1.99)$$

де

$$\varphi_c = 0,97 + 0,191g \left(\frac{H_0}{P_H} \right). \quad (1.100)$$

Для перепадів у прямокутному руслі при атмосферному тиску під падаючою струминою

$$\varphi_c = 0,989 - 0,039 \frac{P}{h_K}, \quad (1.101)$$

де h_K – критична глибина в прямокутному руслі. Формула (1.101) є апроксимацією дослідних даних Ю. С. Алексєєва при $P/h_K = 1 - 10$.

Для перепадів в прямокутному руслі і атмосферному тиску під падаючою струминою можна використати формулу Ю. С. Алексєєва:

$$\varphi_c = 0,882 + 0,173 \lg \frac{H_0}{P}, \quad (1.102)$$

де $H_0 = H + \alpha V_0^2 / 2g$ – повний напір перед водозливом, висота якого P_B .

Для перепаду без відриву струмини та куті похилу поверхні $\beta = 9-30^\circ$ і $P/h_K = 3..15$ величину φ_c на основі досліджень [1] наближено можна визначити за формулою

$$\varphi_c = 1,02 - (0,038 - 0,051 \sin \beta) \frac{P}{h_K}, \quad (1.103)$$

де h_K – критична глибина в прямокутному руслі.

Враховуючи, що $V_c = Q/\omega_c$, отримаємо:

$$Q = \varphi_c \omega_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}. \quad (1.104)$$

Вираз (1.104) – це загальне рівняння для визначення глибини h_c в стисненому перерізі в нижньому б'єфі гідротехнічної споруди.

У переважній більшості випадків русло нижнього б'єфу (безпосередньо за спорудою) має прямокутну форму. Для визначення глибини h_c в прямокутному руслі рівняння (1.104) запишемо у такому вигляді:

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{\varphi_c^2 2g(h_c B)^2} \quad (1.105)$$

або

$$T_0 = h_c + \frac{q^2}{\varphi_c^2 2gh_c^2}, \quad (1.106)$$

де $q = Q/B$ – питома витрата;

B – ширина дна нижнього б'єфу в перерізі С–С.

Рівняння (1.105) та (1.106) – це кубічні рівняння відносно h_c з вільним членом. Для визначення дійсного кореня цих рівнянь можна використати спосіб наближень:

$$h_c = \frac{q}{\varphi_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}}. \quad (1.107)$$

Тоді для першого наближення глибину h_c в правій частині рівняння (1.107) можна взяти рівною нулю. У наступних наближеннях під знак кореня потрібно підставляти ті значення h_c , які одержуємо в результаті обчислень після кожного наближення. У переважній більшості випадків ітераційний процес можна закінчувати після двох-трьох наближень.

7.2 Гідравлічний розрахунок водобійної стінки

Для зменшення кінетичної енергії потоку в нижніх б'єфах гідротехнічних споруд використовують спеціальні конструкції, які називаються гасителями енергії. До найпростіших гасителів належать: водобійні стінки (суцільні та прорізні), водобійні колодязі, комбіновані водобійні колодязі (рис. 1.14).

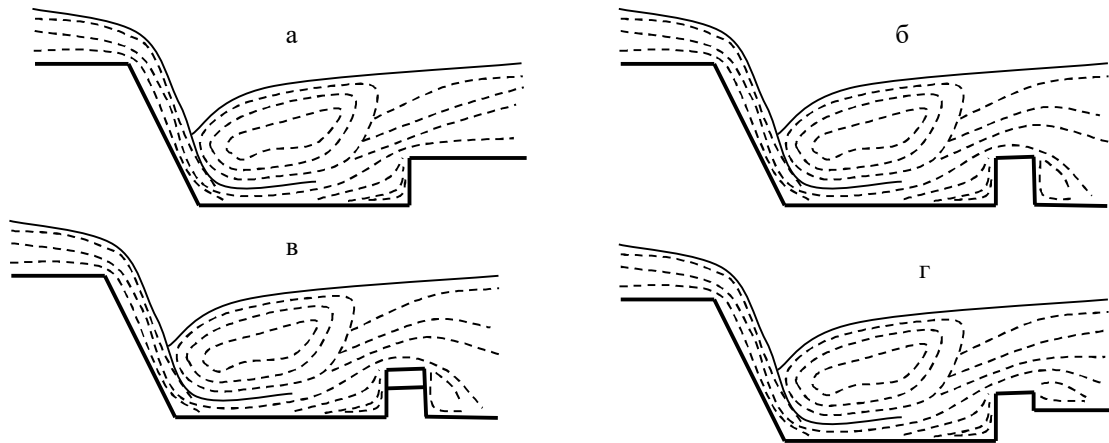


Рисунок 1.14 – Схеми простих гасителів енергії:

а – водобійний колодязь; б – суцільна водобійна стінка;
в – прорізна водобійна стінка; г – комбінований водобійний колодязь

У разі відігнутого стрибка водобійна стінка повинна утворити глибину $h > h_2$, де h_2 – друга спряжена глибина стрибка, яка відповідає розрахунковій витраті Q_p .

Для визначення висоти водобійної стінки припускають, що вона працює як деякий водозлив. Відповідно до цього висота стінки

$$C = \sigma_3 \cdot h_2 - H_c, \quad (1.108)$$

де $\sigma_3 = 1,05-1,1$ – коефіцієнт затоплення гідравлічного стрибка;

h_2 – друга спряжена глибина стрибка при витраті Q_p ;

H_c – напір над водобійною стінкою, який визначають за формулою:

$$H_c = \left(\frac{Q_p}{\sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \quad (1.109)$$

де $\sigma_n = f(h_n/H_c)$ – коефіцієнт підтоплення водобійної стінки з боку нижнього б'єфу;

B_{CT} – довжина стінки;

h_n – глибина підтоплення стінки:

$$h_n = h_n - C, \quad (1.110)$$

m_c – коефіцієнт витрати водобійної стінки як водозливу. Він залежить від типу водобійної стінки (суцільна, прорізна) та її розмірів і напору H_c .

Коефіцієнт витрати суцільної водобійної стінки можна визначити за формулою Р.Р. Чугаєва: $m_0 = 0,402 + 0,054 \frac{H}{P_B}$.

Для визначення коефіцієнта підтоплення суцільної водобійної стінки σ_n при $(h_n / H_c) > 0,4$ можна використати формулу:

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \left(1,8 \frac{h_n}{H_c} - 0,8\right)^2}, \quad (1.111)$$

де H_c, h_n – визначаються за формулами (1.109), (1.111).

Якщо $(h_n / H_c) < 0,4$, то $\sigma_n = 1$.

Оскільки перед початком розрахунків невідомо, водобійна стінка підтоплена чи не підтоплена, то невідоме значення і коефіцієнта підтоплення стінки σ_n . Окрім цього невідоме також значення коефіцієнта витрати m_c , тому що $m_c = f(C, H_c)$. У цьому разі висоту водобійної стінки можна визначити графоаналітичним способом. Хід розрахунків може бути таким:

- задаються кількома значеннями висоти стінки C ;
- обчислюють величини H_c, h_n, m_c, σ_n і за формулою (1.109) визначають витрати:

$$Q = \sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \sqrt{2g} \cdot H_c^{3/2}. \quad (1.112)$$

Результати розрахунків доцільно зводити в наступну таблицю 1.5.

Таблиця 1.5 – Результати розрахунків водобійної стінки

| C | $H_c = \sigma_3 \cdot h_2 - C$ | $h_n = h_n - C$ | σ_n | m_c | Q |
|-------|--------------------------------|-----------------|------------|-------|-------------|
| C_1 | | | | | $Q_1 < Q_p$ |
| C_2 | | | | | Q_2 |
| C_3 | | | | | $Q_3 > Q_p$ |

За даними цієї таблиці 1.5 будують графік $C = f(Q)$ (рис. 1.15), за допомогою якого визначають висоту стінки C .

Віддаль до водобійної стінки від перерізу з глибиною h_l визначають за формулою:

$$l_K = \beta \cdot l_C, \quad (1.113)$$

де l_C – довжина гідравлічного стрибка;

$\beta = 0,7 \dots 0,9$ – коефіцієнт зменшення гідравлічного стрибка.

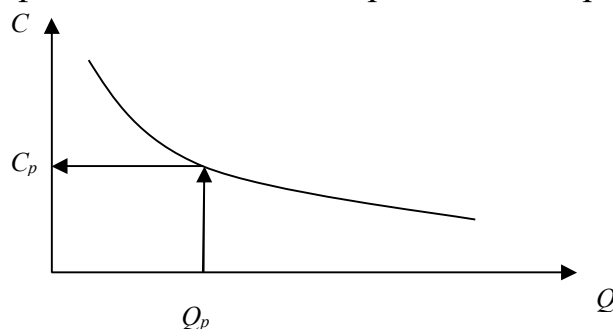


Рисунок 1.15 – Схема графіка $C = f(Q)$ для визначення висоти водобійної стінки

Якщо водобійна стінка висока, то за нею може утворитись відігнаний гідравлічний стрибок. Можливість утворення цього явища перевіряють таким чином: використовуючи наступну формулу визначають стиснену глибину за стінкою:

$$h_{c1} = \frac{Q}{\varphi_C \cdot B_{CT} \sqrt{2g \cdot (T_{0C} - h_{c1})}}, \quad (1.114)$$

де φ_C – коефіцієнт швидкості, що враховує втрати енергії при переливі потоку через водобійну стінку, значення якого при $C / h_k = 0,5-3,5$ визначають за формулою:

$$\varphi_C = 1,03 - 0,057 \cdot C / h_k, \quad (1.115)$$

де h_k – критична глибина. Якщо $C / h_k < 0,5$, то $\varphi_C = 1$;

T_{0C} – повна питома енергія потоку відносно дна нижнього б'єфу за стінкою

$$T_{0C} = \sigma_3 \cdot h_2 + \frac{\alpha Q_p^2}{2g(B_{CT} \cdot \sigma_3 \cdot h_2)^2}, \quad (1.116)$$

де $\alpha = 1,1-1,2$ – коефіцієнт кінетичної енергії потоку в перерізі з глибиною $h = \sigma_3 h_2$;

B_{CT} – довжина водобійної стінки.

Приймаючи, що перша спряжена глибина стрибка $h_1 = h_{c2}$, за рівнянням гідравлічного стрибка визначають другу спряжену глибину стрибка h_2 . Якщо $h_2 > h_n$, то за стінкою стрибок відігнаний і потрібно запроектувати другу водобійну стінку або замість водобійних стінок взяти інший гаситель енергії, наприклад, водобійний колодезь чи комбінований водобійний колодезь.

Слід зазначити, що тип гасителя впливає на вартість ділянки спряження б'єфів та гідротехнічної споруди в цілому. Тому гідравлічні розрахунки спряження б'єфів потрібно виконувати одночасно з оцінкою вартості споруди.

7.3 Гідравлічний розрахунок водобійного колодезя

У результаті гідравлічних розрахунків потрібно визначити глибину колодезя d та його довжину l_k (рис. 1.16).

Глибину водобійного колодезя можна визначити кількома способами:

1. Припускають, що вихід з водобійного колодезя працює як затоплений водозлив з широким порогом (рис. 1.16, а).

Виходячи з того, що колодезь повинен утворити глибину води для затоплення стрибка, відповідно до схеми рисунка 1.16, а, глибину колодезя можна визначити за формулою:

$$d = \sigma_3 h_2 - h_H - z, \quad (1.117)$$

де $\sigma_3 = 1,05-1,1$ – коефіцієнт затоплення стрибка;
 h_2 – друга спряжена глибина стрибка при розрахунковій витраті Q_p ;
 h_n – глибина води в нижньому б'єфі при витраті Q_p ;
 Z – гідравлічний перепад, для визначення якого використовують формулу пропускної здатності водозливу з широким порогом, тобто

$$z_0 = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_p}{\varphi_n B_k h_n} \right)^2, \quad z = z_0 - \frac{\alpha Q_p^2}{2g(\sigma_3 h_2 B_k)^2}, \quad (1.118)$$

де $\varphi_n = 0,98-0,99$ – коефіцієнт швидкості;
 B_k – ширина водобійного колодязя в площині вертикального уступу.

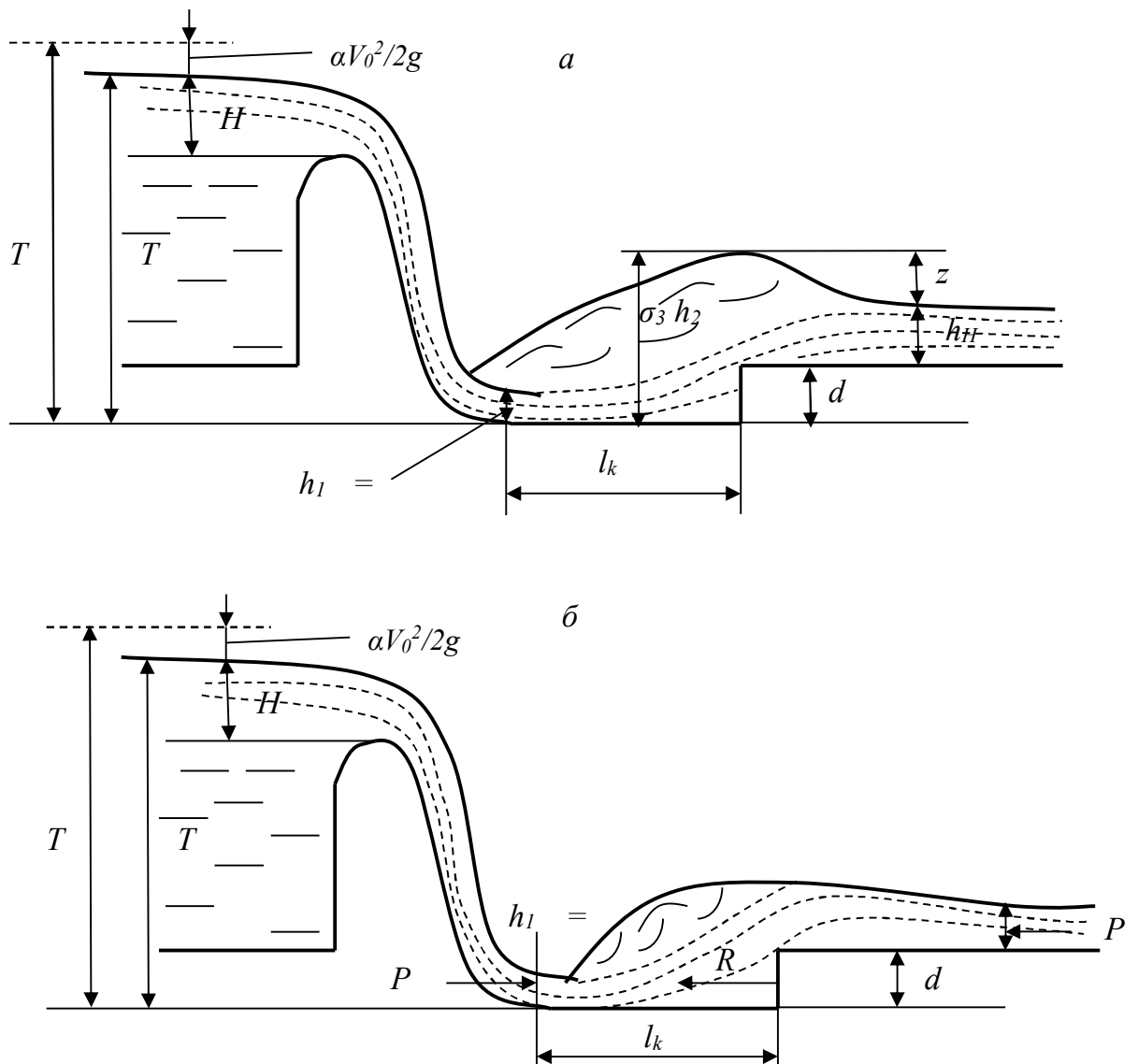


Рисунок 1.16 – Схема до розрахунку глибини водобійного колодязя:
 а – за формулою (1.116); б – за формулою (1.125)

Оскільки, при влаштуванні водобійного колодязя потенціальна енергія потоку верхнього б'єфу збільшується на величину d , то глибина потоку в

перерізі С-С дещо зменшиться, а друга спряжена глибина стрибка трохи збільшиться. Тому потрібно виконати уточнення глибини колодезя. Для цього за наступною формулою уточнюють глибину в стисненому перерізі С-С:

$$h_{c1} = \frac{q}{\varphi_c \sqrt{2g(T_{01} - h_{c1})}}, \quad (1.119)$$

де $T_{01} = T_0 + d$.

Приймаючи, що перша спряжена глибина $h_1 = h_{c1}$, за формулою спряжених глибин визначають нове значення другої спряженої глибини стрибка h_2 і за формулами (1.117), (1.118) обчислюють глибину водобійного колодезя в другому наближенні.

Зазвичай третього наближення не виконують.

2. Для визначення глибини колодезя, яка утворює присунутий до перерізу С-С гідравлічний стрибок, складемо рівняння змінювання кількості руху в потоці між перерізами з глибинами h_C і h_H в проєкціях на горизонтальну вісь:

$$\alpha_0 \rho Q (V_2 - V_1) = P_1 - P_2 - R, \quad (1.120)$$

де R – реакція водобійного виступу, висота якого дорівнює d_0 (рис. 1.16, б);

P_1, P_2 – сили гідродинамічного тиску в перерізах 1-1, 2-2. Припустимо, що P_1 і P_2 можна визначити за законами гідростатики, тобто

$$P_1 = \rho g y_{c1} \omega_1 = \rho g \frac{h_C}{2} h_C B = \rho g \frac{h_C^2}{2} B; \quad (1.121)$$

$$P_2 = \rho g y_{c2} \omega_2 = \rho g \frac{h_H}{2} h_H B = \rho g \frac{h_H^2}{2} B, \quad (1.122)$$

де B – ширина колодезя.

Підставимо значення P_1 і P_2 із (1.121) – (1.122) в рівняння (1.120) і розділимо всі члени рівняння на $\rho g B$.

Тоді отримаємо:

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g B^2} \left(\frac{1}{h_H} - \frac{1}{h_C} \right) = \frac{h_C^2}{2} - \frac{h_H^2}{2} - \frac{R}{\gamma}, \quad (1.123)$$

де γ – питома вага рідини.

Припустимо, що корегуючий коефіцієнт кількості руху α_0 дорівнює корегуючому коефіцієнту кінетичної енергії α . Тоді вираз $\alpha_0 Q^2 / (g B^2) = h_K^3$, де h_K – критична глибина в прямокутному руслі.

Рівняння (1.123) пишемо в такому вигляді:

$$\frac{h_K^3}{h_C} + \frac{h_C^2}{2} = \frac{h_K^3}{h_H} + \frac{h_H^2}{2} + \frac{R}{\gamma}. \quad (1.124)$$

Рівняння (1.124) – це рівняння підпертого гідравлічного стрибка в прямокутному руслі.

Якщо довжина колодязя $l_K \geq l_C$ (де l_C – довжина вільного досконалого стрибка), то реакцію R можна визначити за гідростатичним законом. Тоді, приймаючи, що перед уступом d_0 глибина води $h = h_2$, одержимо:

$$R = \gamma \cdot h_{цв} \cdot \omega_v = \gamma \left(h_2 - \frac{d_0}{2} \right) d_0, \quad (1.125)$$

де $h_{цв}$ – глибина занурення геометричного центру площі перерізу з глибиною h_2 .

Підставляючи значення R із (1.124) в рівняння (1.125), одержимо

$$d_0 = h_2 - \sqrt{h_2^2 - A}, \quad (1.126)$$

де параметр

$$A = (h_H - h_C) \cdot \left(\frac{2h_K^3}{h_C \cdot h_H} - h_H - h_C \right). \quad (1.127)$$

Якщо довжина стрибка $l_K < l_C$, то реакція водобійного виступу R відрізняється від тієї, що обчислена за формулою (1.125).

Для визначення реакції колодязя R використовують експериментальні залежності та графіки.

Для утворення затопленого стрибка глибину d_0 потрібно збільшити. З урахуванням затоплення стрибка глибину колодязя пропонують визначати за формулою:

$$d = \sigma_3 d_0 + (\sigma_3 - 1) \cdot h_H, \quad (1.128)$$

де $\sigma_3 = 1,05-1,1$ – коефіцієнт затоплення стрибка;

h_H – глибина води в нижньому б'єфі при розрахунковій витраті Q_p .

Якщо глибину колодязя визначати за формулами (1.117) і (1.128), то довжину колодязя можна призначати в межах

$$l_K = \beta l_C = (0,8-1,0) l_C. \quad (1.129)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити висоту суцільної водобійної стінки, якщо витрата споруди $Q = 55 \text{ м}^3/\text{с}$, перша спряжена глибина стрибка $h_1 = 0,73 \text{ м}$, глибина води в нижньому б'єфі $h_H = 2,5 \text{ м}$, коефіцієнт затоплення стрибка $\sigma_3 = 1,05$, ширина нижнього б'єфу $B = 8,8 \text{ м}$.

Розв'язання.

1. Визначаємо критичну глибину: $h_K = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot B^2}} = \sqrt[3]{\frac{1 \cdot 55^2}{9,81 \cdot 8,8^2}} = 1,58 \text{ м}$.

2. Далі обчислюємо другу спряжену глибину стрибка:

$$h_2 = 0,5 \cdot 0,73 \left(\sqrt{1 + 8 \left(\frac{1,58}{0,73} \right)^3} - 1 \right) = 2,94 \text{ м}.$$

Оскільки $h_2 = 2,9 \text{ м} > h_H = 2,5 \text{ м}$, то стрибок відігнаний.

3. Припустимо, що водобійна стінка працює як водозлив, коефіцієнт витрати визначають, а далі в першому наближенні вважаємо, що водобійна стінка є невідтопленою з боку нижнього б'єфу. Тоді коефіцієнт підтоплення $\sigma_{II} = 1$.

4. Задаючись висотами водобійної стінки C та використовуючи формули (1.108), (1.109), визначаємо витрати:

$$Q = \sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \sqrt{2g} \cdot H_c^{3/2},$$

де m_c – коефіцієнт витрати. Результати розрахунків зведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Результати розрахунків водобійної стінки

| $C, \text{ м}$ | $H_c = \sigma_3 \cdot h_2 - C, \text{ м}$ | H_c / C | m_c | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ |
|----------------|---|-----------|-------|---------------------------|
| 1 | 2,09 | 2,09 | 0,515 | 60,66 |
| 1,2 | 1,89 | 1,57 | 0,487 | 49,32 |
| 1,5 | 1,59 | 1,06 | 0,459 | 35,68 |

5. За даними таблиці 1.6 будемо графік $C = f(Q)$ (рис. 1.17) за допомогою якого при $Q = 55 \text{ м}^3/\text{с}$ знаходимо висоту водобійної стінки $C = 1,1 \text{ м}$.

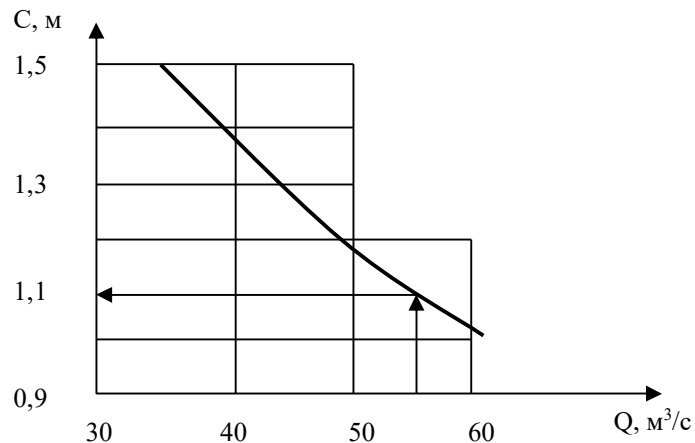


Рисунок 1.17 – Графік для визначення висоти водобійної стінки (до прикладу 1).

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 1. Запроектувати водобійний колодязь при таких умовах: витрата споруди $Q = 75 \text{ м}^3/\text{с}$, перша спряжена глибина стрибка $h_1 = 0,86 \text{ м}$, глибина води в нижньому б'єфі $h_H = 3,1 \text{ м}$, коефіцієнт затоплення стрибка $\sigma_3 = 1,05$, ширина нижнього б'єфу $B = 7,9 \text{ м}$.

Приклад 2. Визначити довжину ділянки спряження б'єфів за водоскидом у вигляді безвакуумного водозливу практичного профілю. Висота водозливу з боку нижнього б'єфу $P_H = 10 \text{ м}$, напір на водозливі $H = 2,48 \text{ м}$, питома витрата

$q = 8 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$, глибини води в нижньому б'єфі $h_n = 3,75 \text{ м}$. Тривалість скидання розрахункової витрати $T = 30 \text{ діб}$.

Тема 8 Гідравлічний стрибок

Гідравлічним стрибком називається різке зростання глибини потоку з переходом від бурхливого до спокійного стану на відносно невеликій довжині русла. Це явище різкого, стрибкоподібного підвищення рівня води у відкритому руслі при переході потоку від бурхливого стану в спокійне.

Перехід цей здійснюється у зв'язку зі зміною умов руху. Зазвичай гідравлічний стрибок виникає при протіканні води через піднесення на дні русла, при витіканні з-під щита або перетікання через водозлив або інші споруди.

До стрибка глибина $h' < h_k$ (h_k – критична глибина), а в кінці стрибка глибина потоку $h'' > h_k$ (рис. 1.18).

Експериментальними дослідженнями встановлено, що в гідравлічному стрибку можна виокремити дві зони (рис. 1.18):

1. Основна струмина.
2. Поверхневий вихор (вир).

Лінія розмежування цих двох частин – це усереднена в часі лінія, яка умовно відмежовує основний потік з витратою Q від поверхневого виру.

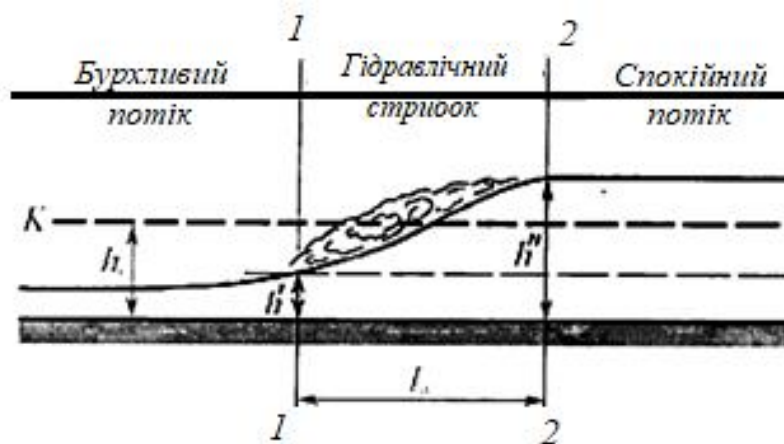


Рисунок 1.18 – Схема гідравлічного стрибка і післястрибкової ділянки

Між поверхневим вихором і транзитним, основним потоком відбувається постійний обмін масами рідини, що є причиною підвищеної турбулізації потоку, утворення додаткових турбулентних напружень, які спричиняють інтенсивні втрати механічної енергії основного потоку.

Під час вивчення гідравлічного стрибка будемо користуватися такими позначеннями (рис. 1.18):

- h' , h'' – спряжені глибини стрибка або глибини до і після гідравлічного стрибка, де h' – перша сполучена глибина (глибина, з якою стрибок починається) $h' < h_k$ та h'' – друга сполучена глибина (глибина в кінці стрибка) $h'' > h_k$, тобто $h' < h_k < h''$;
- різниця $a = h'' - h'$ – висота стрибка;
- горизонтальна проекція поверхневого виру, що міститься між перерізами 1–1 і 2–2 l_c називається довжиною стрибка.

Форма або вид гідравлічного стрибка встановлюється залежно від співвідношення величин спряжених (взаємних) глибин h'' і h' . Виокремлюють такі форми гідравлічного стрибка:

- *досконалий гідравлічний стрибок*, для якого властива низка згасаючих хвиль, та який характеризується гладкою вільною поверхнею;
- *хвилястий гідравлічний стрибок* (стрибок-хвиля) описується руйнуванням першої хвилі, появою вальця, аерацією потоку.

У руслах прямокутного перетину форма гідравлічного стрибка визначається залежно від таких співвідношень:

- $\left(\frac{h_k}{h}\right)^3 > 3$ – досконалий гідравлічний стрибок;
- $\left(\frac{h_k}{h}\right)^3 < 3$ – хвилястий гідравлічний стрибок.

У практичних розрахунках форму стрибка зазвичай визначають так:

- $h'' > 2 h'$ – досконалий гідравлічний стрибок;
- $h'' < 2 h'$ – хвилястий гідравлічний стрибок (стрибок-хвиля)

Основне завдання при розрахунку гідравлічного стрибка зводиться до вирішення таких основних задач:

- визначення спряжених глибин h' і h'' ;
- довжини гідравлічного стрибка l_c ;
- супроводжувальних гідравлічний стрибок втрат енергії h_w .

Довжина трансформації епюр швидкостей називається *ділянкою спряження б'єфів* і в загальному випадку становить

$$L_{дсб} = l_c + l_{пст} = l_c + (10...30)h_n, \quad (1.130)$$

де l_c – довжина гідравлічного стрибка;

$l_{пст}$ – довжина післястрибкової ділянки;

h_n – глибина потоку в нижньому б'єфі.

Задаючись глибинами $h > h_k$, за рівнянням (1.135) обчислюють значення функції $\Pi(h)$ і будують графік (рис. 1.20, а), з якого визначають глибину h'' .

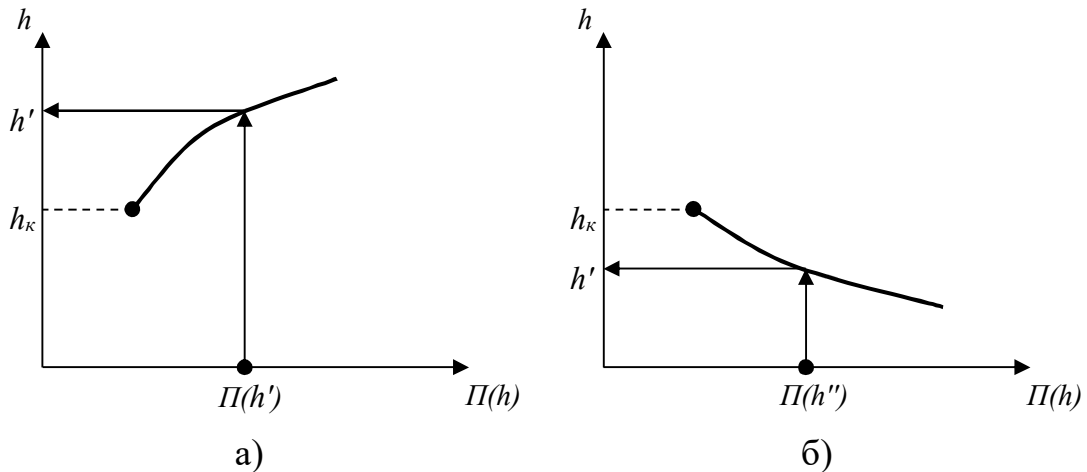


Рисунок 1.20 – Графік для визначення спряжених глибин стрибка

У разі, якщо невідомою є перша спряжена глибина h' , то хід розрахунків такий:

- 1) визначають критичну глибину h_k ;
- 2) обчислюють значення стрибкової функції: $\Pi(h_2) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_2} + y_{c2} \cdot \omega_2$.

3) задаються глибинами $h < h_k$ і за рівнянням (1.132) обчислюють значення функції $\Pi(h)$; будують графік $\Pi(h) = f(h)$ (рис. 1.20, б), за допомогою якого визначають невідому глибину стрибка h' .

Таким чином, взагалі для русел трапецієдального перерізу спряжені глибини визначають за графіком Рахманова, наближеним способом Рахманова (при співвідношенні $h'' / h_k \leq 5$ (точність до 7 %) за формулами:

$$h'' = \frac{1,2h_k^2}{h' + 0,2h_k} \quad ; \quad (1.136)$$

$$h' = 1,2 \frac{h_k^2}{h''} - 0,2h_k. \quad (1.137)$$

Залежності для визначення спряжених глибин стрибка в прямокутному руслі, можна отримати безпосередньо з рівняння (1.130) і (1.134):

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_1} + y_{c1} \cdot \omega_1 = \frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_2} + y_{c2} \cdot \omega_2. \quad (1.138)$$

Припустимо, що $\alpha_0 = \alpha$, де α – коефіцієнт кінетичної енергії. Тоді, беручи до уваги зазначене вище рівняння (1.138) виглядає так:

$$\frac{\alpha Q^2}{g b h_1} + b \cdot \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha Q^2}{g b h_2} + b \cdot \frac{h_2^2}{2}. \quad (1.139)$$

Розділимо всі члени рівняння (1.39) на ширину b :

$$\frac{\alpha Q^2}{gb^2 h_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha Q^2}{gb^2 h_2} + \frac{h_2^2}{2} \quad (1.140)$$

або

$$\frac{h_k^3}{h_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{h_k^3}{h_2} + \frac{h_2^2}{2}. \quad (1.141)$$

Рівняння (1.141) – це рівняння досконалого гідравлічного стрибка в прямокутному руслі з постійною шириною b . З рівняння (1.141) одержуємо:

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_k}{0,5h'} \right)^3} - 1 \right]; \quad (1.142)$$

$$h' = 0,5h'' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_k}{0,5h''} \right)^3} - 1 \right]. \quad (1.143)$$

У рівняннях (1.141) – (1.143) h_k – критична глибина, яка визначається за формулою $h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$ або $h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g}$, де $q = Q/b$, $\alpha = 1,1$.

8.2 Довжина гідравлічного стрибка. Геометричні розміри хвилястого стрибка. Втрати енергії в стрибку

Руйнуюча здатність потоку на ділянці гідравлічного стрибка значно більша, ніж спокійного потоку при рівномірному та нерівномірному русі, тому визначення довжини гідравлічного стрибка має важливе практичне значення.

Приймаємо, що довжина досконалого гідравлічного стрибка – це горизонтальна проєкція поверхневого виру (рис. 1.18), тобто довжина L ділянки, на якому відбувається різка зміна глибин потоку.

Довжину досконалого гідравлічного стрибка в прямокутному руслі при $b = const$ та нахилі дна $i = 0$ можна визначити за формулами:

– М. Д. Чертоусова:

$$l_{\Pi} = 10,3h' \left[\sqrt{\left(\frac{h_k}{h'} \right)^3} - 1 \right]^{0,81}, \quad (1.144)$$

– М. М. Павловського (якщо $3 < \sqrt{\Pi_{K1}} < 10$):

$$l_{\Pi} = 2,5(1,9h'' - h'), \quad (1.145)$$

– С. К. Кузнєцова:

$$l_c = 16,7(h_k - h_1), \quad (1.146)$$

– О. М. Айвазяна:

$$l_c = \frac{8 \cdot (10 + \sqrt{Fr_1}) \cdot (h_2 - h_1)^3}{Fr_1 \cdot 4h_1 \cdot h_2}, \quad (1.147)$$

де h_1, h_2 – перша та друга спряжені глибини стрибка;

Fr_1 – число Фруда в перерізі до стрибка, якщо швидкість $V_1 = Q/\omega_1 = Q/(b \cdot h_1)$, що обчислене за формулою:

$$Fr_1 = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{gh_1} > 3 \quad (1.148)$$

або

$$Fr' = \frac{Q}{g(\omega')^2 h'} \quad (1.149)$$

Довжину гідравлічного стрибка в прямокутному руслі, що розширюється, можна визначити за формулою О. Ф. Васильєва:

$$l_{CP} = \frac{l_c}{\left[1 + 0,052 \left(\frac{l_c}{r}\right)\right]}, \quad (1.150)$$

де l_c – довжина стрибка в прямокутному руслі, яку можна обчислити за формулою (1.145) або (8.146), якщо

$$Fr_1 = \frac{\alpha}{gh_1^3} \left(\frac{Q}{\beta \cdot r}\right)^2, \quad (1.151)$$

де $r = b_1 / \left[2 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right];$

b_1 – ширина дна при першій пряженій глибині;

$\beta = \beta^0 / 57,3$ – кут розширення, рад.

При кутах розширення $\beta < 15^0$ маємо $\beta r \approx b_1$, тоді

$$Fr_1 = \frac{Q^2}{gb_1^2 h_1^3} = \left(\frac{h_{K1}}{h_1}\right)^3. \quad (1.152)$$

Довжину стрибка в трапецієвидному руслі з постійною шириною дна можна визначити за формулою С. Мейєрова:

$$l_{III} = l_c \left(1 + 1,76 \frac{m(h_2 - h_1)}{\chi_1}\right); \quad l_{II} = 10,3h'(\sqrt{Fr'} - 1)^{0,81} \left[1 + 1,76 \frac{m(h'' - h')}{\chi'}\right], \quad (1.153)$$

де l_c – довжина стрибка в прямокутному руслі;

χ – змочений периметр в перерізі до стрибка;

Fr' – число Фруда в перетині до стрибка, який визначається за формулою (1.149);

m – коефіцієнт закладання відкосів каналу.

Довжину стрибка в руслах із нахилом дна $i > i_k$ наближено можна визначити за формулою

$$l_{CT} = l_c(1 + k \cdot i), \quad (1.154)$$

де l_c – довжина стрибка при $i = 0$;

k – коефіцієнт збільшення довжини стрибка при $i > 0$.

За даними Г. М. Косякової $k = 3$, а за даними Г. К. Ілчева $k = 3,75$.

Якщо число $Fr_1 = (1,5-3)$, то найбільшу глибину хвилястого стрибка h_{XB} можна визначити за формулою М. С. Краснітського

$$h_{XB} = h_1 [1 + 0,72(Fr_1 - 1)]. \quad (1.155)$$

Співвідношення між спряженими глибинами хвилястого стрибка $\eta_2 = h_2/h_1$ за дослідженнями О. А. Рябенка можна визначити за формулою

$$\eta_2 = \frac{1}{3} \left[2\beta_1 + Fr_1 - \sqrt{(2\beta_1 + Fr_1)^2 - 3(2\beta_1 + Fr_1 - 1)} \right], \quad (1.156)$$

де β_1 – коефіцієнт, що враховує кривизну елементарних струминок в перерізі з першою спряженою глибиною h_1 хвилястого стрибка.

За дослідженнями О.А. Рябенка при числах $Fr_1 > 2$ можна припустити, що $\beta_1 = 1$, а при $Fr_1 = (1,1-1,5) - \beta_{1max} = 1,045$.

У разі, якщо $\beta_1 = 1$, то

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= \frac{1}{3} h_1 (1 + Fr_1) \\ h_{XB} &= h_1 \cdot Fr_1 \end{aligned} \right\} \quad (1.157)$$

Втрати енергії в стрибку (втрачений напір), які супроводжують гідравлічний стрибок визначають за формулами:

– для русел прямокутного поперечного перерізу:

$$h_\omega = \frac{(h'' - h')^3}{4 \cdot h' \cdot h''}, \quad (1.158)$$

– для русел трапециїдального поперечного перерізу:

$$h_\omega = \left[h' + \frac{(V')^2}{2g} \right] - \left[h'' + \frac{(V'')^2}{2g} \right], \quad (1.159)$$

де V' , V'' – середні в перетин швидкості, відповідні глибин до і після стрибка.

Висота хвилястого гідравлічного стрибка (висота першої хвилі) в руслі прямокутного поперечного перерізу при малому нахилі наближено визначається за формулою М. С. Краснітського:

$$a = 0,72 h' \left[\frac{(h_K)^3}{h'} - 1 \right], \quad (1.160)$$

де h' – глибина потоку на початку стрибка (менша з сполучених глибин).

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити у руслі прямокутного поперечного перерізу глибину після стрибка, форму стрибка і його довжину за формулою М. М. Павловського, якщо витрата $Q = 1 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла $b = 1 \text{ м}$, глибина на початку стрибка $h' = 0,2 \text{ м}$.

Розв'язання.

1. Визначаємо критичну глибину, для цього розраховуємо питому витрату в каналі $q = Q / b = 1/1 = 1 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$; при $\alpha = 1,1$.

2. Тоді критична глибина

$$h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 1^2}{9,81}} = 0,482 \text{ м.}$$

3. Сполучена глибина після стрибка

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_k}{0,5h'} \right)^3} - 1 \right] = 0,5 \cdot 0,2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,482}{0,5 \cdot 0,2} \right)^3} - 1 \right] = 0,963 \text{ м.}$$

4. Форма стрибка $\left(\frac{h_k}{h} \right)^3 = (0,482/0,2)^3 = 14 > 3$, тоді гідравлічний стрибок – досконалий.

5. Довжина досконалого гідравлічного стрибка за формулою М.М. Павловського: $l_{\Pi} = 2,5(1,9h'' - h') = 2,5(1,9 \cdot 0,96 - 0,2) = 4,06 \text{ м.}$

Приклад 2. Визначити форму стрибка, його висоту і глибину після стрибка в руслі прямокутного поперечного перерізу, якщо витрата $Q = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина русла $b = 5 \text{ м}$, глибина перед стрибком $h' = 0,6 \text{ м}$.

Розв'язання

1. Питома витрата в каналі $q = Q / b = 10/5 = 2 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$, при $\alpha = 1,1$. Тоді за q знаходимо $h_k = 0,765 \text{ м}$ або $h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 2^2}{9,81}} = 0,765 \text{ м.}$

2. Спряжена глибина після стрибка

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_k}{0,5h'} \right)^3} - 1 \right] = 0,5 \cdot 0,6 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,765}{0,5 \cdot 0,6} \right)^3} - 1 \right] = 0,96 \text{ м.}$$

3. Форма стрибка $\left(\frac{h_k}{h} \right)^3 = (0,765/0,6)^3 = 2,07 < 3$ – хвилястий гідравлічний стрибок

4. Висота хвилястого стрибка $a = h'' - h' = 0,96 - 0,6 = 0,36 \text{ м.}$

Приклад 3. Визначити втрати енергії («втрачений напір») у стрибку в руслі прямокутного поперечного перерізу, якщо:

а) $h' = 0,2 \text{ м}$, $h'' = 1 \text{ м}$; б) $h' = 3 \text{ м}$, висота стрибка $a = 2 \text{ м}$.

Розв'язання:

а) для русел прямокутного поперечного перерізу

$$h_{\omega} = \frac{(h'' - h')^3}{4 \cdot h' \cdot h''} = \frac{(1 - 0,2)^3}{4 \cdot 0,2 \cdot 1} = 0,64;$$

б) для русел прямокутного поперечного перерізу втрати енергії в стрибку

$$h_{\omega} = \frac{(h'' - h')^3}{4 \cdot h' \cdot h''} = \frac{(3 - 1)^3}{4 \cdot 1 \cdot 3} = 0,67;$$

Якщо висота гідравлічного стрибка $a = h'' - h'$, то $h' = h'' - a = 3 - 2 = 1$ м.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 4. Визначити в руслі прямокутного поперечного перерізу глибину після стрибка, форму стрибка і його довжину за формулою М. М. Павловського, якщо витрата $Q = 0,64$ м³/с, ширина русла $b = 0,8$ м, глибина на початку стрибка $h' = 0,2$ м.

Відповідь: $h'' = 0,72$ м; $l_{\Pi} = 2,9$ м.

Приклад 5. Визначити форму стрибка, його висоту й глибину після стрибка в руслі прямокутного поперечного перерізу, якщо

а) $Q = 6$ м³/с, ширина русла $b = 2$ м, глибина перед стрибком $h' = 0,8$ м;

б) $Q = 3$ м³/с, $b = 2$ м, $h' = 0,4$ м.

Відповідь: а) хвилястий стрибок; $a = 0,55$ м; $h'' = 1,35$ м;

б) досконалий стрибок; $a = 0,69$ м; $h'' = 1,09$ м.

Приклад 6. Визначити шляхом підбору, побудовою графіка стрибкової функції, наближеним і графоаналітичним способами А. Н. Рахманова (дод. Ю) невідому спряжену глибину в руслі трапецієподібного поперечного перерізу:

а) шириною по дну $b = 0,6$ м, якщо витрата $Q = 0,6$ м³/с, коефіцієнт закладання укосів $m = 1,5$; глибина до стрибка $h' = 0,2$ м, а критична глибина $h_k = 0,36$ м;

б) $b = 0,5$ м, $Q = 1,5$ м³/с, $m_1 = 2$; $m_2 = 1$; $h' = 0,35$, $h_k = 0,6$ м.

Приклад 7. Визначити в руслі прямокутного поперечного перерізу невідому із спряжених глибин і довжину досконалого гідравлічного стрибка по формулі М. Д. Чертоусова, якщо:

а) критична глибина $h_k = 0,4$ м, а менша із сполучених глибин $h' = 0,2$ м;

б) $h_k = 0,5$ м, $h'' = 1$ м.

Відповідь: а) $h'' = 0,71$ м, $l_{\Pi} = 3,4$ м; б) $h' = 0,21$ м, $l_{\Pi} = 4,9$ м.

ЗМ З РУХ ҐРУНТОВИХ ВОД

Тема 9 Види фільтрації. Основний закон фільтрації

Рух рідини в ґрунтах та пористих середовищах називається *фільтрацією*. Зазвичай розглядають рух гравітаційної – вільної води, яка знаходиться під дією сили тяжіння.

Ґрунтові води, що рухаються, утворюють фільтраційний потік.

Рух ґрунтових вод може бути напірним і безнапірним. При безнапірному русі фільтраційний потік обмежується зверху вільною поверхнею, в усіх точках якої тиск є величиною постійною і зазвичай дорівнює атмосферному. Ця вільна поверхня називається *депресійною поверхнею*, а лінія перерізу її з вертикальною площиною називається *кривою депресії*.

Об'єм води, що проходить через живий переріз пористого середовища в одиницю часу, називають *фільтраційною витратою*.

Швидкість фільтрації називають відношення витрати до площини поперечного перерізу всього пористого середовища, через яке здійснюється фільтрація. Таким чином, швидкість фільтрації є фіктивною швидкістю руху, що відрізняється від дійсної швидкості, з якою переміщується вода в порах ґрунта.

Фільтрація може бути ламінарною та турбулентною.

9.1 Методи визначення коефіцієнта фільтрації

Коефіцієнт фільтрації дорівнює швидкості фільтрації при $I = 1$. Він залежить від властивостей пористого середовища (форми, розмірів, взаємного розташування, шорсткості часток), засоленості ґрунту й в'язкості рідини (а, отже, від її температури). Коефіцієнт фільтрації може змінюватися під впливом електричних і магнітних полів.

Орієнтовні значення коефіцієнта фільтрації наведені в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Орієнтовні значення коефіцієнта фільтрації

| Ґрунти | Коефіцієнт фільтрації, K , м/сут | Ґрунти | Коефіцієнт фільтрації, K , м/сут |
|-----------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| Глина | 0,001 | Пісок дрібнозернистий | 1–5 |
| Суглинок важкий | 0,05 | Пісок середньо зернистий | 5–20 |
| Суглинок легкий | 0,05–0,1 | Пісок грубозернистий | 20–50 |
| Супись | 0,1–0,05 | Ґравій | 20–150 |
| Льос | 0,25–0,5 | Ґалечник | 100–500 |
| Пісок пилюватий | 0,5–1,0 | Великий ґалечник без піщаного заповнення | 500–1000 або більше |

Властивість пористого середовища пропускати через себе рідину, газ під дією прикладеного перепаду тиску називається *проникністю*. Проникність оцінюється коефіцієнтом проникності, що залежить не від властивостей рідини, а тільки від властивостей ґрунту й вимірюється в тих же одиницях, що й площа. Його можна подати у вигляді

$$K_n = g K/v, \quad (1.161)$$

де v – кінематична в'язкість рідини.

Тоді формулу Дарсі можна подати у вигляді:

$$U = gK_n/v. \quad (1.162)$$

Коефіцієнт фільтрації, як середньо арифметичне значення, за результатами лабораторних і польових досліджень, отриманих в однакових умовах.

При лабораторних випробуваннях для визначення коефіцієнтів фільтрації нев'язких ґрунтів використовують прилад Дарсі (рис. 1.21).

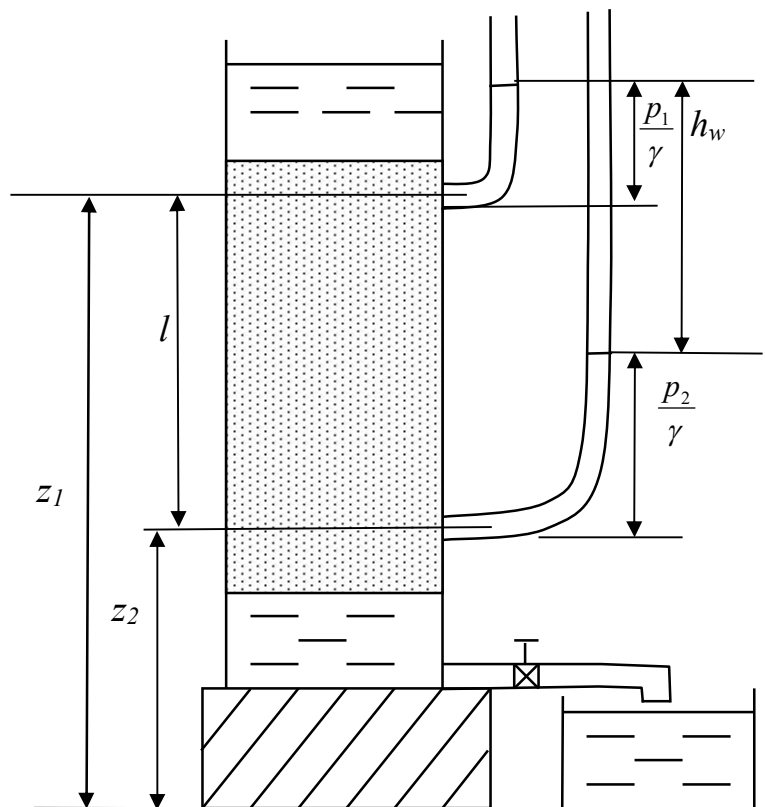


Рисунок 1.21 – Прилад Дарсі

У вертикальному відкритому циліндрі з площею поперечного перерізу W покладено пісок, що знизу підтримується сіткою. Вода надходить по трубці, сталість рівня підтримується зливом води через трубу (внизу приладу).

Вода, що фільтрується через ґрунт, збирається під решіткою на дні циліндру і витікає назовні через кран. Після того як рух стане сталим, знаходять

витрату Q і вимірюють покази п'езометрів, приєднаних до бічної стінки циліндра в межах частини обсягу, заповненого ґрунтом.

За формулою $U = Q / W$ визначають швидкість фільтрації, гідравлічний нахил $I = h_{mp} / l$ (h_{mp} – різниця показань у двох п'езометрах на відстані l один від одного). За формулою (1.161) знаходимо коефіцієнт фільтрації k .

У деяких щільних ґрунтах (глини й важкі суглинки) фільтрація починається лише тоді, коли гідравлічний нахил (градієнт напору) перевищить початковий градієнт I_0 . Тоді замість формули (1.161) використовують формулу

$$U = -k \left(\frac{d}{dl} + I_0 \right) = k(I - I_0). \quad (1.163)$$

Для дуже щільних глин $I_0 = 20-30$.

Експериментально встановлено, що закон Дарсі при числах Re , що перевищує деякі значення $Re_{кр}$, порушується. При $Re < Re_{кр}$ зберігається лінійний закон фільтрації (ламінарна фільтрація). При $Re > Re_{кр}$ (турбулентна фільтрація) залежності U і I інші. Для цих випадків експериментально визначено:

$$I = a + b \quad (1.164)$$

або

$$U = c I, \quad (1.165)$$

де a , b , c – коефіцієнти, що отримані дослідним шляхом для конкретних випадків руху ґрунтових вод.

Якщо швидкості так малі, що можна зневажити другим членом рівняння (1.164), одержуємо формулу Дарсі. Якщо швидкості значні й можна зневажити членом a , одержуємо формулу, що нагадує формулу Шезі:

$$U = K_{кр} I. \quad (1.166)$$

Формулу (1.165) застосовують для тріщинуватих порід при $n = 1-1,75$.

Іншими словами, турбулентний режим руху води можливий при фільтрації у великих частках, наприклад, при русі води в кам'яному накиді.

За С. В. Избашем

$$K_{турб} = \left(20 - \frac{14}{d} \right) m \cdot d_m, \quad (1.167)$$

де d_m – середній діаметр кулі рівновеликого каменю, см;
 m – пористість кам'яного накиду.

9.2 Приплив води до горизонтальної галереї

Розглянемо приплив рідини до галереї, дно якої співпадає з поверхнею непроникного шару (рис. 1.22).

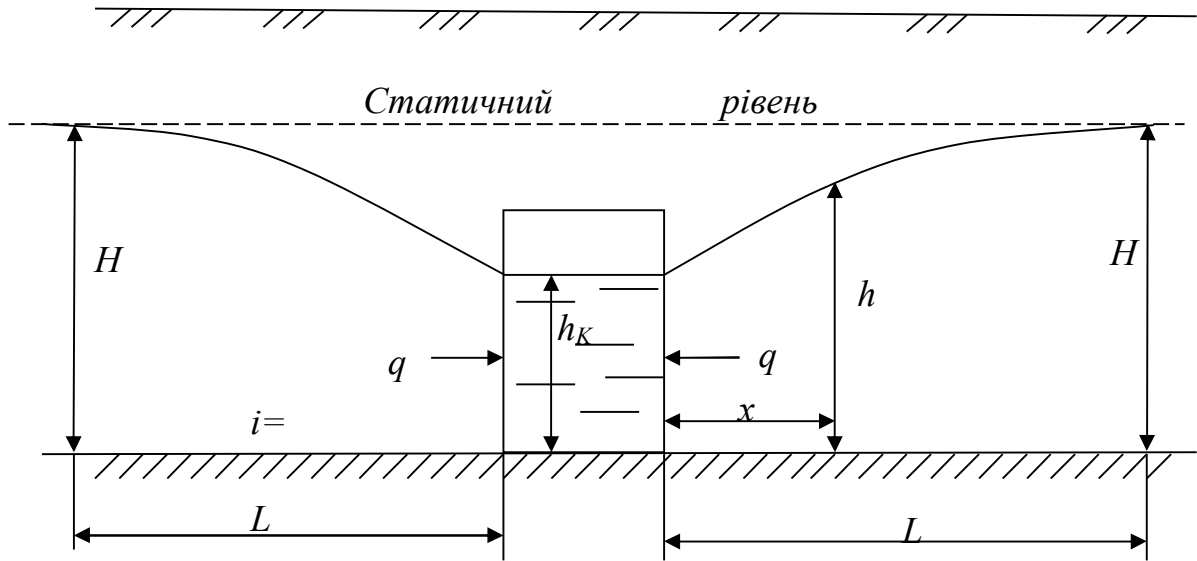


Рисунок 1.22 – Схема до розрахунку водозабірної галереї

У даному розділі розглядають фільтрацію води, тобто розглядаємо рух води в пористому середовищі (в ґрунті).

Кількість води, що надходить через одну бокову поверхню галереї, можна визначити за формулою

$$\frac{2q}{K}l = h_1^2 - h_2^2, \quad (1.168)$$

де h_1, h_2 – більша і менша глибини, що відповідають обраним перерізам.

Для розрахунку горизонтальної галереї $h_1 = H, h_2 = h_2, l = L$. Тоді загальна кількість води, що надходить в галерею через одиницю її довжини

$$q = \frac{K}{L}(H^2 - h_2^2), \quad (1.169)$$

де h_2 – глибина води в галереї;

H – товщина водоносного шару до влаштування галереї.

Величину H знаходять на основі гідрологічних досліджень.

Повний об'єм води, що надходить до горизонтальної галереї

$$Q = q \cdot B, \quad (1.170)$$

де B – довжина галереї.

Маючи витрату q , обчислену за формулою (1.169), і використовуючи рівняння (1.168), отримуємо формулу для побудови кривої депресії:

$$h = \sqrt{\frac{2q}{K}x + h_2^2}, \quad (1.171)$$

де h – глибина потоку на віддалі x від галереї.

Для зниження рівня ґрунтових вод можна влаштувати ряд горизонтальних галерей. Віддаль між такими галереями можна визначити за формулою

$$L = \frac{K}{q} [(H - a)^2 - h_r^2], \quad (1.172)$$

де a – норма зниження рівня ґрунтових вод.

9.3 Приплив води до вертикального колодязя

У гідравлічних розрахунках припливу до вертикального колодязя розрізняють два випадки:

1) дно колодязя знаходиться на водонепроникливому шарі (такий колодязь називається *досконалим*);

2) дно колодязя розташоване вище поверхні водонепроникливого шару (цей колодязь називається *недосконалим*).

Розглянемо гідравлічний розрахунок досконалого колодязя (рис. 1.23).

Якщо з колодязя воду не викачують, то рівень води в ньому збігається з рівнем ґрунтових вод за колодязем, тобто $h_0 = H$.

При усталеному заборі води з колодязя витрата Q буде дорівнювати припливу води в колодязь через його стінки, в яких влаштовані отвори.

Розглянемо випадок, коли поверхня водонепроникливого шару горизонтальна.

Рух води до колодязя відбувається через циліндричні поверхні радіусом r і висотою h . Середня швидкість фільтрації через таку поверхню

$$V = KJ = -K \frac{dh}{dr}, \quad (1.173)$$

а фільтраційна витрата

$$Q = \omega \cdot V = 2\pi \cdot r \cdot K \frac{dh}{dr}. \quad (1.174)$$

Інтегруючи (1.174) в межах $r = r_0 \dots R$, $h = h_0 \dots H$, отримаємо:

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h_0^2)}{\ln(R/r_0)}, \quad (1.175)$$

де R – радіус впливу колодязя, величину якого наближено можна визначити за формулою Зіхарда:

$$R = 3000(H - h_0)\sqrt{K}. \quad (1.176)$$

Більш точно R можна визначити гідрогеологічними дослідженнями.

Приплив до недосконалого колодязя

$$Q = Q_B + Q_D, \quad (1.177)$$

де Q_B – приплив через бокову поверхню; Q_D – приплив через дно.

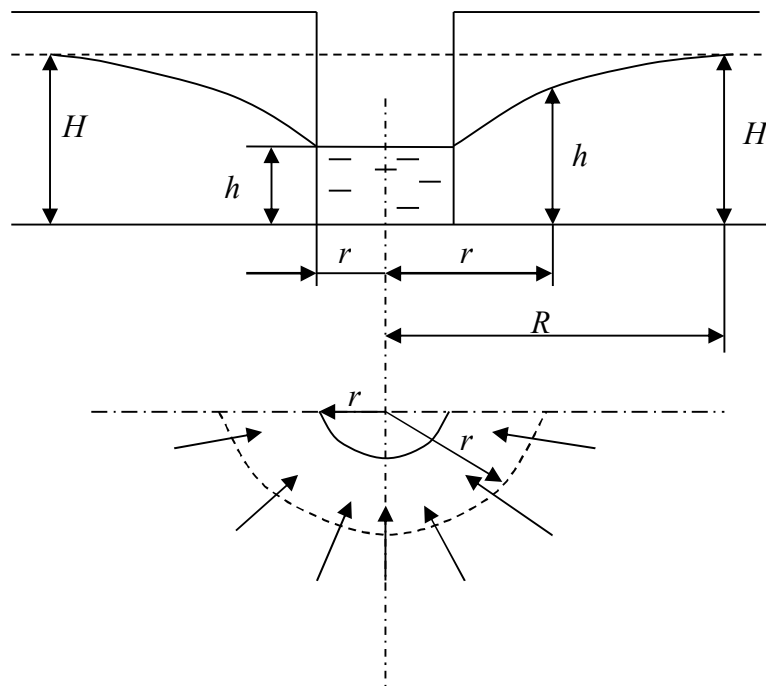


Рисунок 1.23 – Схема до розрахунку вертикального досконалого колодязя

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 1. Визначити швидкість руху ґрунтових вод V_ϕ і режим руху фільтрації у щільному піщаному ґрунті (коефіцієнт $C = 0,00085$), якщо нахил підстилаючого водонепроникаючого шару $I = 0,025$, середній діаметр частинок $d_e = 0,0017$ м, температура води 10°C ($\nu = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

Приклад 2. Основа водоносного пласту у створах, відстань між якими $l = 1000$ м, розташована на відмітках $Z_1 = Z_2 = 10,3$ м. Рівні ґрунтових вод у цих створах знаходяться на відмітках $Z_1 = 19,2$ м і $Z_2 = 15,6$ м. Визначити витрату води у піщаному крупнозернистому пласті одиничної ширини.

Приклад 3. Для видалення шкідливих домішок повітря пропускають через трьохшаровий фільтр діаметром $0,1$ м. Визначити пропускну здатність фільтру і перепад тисків у кожному з його шарів, якщо коефіцієнт фільтрації шарів: $K_1 = 0,015$ м/с, $K_2 = 0,003$ м/с, $K_3 = 0,0006$ м/с. товщина шарів: $\delta_1 = 0,35$ м, $\delta_2 = 0,1$ м, $\delta_3 = 0,05$ м. Сумарний перепад тисків $\Delta p = 2$ кПа. Температура повітря 20°C .

Приклад 4. Артезіанський колодязь радіусом $r_0 = 0,4$ м, закладений у водопроникний пласт галечийікового ґрунту товщиною $A = 5$ м, містить ґрунтові води під тиском $p = 0,15$ МПа. Радіус впливу колодязя $R = 100$ м. Визначити дебит колодязя Q і час τ руху води з відстані R до стінки колодязя, якщо рівень води у колодязі $h_0 = 9$ м. Температура води 20°C , густина води $\rho = 998,2$ кг/м³, пористість $\mu = 0,4$, а коефіцієнт фільтрації $K = 0,001$ м/с.

2 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Завданням для розрахунково-графічного завдання здобувачам вищої освіти передбачена задача визначення нормальної та критичної глибин для земляного каналу, середньої швидкості руху рідини та підібрати гідравлічно вигідні розміри каналу (табл. 2.1).

Вихідні дані для розрахунково-графічного завдання

Рух води у земляному каналі (рис. 2.1) рівномірний. Параметри каналу: пропускна здатність каналу Q ; ширина каналу по дну b ; коефіцієнт закладення відкосів m ; коефіцієнт шорсткості n ; нахил дна i_0 .

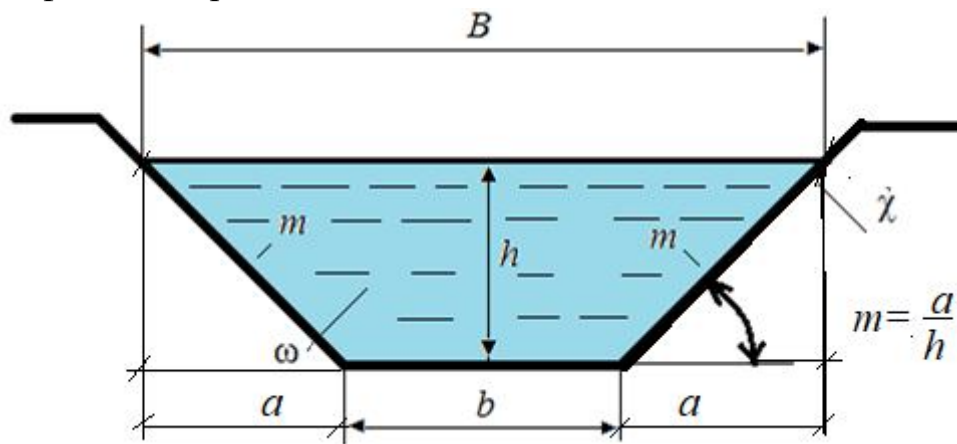


Рисунок 2.1 – Земляний канал

Необхідно:

1. Визначити нормальну глибину h_0 . Рішення виконати двома способами:
 - графоаналітичним – побудовою кривої витратної характеристики $K = f(h)$;
 - використовуючи «показовий закон» або виконати розрахунок за відносним гідравлічним радіусом, користуючись таблицями і графіками.
2. Визначити середню швидкість руху води в каналі і перевірити канал на розмив.
3. Підібрати гідравлічно найвигідніший переріз.
4. Визначити критичну глибину $h_{кр}$. Рішення виконати графоаналітичним побудовою залежності $\omega^3 / B = f(h)$.
5. Визначити критичний нахил.
6. Встановити стан потоку в припущенні, що рух в каналі рівномірний.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до розрахунково-графічного завдання

| Величина | Номер варіанта (остання цифра номера залікової книжки) | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | 36 | 10 | 12 | 14 | 23,5 | 25 | 31,5 | 17 | 19 | 28 |
| $b, \text{ м}$ | 14 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11,5 | 8,5 | 9,5 | 10,5 |
| m | 3 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 2,5 | 2 | 2,5 |
| n | 0,025 | 0,02 | 0,022 | 0,025 | 0,027 | 0,03 | 0,02 | 0,027 | 0,022 | 0,028 |
| $i_0 \cdot 10^{-4}$ | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота № 1

Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі

Загальні відомості

У гідротехніці та інших областях народного господарства часто вирішують питання, пов'язані з витіканням рідини з отворів.

Витікання рідини може відбуватися в атмосферу (не підтоплені отвори), або під рівень води (затоплені отвори) при сталому або змінному напорі.

У різних сферах техніки зустрічаються завдання, при яких рідина витікає через різні за формою та розмірами отворів.

Зважаючи на велике практичне завдання, витіканням рідини через отвір займались вчені: широко відомі експерименти учнів Галілея-Кастеллі й Торічеллі (1643 р.), які вивчали швидкість витікання рідини через отвір. Д. Бернуллі вирішував задачі про встановлення швидкості витікання рідини через отвір, вивів своє рівняння.

З того часу інженери й науковці виконали багато робіт щодо витікання рідини через отвір. Складність картини витікання через отвір пояснюється тим, що ще немає теорії витікання з отвору, а в розрахункові формули витікання рідини вводять експериментальні коефіцієнти.

При витіканні струменя з отвору на відстані від внутрішньої стінки резервуара, яка дорівнює приблизно $0,5 d$ (де d – діаметр створу), утворюється «стислий переріз» (рис. 3.1). Площа стислого перерізу струменя ω_c менше площі отвору ω .

Стискання струменя характеризується коефіцієнтом стискання E , є відношення площі стислого перерізу ω_c до площі отвору ω :

$$E = \frac{\omega_c}{\omega}. \quad (3.1)$$

При витіканні струменя в атмосферу з малого отвору в тонкій стінці відбувається зміна форми струменя за довжиною (особливо це спостерігається при витіканні з квадратних, прямокутних і трикутних отворів). Таке явище називають інверсією струменя (рис. 3.2). Це явище виникає під дією сил поверхневого натягу на струмінь, що витікає.

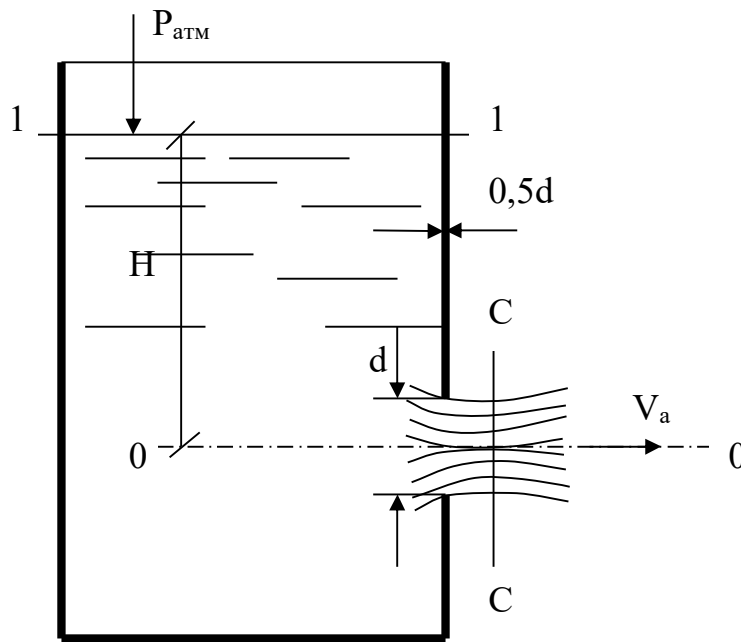


Рисунок 3.1 – Схема витікання струменя через тонку стінку

Якщо використати рівняння Бернуллі й написати його для двох перерізів, один з яких (1-1) співпадає з вільною поверхнею рідини в резервуарі, а другий (С-С) – зі стислим перерізом, за площину порівняння вибираємо площину (0-0), що проходить через центр ваги отвору (рис. 3.1), то при витіканні в атмосферу через малий отвір у тонкій стінці отримуємо розрахункові формули:

$$V = \varphi \sqrt{2gH} , \quad (3.2)$$

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} , \quad (3.3)$$

де V – середня швидкість у сталому перерізі струменя;

g – прискорення сили ваги;

H – напір над центром ваги отвору;

Q – витрата;

ω – площа отвору;

μ – коефіцієнт витрати, що дорівнює добутку коефіцієнта стискання та коефіцієнта швидкості:

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi , \quad (3.4)$$

де φ – коефіцієнт швидкості, що визначається за формулою

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} , \quad (3.5)$$

де ξ – коефіцієнт опору.

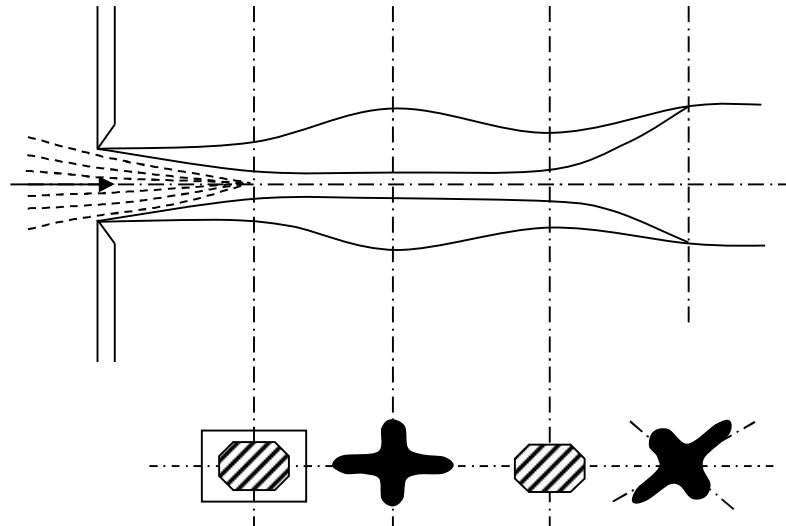


Рисунок 3.2 – Схема змінювання форми поперечного перерізу струменя за довжиною

Фізичний зміст коефіцієнта витрати та його числове значення можна бути знайти за формулою:

$$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}, \quad (3.6)$$

або коефіцієнт витрати можна визначити як співвідношення дійсної витрати до теоретичної.

Аналогічно можна встановити фізичний зміст коефіцієнта швидкості:

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}}, \quad (3.7)$$

де φ – характеризує зменшення дійсної швидкості V витікання в'язкої рідини порівняно з теоретичною $V_{теор}$ нев'язкої рідини, яка визначається за формулою Торічеллі:

$$V_{теор} = \sqrt{2gH}. \quad (3.8)$$

Числове значення коефіцієнта швидкості можна визначити, враховуючи, що при витіканні рідини з отвору струмінь набуває форму параболи. Згідно з закону вільного падіння будемо мати:

$$x = V \cdot t, \quad (3.9)$$

$$y = \frac{gt^2}{2}, \quad (3.10)$$

де x і y – координати довільної точки струменя відносно початку координат, який співпадає з центром ваги стислого перерізу (рис. 3.1);

t – час руху частини рідини від стислого перерізу до потрібного перерізу.

Виключаючи з рівнянь (3.9) і (3.10) час t , отримаємо:

$$V = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y}}. \quad (3.11)$$

Підставивши значення V із рівняння (3.11) у рівняння (3.7), отримаємо:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}. \quad (3.12)$$

Визначивши у такий спосіб φ , можна з рівняння (3.5) знайти коефіцієнт опору ξ :

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (3.13)$$

На підставі багатьох експериментів для круглих, квадратних отворів у тонкій стінці при абсолютному стисканні й при числах Рейнольдса $> 10^5$ коефіцієнти витікання мають такі значення:

$$E = 0,63 \div 0,64; \quad \xi = 0,06; \quad \varphi = 0,97; \quad \mu = 0,62.$$

При $Re < 10^5$ зростає нерівномірність розподілу швидкостей у початковому перерізі струменя та збільшуються втрати напору. Збільшення коефіцієнта кінетичної енергії α і коефіцієнта опору ξ призводить до зменшення коефіцієнта швидкості φ .

Експерименти підтвердили, що при $Re > 10^5$ значення Re на коефіцієнт витікання не впливають (квадратична зона опору).

Склад роботи

1. Визначити експериментальним шляхом коефіцієнти витрати, швидкості, стискання та опору при витіканні з отвору в тонкій стінці й порівняти ці коефіцієнти з довідковими.

2. Спостерігання явища інверсії струменя, що витікає з отворів різної форми.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 3.3) складається з напірного резервуара (б). Надходження води в напірний резервуар регулюється за

допомогою вентиля (3). Для підтримання сталого напору резервуар обладнаний переливним пристроєм. До напірного резервуара приєднаний патрубок, на який встановлені отвори (7) різної форми й типів. Вода з отвору (7) витікає у вимірний резервуар (6).

Для вимірювання координат осі струменя, що витікає з отвору, застосовують спеціальний пристрій (координатник), що складається з горизонтальної рейки зі шкалою (4) і мірною голкою (5), яка вільно пересувається по горизонтальній рейці. Нуль шкали горизонтальної рейки співпадає зі стислим перерізом струменя. Напір, при якому відбувається витікання, фіксується п'єзометром (8).

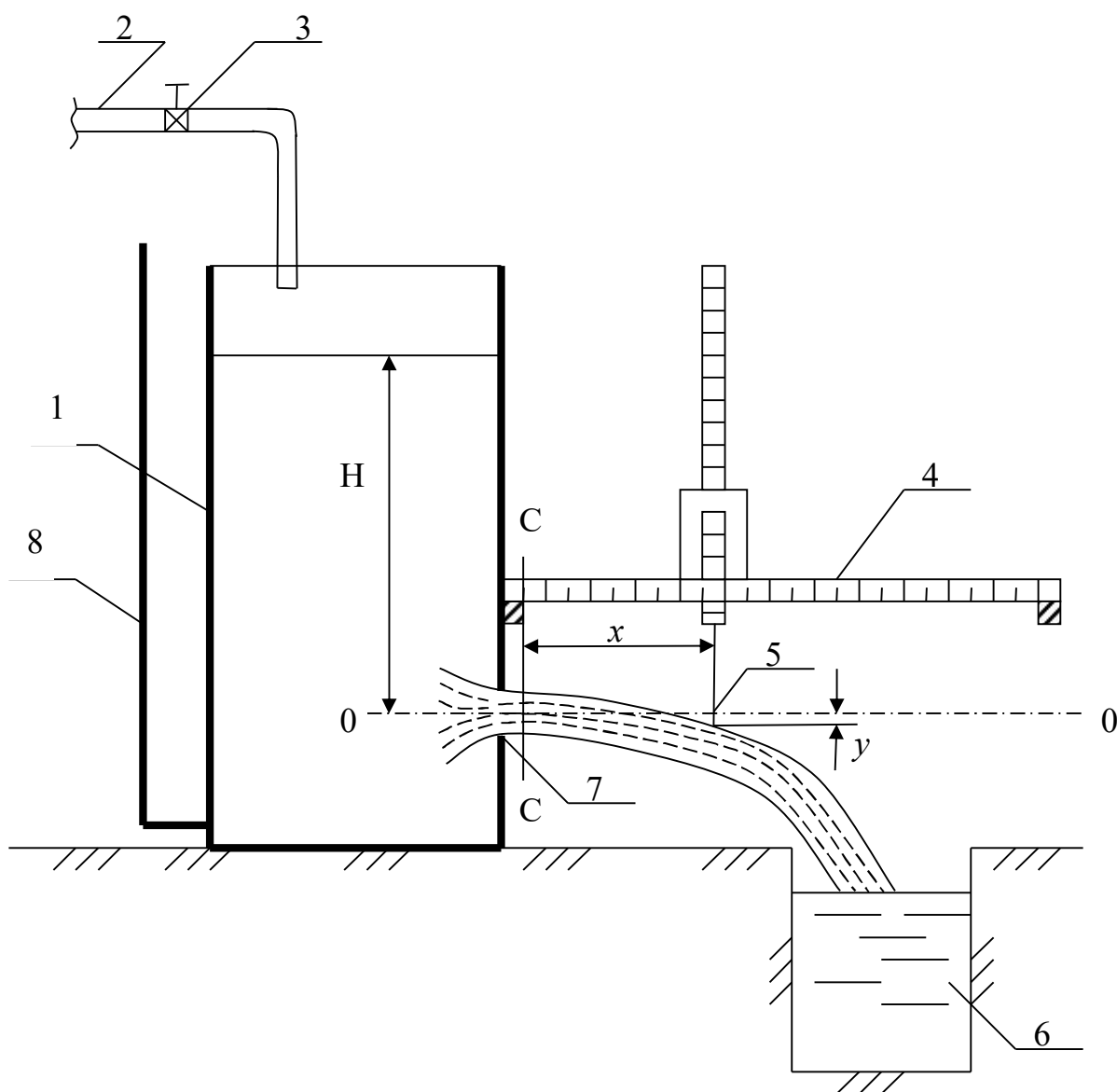


Рисунок 3.3 – Схема експериментальної установки

Порядок проведення роботи

1. Вимірюємо діаметр d , а для некруглих отворів – розміри поперечного перерізу та приєднуємо отвір до торцевої стінки патрубку.

2. Відкриваємо кран (3) на трубі (2) і наповнюємо водою напірний резервуар (1). На весь час проведення експерименту перелив повинен працювати, тобто напір H має бути сталим і фіксуватися п'єзометром (8).

3. Визначаємо об'єм води W , за часом T , що фіксується секундоміром.

4. За допомогою штангенциркуля або спеціального пристрою вимірюємо розміри поперечного перерізу струменя в стислому перерізі за горизонталлю b і за вертикаллю a .

5. За допомогою координатника (4) і вимірної голки (9) знаходимо координати x і y , якої-небудь точки осі струменя, що витікає з отвору.

6. Змінюючи почергово отвори, спостерігаємо явище інверсії струменя при витіканні з отвору різної форми.

Оброблення експериментальних даних

1. Визначення площини перерізу отвору:

– круглого $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$; (3.14)

– не круглого $\omega = a \cdot b$, (3.15)

де b – ширина прямокутного отвору;

a – висота прямокутного отвору.

2. За виконаними замірами обчислюємо площу струменя в стисненому перерізі за формулою

$$\omega_c = \frac{\pi ab}{4}. \quad (3.16)$$

3. Знаходимо коефіцієнт стиснення струменя за формулою (3.1).

4. За отриманими замірами обчислюємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}. \quad (3.17)$$

5. За формулою (3.6) обчислюємо коефіцієнт витрати отвору μ :

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}.$$

6. Визначаємо коефіцієнт швидкості рідини з отвору за співвідношенням (3.4) як

$$\varphi = \frac{\mu}{E} \quad (3.18)$$

і рівнянням (3.12), співставляємо їх.

7. Обчислюємо коефіцієнт опору отвору ξ за формулою (3.13).

8. За рівнянням (3.2) знаходимо дійсну середню швидкість у стиснутому перерізі, а за рівнянням (3.8) – швидкість без урахування опору – теоретичну швидкість у цьому самому перерізі.

9. За співвідношенням швидкостей за формулою (3.7) знову обчислюємо коефіцієнт швидкості φ і співставляємо його значення з коефіцієнтом швидкості, який знаходимо за формулами (3.18) та (3.12).

10. Обчислюємо експериментальним шляхом коефіцієнти μ , φ , E та ξ і співставляємо їх із довідковими. Результати зводимо до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Журнал лабораторної роботи № 1

| № з/п | Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності | Числові значення характеристик |
|-------|---|--------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Діаметр круглого отвору d , мм | |
| 2 | Площа перерізу круглого отвору $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ² | |
| 3 | Розміри прямокутного (квадратного) отвору: – висота отвору a , мм – ширина отвору b , мм | |
| 4 | Площа перерізу прямокутного (квадратного) отвору $\omega = a \cdot b$, см ² | |
| 5 | Напір, під яким відбувається витікання H_0 , м | |
| 6 | Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час W , л | |
| 7 | Тривалість витікання T , с | |
| 8 | Розміри струменя у стислом перерізі при витіканні з отвору: – за вертикаллю a , мм – за горизонталлю b , мм | |
| 9 | Площа струменя в стислом перерізі отвору $\omega_c = \frac{\pi ab}{4}$, см ² | |
| 10 | Коефіцієнт стиснення струменя, що витікає з отвору $E = \frac{\omega_c}{\omega}$ | |
| 11 | Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с | |

Продовження таблиці 3.1

| 1 | 2 | 3 |
|----|---|---|
| 12 | Коефіцієнт витрати з отвору $\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}$ | |
| 13 | Координати точки на осі струменя, що витікає з отвору: – абсциса – x , см – ордината – y , см | |
| 14 | Коефіцієнт швидкості отвору: – зі співвідношення $\varphi = \frac{\mu}{E}$ – із рівняння $\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}$ | |
| 15 | Швидкість у стислому перерізі отвору з урахуванням опору $V = \varphi\sqrt{2gH}$, см/с | |
| 16 | Швидкість у стислому перерізі отвору без урахування опору (теоретична) $V_{теор} = \sqrt{2gH}$, см/с | |
| 17 | Коефіцієнт швидкості отвору за співвідношенням швидкостей $\varphi = \frac{V}{V_{теор}}$ | |
| 18 | Коефіцієнт опору $\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$ | |
| 19 | Висновки: | |

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)**Контрольні запитання**

1. Який гідравлічний зміст має назва «тонка стінка»?
2. Який отвір називають малим?
3. У яких умовах отвір буде перебувати в умовах неповного стиснення, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого?
4. Які числові значення мають коефіцієнти μ , φ , E і ξ при витіканні з отвору в тонкій стінці?
5. Який фізичний зміст коефіцієнтів μ і φ ?
6. Що таке коефіцієнт стиснення струменя?
7. Який зв'язок існує між коефіцієнтом швидкості й коефіцієнтом опору?
8. Як визначається коефіцієнт витрати через коефіцієнти E та φ ?
9. Напишіть формулу пропускну здатності отвору.

Лабораторна робота № 2

Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стиснення й опору при витіканні рідини через насадку при сталому напорі

Загальні відомості

Насадкою називається коротка труба завдовжки від $3d$ до $8d$ (d – внутрішній діаметр насадки). Насадки поділяють на три типи: циліндричні, конічні й коноїдальні (рис. 3.4).

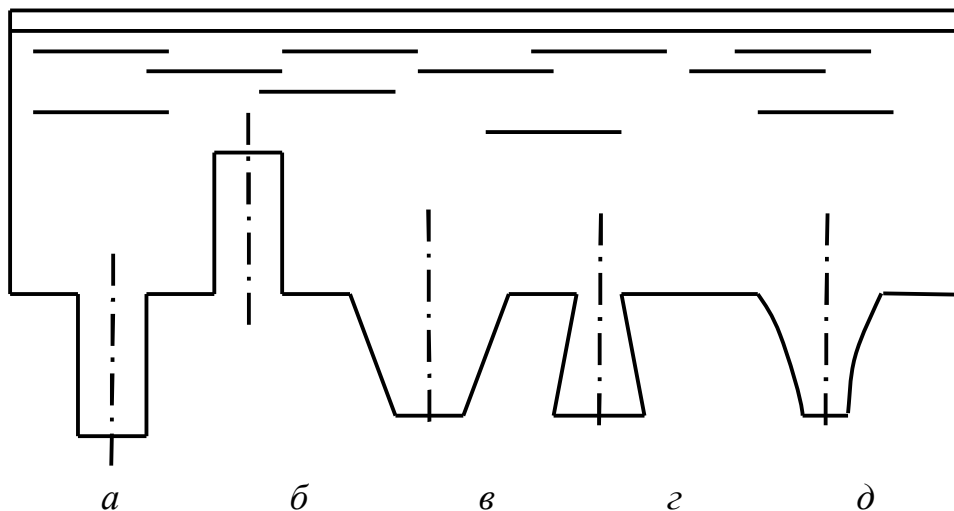


Рисунок 3.4 – Типи насадок

В інженерній практиці використовуються різні типи насадок: зовнішня циліндрична насадка, або насадка Вентурі (рис. 3.4, а), яка становить пряму циліндричну трубку довжиною $(3,5-7)d$, приставлену із зовнішнього боку стінки без закруглення вхідної кромки.

Внутрішня циліндрична насадка, або насадка Борда (рис. 3.4, б). Якщо до отвору з середини резервуара підключити коротку трубку довжиною не менше $(3,5-4)d$, то така насадка теж збільшує пропускну здатність. За даними дослідів, для внутрішньої циліндричної насадки $\varphi = \mu = 0,71$.

Конічно-збіжна насадка (конфузорна насадка) (рис. 3.4, в). У таких насадках рідина при виході також стискається, але менше.

Коефіцієнти φ і μ цих насадок залежать від кута конусного θ . Найвигіднішим кутом є кут $\theta = 13^{\circ}24'$, при якому $\varphi = 0,97$, $\mu = 0,95$, $E = 0,98$.

Конічно-розхідні насадки (дифузорні насадки) (рис. 3.4, г). У насадках цього типу в зоні стиснення струменя виникає значно більше розрідження, ніж у циліндричних насадках, що сприяє збільшенню швидкості в стиснутому перерізі внаслідок підсмоктування. Найвигіднішим вважається кут $\theta = 8^{\circ}$. Коефіцієнти φ і μ змінюються в межах $0,45-0,5$, що свідчить про порівняно невеликі швидкості на виході.

Коноїдальні насадки (рис. 3.4, д). При таких насадках завдяки плавним умовам входу в насадку зменшують втрати енергії при виході, що сприяє збільшенню пропускної здатності насадок.

Дослідами підтверджено, що $\varphi = \mu = 0,96-0,99$.

При витіканні рідини через будь-які насадки, як і при витіканні через отвір, у разі використання рівняння Д. Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 (рис. 3.5) можна одержати розрахункові формули швидкості й витрати, які так само, як і при витіканні з отвору застосовуємо формули (3.2) та (3.3), де $V = \varphi\sqrt{2gH}$ і $Q = \mu\omega\sqrt{2gH}$.

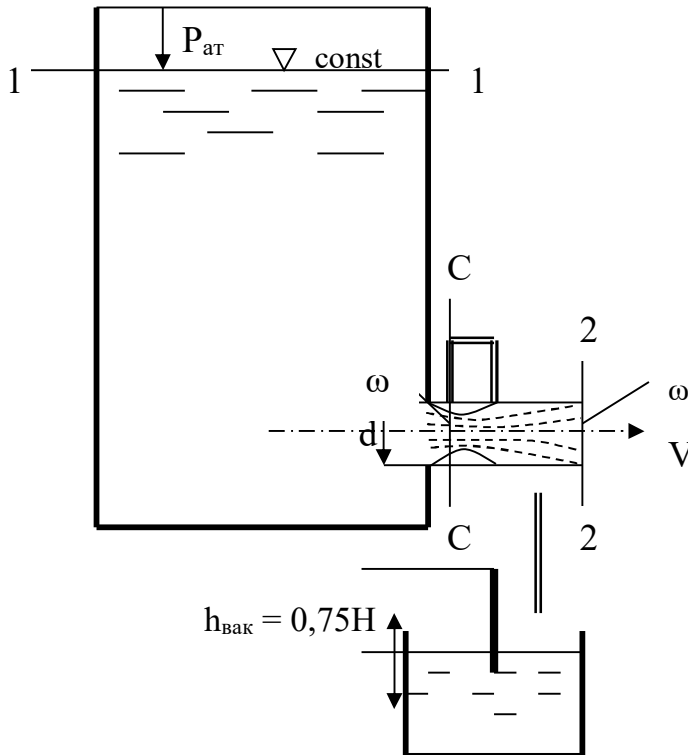


Рисунок 3.5 – Схема витікання рідини через насадку

Якщо насадка визначається для вихідного отвору, коли $E = 1$, то за формулою (3.4) коефіцієнт витрати насадка дорівнює коефіцієнту швидкості:

$$\mu = E \cdot \varphi = 1 \cdot \varphi = \varphi. \quad (3.19)$$

Якщо в перерізі С-С швидкість більша, ніж на вихідному перерізі насадки ($V_c > V$), то за рівнянням Д. Бернуллі тиск у стислomu перерізі буде менший від атмосферного ($P < P_{атм}$), тобто в стиснутому перерізі утворюється вакуум. Якщо до насадки в стиснутому перерізі підключити вакуум, то висота піднятої рідини $h_{вак} = 0,75H$ (рис. 3.5).

Утворення вакууму сприяє додатковому підсмоктуванню рідини з напірного резервуара. Пропускна здатність насадки (витрата) перевищує пропускну здатність отвору того самого розміру при однаковому напорі.

Якщо трубка вакуумметра буде коротшою, ніж $h_{\text{вак}}$, то насадок почне «підсмоктувати» рідину з вакуумметра. На цьому явищі заснована дія водострумних насосів.

При напорах, більших за граничні (для води $H_{\text{гран}} \approx 13$ м), у циліндричних насадках відбувається зрив вакууму. При цьому струмінь відривається від внутрішньої поверхні насадки й витікання проходить із малого отвору в тонкій стінці. У такому разі насадка не виправдовує свого значення. На практиці приймають вакуумметричну висоту не більшу ніж 8 м, тоді $H_{\text{гран}} \leq 10,7$ м.

Склад роботи

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів витрати, швидкості, стиснення та опору при витіканні рідини через насадку та порівняння цих коефіцієнтів з довідковими.

2. Вимірювання величини вакууму в зовнішньому циліндричному насадку, спостереження за зривом вакууму.

Опис експериментальної установки

Дослідна установка (рис. 3.6) складається з напірного резервуара (7) і вимірного резервуара (4). Надходження води у напірний резервуар регулюється за допомогою крана (2). Для дотримання сталого напору резервуар обладнано переливними пристроями. До резервуару приєднана циліндрична насадка у торцевій стінці. Вода з насадки (3) витікає у вимірний резервуар (4). Вакуум насадка вимірюється за допомогою вакуумметра. Напір, при якому здійснюється витікання рідини з насадки, фіксується за допомогою п'єзометра (6).

Порядок виконання роботи

1. Вимірюємо діаметри вхідного d_1 і вихідного d_2 отворів насадок.

2. Шляхом відкривання крану (2) на трубі (1) наповнюємо напірний резервуар (7). На весь час проведення досліду перелив повинен працювати, тобто напір H має бути сталим.

3. Визначаємо об'єм води W за певний час T , що фіксується секундоміром.

4. Напір H , при якому проходить витікання, визначаємо за п'єзометром (6), нуль якого співпадає з віссю насадки.

5. За допомогою вакуумметра вимірюємо вакуум.

6. Для спостереження явища «зриву вакууму» знімають гумову трубку зі штуцера насадки (1) у такий спосіб з'єднують зону пониженого тиску з атмосферою, що призводить до зриву вакууму. Для відновлення вакууму надівають гумову трубку на штуцер і на деякий час перекривають вихідний отвір насадки.

Під час проведення дослідів варто звертати увагу на форму, характер, дальність струменя, який витікає з насадки, а також при зриві вакууму.

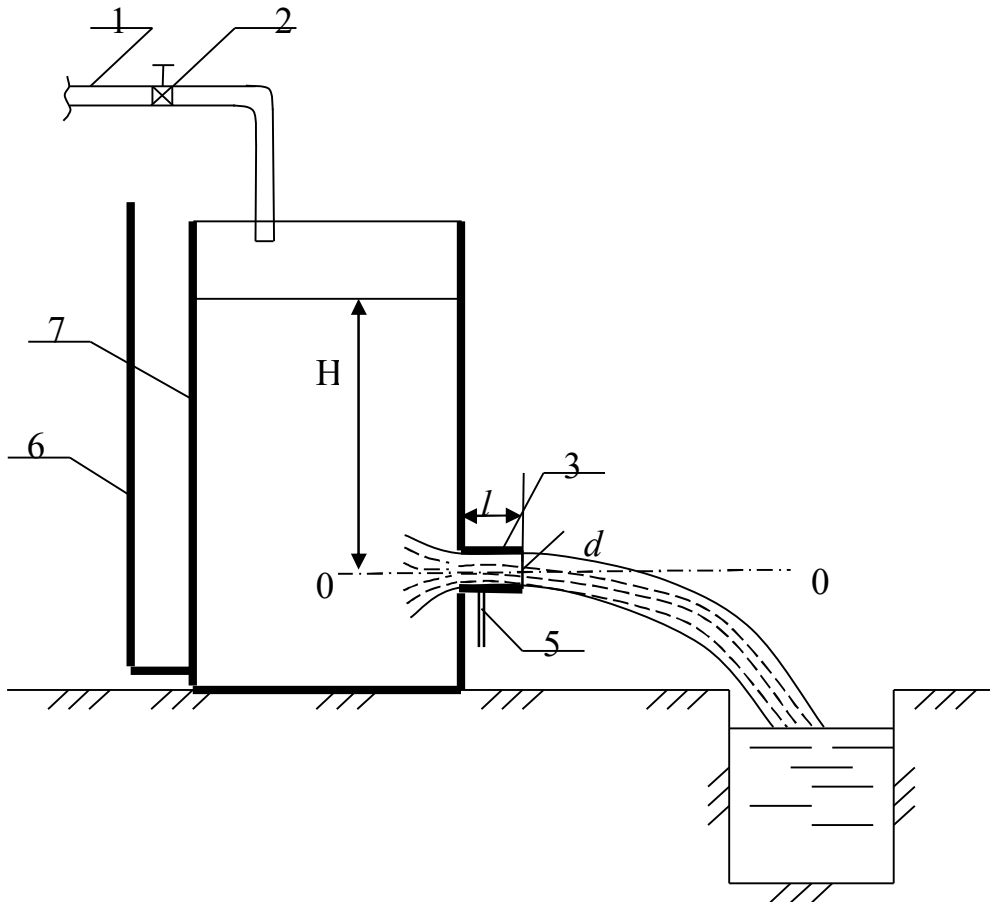


Рисунок 3.6 – Схема експериментальної установки

Обчислення дослідних даних

1. Визначаємо площину перерізу насадки на вході ω_1 та на виході ω_2 :

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ і } \omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}, \quad (3.20)$$

де d_1 – діаметр насадки на вході;
 d_2 – діаметр насадки на виході.

2. За даними вимірів обчислюємо витрату насадка за формулою:

$$Q = \frac{W}{T}. \quad (3.21)$$

3. За рівнянням знаходимо коефіцієнт витрати насадки:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}. \quad (3.22)$$

4. Визначаємо відношення $h_{\text{вак}} / H$ і обчислюємо величину вакууму на вході в насадку:

$$P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}. \quad (3.23)$$

5. Отримані з дослідів значення μ , ζ та $h_{\text{вак}} / H$ зіставляємо з довідковими. Усі результати вимірювань і обчислення записуємо до лабораторного журналу (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Журнал лабораторної роботи № 2

| № з/п | Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності | Числові значення характеристик |
|-------|--|--------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Довжина насадки l , см | |
| 2 | Діаметр насадки: – на вході d_1 , мм – на виході d_2 , мм | |
| 3 | Площа перерізу насадки: – на вході $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$, см ² – на виході $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$, см ² | |
| 4 | Напір, під яким відбувається витікання H_0 , м | |
| 5 | Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час W , л | |
| 6 | Тривалість витікання T , с | |
| 7 | Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с | |
| 8 | Коефіцієнт витрати насадки $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$ | |
| 9 | Середня швидкість у швидкісному перерізі насадки $V = \frac{Q}{\omega_2}$, см/с | |
| 10 | Коефіцієнт швидкості насадки $\mu = \frac{V}{\sqrt{2gH}}$ | |
| 11 | Значення вакууму на вході в насадку $h_{\text{вак}}$, см | |
| 12 | Відношення $h_{\text{вак}} / H$ | |
| 13 | Вакууметричний тиск на вході в насадку $P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}$ | |

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. У яких умовах струмінь буде перебувати в умовах неповного стиснення, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого при витіканні з насадки?
2. Які числові значення мають коефіцієнти μ , φ , E і ξ при витіканні з насадок різної форми? Який фізичний зміст коефіцієнтів μ та φ ?
3. Що таке коефіцієнт стиснення струменя?
4. Як визначають коефіцієнт витрати через коефіцієнти E та φ при витіканні рідини через насадки?

Лабораторна робота № 3

Визначення гідравлічних параметрів усталеного потоку, що рухається у відкритому руслі

Загальні відомості

Зазвичай у штучних відкритих руслах спостерігається нерівномірний рух. Будь-яка перешкода, побудована в руслі (гребля, міст тощо), зміна нахилу дна, будь-які нерівності дна тощо порушують рівномірний рух і обумовлюють перехід його у нерівномірний. У призматичних руслах з нахилами дна $i \leq 0$ і в непризматичних руслах рівномірний рух фізично неможливий.

При нерівномірному русі за довжиною потоку спостерігається або зміна середньої швидкості течії, або перерозподіл швидкостей за живим перерізом, що зумовлює появу сил інерції та порушує рівновагу сил, що діють на потік, властивий рівномірному руху. Глибина потоку h при нерівномірному русі зазвичай змінюється за шляхом.

Основне диференціальне рівняння усталеного нерівномірного плавно-змінного руху рідини в призматичному руслі будь-якої правильної форми виглядає так:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}, \quad (3.24)$$

де dh – нескінченно мала зміна глибини потоку на нескінченно малому шляху його dl ;

i – нахил дна русла;

Q – витрата рідини;

$K = \omega C \sqrt{R}$ – витратна характеристика у конкретному перерізі потоку з глибиною h .

У роботі проводиться оцінка енергетичного стану потоку у відкритому руслі та побудова кривих вільної поверхні.

На основі аналізу рівняння (3.24) досліджуються криві вільної поверхні потоку, а його інтегрування дає можливість розраховувати й будувати криві вільної поверхні в призматичних руслах будь-якої правильної форми.

Для оцінки енергетичного стану потоку та дослідженні кривих вільної поверхні в призматичних руслах використовуються поняття нормальної та критичної глибин, а також критичного нахилу дна русла.

Нормальною глибиною h_0 називається глибина наповнення призматичного русла з прямим нахилом дна, при якій проходження витрати здійснюється при рівномірному русі. Під час розгляду нерівномірного руху під нормальною глибиною розуміється уявна глибина наповнення, яка встановилася б у руслі, якщо рух став рівномірним.

Нормальну глибину визначають за формулою Шезі. Нормальна глибина h_0 залежить від нахилу дна i та коефіцієнта шорсткості n русла:

$$V = C\sqrt{Ri}. \quad (3.25)$$

Критична глибина h_K – глибина, що відповідає мінімальними значенням питомої енергії перерізу E . Питома енергія потоку становить повну питому енергію у даному перетині безнапірного потоку відносно площини порівняння, що проходить через найнижчу точку живого перетину:

$$E = h + \frac{\alpha V^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} = E_{\text{ном}} + E_{\text{кін}} \quad (3.26)$$

Критична глибина h_K для призматичного русла будь-якої правильної форми визначається з основного рівняння критичного стану потоку:

$$\frac{\alpha V^2}{g} = \frac{\omega_K^3}{B_K} \quad (3.27)$$

де ω_K і B_K – площа живого перетину й ширина потоку поверху, що відповідають критичній глибині.

Згідно з рівнянням (3.24) видно, що критична глибина залежить від витрати й форми русла, але (на відміну від нормальної) не залежить ні від нахилу дна русла, ні від його шорсткості.

У разі прямокутного русла критична глибина визначається за формулою, отриманою з рівняння (3.26):

$$h_K = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (3.28)$$

де $q = Q/B$ – питома витрата води (витрата, що припадає на одиницю ширини русла).

При заданій витраті в призматичному руслі, для якого $\omega = f(h)$, питома енергія перерізу є функцією тільки глибини потоку, тобто $E = f(h)$.

Графік цієї функції (рис. 3.7) показує, що одному й тому самому значенню E можуть відповідати два різних значення глибини потоку h , одне з яких більше критичної глибини, а інше – менше.

Якщо глибина потоку перевищує критичну ($h > h_K$), потік перебуває в спокійному стані. У цьому разі кінетична енергія потоку мала, порівняно з потенційною, тому параметр кінетичності Π_K (число Фруда Fr_h , обчислене через середню глибину $h = \omega/B$) менше одиниці, тобто

$$\Pi_K = \frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^2} = \frac{\alpha V^2}{gh} < 1. \quad (3.29)$$

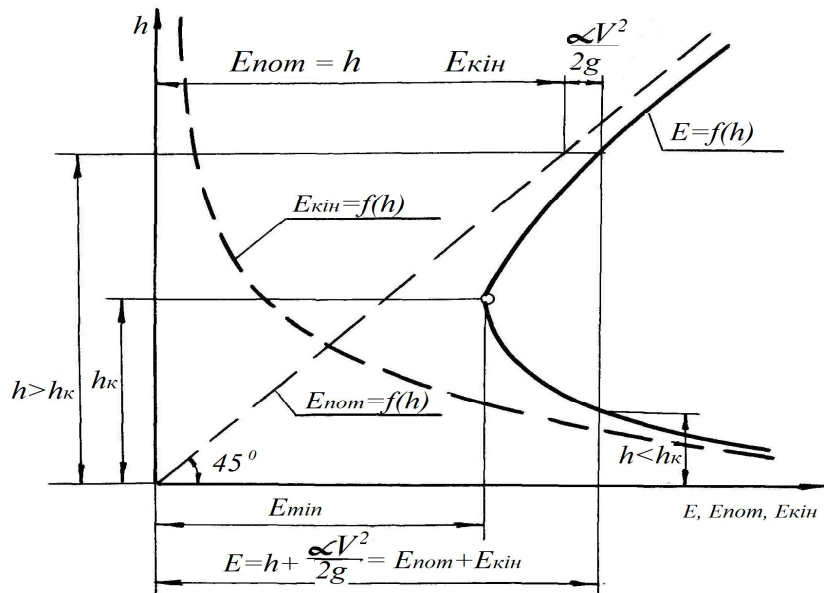


Рисунок 3.7 – Графік питомої енергії перерізу

Для прямокутного русла вираз (3.29) виглядає так:

$$P_k := \left(\frac{h_k}{h} \right)^3. \quad (3.30)$$

При спокійному стані потоку питома енергія перерізу зі збільшенням глибини потоку зростає.

1. Якщо глибина потоку менше критичної ($h < h_k$), потік перебуває у бурхливому стані ($P_k > 1$), а питома енергія перерізу з ростом глибини потоку зменшується.

2. Якщо $h = h_k$, потік знаходиться у критичному стані ($P_k = 1$), а питома енергія перерізу E приймає мінімальне значення.

Таким чином, використовуючи поняття критичної глибини, можна класифікувати потоки за їхнім енергетичним станом.

Критичний нахил i_k – це такий нахил дна призматичного русла, при якому задана витрата пропускається за нормальною глибиною рівній критичній ($h_0 = h_k$), а величина критичного нахилу знаходиться з формули Шезі:

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k C_k^2 R_k}. \quad (3.31)$$

Критичний нахил може бути обчислений для будь-якого призматичного русла, незалежно від того, чи має це русло нахил дна $i < 0$ чи $i > 0$.

Якщо $i < i_k$, нормальна глибина більше критичної ($h_0 > h_k$).

Якщо $i > i_k$, то $h_0 > h_k$. При $i = i_k$ $h_0 = h_k$.

Під час дослідження кривої вільної поверхні доцільно нанести на креслення профілю русла лінії нормальної глибини та критичної. Ці лінії залежно від нахилу дна русла можуть займати різне положення відносно один одного:

- при $i < i_k$ лінія нормальної глибини розміщена вище критичної лінії ($h_o > h_k$) коли $h > h_o > h_k$ (рис. 3.8);
- при $i > i_k$ лінія нормальної глибини розташована нижче критичної лінії (рис. 3.9);
- при $i = i_k$ лінії зливаються в одну.

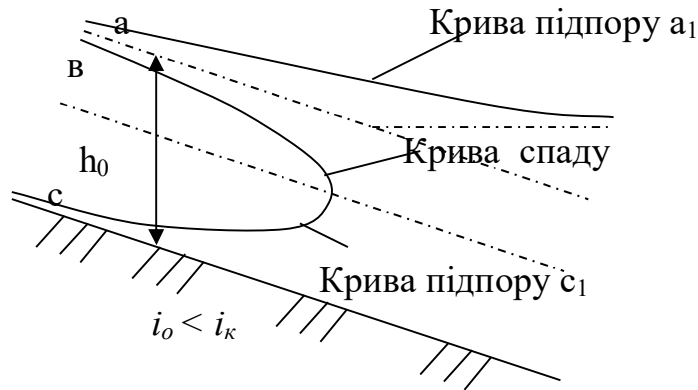


Рисунок 3.8 – Призматичне русло при прямому нахилі дна при $i < i_k$

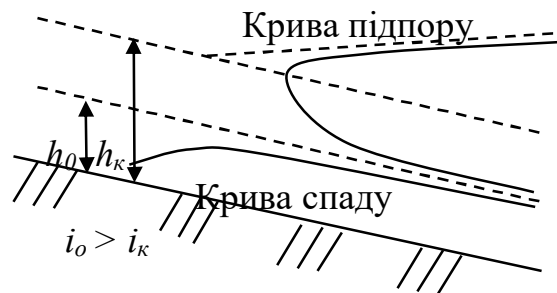


Рисунок 3.9 – Форма вільної поверхні при $h > h_k > h_o$

У руслах із горизонтальним дном ($i = 0$) і зі зворотним нахилом дна ($i < 0$) рівняння рівномірного руху втрачає фізичний зміст, адже не має фізичного сенсу й поняття про нормальну глибину. Критична ж глибина і в цих випадках зберігає своє значення, адже не залежить від нахилу дна, тому при нахилі дна $i \leq 0$ має тільки критичну лінію.

Дослідження кривої вільної поверхні потоку виконують у такій послідовності:

1. Встановлюють енергетичний стан потоку (за співвідношенням між глибинами h і h_k); якщо $h > h_k$ – потік в спокійному стані, $h < h_k$ – у бурхливому.

2. З'ясовують яку форму буде мати крива вільної поверхні (криву спаду або криву підпору). Для цього необхідно через співвідношення між глибинами h , h_o і h_k або між h і h_k , визначити знак похідної dh / dl у рівнянні (3.24):

- якщо $dh / dl > 0$, має знак «плюс» – крива вільної поверхні є кривою підпору,

- а в іншому випадку – кривою спаду.

3. Визначають за графіком $E = f(h)$ зменшується чи зростає питома енергія перерізу E за шляхом руху потоку.

4. Установлюють форму (кривизну) кривої вільної поверхні, з'ясовуючи, до чого схильна dh/dl у рівнянні (3.24) при значеннях h до крайніх значень.

5. Визначають форму довжини кривої вільної поверхні: кінцева або нескінченна (за наявності асимптот). Якщо крива має хоча б одну асимптоту – її довжина теоретично дорівнює нескінченності.

Склад роботи

1. З'ясувати енергетичний стан потоку та побудувати за дослідними даними криві вільної поверхні.

2. Установити тип і форму кривих вільної поверхні потоку за даними вимірювання глибин.

3. Перевірити відповідність форм кривих вільної поверхні (знайдених дослідним шляхом) із теоретичними за рівнянням (3.24).

Опис експериментальної установки

Установка (рис. 3.10) становить скляний лоток (8) прямокутного перетину зі змінним нахилом дна, напірний бак (11), обладнаний п'єзометром (12), і нижнім металевим лотком (4). Циркуляція води в установці забезпечується насосом (2) з електродвигуном (1). Витрата води регулюється засувкою (3).

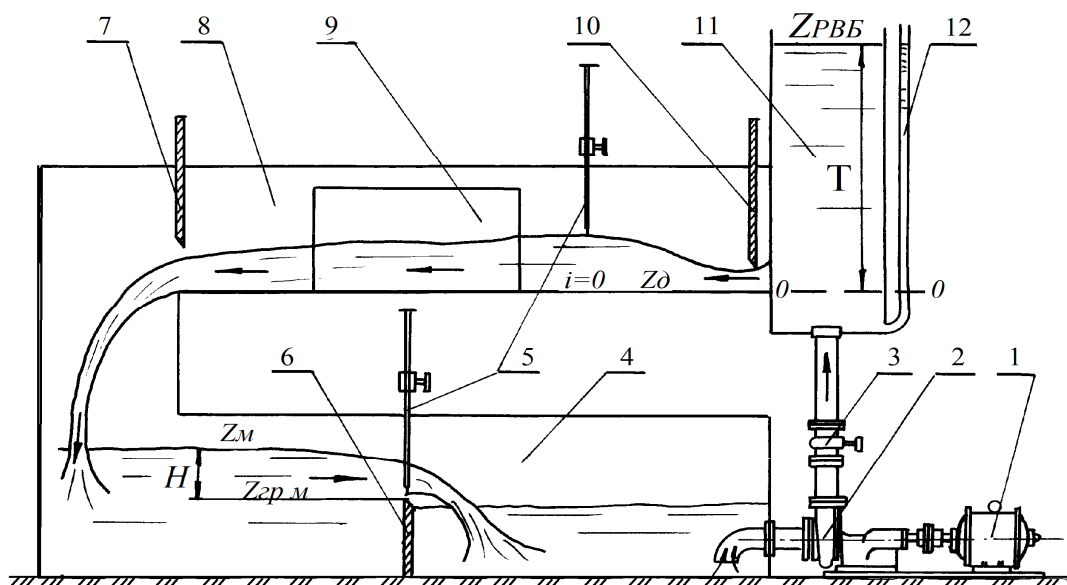


Рисунок 3.10 – Схема установки

Створення потоку з різними формами кривих вільної поверхні здійснюється шляхом маневрування засувкою (3) і плоскими затворами (7) і (10). Для вимірювання витрати використовується трикутний водозлив 6. Глибини потоку визначаються мірною голкою (5) і (9). Знаходження перетинів потоку визначається за шкалою, розташованою на стінці лотка (8) (на схемі не зображена).

Порядок проведення роботи

1. При нахилі дна лотка (8) ($i = 0$) включити насос (2), відкрити повністю засувку (3) і затвори (7) і (10). Потім виміряти статичний тиск H на водозливі (6) і обчислити витрату.

2. Для знайденої витрати Q і відомої ширини лотка B розрахувати за формулою (3.28) критичну глибину h_k і критичний нахил i_k за формулою (3.31).

3. Відзначити на стінці лотка (8) положення лінії критичної глибини, орієнтуючись на неї, відрегулювати відкриття затворів (7) і (10) так, щоб глибини потоку в лотку були менше критичної. Потім виміряти глибини потоку у перетинах і їх координати x (за шкалою на стінці лотка).

4. Маневруючи затворами (7) і (10), створити в лотку потік з глибинами h більше критичної глибини h_k , зробити виміри глибин і відстаней.

5. Не змінюючи витрати, створити прямий нахил дна русла ($i > 0$). Обчислити для нахилу дна нормальну глибину h_0 . При цьому глибини потоку h повинні бути більше нормальної h_0 та менше нормальної (в обох більше критичної $h_0 > h > h_k$).

6. Результати вимірювань занести до журналу та зробити висновок шляхом вичислення.

Обробка експериментальних даних:

1. Визначаємо критичну глибину потоку:
$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gB^2}} .$$

2. Визначаємо критичний нахил за формулою:
$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k} .$$

3. Визначаємо нахил дна лотка:
$$i = \frac{Z_{\partial 1} - Z_{\partial 2}}{L_{1-2}} .$$

Отримані експериментальні дані занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Журнал лабораторної роботи № 3

| № з/п | Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності | Числові значення | | |
|-------|--|------------------|----------|----------|
| | | Дослід 1 | Дослід 2 | Дослід 3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Мірний трикутний водозлив (водозлив Томсона) відмітка гребня $Z_{г.р.м}$, м відмітка рівня води Z_m , м Напір $H = Z_m + Z_{г.р.м}$, м Витрата води $Q = 1,4H^{5/2}$ м ³ /с | | | |
| 2 | Ширина лотка, B , см | | | |
| 3 | Критична глибина $h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gB^2}}$, см | | | |

Продовження таблиці 3.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---|---|---|---|
| 4 | Критичний нахил $i_k = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k}$ | | | |
| 5 | Нормальна глибина (за формулою Шезі), h_0 , см | | | |
| 6 | Глибина потоку у довільному перерізі h , см | | | |
| 7 | Співвідношення між глибинами h, h_0 і h_k ($h_0 < h > h_k$; $h_k > h < h_0$ тощо) | | | |
| 8 | Енергетичний стан потоку (спокійний, бурхливий, критичний) | | | |
| 9 | Нахил дна лотка $i = \frac{Z_{\partial 1} - Z_{\partial 2}}{L_{1-2}}$ | | | |
| 10 | Глибини потоку h у перерізі (у чисельнику) і координат x перетинів (у знаменнику) - h_1/x_1 , см; - h_2/x_2 , см; - h_3/x_3 , см; - h_4/x_4 , см; - h_5/x_5 , см; - h_6/x_6 , см. | | | |
| 11 | Висновок | | | |

« _____ » _____ 20__ р.

_____ (підпис студента)

Контрольні запитання

1. Поясніть поняття кривої вільної поверхні, кривої спаду та кривої підпору.
2. Наведіть класифікацію відкритих русел за нахилом дна та формою поперечного перерізу.
3. Як визначають енергетичний стан потоку?
4. Що таке нормальна, критична глибини та критичний нахил дна русла?
5. Зобразіть графік питомої енергії перерізу. Що відбувається з питомою енергією перерізу при зростанні глибини потоку за шляхом руху рідини при спокійному й бурхливому станах потоку?
6. Поясніть, як визначається нормальна глибина потоку h_0 ?
7. Напишіть рівняння критичного стану. Як визначають критичну глибину?
8. Як визначається критичний нахил i_k дна русла?

Лабораторна робота № 4

Визначення гідравлічних параметрів рівномірного потоку, що рухається у відкритому руслі

Загальні відомості

Рівномірний рух у відкритих руслах зустрічається тільки в штучних водотоках – каналах і лотках. Рух у річках – нерівномірний, оскільки гідравлічні елементи потоку в природних руслах змінюються вздовж водотоку.

Рівномірний рух води – рух, при якому витрата й розміри живого перетину потоку незмінні по його довжині (рис. 3.11). Отже, для існування рівномірного руху необхідно виконання кількох умов:

$$I_p = i = I, \quad (3.32)$$

де I_p – п'езометричний нахил;
 I – нахил вільної поверхні потоку;
 i – гідравлічний нахил дна русла.

Ця умова виконується при постійних: витраті Q , площі живого перетину, шорсткості n змоченої поверхні русла по довжині, та за відсутності місцевих опорів.

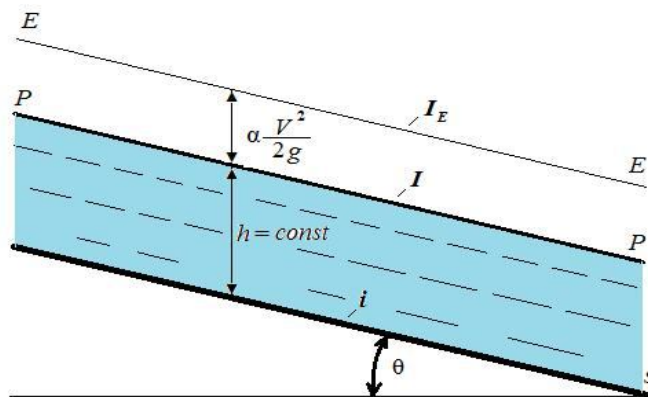


Рисунок 3.11 – Рівномірний рух рідини у відкритому призматичному руслі:

$$h = \text{const}; V = \text{const}; h_l / l = I - \text{гідравлічний нахил};$$

$$\sin \theta = i - \text{поздовжній нахил дна русла}$$

Факторами, що обумовлюють пропускну здатність русла, є його стан і шорсткість. У роботі визначали гідравлічний параметр рівномірного потоку у відкритому руслі – коефіцієнт шорсткості для призматичного русла. *Шорсткість* – сукупна нерівномірність твердої поверхні, що позначається на виникненні сил тертя потоку на дно та стінки русла, яка залежить від абсолютного розміру нерівномірностей та їхнього взаємного розташування. Характеризуються величиною коефіцієнта шорсткості n .

Коефіцієнт шорсткості n входить в емпіричні формули для визначення коефіцієнта Шезі C . Останній, зі свого боку, входить в формулу Шезі, що є

основною розрахунковою залежністю рівномірного руху рідини у відкритих руслах:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (3.33)$$

де Q – витрата води, м³/с;
 ω – площа живого перетину потоку, м²;
 C – коефіцієнт Шезі, м^{0,5}/с;
 R – гідравлічний радіус, що є відношенням площі живого перетину ω до змоченій периметру χ , м, тобто

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.34)$$

При розрахунках гідротехнічних споруд з використанням формули Шезі коефіцієнт C розраховують за різними емпіричними формулами:

– М. М. Павловського:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (3.35)$$

де n – коефіцієнт шорсткості, який визначається за довідковими даними;
 y – змінний показник ступеня $y = f(n, R)$:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1). \quad (3.36)$$

– Маннінга:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}; \quad (3.37)$$

– І. І. Агроскіна:

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R, \frac{M^{0,5}}{c} \quad (3.38)$$

Якщо геометричні параметри виражені в сантиметрах, то з формул (3.33), (3.37), (3.38) отримуємо формули для визначення коефіцієнта шорсткості:

$$n = \frac{4,64\omega R^2 / \sqrt{i}}{Q} \quad \text{та} \quad n = \frac{1}{C - 17,72 \lg R}. \quad (3.39)$$

Коефіцієнт шорсткості n – це умовний коефіцієнт, який при даних розмірах і матеріалі русла, заданих витраті води Q й нахилі дна дає величину C , розраховану за формулою рівній дослідній величині.

Під час проектування відкритих каналів величину коефіцієнта шорсткості n вибирають за таблицями, які є в спеціальній літературі, який залежить від матеріалу стінок і дна русла, а також умов його утримання. Фактично ж величина коефіцієнта n залежить від великої кількості факторів (шорсткості, рослинності, руслоформувальних процесів – замулення та розмиву, перешкод, розмірів і форми каналу, глибини наповнення та витрати, завислих і донних насосів, сезонних змін, пов'язаних із ростом водної рослинності). Таблиці для n містять лише описові та якісні характеристики категорій русел.

Склад роботи

1. Визначити за дослідними даними значення коефіцієнта шорсткості n відкритого каналу прямокутного перерізу.
2. Знайти величину коефіцієнта n для матеріалу стінок і дна каналу в довідковій літературі.
3. Обчислити відносні відхилення.

Опис експериментальної установки

Для виконання роботи використовується скляний, досить довгий лоток, щоб у ньому можна було отримати ділянку з рівномірним рухом води.

Установка (рис. 3.12) включає в себе: скляний лоток (3) прямокутного перетину з прямим нахилом дна ($i > 0$), обладнаний в головній і зливній частинах плоскими затворами (5) і (2) (для регулювання глибини потоку) і мірною голкою (4) (для вимірювання відміток дна та вільної поверхні потоку); головну частину (7), забезпечену струменевим випрямлячем (6), гратчастим гасником (9) і п'єзометром (8), з'єднаним через трубопровід (12), на якому є засувка (11) для регулювання витрати води з напірним резервуаром (1). Нижній бак (13), забезпечений голкою (15) і трикутним водозливом (14) для вимірювання величини витрати Q . Установка входить в систему оборотного водопостачання лабораторії, що включає приймальний резервуар (10), відцентровий насос (на схемі не показаний) з системою трубопроводів і напірний резервуар (1).

Порядок проведення роботи

1. Виміряти лінійкою ширину лотку b .
2. Виміряти позначки дна $Z\partial 1$ і $Z\partial 2$ у перетинах, розташованих у головній і зливній частинах каналу (3), і відстань (1) між ними (за шкалою).
3. Виміряти позначку гребеня трикутного водозливу (14) $Z\Gamma$ р.м.

4. Включити насос (9). Після того, як рівень води в резервуарі (1) встановиться на постійній позначці, відкрити засувку (11), забезпечивши по каналу 3 пропуск постійної витрати води Q .

5. Регулюючи засувки (5) і (2), створити в середній частині каналу (3) рівномірний рух. Виміряти у перерізі, розташованому в середині ділянки з рівномірним рухом, позначки рівня води та дна каналу Z_d .

6. Виміряти рівень води перед водозливом (14).

7. Змінюючи витрату води засувкою, виконати аналогічні досліди та записати отримані дані до журналу.

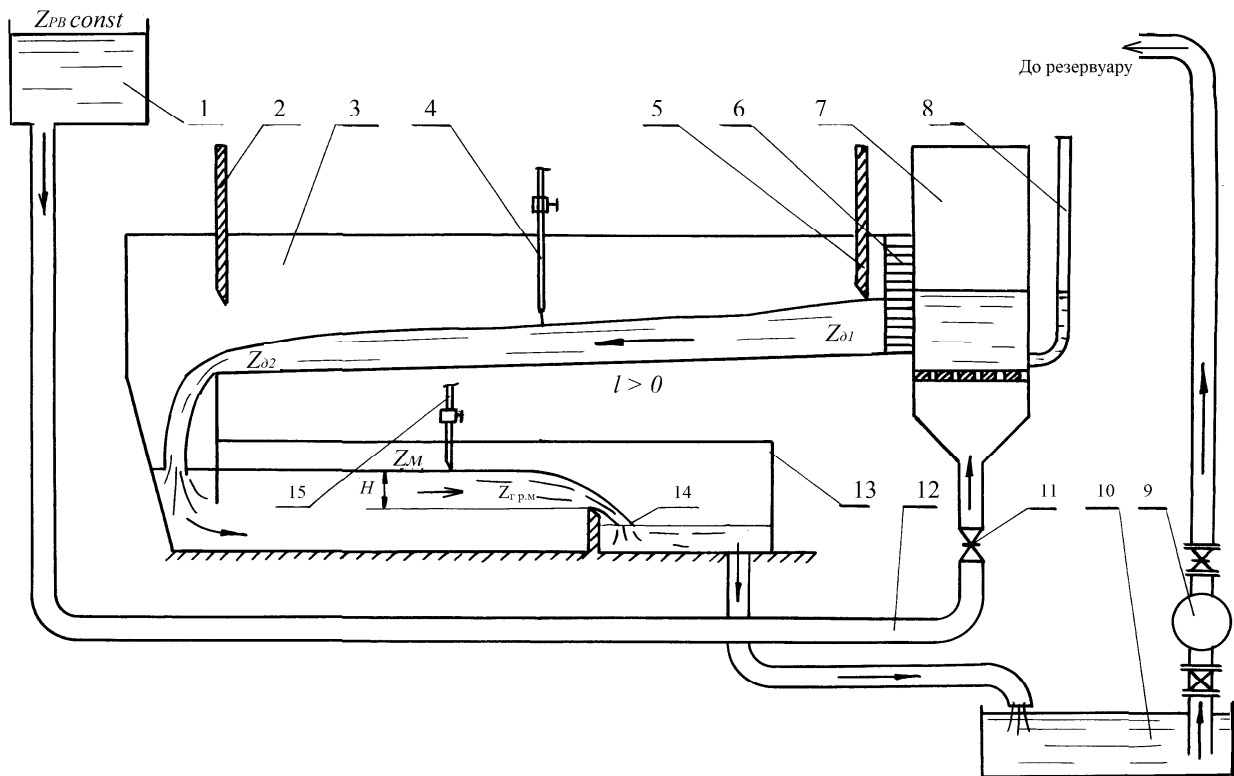


Рисунок 3.12 – Схема установки

Обробка експериментальних даних

За дослідними даними величину коефіцієнта шорсткості n можна визначити у такий спосіб:

- у відкритому призматичному руслі, зазвичай з прямим нахилом дна, вимірюють величини, необхідні для визначення: витрата води Q , площі живого перетину ω і нахилу дна i ;
- за формулами обчислюють коефіцієнт Шезі C та величину n ;
- знайдені чисельні значення коефіцієнта шорсткості n порівнюють з даними в довідковій літературі. Вони є результатом обробки численних дослідних даних, отриманих різними дослідниками у різні роки в штучних і природних руслах у натурних і лабораторних умовах.

1. Визначаємо гідравлічні параметри потоку:
 - площу живого перетину потоку $\omega = (b + mh)h$;
 - змочений периметр $\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}$;
 - гідравлічний радіус R .
2. Розраховують значення коефіцієнта Шезі C за формулами (3.35–3.38).
3. За довідковою літературою визначають теоретичне значення коефіцієнту шорсткості n за формулою для матеріалу лотка та дослідне n .
4. За даними розрахунку значення n зіставляють із дослідними й роблять висновок про можливість застосування залежностей (3.38)–(3.39).

Таблиця 3.4 – Журнал лабораторної роботи № 4

| № з/п | Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності | Числові значення | | |
|-------|--|------------------|----------|----------|
| | | Дослід 1 | Дослід 2 | Дослід 3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Відмітки дна каналу: у головній частині $Z_{\partial 1}$, м зливній частині $Z_{\partial 2}$, м | | | |
| 2 | Відстань між перерізами з відмітками $Z_{\partial 1}$ і $Z_{\partial 2}$ L_{1-2} , м | | | |
| 3 | Нахил дна каналу $i = \frac{Z_{\partial 1} - Z_{\partial 2}}{L_{1-2}}$ | | | |
| 4 | Мірний трикутний водозлив (водозлив Томсона): – відмітка гребня $Z_{г.р.м}$, м – відмітка рівня води Z_m , м – напір на водозливі $H = Z_m + Z_{г.р.м}$, м | | | |
| 5 | Витрата води $Q = 1,4H^{5/2}$, м ³ /с | | | |
| 6 | Відмітка вільної поверхні у заданому перерізі Z , м | | | |
| 7 | Відмітка дна каналу Z_{∂} , м | | | |
| 8 | Глибина потоку $h_0 = Z - Z_{\partial}$, м | | | |
| 9 | Ширина лотка (потоку), b , м | | | |
| 10 | Площа живого перетину, $\omega = bh_0$, м ² | | | |
| 11 | Змочений периметр, $\chi = b + 2h_0$, м | | | |
| 12 | Гідравлічний радіус, $R = \omega / \chi$, м | | | |
| 13 | Коефіцієнт Шезі, $C = Q / \omega \sqrt{Ri}$, м ^{0,5} /с | | | |
| 14 | Коефіцієнт шорсткості: $n_1 = R^y / C$; $n_2 = R^{1/6} / C$; $n_3 = 1 / C - 17,72 \lg R$; за довідником $n_{емп}$ | | | |

Продовження таблиці 3.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--|---|---|---|
| 15 | <p>Відносна похибка:</p> $\Delta n_1 = ((n_{емп} - n_1) / n_{емп}) 100 \%$ $\Delta n_2 = ((n_{емп} - n_2) / n_{емп}) 100 \%$ $\Delta n_3 = ((n_{емп} - n_3) / n_{емп}) 100 \%$ | | | |

«_____» _____ 20__ р.

_____ (підпис студента)

Контрольні запитання

1. Поясніть умови рівномірного руху рідини у відкритому руслі.
2. Що таке коефіцієнт шорсткості n та які чинники впливають на його величину при проектуванні гідротехнічних споруд?
3. Опишіть формулу Шезі та поясніть її.

Лабораторна робота № 5

Вивчення форм та параметрів водозливів

Загальні відомості

Водозливом називають безнапірний отвір (виріз у стіні), через який протікає рідина. Ділянка потоку води, що прилягає до водозливу з верхнього боку, називається верхнім б'єфом, а з низового – нижнім б'єфом.

Класифікують водозливи за багатьма ознаками, зокрема за товщиною водозливної стінки (порогу) та її окресленням, розташуванням і формою стінки в плані, впливом рівня нижнього б'єфа на витікання, формою вирізу отвору у стінці, ступенем бокового стиснення струменя, що переливається через водозлив.

У роботі вивчається пропускна здатність мірних водозливів із тонкою стінкою.

Водозлив із тонкою стінкою – водозлив, товщина стінки δ якого не впливає на форму переливального струменя та становить $\delta \leq 0,67 H$ (де H – напір на водозливі) (рис. 3.13).

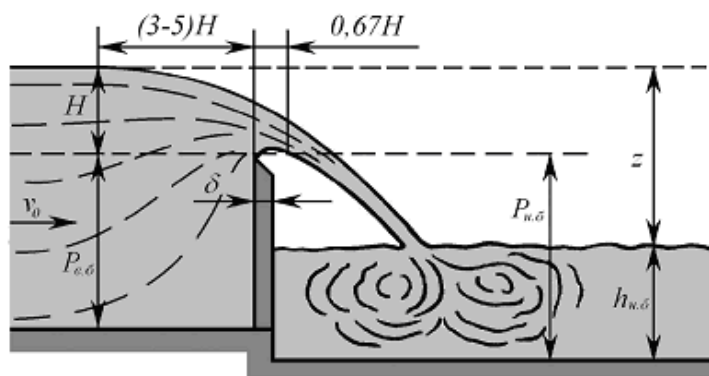


Рисунок 3.13 – Витікання через водозлив з тонкою стінкою (непідтоплений)

Водозливи з тонкою стінкою за формою вирізу отвору в стінці бувають: прямокутні, трикутні, трапецієподібні й криволінійні. Трикутні, прямокутні та трапецієподібні водозливи широко застосовуються для вимірювання витрат води на невеликих водотоках і в лабораторних умовах. Вони є мірними водозливами та забезпечують високу точність вимірювання (помилка 1 %).

Попередньо водозливи тарирують, пропускаючи крізь них різні витрати води Q , (вимірювані, наприклад, об'ємним способом) і визначають відповідні їм напори H .

У результаті тарування складають таблицю або будують графік $Q = f(H)$ (рис. 3.14), якими й користуються для визначення величини витрат Q за вимірною величиною напору H на водозливі, не вдаючись до вимірювань об'єму води та часу.

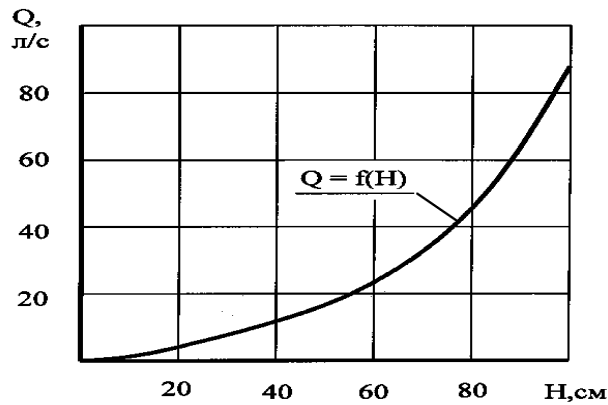


Рисунок 3.14 – Вигляд тарувальної кривої водозливу з тонкою стінкою

З точки зору впливу рівня нижнього б'єфа на пропускну здатність водозливів, вони можуть бути підтопленими і непідтопленими.

Непідтоплений водозлив – водозлив, при якому положення рівня нижнього б'єфа не впливає на пропускну здатність водозливу. Водозлив з тонкою стінкою стає підтопленим за умови виконання двох умов:

1) відмітка рівня нижнього б'єфа РНБ повинна бути більше рівня гребеня водозливу $Z_{гр}$. Перепад у споруді Z менше напору H або глибина підтоплення $h_{п}$ більше нуля ($h_{п} > 0$);

2) сполучення падаючого з водозливу струменя з нижнім б'єфом має відбуватися при затопленому стрибку.

Одним з основних питань під час дослідження будь-якого водозливу є вивчення його пропускну здатності Q . У цій роботі вивчаються трикутний водозлив із кутом при вершині $\theta = 90^\circ$ (водозлив Томсона) (рис. 3.15) і трапецієподібний водозлив при $\varphi = 14^\circ$ (рис. 3.16).

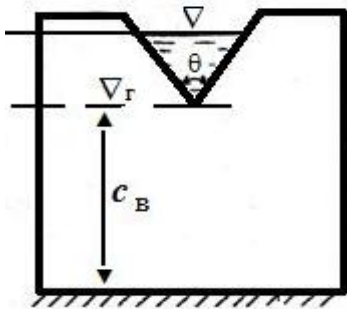


Рисунок 3.15 – Водозлив Томсона

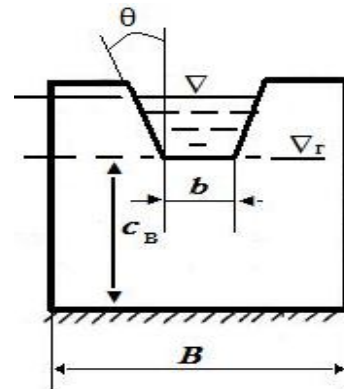


Рисунок 3.16 – Трапецієдальний водозлив із тонкою стінкою ($\varphi=14^\circ$)

Витрата через непідтоплений трикутний водозлив з вертикальною тонкою стінкою (при $\theta = 90^\circ$) визначається за формулою Томсона:

$$Q = 1,4 H^{5/2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.40)$$

Формула Томсона застосовується за умов: $0,05 \leq H \leq 0,25$ м, $V_0 \leq 0,5$ м/с. Також витрата через трикутний водозлив визначається за формулою

$$Q = 1,343 \cdot H^{2,47} . \quad (3.41)$$

При куті $22^\circ \leq \theta \leq 118^\circ$ витрату визначають за формулою Граве:

$$Q = 1,331 \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,996} \cdot H^{2,47} , \text{ м}^3/\text{с} . \quad (3.42)$$

Трикутні водозливи мають меншу пропускну спроможність, ніж прямокутні й трапецієподібні (при постійному напорі H), їх застосовують для вимірювання невеликих витрат.

Витрата через прямокутний водозлив із тонкою стінкою:

$$Q = m_0 \cdot \sigma_n \cdot b_2 \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} . \quad (3.43)$$

Витрата через непідтоплений трапецеїдальний водозлив при вільному витіканні та куті $\varphi = 14^\circ$ (при $b \geq 3H$) визначають за формулою

$$Q = 1,86b H^{3/2} = kb H^{3/2} , \quad \text{м}^3/\text{с} , \quad (3.44)$$

де $k = 1,86 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$ – коефіцієнт пропорційності;
 b – ширина водозливного отвору знизу.

Склад роботи

1. Визначити за дослідними даними для трикутного і трапецеїдального водозливів значення коефіцієнтів пропорційності $m_{\text{досл}}$ і $k_{\text{досл}}$ та порівняти зі значення у формулах (3.43) і (3.44).
2. Побудувати за дослідними даними тарувальні криві $Q = f(H)$.

Опис експериментальної установки

Робота виконується на установці, схема якої зображена на рисунку 3.17. Трикутний і трапецієподібний водозливи розміщуються у скляному лотку (3). Витрата води, що пропускається через послідовно розташовані водозливи, регулюється засувками. Величина витрати вимірюється об'ємним способом.

Установка для проведення лабораторної роботи складається з гідравлічного лотка (3) змінного нахилу, баку (4) із мірним трикутним водозливом (5) та циркуляційного насосу (1) (рис. 3.17). Установка становить циркуляційну систему; витрата води в ній регулюється засувками до й після насосу. Водозлив з тонкою стінкою (2) виконаний у вигляді бетонних блоків та встановлюються в гідравлічний лоток у період проведення лабораторної роботи.

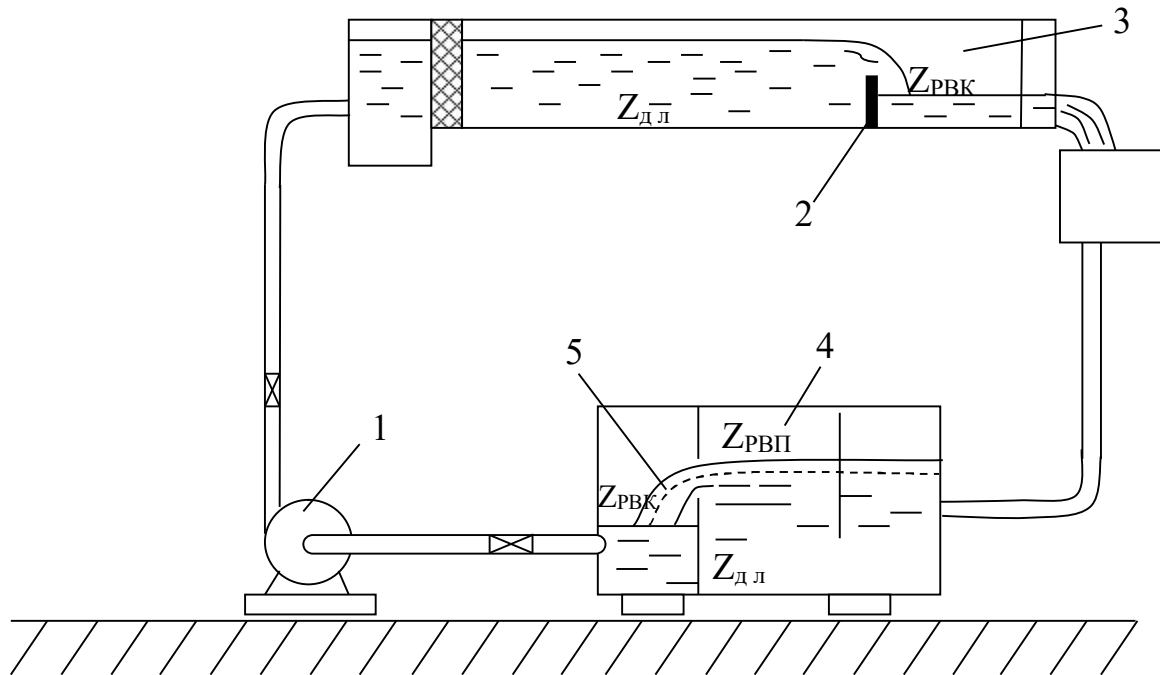


Рисунок 3.17 – Схема експериментальної установки з гідравлічним лотком

Порядок проведення роботи та обробка експериментальних даних

1. Виміряти позначки: дна лотка, гребеня трикутного та трапецієподібного водозливів.
2. Виміряти ширину за низом b отвору трапецієподібного водозливу.
3. Відкрити (частково) засувку для пропуску деякої невеликої кількості води через водозливи.
4. Виміряти позначки рівнів води перед водозливами на відстані $l \geq 3H$ від водозливної стінки.
5. Виміряти витрату води (за допомогою мірного баку (4) і секундоміра).
6. Обробити отримані дослідні дані та результати записати до журналу (табл. 3.5). За отриманими даними побудувати тарувальні криві для досліджуваних водозливів та зробити висновок за результатами роботи.

Таблиця 3.5 – Журнал лабораторної роботи № 5

| № п/п | Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності | Числові значення | |
|-------|---|--------------------|---------------------------|
| | | Трикутний водозлив | Трапецієподібний водозлив |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2 | Відмітки: – дна лотка, м; – гребеня водозливу, $Z_{гр}$, м; – рівня води перед водозливом, $Z_{рв}$, м; – | | |

Лабораторна робота №6

Вивчення фільтраційних властивостей різних типів ґрунтів

Загальні відомості

Фільтрацією називають рух води в порах водонасиченого ґрунту. Знання закономірностей фільтрації застосовують для визначення припливу ґрунтових вод до котлованів споруджуваних будинків, дренажним і водозабірних пристроїв, для розрахунків осідання фундаментів і обчислення втрат води через земляні греблі й дамби. Рух ґрунтових вод, так само як у потоках відкритих і напірних, може бути сталим і несталим, рівномірним і нерівномірним, напірним і безнапірним, двовірним (плоским) і тривимірним (просторовим).

Якщо рух ґрунтових вод відбувається з вільною поверхнею, на якій тиск дорівнює атмосферному, такий рух є *безнапірним*.

Якщо відбувається рух ґрунтових вод у повністю заповненому водоносному шарі, зверху й знизу обмеженому водонапірними шарами, і всі пори заповнені водою, тобто п'єзометрична лінія розташована вище верху водоносного шару, рух – *напірний*.

Об'єм води, що проходить через живий переріз пористого середовища в одиницю часу, називають *фільтраційною витратою*.

Швидкість фільтрації – відношення витрати до площини поперечного перерізу всього пористого середовища, через яке здійснюється фільтрація. Отже, швидкість фільтрації є фіктивною швидкістю руху, що відрізняється від дійсної швидкості, з якою переміщується вода в порах ґрунту. Режим руху ґрунтових вод може бути ламінарним і турбулентним.

Під час вивчення фільтраційних властивостей різних типів ґрунтів у роботі вивчається усталена напірна фільтрація в піщаному ґрунті на установці Дарсі при ламінарному русі, що описується законом Дарсі, при цьому швидкість фільтрації лінійно залежить від гідравлічного нахилу:

$$V_{\phi} = k I, \quad (3.45)$$

де k – коефіцієнт фільтрації.

Формула (3.45) називають *законом Дарсі* або *лінійним законом фільтрації*.

$$Q = \omega k I, \quad (3.46)$$

де V – швидкість фільтрації. Уведемо поняття *швидкості фільтрації*.

$$V_{\phi} = Q / \omega. \quad (3.47)$$

де Q – витрата, що проходить через переріз ґрунту, площею ω .

ω - площа поверхневого перетину фільтраційного потоку, що складається з сумарної площі перетину пор ($\omega_{пор}$) і частинок скелета ґрунту ($\omega_{ск}$), тобто: $\omega = \omega_{пор} + \omega_{ск}$;

k – коефіцієнт фільтрації, що має розмірність зазвичай у см/с або м/добу, характеризує водопроникність ґрунту. Величину k визначають для кожного виду ґрунту дослідним шляхом (при постійній температурі фільтрувальної рідини).

У довідковій літературі величини коефіцієнта фільтрації ґрунтів зазвичай даються при температурі 10 °С. Для переходу від величини коефіцієнта k_t , отриманої при температурі t , відмінною від 10 °С, до величини при 10 °С застосовується формула

$$k_{10} = \frac{k_t}{\tau}, \quad (3.48)$$

де τ – температурна поправка, яка розраховується за формулою

$$\tau = 0,7 + 0,03t, \quad ^\circ\text{C}. \quad (3.49)$$

Гرادієнт напору I (відношення різниці повних напорів) $H_1 - H_2 = h_{1-2}$ у двох точках ґрунтового потоку, які лежать на одній лінії потоку, до відстані між ними l_{1-2} , вимірюваній за лінією:

$$I_{1-2} = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} = \frac{h_{1-2}}{l_{1-2}}. \quad (3.50)$$

У разі фільтрації швидкісним напором нехтують, тому повний напір вважають рівним гідростатичному, тобто

$$H = z + \frac{p}{\rho g}. \quad (3.51)$$

Закон Дарсі показує, що швидкість фільтрації пропорційна градієнту напору та втрати напору лінійно залежать від швидкості фільтрації. Зауважимо, що реальна швидкість руху рідини в порах ґрунту

$$V_d = \frac{Q}{\omega_{пор}}. \quad (3.52)$$

Швидкість V_d і V пов'язані між собою відношенням:

$$V_d = V/n, \quad (3.53)$$

де $n = \omega_{пор}/\omega$ – пористість ґрунту.

Склад роботи

1. Переконайтеся у справедливості закону Дарсі шляхом побудови в масштабі (за даними трьох дослідів) графіків залежності швидкості фільтрації від градієнта напору I (графіків для трьох видів піщаного ґрунту, що відрізняються розміром частинок (рис. 3.18).

2. Визначити за графіком для одного виду піщаного ґрунту (зазначеного викладачем) середню величину коефіцієнту фільтрації та вказати її на графіку (рис. 3.18).

3. Побудувати у масштабі за даними одного дослідів епюру напорів (графік зміни напору шляхом фільтрації (рис. 3.19).

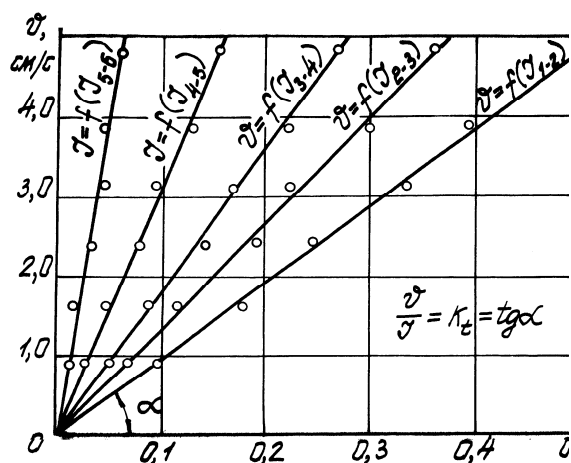


Рисунок 3.18 – Графік залежності швидкості фільтрації від градієнту напору I

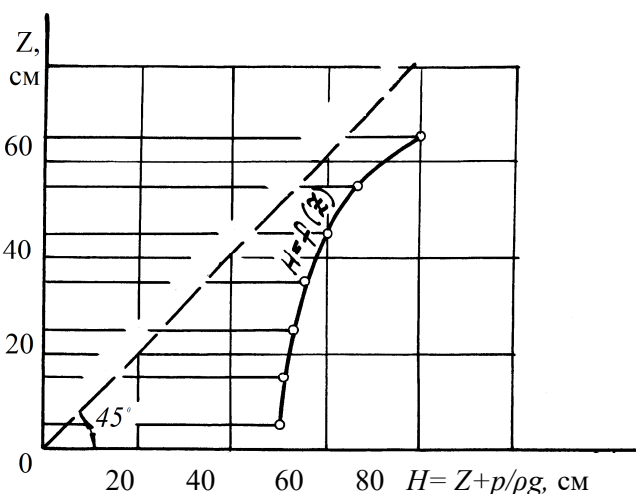


Рисунок 3.19 – Епюра напорів

Опис експериментальної установки

При лабораторних випробуваннях для визначення коефіцієнтів фільтрації нев'язких ґрунтів використовують прилад Дарсі (рис. 3.20).

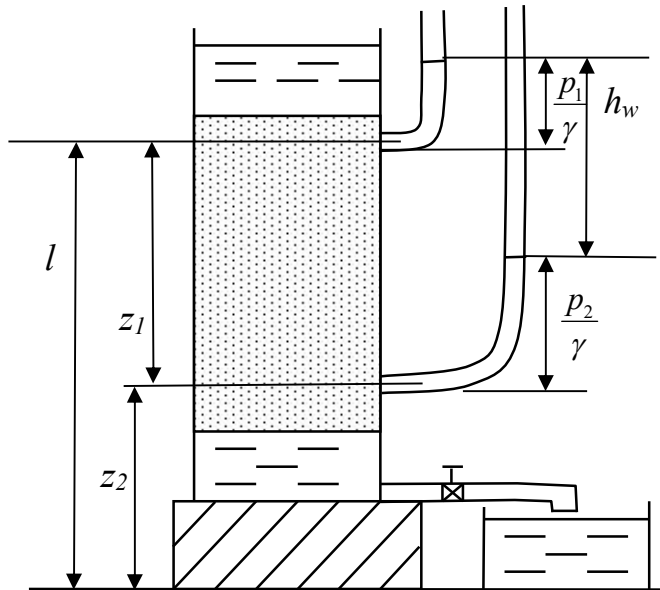


Рисунок 3.20 – Прилад Дарсі

У вертикальному відкритому циліндрі з площею поперечного перерізу w покладений пісок, що знизу підтримується сіткою. Вода надходить по трубі, сталість рівня підтримується завдяки зливу води через трубу (внизу приладу).

Вода, що фільтрується через ґрунт, збирається під решіткою на дні циліндра й витікає назовні через кран. Після того як рух стане сталим, знаходять витрату Q і вимірюють показання п'єзометрів, приєднаних до бічної стінки циліндра в межах частини обсягу, заповненого ґрунтом.

Час t заповнення профільтрованої води необхідного об'єму W заміряється секундоміром. Температура води t , $^{\circ}\text{C}$ – термометром.

Порядок проведення роботи

1. При різних положеннях зливного пристрою провести дослід:
 - визначити позначки рівнів води в п'єзометрах фільтраційного потоку;
 - виміряти лінійкою перевищення цих точок над площиною порівняння;
 - виміряти в посудині обсяг води, профільтрований через ґрунт, тривалість наповнення обсягу t і температуру води t , $^{\circ}\text{C}$.
2. Опустити зливний пристрій на 5–10 см і, почекавши кілька хвилин, щоб режим фільтрації встановився, повторити.
3. Отримані дослідні дані занести до таблиці 3.6.
4. Побудувати в масштабі за отриманими даними графік для різних видів ґрунту (рис. 3.18) та епюру напорів для одного з дослідів (рис. 3.19).
7. Зробити висновок за результатами роботи.

Обробка експериментальних даних

За формулою (3.47) визначають швидкість фільтрації $V_\phi = Q/\omega$, гідравлічний нахил $I = h_{mp}/l$ (h_{mp} – різниця показів у двох п'єзометрах на відстані l один від одного). За формулою (3.48) знаходимо коефіцієнт фільтрації k .

У деяких щільних ґрунтах (глини й важкі суглинки) фільтрація починається лише тоді, коли гідравлічний нахил (градієнт напору) перевищить початковий градієнт I_0 , тоді використовують таку формулу:

$$V_\phi = -k \left(\frac{d}{dl} + I_0 \right) = k(I - I_0). \quad (3.54)$$

Для дуже щільних глин $I_0 = 20-30$.

Експериментально встановлено, що закон Дарсі при числах Re , що перевищують значення $Re_{кр}$, порушується. При $Re < Re_{кр}$ зберігається лінійний закон фільтрації (ламінарна фільтрація). При $Re > Re_{кр}$ (турбулентна фільтрація) залежності V_ϕ та I інші. Для цих випадків експериментально визначено:

$$I = a + b \quad (3.55)$$

або
$$V_\phi = c I, \quad (3.56)$$

де a , b , c – коефіцієнти, що отримані дослідним шляхом для конкретних випадків руху ґрунтових вод.

Якщо швидкості значні й можна знехтувати членом a , одержуємо формулу, що нагадує формулу Шезі:

$$V_\phi = K_{кр} I. \quad (3.57)$$

Формулу (3.56) застосовують для тріщинуватих порід при $n = 1-1,75$.

Турбулентний режим руху води можливий при фільтрації у великих частинках, наприклад, при русі води в кам'яному насипі. За С. В. Ізбашем

$$K_{турб} = \left(20 - \frac{14}{d}\right) m \cdot d_m, \quad (3.58)$$

де d_m – середній діаметр кулі рівновеликого каменю, см;
 m – поруватість кам'яного насипу.

Таблиця 3.6 – Журнал лабораторної роботи № 6

| № з/п | Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності | | Числові значення характеристик | | |
|-------|---|----------------|--------------------------------|----------|----------|
| | | | Дослід 1 | Дослід 2 | Дослід 3 |
| 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Напори (відмітки рівнів води у п'езометрах) $H_i = z_i + p_i/\rho g$ | H_1 , см | | | |
| | | H_2 , см | | | |
| | | H_3 , см | | | |
| | | H_4 , см | | | |
| | | H_5 , см | | | |
| | | H_6 , см | | | |
| 2 | Об'єм профільтрованої води, W , см ³ | | | | |
| 3 | Тривалість фільтрації, t , с | | | | |
| 4 | Перевищення точок підімкнення п'езометрів над площиною порівняння (геометричні висоти) Z_i | z_1 , см | | | |
| | | z_2 , см | | | |
| | | z_3 , см | | | |
| | | z_4 , см | | | |
| | | z_5 , см | | | |
| | | z_6 , см | | | |
| 5 | Температура води, t , °C | | | | |
| 6 | Фільтраційна витрата, $Q=W/t$, см ³ /с | | | | |
| 7 | Швидкість фільтрації, $V_\phi = Q/\omega$, см/с | | | | |
| 8 | Втрати напору: $h_{i-i+1} = H_i - H_{i+1}$ | h_{1-2} , см | | | |
| | | h_{2-3} , см | | | |
| | | h_{3-4} , см | | | |
| | | h_{4-5} , см | | | |
| | | h_{5-6} , см | | | |
| 9 | Градiєнт напору: $I_{i-i+1} = h_{i-i+1}/l$ | I_{1-2} | | | |
| | | I_{2-3} | | | |
| | | I_{3-4} | | | |
| | | I_{4-5} | | | |
| | | I_{5-6} | | | |

Продовження таблиці 3.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|---|--------------------|---|---|---|
| 10 | Коефіцієнт фільтрації: $k_{t_{i-i+1}} = V_{\phi} / I_{i-i+1}$ | k_{t1-2} , см/с | | | |
| | | k_{t2-3} , см/с | | | |
| | | k_{t3-4} , см/с | | | |
| | | k_{t4-5} , см/с | | | |
| | | k_{t5-6} , см/с | | | |
| 11 | Температурна поправка $\tau = 0,7 + 0,03 t$, °C | | | | |
| 12 | Коефіцієнт фільтрації при 10 °C: $k_{10_{i-i+1}} = k_{t_{i-i+1}} / \tau$ | k_{101-2} , см/с | | | |
| | | k_{102-3} , см/с | | | |
| | | k_{103-4} , см/с | | | |
| | | k_{104-5} , см/с | | | |
| | | k_{105-6} , см/с | | | |

« _____ » _____ 20__ р.

_____ (підпис студента)

Контрольні запитання

1. Що таке фільтрація?
2. Яке рівняння називають законом Дарсі? Поясніть його.
3. Наведіть формулу визначення коефіцієнта фільтрації.
4. Наведіть схему приладу Дарсі.
5. Сформулюйте поняття градієнта напору та поясніть, як визначається його величина.
6. Зобразіть епюру напорів та поясніть її.
9. Від яких факторів залежить фільтраційна здатність ґрунту?

4 САМОСТІЙНА РОБОТА

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ

Тема 1 Витікання рідини з отворів і насадків

Маленькі та великі отвори. Отвір у тонкій і товстій стінках. Досконале та недосконале стиснення потоку. Вільні й підтоплені отвори. Коефіцієнт стиснення. Витікання рідини з малих отворів при постійному напорі. Витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі. Витікання рідини з отворів при змінному напорі. Витікання рідини через насадки. Види насадок. Середнє значення коефіцієнтів для найпоширеніших видів насадок. Сфера застосування різних насадок.

Питання для самоперевірки

1. Що таке інверсія?
2. Досконале та недосконале стиснення рідини.
3. Вільні, підтоплені й затоплені отвори.
4. Напишіть формулу визначення коефіцієнта стиснення струменя.
5. У чому полягає розходження між витратою при витіканні з отворів при постійному та змінному напорі?
6. Класифікація насадок.
7. Сфера застосування різних видів насадок.

Тема 2 Усталений рух рідини у відкритих руслах

Диференціальне рівняння сталого руху рідини, що плавно змінюється. Види усталеного руху рідини в призматичному відкритому руслі. Питома енергія потоку й перерізу. Критична глибина, спокійні й бурхливі потоки. Критичний нахил.

Питання для самоперевірки

1. Які русла належать до призматичних і непризматичних?
2. Напишіть диференціальне рівняння сталого руху рідини, що плавно змінюється, у відкритому руслі. Чим таке рівняння для непризматичного русла відрізняється від рівнянь для призматичного русла?
3. Як можна витлумачити параметр кінетичності з енергетичної точки зору?
4. Що таке питома енергія потоку й чим вона відрізняється від питомої енергії перерізу?
5. Як змінюється по довжині питома енергія перерізу й питома енергія потоку? Чи може питома енергія перерізу бути постійною за довжиною потоку?
6. У чому полягає трактування зміни питомої енергії перерізу з погляду співвідношення роботи сил опору і роботи сил тяжіння при русі рідини?
7. Які особливості питомої енергії перерізу і її змін по довжині в руслах з нульовим і зворотним нахилом.
8. Яка глибина русла називається критичною?

9. Як визначити критичну глибину в руслах прямокутного та трапецієподібного поперечних перерізів?
10. Як визначити критичну глибину в трикутному руслі?
11. Чому дорівнює $h_{кр}$ у руслі з параболічним поперечним перерізом?
12. Критична глибина в сегментному руслі.
13. Що таке нормальна глибина та критичний нахил?

Тема 3 Рівномірний рух рідини у відкритих руслах

Типи відкритих русел. Умови існування рівномірного руху. Рівняння рівномірного руху. Емпіричні формули для швидкісного множника (коефіцієнта Шезі) і швидкісної характеристики. Припустимі, що не розмивають і не замулюють середні за перерізом швидкості.

Питання для самоперевірки

1. Які ознаки характеризуються рівномірним рухом у відкритому руслі?
2. Як враховується неоднорідна шорсткість по периметру русла при розрахунку коефіцієнта Шезі?
3. Які фактори впливають також на значення коефіцієнтів Шезі?
4. Що називається допустимою нерозмиваючою та замулюючою середньою швидкостями в руслі?
5. Що таке гідравлічна крупність наносів?
6. Що таке транспортувальна здатність потоку?
7. Як можна визначити замулюючу швидкість у відкритому потоці?
8. Які основні типи завдань розглядаються при розрахунку каналів?
9. Укажіть співвідношення між основними типовими елементами русла, що розраховується, і русла з гідравлічно найвигіднішим профілем?
10. Які характеристики живого перерізу каналу трапецієподібного, параболічного й сегментного перерізу гідравлічно найвигіднішого профілю?
11. Як розраховуються канали в завданнях різного типу?

Тема 4 Гідравлічно найвигідніший переріз каналів

Гідравлічно найвигідніший переріз каналу. Визначення нормальної глибини потоку. Розрахунок русел трапецієподібного перерізу.

Питання для самоперевірки

1. Приведіть формулу визначення максимального гідравлічного радіуса.
2. Дайте визначення нормальної глибини потоку.
3. Методи визначення нормальної глибини потоку.
4. Відносні характеристики живого перерізу потоку.

Тема 5 Нерівномірний рух у відкритих руслах

Основні поняття й визначення. Питома енергія перерізів, критична глибина. Бурхливий і спокійний стан потоку, критичний нахил. Основне диференціальне рівняння сталого нерівномірного руху, що плавно змінюється для призматичних русел. Можливі випадки співвідношень між глибиною

нерівномірного руху h_1 , глибиною рівномірного руху h_0 і критичною глибиною h_k . Дослідження форм вільної поверхні потоку.

Питання для самоперевірки

1. Визначення нерівномірного руху у відкритих руслах.
2. Питома енергія потоку.
3. Бурхливий і спокійний стан потоку.
4. Величина критичного нахилу.
5. Можливі випадки співвідношень між глибиною нерівномірного руху h_1 , глибиною рівномірного руху h_0 і критичною глибиною h_k .
6. Що таке гідравлічний стрибок і крива підпору?

Тема 6 Водозливи. Їх класифікація

Класифікація водозливів. Водозлив з тонкою стінкою. Коефіцієнт витрати водозливу. Водозлив практичного профілю. Розрахунок незатоплених і підтоплених водозливів практичного профілю.

Питання для самоперевірки

1. Дайте визначення водозливу.
2. Що таке статичний напір на водозливі?
3. Класифікація водозливів за типом стінок, через які переливається вода.
4. Класифікація водозливів за формою вирізу отвору в стінці.
5. Класифікація водозливів за формою в плані.
6. Класифікація водозливів за розташуванням стінок щодо осі потоку.
7. Класифікація водозливів за наявністю в них бічного стиснення.
8. Класифікація водозливів за типом сполучення струменя з низовою частиною потоку.
9. Формула витрати водозливу.
10. Формула витрати водозливу практичного профілю.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 СПОЛУЧЕННЯ Б'ЄФІВ

Тема 7 Сполучення б'єфів

Основні положення питання про сполучення б'єфів. Вирішення завдань про сполучення б'єфів. Гідравлічний стрибок. Сполучення глибини. Рівняння стрибкової функції. Формули сполучених глибин для прямокутних русел. Довжина стрибка. Форма стрибка. Гідравлічний стрибок як змішувач (гасник енергії).

Питання для самоперевірки

1. Від чого залежить характер сполучення потоку, який пройшов через гідротехнічну споруду, з потоком у нижньому б'єфі?
2. Яке рівняння використовується для рішення завдань про сполучення б'єфів?

3. Що таке гідравлічний стрибок?
4. Питома енергія гідравлічного стрибка.
5. Дайте визначення стрибкової функції.

Тема 8 Гідравлічний стрибок

Сполучення глибини. Рівняння стрибкової функції. Формули сполучених глибин для прямокутних русел. Визначення довжини стрибка, форми гідравлічного стрибка. Гідравлічний стрибок як змішувач і гасник енергії.

Питання для самоперевірки

1. Що таке гідравлічний стрибок та приклади його виникнення?
2. Як визначаються сполучені глибини гідравлічного стрибка та які існують види гідравлічного стрибка залежно від їх співвідношення?
3. Опишіть та поясніть рівняння приривкової функції та сфера її використання.
4. Які основні задачі ставляться при розрахунку гідравлічного стрибка, наведіть відповідні формули для русел прямокутного поперечного перерізу?
5. Формули для визначення довжини стрибка М.М. Павловського.
6. Дайте визначення досконалого гідравлічного стрибка.
7. Гідравлічний стрибок як змішувач і гаситель енергії.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3 РУХ ҐРУНТОВИХ ВОД

Тема 9 Види фільтрації. Основний закон фільтрації

Види фільтрації. Основний закон фільтрації. Коефіцієнт фільтрації. Приплив води до водозабірної галереї й до дренажних колодязів. Основи розрахунку дренажу.

Питання для самоперевірки

1. Види води в ґрунтах.
2. Що таке фільтрація вод?
3. Безнапірний і напірний рух ґрунтових вод.
4. Дайте визначення пористості ґрунту.
5. Закон Дарсі. Що таке коефіцієнт фільтрації?
6. Поняття про водозбірну галерею.

Завданням для контрольної роботи передбачається складання відповідей на запитання для самостійного вивчення, номери яких зазначені в цих методичних рекомендаціях.

| Номер теми | Номер варіанта | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------|----|---|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 6 | 12 | 9 | 7 | - | 11 | 13 | 1 | 2 | 3 | 4 | - | 8 | 10 | 5 |
| 3 | 5 | - | 9 | - | 8 | - | 10 | - | 11 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 4 | - | 4 | - | - | - | 3 | - | 1 | - | - | - | 2 | - | - | - |
| 5 | - | - | - | 4 | 1 | 2 | - | 5 | - | - | - | - | 6 | - | 3 |
| 6 | 6 | - | - | - | 7 | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 8 | 7 | 6 | 5 | 3 | 4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | 1 | 2 | 3 | 4 | - | - | 5 | - | - | - | 6 | - |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов Ю. М. Задачник з гідравліки: навч. посібник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : КНУБА, 2008. – 92 с.
2. Справочник по гидравлике / Под ред. В. А. Большакова. – 2-е изд. – Київ : Вища школа, 1984. – 343 с.
3. Большаков В. А. Гидравлика. Общий курс / В. А. Большаков, В. Н. Попов. – Київ : Вища школа. – 1989. – 215 с.
4. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький. – Львів : Світ, 1994. – 298 с.
5. Hydraulics. Hydraulics machines / [E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński and etc.]. – Lublin : Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.
6. Науменко І. І. Гідравліка / І. І. Науменко. – Рівне : Видавництво НУВГП, 2005. – 360 с.
7. Константинов Ю. М. Гідравліка / Ю. М. Константинов. – Київ : Вища школа, 1988. – 320 с.
8. Lewitt E. H. Hydraulics and Fluid Mechanics: A Text-book Covering the Syllabused of the B. Sc. (Eng.), I.C.E., and I. Mech. E. Examination / E. H. Lewitt // English Language Book Society and I. Pitman, 2000. – 752 p.
9. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. С. Шивотовский, П. П. Иванов. – М. : Стройиздат. – 1987. – 414 с.
10. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – М. : Стройиздат. – 1987. – 440 с.
11. Науменко І. І. Гідравліка. Підручник / І. І. Науменко – Рівне : НУВГП. – 2005. – 475 с.
12. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учеб. пособие для ВУЗов. В 2-х кн. / Д. В. Штеренлихт. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 351 с.
13. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький, Н. П. Ленін. – Львів : Світ, 1994. – 264 с.
14. Chanson H. Hydraulics of open channel flow / H. Chanson. – Elsevier, 2004. – 1102 p.
15. Bear J. Hydraulics of groundwater / J. Bear. – Courier Corporation, 2012.
16. Бровченко П. Н. Открытые русла: руководство к лабораторным работам / П. Н. Бровченко, С. Н. Редников. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2010. – 34 с.

ДОДАТОК А

Зразок оформлення титульного аркуша

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

Кафедра водопостачання, водовідведення і очищення вод

Розрахунково-графічне завдання

з дисципліни

«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»

Виконав:

здобувач гр. _____

Керівник:

канд. техн.наук, доц. Галкіна О. П.

або канд. техн.наук., доц. Шевченко Т. О.

Національна шкала _____

Кількість балів: _____

Харків – 20__

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Залежність густини води від температури

| Температура, °С | Густина, кг/м ³ | Температура, °С | Густина, кг/м ³ | Температура, °С | Густина, кг/м ³ |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| -10 | 998,15 | 7 | 999,93 | 25 | 997,07 |
| -9 | 998,43 | 8 | 999,88 | 26 | 996,81 |
| -8 | 998,69 | 10 | 999,73 | 27 | 996,52 |
| -7 | 998,92 | 11 | 999,63 | 28 | 996,22 |
| -6 | 999,12 | 12 | 999,52 | 29 | 995,92 |
| -5 | 999,30 | 13 | 999,40 | 30 | 995,61 |
| -4 | 999,45 | 14 | 999,27 | 31 | 995,21 |
| -3 | 999,58 | 15 | 999,13 | 32 | 994,79 |
| -2 | 999,70 | 16 | 998,97 | 33 | 994,36 |
| -1 | 999,79 | 17 | 998,80 | 34 | 993,94 |
| 0 | 999,87 | 18 | 998,62 | 35 | 993,50 |
| 1 | 999,93 | 19 | 998,43 | 40 | 991,18 |
| 2 | 999,97 | 20 | 998,23 | 50 | 988,04 |
| 3 | 999,99 | 21 | 998,02 | 60 | 983,18 |
| 4 | 1000,0 | 22 | 997,80 | 70 | 977,71 |
| 5 | 999,99 | 23 | 997,57 | 80 | 972,69 |
| 6 | 999,97 | 24 | 997,32 | 90 | 965,34 |

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Густина крапельних рідин ρ (за температури 20 °С)

| Рідина | Густина, ρ , кг/м ³ | Рідина | Густина, ρ , кг/м ³ |
|-------------------|--|--------------------|--|
| Анілін | 945 | Масло мінеральне | 877–892 |
| Бензол | 876–880 | Нафта | 760–900 |
| Бензин авіаційний | 739–780 | Ртуть | 13550 |
| Бітум рідкий | 1050 | Спирт етиловий | 790 |
| Вода прісна | 998,2 | Хлористий натрій | 1100 |
| Вода морська | 1002–1030 | (26 %-вий розчин) | |
| Масло касторове | 970 | Штукатурні розчини | 2000–2500 |
| Масло льняне | 930 | Ефір етиловий | 715–719 |

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 – Кінематична в'язкість деяких рідин (при температурі 20 °С)

| Рідина | $\nu \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ | Рідина | $\nu \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ |
|--|---|-------------------------------------|---|
| Бензин | 0,83–0,93 | Масло льняне | 55 |
| Вода прісна | 1,01 | Масло мінеральне | 313–1450 |
| Гліцерин безводний | 4,1 | Ртуть | 0,11 |
| Дизельне пальне | 5,0 | Нафта | 8,1–9,3 |
| Гас | 2–3 | Ртуть | 0,11 |
| Фарбові розчини (готові до використання) | 90–120 | Спирт етиловий безводний | 1,51 |
| Масло касторове | 1002 | Хлористий натрій (26% – вий розчин) | 1,53 |

ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1 – Кінематична в'язкість прісної води

| Температура, °С | Коефіцієнт кінематичної в'язкості, ν , $\text{см}^2/\text{с}$ | Температура, °С | Коефіцієнт кінематичної в'язкості, ν , $\text{см}^2/\text{с}$ |
|-----------------|---|-----------------|---|
| 0 | 0,0179 | 16 | 0,0112 |
| 1 | 0,0173 | 17 | 0,0109 |
| 2 | 0,0167 | 18 | 0,0106 |
| 3 | 0,0162 | 19 | 0,0104 |
| 4 | 0,0157 | 20 | 0,0101 |
| 5 | 0,0152 | 25 | 0,0090 |
| 6 | 0,0147 | 30 | 0,0081 |
| 7 | 0,0143 | 35 | 0,0072 |
| 8 | 0,0139 | 40 | 0,0066 |
| 9 | 0,0135 | 45 | 0,0060 |
| 10 | 0,0131 | 50 | 0,0055 |
| 11 | 0,0128 | 60 | 0,0047 |
| 12 | 0,0124 | 70 | 0,0040 |
| 13 | 0,0120 | 80 | 0,0037 |
| 14 | 0,0117 | 90 | 0,0033 |
| 15 | 0,0114 | 100 | 0,0029 |

ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1 – Значення коефіцієнта шорсткості природних русел

| Характеристика водотоку | Значення коефіцієнту шорсткості природних русел та заплав за М. Ф. Срібним |
|---|--|
| 1 | 2 |
| Природні русла в дуже сприятливих умовах (чисте, пряме, незасмічене, земляне з вільною течією) | 0,025 |
| Проміжне значення між попередньою, та наступною категоріями, що часто застосовується в практиці; галькові та гравійні русла при словесній характеристиці їх, що співпадає з попередньою категорією | 0,0285 |
| Русла постійних водотоків рівнинного типу (переважно великих та середніх річок) у сприятливих умовах стану ложа та течії води | 0,030 |
| Періодичні потоки (великі та малі при дуже хорошому стані поверхні та форми ложа) | 0,033 |
| Порівняно чисті русла постійних рівнинних водотоків у звичайних умовах, звивисті, з деякими неправильностями в напрямку струменів або прямі, але з неправильностями в рельєфі дна (мілини, промоїни, місцями каміння) | 0,040 |
| Правильні добре розроблені галькові русла гірських річок (у нижній течії). Земляні русла періодичних водотоків (сухих логів) у сприятливих умовах | 0,040 |
| Русла великих та середніх річок значно засмічені, звивисті та частково зарослі, кам'яністі з неспокійною течією | 0,050 |
| Періодичні (зливові та весняні) водотоки, що несуть під час паводку значну кількість наносів, з великогальковим або покритим рослинністю ложем | 0,050 |
| Заплави великих і середніх річок, покриті нормальною кількістю рослинності (трави, чагарники) | 0,050 |
| Русла періодичних водотоків сильно засмічені та звивисті. Порівняно зарослі, нерівні, погано розроблені заплави річок (промоїни, чагарники, дерева, з наявністю заплав) | 0,067 |
| Порожисті ділянки рівнинних рік. Гальково-валунні русла гірського типу з неправильною поверхнею водного дзеркала | 0,067 |
| Річки та заплави значно зарослі (зі слабкою течією), з великими глибокими промоїнами | 0,080 |
| Валунні русла гірського типу з бурхливим пінистим плином, з поритою поверхнею водного дзеркала (з бризками, що летять вгору) | 0,080 |
| Заплави такі ж, але з сильно неправильною косоструйною течією, заводами та ін. | 0,100 |
| Русла гірничо-водопадного типу з крупновалунною звивистою будовою ложа, перепади яскраво виражені, пінистість настільки сильна, що вода, втративши прозорість, має білий колір, шум потоку домінує над іншими звуками | 0,100 |

Продовження таблиці Е.1

| 1 | 2 |
|---|-------|
| Характеристика гірських річок приблизно та сама, що й попередньої категорії. Річки болотного типу (зарості, купини, у багатьох місцях майже стояча вода та ін.) | 0,133 |
| Глухі заплави, лісові, тайгового типу. Схили басейнів у природному стані | 0,200 |
| Потоки, типу селевих, що складаються з бруду, каміння та ін. | 0,200 |

Таблиця Е.2 – Значення коефіцієнта шорсткості за формулами М.М. Павловського та Манінга

| Характеристика поверхні | <i>n</i> | <i>l/n</i> |
|--|----------|------------|
| Найкраще цементне мурування; обшукані дошки; дерев'яні труби великого діаметру (з клепок) | 0,011 | 90 |
| Сталеві труби великого діаметру з поздовжнім звареним швом; дуже хороше бетонування; бетонні та залізобетонні труби, зібрані з довгих ланок з вирівняною внутрішньою поверхнею; неостругані дошки, добре просочені | 0,012 | 83,3 |
| Зварні труби з поперечним клепаним швом; нові чавунні труби; кладка з цегли, покритої глазур'ю | 0,013 | 76,9 |
| Чавунні труби, що були в експлуатації; бетонні монолітні труби, виконані у дерев'яних формах; бетонування каналів у середніх умовах | 0,014 | 71,4 |
| Кладка з цегли з добре замуrowаними швами: облицювання з тесаного каменю в середніх умовах | 0,015 | 66,7 |
| Зварні труби внахлестку в поздовжньому напрямку, з'єднані чотирма рядами заклепок у поперечному напрямку; клепані труби із внутрішніми накладками; бетонні труби, зібрані з коротких ланок | 0,016 | 62,5 |
| Глинисті ґрунти; канали в доли, щільному гравію, щільній землі, затягнуті плівкою (у нормальному стані) | 0,02 | 50 |
| Канали та тунелі, чисто висічені в скелі (без помітних виступів); гравілістий пісок, великі земляні канали в середніх умовах утримання та ремонту та малі – у хороших; бруківка (без розчину); річки в дуже сприятливих умовах (чисте, пряме у плані, досконале, незасмічене земляне русло з вільною течією) | 0,025 | 40 |
| Русла постійних водотоків рівнинного типу переважно великих та середніх річок у сприятливих умовах стану ложа та течії води; земляні канали в поганих умовах (наприклад, по дну); канали та тунелі, висічені | 0,030 | 33,3 |
| Русла постійних рівнинних річок у звичайних умовах, звивисті (мілини промоїни, місцями каміння); правильно, добре розроблене галькове русло гірських річок у нижній течії; канали та тунелі, висічені в скелі з грубими виступами; русла, значно засмічені, звивисті, і частково зарослі, кам'яністі, з неспокійною течією | 0,04 | 25 |

Таблиця Е.3 – Значення коефіцієнтів шорсткості русел *n*

| Характеристика покриття | <i>n</i> |
|---|----------|
| 1 | 2 |
| Чисті (нові) гончарні, чавунні та залізні труби, добре укладені та з'єднані; добре стругані дошки | 0,011 |
| Нестругані, добре пригнані дошки, водопровідні труби у нормальних умовах; чисті водосточні труби; гарне бетонування | 0,012 |

Продовження таблиці Е.3

| 1 | 2 |
|---|--------|
| Добра цегляна кладка, водосточні труби у нормальних умовах, трохи забруднені водопровідні труби | 0,013 |
| Забруднені водопровідні та водосточні труби; бетонування каналів в середніх умовах | 0,014 |
| Цегляна кладка й облицьовка з тесаного каменя в середніх умовах, значно забруднені водостоки | 0,015 |
| Добра бутова кладка; стара цегляна кладка; порівняно грубе бетонування; виключно гладка, добре оброблена скеля | 0,017 |
| Канали, покриті товстим стійким муловим шаром; ґрунти пропитані бітумом | 0,018 |
| Середня, задовільна бутова кладка; бруківка; канали, висічені у скелі; канали, затягнуті муловою плівкою у нормальному стані | 0,020 |
| Канали у щільній глині; канали, затягнуті місцями переривчастою муловою плівкою; великі земляні канали в умовах утримання і ремонту вище середніх | 0,0225 |
| Гарна суха кладка; великі земляні канали в середніх умовах утримання; фашинні тюфяки | 0,025 |
| Великі земляні канали в умовах утримання і ремонту, одернування в стіну | 0,0275 |
| Канали у дуже складних умовах, з неправильним профілем, забруднені камінням і водоростями | 0,030 |
| Земляні канали у порівняно поганих умовах, які заросли травою, з місцевими обвалами відкосів, місцями з водоростями, булижниками і гравієм на дні | 0,030 |

Таблиця Е.4 – Значення коефіцієнта шорсткості

| Характеристика поверхні | k_e , мм | n |
|---|-----------------|--------------|
| Виключно гладкі поверхні (емальовані, глазуровані тощо) | 0 (0–0,02) | 0–0,007 |
| Озалізоване цементне мурування або дуже чисто заглажене | 0,1 (0,002–0,3) | 0,007–0,010 |
| Звичайне цементне мурування | 0,3 (0,1–0,8) | 0,0085–0,012 |
| Металеві лотки з гладкою внутрішньою поверхнею | 1,0 (0,4–5) | 0,011–0,017 |
| Бетонні та залізобетонні каналізаційні труби | 2 | 0,014 |
| Керамічні каналізаційні труби | 1,25 | 0,013 |
| Дерев'яні лотки зі струганих дошок | 2 (0,5–8) | 0,01–0,018 |
| Дерев'яні лотки з неструганих дошок | 3 (0,8–10) | 0,012–0,019 |
| Бетонування | 2 (0,3–5) | 0,012–0,015 |
| Цегляна кладка | 3 (1–6) | 0,013–0,017 |
| Земляні стіни | 50 (15–200) | 0,02–0,03 |
| Бутова кладка | 20 (5–70) | 0,017–0,025 |
| Бруківка (булижна мостова) | 35 (15–70) | 0,020–0,025 |

ДОДАТОК Ж

Таблиця Ж.1 – Значення допустимих нерозмиваючих середніх в перерізі швидкостей течії води $V_{дон}$, м/с

| Найменування ґрунтів або тип укріплення | Глибина потоку h, м | | | |
|--|---------------------|------|-----|-----|
| | 0,4 | 1,0 | 2,0 | 3,0 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Пісок, 0,25–1,00 мм | 0,4 | 0,25 | 0,6 | 0,7 |
| Гравій, 5–10 мм | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 1,2 |
| Галька, 25–40 мм | 1,3 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| Булижник, 100–150 мм | 2,8 | 3,0 | 3,5 | 3,8 |
| Льосовидні ґрунти (щільні) | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,3 |
| Конгломерат, мергель, сланці | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| Пористий вапняк, вапняковий піщаник | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| Доломитовий піщаник, щільний вапняк, мрамор | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 6,5 |
| Граніти, базальти, кварцити | 15 | 18 | 20 | 22 |
| Одернування плашмя на малозв'язаній основі | 1,7 | 2,0 | 2,3 | 2,5 |
| Одернування плашмя на зв'язаній основі | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 2,7 |
| Одернування в стінку | 2,2 | 2,5 | 2,8 | 3,2 |
| Ґрунти, стабілізовані бітумом | 2,3 | 2,7 | 3,0 | 3,3 |
| Фашинні тюфяки | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,8 |
| Мощення на мохові (шар моху не менше 5 мм): | | | | |
| – з булижнику розміром 5 см; | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| – те саме розміром 20 см; | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
| – те саме розміром 25 см | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| Мощення плашмя на шарі глини 10–15 см та соломі або мохові: | | | | |
| – каменем розміром 13–14 см; | 2,3 | 2,9 | 3,4 | 3,8 |
| – те саме розміром 14–16 см; | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
| – те саме розміром 16–18 см | 2,8 | 3,3 | 3,8 | 4,3 |
| Мощення на щебені (шар щебеню не менше 10 см): | | | | |
| – з рваного каменю розміром 15 см; | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
| – те саме розміром 20 см; | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| – те саме розміром 25 см | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Мощення з підбором облицювання та грубим приколом на щебені (шар щебеню не менше 10 см): | | | | |
| – каменем розміром 20 см; | 3,5 | 4,5 | 5,0 | 5,5 |
| – те саме розміром 25 см; | 4,0 | 4,5 | 5,5 | 5,5 |
| – те саме розміром 30 см | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 6,0 |

Продовження таблиці Ж.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-----|-----|-----|------|
| Кладка зі звичайної цегли на цементному розчині | 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,4 |
| Бутова кладка з середніх пород | 5,5 | 6,6 | 7,7 | 8,3 |
| Кладка з клинкеру | 6,6 | 7,7 | 8,8 | 10,0 |
| Мурування з бетону та залізобетону | 6,6 | 8,0 | 9,2 | 10,0 |
| Бетонні монолітні лотки з гладкою поверхнею | 13 | 16 | 19 | 20 |
| Дерев'яні лотки разі надійного підґрунтя та течіх вздовж волокон | 10 | 12 | 14 | 16 |

Примітка 1. Для проміжних значень глибини ведичина допустимої швидкості не інтерполюється і визначається за найближчим значенням глибини.

Примітка 2. Якщо на початковій стадії розрахунку глибина потоку невідома, то для попередніх підрахунків приймається значення $V_{дон}$, м/с, яке відповідає глибині 0,4 м.

Примітка 3. Якщо глибина потоку понад 3 м, то початково для розрахунків приймається значення $V_{дон}$, м/с, що відповідає глибині 3 м, яке потім уточнюється під час подальших розрахунків.

ДОДАТОК И

Таблиця И.1 – Значення множника a залежно від середнього діаметра часток

| d_{cp} , мм | a , м ^{1/2} /с | d_{cp} , мм | a , м ^{1/2} /с | d_{cp} , мм | a , м ^{1/2} /с |
|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
| 0,1 | 0,22 | 0,8 | 0,90 | 1,6 | 1,05 |
| 0,2 | 0,45 | 1,0 | 0,95 | 1,8 | 1,07 |
| 0,4 | 0,67 | 1,2 | 1,00 | 2,0 | 1,10 |
| 0,6 | 0,82 | 1,4 | 1,02 | 3,0 | 1,11 |

ДОДАТОК К

Таблиця К.1 – Припустимі незамулюючі середні швидкості V_{min} в м/с за даними В. Н. Гончарова

| Наноси | Діаметр часток, мм | Глибина течії | | |
|----------------|--------------------|---------------|------|------|
| | | 1,0 | 2,0 | 3,0 |
| Дуже мілкі | 0,2–0,3 | 0,34 | 0,44 | 0,51 |
| Мілкі | 0,3–0,4 | 0,43 | 0,57 | 0,66 |
| Середньопіщані | 0,4–0,5 | 0,60 | 0,78 | 0,92 |
| Крупнопіщані | 0,5–1,0 | 0,87 | 1,13 | 1,32 |

ДОДАТОК Л

Таблиця Л.1 – Залежність коефіцієнта A від гідравлічної крупності наносів

| Гідравлічна крупність мм/с | A |
|----------------------------|------|
| Менше 1,5 | 0,33 |
| Від 1,5 до 2,5 | 0,44 |
| Більше 2,5 | 0,55 |

ДОДАТОК М

Таблиця М.1 – Залежність коефіцієнта ε від характеру поверхні

| Характеристика поверхні | ε , мм* |
|--|---------------------|
| Виключно гладкі поверхні (емальовані, глазуровані тощо) | 0 (0–0,01) |
| Чиста цементна штукатурка | 0,04 (0,02–0,06) |
| Металеві лотки з гладкою внутрішньою поверхнею | 0,10 (0,02–1) |
| Дерев'яні лотки зі струганих дошок | 0,30 (0,05–1,5) |
| Дерев'яні лотки з неструганих дошок | 0,50 (0,08–2,0) |
| Бетоніровка | 0,30 (0,05–1,5) |
| Цегляна кладка | 0,50 (0,08–1,25) |
| Тесаний камінь | 0,50 (0,12–1,25) |
| Земляні стіни | 5,00 (1–50) |
| Бутова кладка | 10,00 (0,5–20) |
| Бруківка (булижна мостова) | 20,00 (15–30) |
| Канали, висічені в скелі | 30,00 (3–80) |
| *Наведені найбільш вірогідні значення ε для середніх умов, у дужках – можливі коливання. | |

ДОДАТОК Н

Таблиця Н.1 – Швидкісні характеристики W , м/с, при різних значеннях коефіцієнта шорсткості

| R, м | Коефіцієнт шорсткості n | | | | | | | | | | | | | | R, м |
|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|--------|------|-------|------|------|
| | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,017 | 0,018 | 0,02 | 0,0225 | 0,025 | 0,0275 | 0,03 | 0,035 | 0,04 | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 0,10 | 21,3 | 19,0 | 17,2 | 15,6 | 14,2 | 12,0 | 11,2 | 9,67 | 8,22 | 7,09 | 6,19 | 5,46 | 4,35 | 3,56 | 0,10 |
| 0,12 | 23,9 | 21,4 | 19,3 | 17,6 | 16,1 | 13,7 | 12,7 | 11,0 | 9,41 | 8,15 | 7,14 | 6,32 | 5,07 | 4,18 | 0,12 |
| 0,14 | 26,3 | 23,6 | 21,4 | 19,5 | 17,9 | 15,2 | 14,1 | 12,3 | 10,6 | 9,17 | 8,06 | 7,16 | 5,77 | 4,78 | 0,14 |
| 0,16 | 28,6 | 25,7 | 23,3 | 21,3 | 19,5 | 16,7 | 15,5 | 13,6 | 11,7 | 10,2 | 8,95 | 7,97 | 6,45 | 5,36 | 0,16 |
| 0,18 | 30,8 | 27,8 | 25,5 | 23,0 | 21,2 | 18,1 | 16,9 | 14,8 | 12,7 | 11,1 | 9,81 | 8,75 | 7,12 | 5,94 | 0,18 |
| 0,20 | 33,0 | 29,7 | 27,0 | 24,7 | 22,7 | 19,5 | 18,2 | 16,0 | 13,8 | 12,0 | 10,7 | 9,52 | 7,78 | 6,50 | 0,20 |
| 0,22 | 35,0 | 31,6 | 28,7 | 26,3 | 24,2 | 20,8 | 19,4 | 17,1 | 14,8 | 12,9 | 11,5 | 10,3 | 8,42 | 7,06 | 0,22 |
| 0,24 | 37,0 | 33,4 | 30,4 | 27,5 | 25,7 | 22,1 | 20,7 | 18,2 | 15,8 | 13,8 | 12,3 | 11,0 | 9,05 | 7,61 | 0,24 |
| 0,26 | 38,9 | 35,2 | 32,1 | 29,4 | 27,1 | 23,4 | 21,9 | 19,3 | 16,7 | 14,7 | 13,1 | 11,7 | 9,67 | 8,15 | 0,26 |
| 0,28 | 40,8 | 36,9 | 33,7 | 30,9 | 28,5 | 24,6 | 23,0 | 20,3 | 17,7 | 15,6 | 13,8 | 12,4 | 10,3 | 8,69 | 0,28 |
| 0,30 | 42,6 | 38,6 | 35,2 | 32,3 | 29,9 | 25,8 | 24,2 | 21,4 | 18,6 | 16,4 | 14,6 | 13,1 | 10,9 | 9,22 | 0,30 |
| 0,32 | 43,5 | 39,4 | 36,0 | 33,1 | 30,5 | 26,4 | 24,7 | 21,9 | 19,0 | 16,8 | 15,0 | 13,5 | 11,2 | 9,48 | 0,32 |
| 0,34 | 46,1 | 41,8 | 38,2 | 35,1 | 32,5 | 28,1 | 26,4 | 23,4 | 20,4 | 18,0 | 16,1 | 14,5 | 12,1 | 10,3 | 0,34 |
| 0,36 | 47,8 | 43,4 | 39,6 | 36,5 | 33,8 | 29,3 | 27,5 | 24,3 | 21,2 | 18,8 | 16,8 | 15,2 | 12,6 | 10,8 | 0,36 |
| 0,38 | 49,4 | 44,9 | 41,1 | 37,8 | 35,0 | 30,4 | 28,5 | 25,3 | 22,1 | 19,6 | 17,5 | 15,8 | 13,2 | 11,3 | 0,38 |
| 0,40 | 51,1 | 46,4 | 42,5 | 39,1 | 36,2 | 31,5 | 29,5 | 26,2 | 22,9 | 20,3 | 18,2 | 16,5 | 13,8 | 11,8 | 0,40 |
| 0,45 | 55,0 | 50,0 | 45,9 | 42,3 | 39,2 | 34,1 | 32,1 | 28,5 | 25,0 | 22,2 | 20,0 | 18,1 | 15,2 | 13,0 | 0,45 |
| 0,50 | 58,8 | 53,5 | 49,1 | 45,3 | 42,1 | 36,7 | 34,5 | 30,7 | 27,0 | 24,0 | 21,6 | 19,6 | 16,5 | 14,3 | 0,50 |
| 0,55 | 62,4 | 58,9 | 52,2 | 48,3 | 44,8 | 39,2 | 36,9 | 32,9 | 28,9 | 25,8 | 23,2 | 21,1 | 17,8 | 15,4 | 0,55 |
| 0,60 | 65,9 | 60,2 | 55,3 | 51,1 | 47,5 | 41,6 | 39,1 | 35,0 | 30,8 | 27,5 | 24,8 | 22,6 | 19,1 | 16,5 | 0,60 |
| 0,65 | 69,3 | 63,3 | 58,2 | 53,9 | 50,1 | 43,9 | 41,4 | 37,0 | 32,7 | 29,2 | 26,4 | 24,0 | 20,4 | 17,6 | 0,65 |
| 0,70 | 72,6 | 66,4 | 61,1 | 56,6 | 52,6 | 46,2 | 43,5 | 39,0 | 34,5 | 30,8 | 27,9 | 25,4 | 21,6 | 18,7 | 0,70 |
| 0,75 | 75,8 | 69,4 | 63,9 | 59,2 | 55,1 | 48,4 | 45,0 | 40,9 | 36,2 | 32,4 | 29,4 | 26,8 | 22,8 | 19,8 | 0,75 |
| 0,80 | 79,0 | 72,3 | 66,6 | 61,7 | 57,5 | 50,6 | 47,7 | 42,8 | 37,9 | 34,8 | 30,8 | 28,2 | 24,0 | 20,9 | 0,80 |
| 0,85 | 82,1 | 75,1 | 69,3 | 64,2 | 59,9 | 52,7 | 49,7 | 44,7 | 39,6 | 35,6 | 32,2 | 29,5 | 25,2 | 21,9 | 0,85 |
| 0,90 | 85,1 | 77,9 | 71,9 | 66,7 | 62,2 | 54,8 | 51,7 | 46,5 | 41,2 | 37,1 | 33,6 | 30,8 | 26,3 | 23,0 | 0,90 |
| 0,95 | 88,0 | 80,6 | 74,4 | 69,1 | 64,4 | 56,8 | 53,7 | 48,3 | 42,9 | 38,5 | 35,0 | 32,1 | 27,5 | 24,0 | 0,95 |
| 1,0 | 90,9 | 83,3 | 76,9 | 71,4 | 66,7 | 58,8 | 55,6 | 50,0 | 44,4 | 40,0 | 36,4 | 33,3 | 28,6 | 25,0 | 1,0 |

Продовження таблиці Н.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1,1 | 96,5 | 88,5 | 81,8 | 76,0 | 71,0 | 62,7 | 59,3 | 53,4 | 47,5 | 42,8 | 39,0 | 35,8 | 30,7 | 27,0 | 1,1 |
| 1,2 | 102 | 93,6 | 86,5 | 80,4 | 75,2 | 66,5 | 62,9 | 56,7 | 50,5 | 45,6 | 41,5 | 38,2 | 32,9 | 28,9 | 1,2 |
| 1,3 | 107 | 98,5 | 91,1 | 84,7 | 79,2 | 70,1 | 66,3 | 59,9 | 53,4 | 48,3 | 44,0 | 40,5 | 34,9 | 30,7 | 1,3 |
| 1,4 | 112 | 103 | 95,5 | 88,9 | 83,1 | 43,7 | 69,7 | 60,3 | 56,3 | 50,9 | 46,4 | 42,7 | 36,9 | 32,5 | 1,4 |
| 1,5 | 117 | 108 | 99,8 | 92,9 | 87,0 | 77,1 | 73,0 | 66,0 | 59,0 | 53,4 | 48,8 | 44,9 | 38,8 | 34,3 | 1,5 |
| 1,6 | 122 | 112 | 104 | 96,9 | 90,7 | 80,5 | 76,2 | 69,0 | 61,7 | 55,9 | 51,1 | 47,1 | 40,7 | 36,0 | 1,6 |
| 1,7 | 127 | 117 | 108 | 101 | 94,3 | 83,5 | 79,4 | 71,8 | 64,3 | 58,3 | 53,3 | 49,1 | 42,6 | 37,7 | 1,7 |
| 1,8 | 131 | 121 | 112 | 105 | 97,9 | 87,0 | 82,4 | 74,6 | 66,9 | 60,6 | 55,5 | 51,2 | 44,4 | 39,3 | 1,8 |
| 1,9 | 136 | 125 | 116 | 108 | 101 | 90,1 | 85,4 | 77,4 | 69,3 | 62,9 | 57,6 | 53,2 | 46,2 | 40,9 | 1,9 |
| 2,0 | 140 | 129 | 120 | 112 | 105 | 93,2 | 88,4 | 80,1 | 71,8 | 65,1 | 59,7 | 55,1 | 47,9 | 42,5 | 2,0 |
| 2,2 | 149 | 137 | 127 | 119 | 111 | 99,1 | 94,0 | 85,3 | 76,5 | 69,5 | 63,7 | 58,9 | 51,2 | 45,5 | 2,2 |
| 2,4 | 157 | 145 | 135 | 126 | 118 | 105 | 99,5 | 90,3 | 81,1 | 73,7 | 67,6 | 62,5 | 54,4 | 48,4 | 2,4 |
| 2,6 | 165 | 152 | 142 | 132 | 124 | 110 | 105 | 95,2 | 85,5 | 77,7 | 71,3 | 66,0 | 57,5 | 51,1 | 2,6 |
| 2,8 | 173 | 160 | 148 | 138 | 130 | 116 | 110 | 99,8 | 89,7 | 81,6 | 74,9 | 69,3 | 60,5 | 53,8 | 2,8 |
| 3,0 | 181 | 167 | 155 | 145 | 136 | 121 | 115 | 104 | 93,8 | 85,3 | 78,4 | 72,5 | 63,3 | 56,4 | 3,0 |

ДОДАТОК П

Таблиця П.1 – Значення коефіцієнта Шезі за формулою Павловського

| Гідравлічний радіус R, м | Коефіцієнт Шезі C , м ^{1/2} /с при коефіцієнті шорсткості n | | | | | | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,011 | 0,013 | 0,017 | 0,020 | 0,025 | 0,030 | 0,035 | 0,040 |
| 0,05 | 61,3 | 48,7 | 33,2 | 26,1 | 18,6 | 13,9 | 10,9 | 8,7 |
| 0,06 | 62,8 | 50,1 | 34,4 | 27,2 | 19,5 | 14,7 | 11,5 | 9,3 |
| 0,07 | 64,1 | 51,3 | 35,5 | 28,2 | 20,4 | 15,5 | 12,2 | 9,9 |
| 0,08 | 65,2 | 52,4 | 36,4 | 29 | 21,1 | 16,1 | 12,8 | 10,3 |
| 0,1 | 67,2 | 54,3 | 38,1 | 30,6 | 22,4 | 17,3 | 13,8 | 11,2 |
| 0,12 | 68,8 | 55,8 | 39,5 | 32,6 | 23,5 | 18,3 | 14,7 | 12,1 |
| 0,14 | 70,3 | 57,2 | 40,7 | 33 | 24,5 | 19,1 | 15,4 | 12,8 |
| 0,16 | 71,5 | 58,4 | 41,8 | 34 | 25,4 | 19,9 | 16,1 | 13,4 |
| 0,18 | 72,6 | 59,5 | 42,7 | 34,8 | 26,2 | 20,6 | 16,8 | 14 |
| 0,20 | 73,7 | 60,4 | 43,6 | 35,7 | 26,9 | 21,3 | 17,4 | 14,5 |
| 0,22 | 74,6 | 61,3 | 44,4 | 36,4 | 27,6 | 21,9 | 17,9 | 15 |
| 0,24 | 75,5 | 62,1 | 45,2 | 37,1 | 28,3 | 22,5 | 18,5 | 15,5 |
| 0,26 | 76,3 | 62,9 | 45,9 | 37,8 | 28,8 | 23 | 18,9 | 16 |
| 0,28 | 77 | 63,6 | 46,5 | 38,4 | 29,4 | 23,5 | 19,4 | 16,4 |
| 0,30 | 77 | 64,3 | 47,2 | 39 | 29,9 | 24 | 19,9 | 16,8 |
| 0,35 | 79,3 | 65,8 | 48,6 | 40,3 | 31,1 | 25,1 | 20,9 | 17,8 |
| 0,40 | 80,8 | 67,1 | 49,8 | 41,5 | 32,2 | 26 | 21,8 | 18,6 |
| 0,45 | 82 | 68,4 | 50,9 | 42,5 | 33,1 | 26,9 | 22,6 | 19,4 |
| 0,50 | 83,1 | 69,5 | 51,9 | 43,5 | 34 | 27,8 | 23,4 | 20,1 |
| 0,55 | 84,1 | 70,4 | 52,8 | 44,4 | 34,8 | 28,5 | 24 | 20,7 |
| 0,60 | 85,3 | 71,4 | 54,2 | 45,5 | 35,5 | 29,2 | 24,7 | 21,3 |
| 0,65 | 86 | 72,2 | 54,5 | 45,9 | 36,2 | 29,8 | 25,3 | 21,9 |
| 0,7 | 86,8 | 73 | 55,2 | 46,6 | 36,9 | 30,4 | 25,8 | 22,4 |
| 0,8 | 88,3 | 74,5 | 56,5 | 47,9 | 38 | 31,5 | 26,8 | 23,4 |
| 0,9 | 89,4 | 75,5 | 57,5 | 48,8 | 38,9 | 32,3 | 27,6 | 24,1 |
| 1,0 | 90,9 | 76,9 | 58,8 | 50 | 40 | 33,3 | 28,6 | 25 |
| 1,1 | 92 | 78 | 59,8 | 50,9 | 40,9 | 34,1 | 29,3 | 25,7 |
| 1,2 | 93,1 | 79 | 60,7 | 51,8 | 41,6 | 34,8 | 30 | 26,3 |
| 1,3 | 94 | 79,9 | 61,5 | 52,5 | 42,3 | 35,5 | 30,6 | 26,9 |
| 1,5 | 95,7 | 81,5 | 62,9 | 53,9 | 43,6 | 36,7 | 31,7 | 28 |
| 1,7 | 97,3 | 82,9 | 64,3 | 55,1 | 44,7 | 37,7 | 32,7 | 28,9 |
| 2,0 | 99,3 | 84,8 | 65,9 | 56,6 | 46 | 38,9 | 33,8 | 30 |
| 2,5 | 102,1 | 87,3 | 68,1 | 58,7 | 47,9 | 40,6 | 35,4 | 31,5 |
| 3,0 | 104,4 | 89,4 | 69,8 | 60,3 | 49,3 | 41,9 | 36,6 | 32,5 |
| 3,5 | 106,4 | 91,1 | 71,3 | 61,5 | 50,3 | 42,8 | 37,4 | 33,3 |
| 4,0 | 108,1 | 92,6 | 72,5 | 62,5 | 51,2 | 43,6 | 38,1 | 33,9 |
| 5,0 | 111 | 95,1 | 74,2 | 64,1 | 52,4 | 44,6 | 38,9 | 34,6 |

Таблиця П.2 – Коефіцієнти Шезі обчислені за формулою (3.12)

| ε, мм | Гідрравлічний радіус R, м | Нахил <i>i</i> | | | | | | |
|-------|------------------------------|----------------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | | 0,000025 | 0,00005 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,001 | 0,01 |
| 0 | 50 | 53 | 56 | 59 | 62 | 65 | 69 | 79 |
| | 100 | 62 | 65 | 68 | 71 | 74 | 78 | 88 |
| | 200 | 71 | 74 | 77 | 78 | 83 | 87 | 97 |
| | 300 | 76,2 | 79,3 | 82 | 85,2 | 88 | 92,1 | 102,2 |
| | 500 | 83 | 86 | 89 | 92 | 95,1 | 99 | 109 |
| | 1 000 | 92 | 95,6 | 98 | 101 | 104 | 108 | 118 |
| | 2 000 | 101 | 104 | 107 | 110 | 113 | 117 | 127 |
| | 3 000 | 106,3 | 109 | 112 | 115,3 | 118,2 | 122 | 132,6 |
| | 5 000 | 113 | 116 | 118,8 | 122 | 125 | 129 | 138,4 |
| | 15 000 | 127 | 130 | 133,2 | 136,3 | 139,4 | 143,5 | 154 |
| 0,04 | 50 | 50,3 | 52,4 | 54,2 | 56 | 57,2 | 58,7 | 60,8 |
| | 100 | 58,5 | 60,3 | 62 | 63,4 | 64,4 | 65,5 | 67,1 |
| | 200 | 66,3 | 68 | 69,4 | 70,5 | 71,4 | 72,2 | 73,4 |
| | 300 | 70,8 | 72,3 | 73,6 | 74,6 | 75,2 | 76 | 77 |
| | 500 | 76,4 | 77,7 | 78,8 | 79,6 | 80,2 | 80,9 | 81,5 |
| | 1 000 | 83,7 | 84,6 | 85,6 | 86,1 | 86,6 | 87,2 | 87,7 |
| | 2 000 | 90,9 | 91,8 | 92,1 | 92,6 | 93 | 93,4 | 93,8 |
| | 3 000 | 94,9 | 95,6 | 96 | 96,5 | 96,8 | 97 | 97,4 |
| | 5 000 | 99,8 | 100 | 100,9 | 101,2 | 101,4 | 101,5 | 101,8 |
| | 15 000 | 110,2 | 110,6 | 110,8 | 111 | 111,2 | 111,3 | 111,4 |
| 0,10 | 50 | 47,4 | 48,9 | 50,1 | 51 | 51,8 | 52,6 | 53,5 |
| | 100 | 55 | 56,1 | 57,1 | 57,8 | 58,4 | 59 | 59,6 |
| | 200 | 60,2 | 63 | 63,8 | 64,5 | 64,8 | 65,4 | 65,8 |
| | 300 | 66,3 | 67 | 67,8 | 68,2 | 68,5 | 69 | 69,4 |
| | 500 | 71,3 | 72 | 72,6 | 73 | 73,2 | 73,4 | 73,8 |
| | 1 000 | 78 | 78,6 | 79 | 79,2 | 79,4 | 79,6 | 79,8 |
| | 2 000 | 84 | 85 | 85,4 | 85,5 | 85,6 | 85,8 | 86 |
| | 3 000 | 88,4 | 88,6 | 89 | 89 | 89,3 | 89,4 | 89,5 |
| | 5 000 | 93 | 93,1 | 93,5 | 93,7 | 93,8 | 93,8 | 94 |
| | 15 000 | 103 | 103 | 103,2 | 103,3 | 103,4 | 103,4 | 103,5 |
| 0,30 | 50 | 41,6 | 42,4 | 42,9 | 43,4 | 43,6 | 43,9 | 44,2 |
| | 100 | 48,4 | 49 | 49,4 | 49,6 | 50 | 50,1 | 50,4 |
| | 200 | 55 | 55,4 | 55,7 | 56 | 56,1 | 56,2 | 56,4 |
| | 300 | 58,8 | 59,1 | 59,2 | 59,6 | 59,6 | 59,8 | 60 |
| | 500 | 63,4 | 63,8 | 63,8 | 64,1 | 64,2 | 64,2 | 64,3 |
| | 1 000 | 69,9 | 70 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,4 |
| | 2 000 | 76 | 76,1 | 76,3 | 76,3 | 76,4 | 76,4 | 76,4 |
| | 3 000 | 79,6 | 79,7 | 79,8 | 79,8 | 80 | 80 | 80 |
| | 5 000 | 84,1 | 84,2 | 84,3 | 84,4 | 84,4 | 84,4 | 84,4 |
| | 15 000 | 93,9 | 93,9 | 93,9 | 94 | 94 | 94 | 94 |

Таблиця П.3 – Значення коефіцієнта Шезі за формулою: $C = 25 \left(\frac{R}{K_{\vartheta} + 0,025 / \sqrt{Ri}} \right)^{1/6}$

| к _с , мм | Гідравлічний радіус R, м | Нахил <i>i</i> | | | | | | |
|------------------------|-----------------------------|----------------|---------|--------|--------|--------|-------|------|
| | | 0,000025 | 0,00005 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,001 | 0,01 |
| 0,3 | 50 | 48,3 | 50,2 | 52 | 53,8 | 55,1 | 56,6 | 59,4 |
| | 100 | 56,5 | 58,5 | 60,2 | 61,8 | 63 | 64,4 | 66,4 |
| | 200 | 65,5 | 67,6 | 69,4 | 70,9 | 72,1 | 73,2 | 74,8 |
| | 300 | 71,4 | 73,5 | 75,2 | 76,5 | 77,6 | 78,7 | 79,4 |
| | 500 | 79,3 | 81,3 | 83 | 84,1 | 85 | 86 | 86,8 |
| | 1 000 | 91,4 | 93,1 | 94,5 | 95,8 | 96,5 | 97,4 | 98,4 |
| | 2 000 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 110 |
| | 3 000 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 118 |
| | 5 000 | 124 | 126 | 127 | 127 | 128 | 128 | 129 |
| 1 | 50 | 42,8 | 43,5 | 44,3 | 44,7 | 45,2 | 45,5 | 46 |
| | 100 | 49 | 49,7 | 50,3 | 50,6 | 50,9 | 51,2 | 51,6 |
| | 200 | 55,8 | 56,3 | 56,7 | 57,1 | 57,4 | 57,7 | 58 |
| | 300 | 60 | 60,7 | 61,1 | 61,4 | 61,6 | 61,8 | 62,1 |
| | 500 | 66 | 66,4 | 66,8 | 67 | 67,3 | 67,5 | 67,7 |
| | 1 000 | 74,5 | 75 | 75,3 | 75,5 | 75,7 | 75,8 | 76 |
| | 2 000 | 84,1 | 84,5 | 84,7 | 84,9 | 85 | 85 | 85,1 |
| | 3 000 | 90,1 | 90,3 | 90,5 | 90,8 | 90,9 | 91 | 91,1 |
| | 5 000 | 98,4 | 98,6 | 98,8 | 99 | 99 | 99,1 | 99,2 |
| 6 | 50 | 34,6 | 34,8 | 34,9 | 35 | 35,1 | 35,2 | 35,3 |
| | 100 | 39 | 39,2 | 39,4 | 39,4 | 39,5 | 39,5 | 39,6 |
| | 200 | 44 | 44,4 | 44,2 | 44,3 | 44,4 | 44,4 | 44,5 |
| | 300 | 47,2 | 47,2 | 47,3 | 47,4 | 47,5 | 47,5 | 47,6 |
| | 500 | 51,5 | 51,6 | 51,7 | 51,7 | 51,7 | 51,8 | 51,8 |
| | 1 000 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58,1 | 58,1 | 58,1 |
| | 2 000 | 65 | 65,1 | 65,1 | 65,1 | 65,1 | 65,2 | 65,2 |
| | 3 000 | 69,6 | 69,9 | 69,6 | 69,7 | 69,7 | 69,7 | 69,7 |
| | 5 000 | 76 | 76 | 76 | 76 | 76 | 76 | 76 |
| 15 | 50 | 29,8 | 29,8 | 29,9 | 29,9 | 29,9 | 29,9 | 29,9 |
| | 100 | 33,4 | 33,4 | 33,5 | 33,5 | 33,6 | 33,6 | 33,6 |
| | 200 | 37,6 | 37,6 | 37,6 | 37,7 | 37,7 | 37,7 | 37,7 |
| | 300 | 40,4 | 40,4 | 40,4 | 40,4 | 40,4 | 40,4 | 40,4 |
| | 500 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 |
| | 1 000 | 49,4 | 49,4 | 49,4 | 49,4 | 49,4 | 49,4 | 49,4 |
| | 2 000 | 55,5 | 55,5 | 55,5 | 55,5 | 55,5 | 55,5 | 55,5 |
| | 3 000 | 59,4 | 59,4 | 59,4 | 59,4 | 59,4 | 59,4 | 59,4 |
| | 5 000 | 64,5 | 64,5 | 64,5 | 64,5 | 64,5 | 64,5 | 64,5 |

ДОДАТОК Р

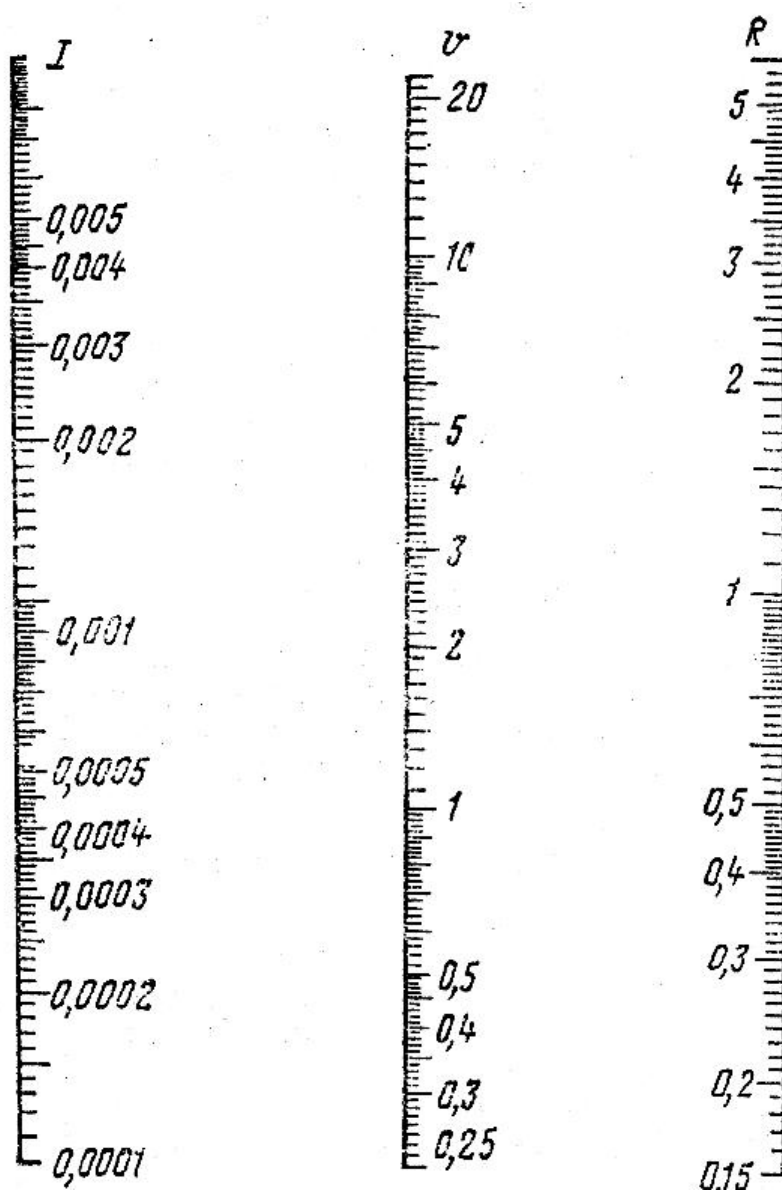


Рисунок Р.1 – Номограма для визначення швидкості течії у відкритих руслах за формулою Павловського при $n = 0,013$

ДОДАТОК С

Таблиця С.1 – Основні геометричні і гідравлічні елементи труб круглого поперечного перерізу при різному наповненні

| $\Delta = \frac{h}{r}$ | $B' = \frac{B}{r}$ | $\omega' = \frac{\omega}{r^2}$ | $\chi' = \frac{\chi}{r}$ | $R' = \frac{R}{r}$ | $f(\Delta) = \frac{Q}{r^2 \sqrt{r}}$ | $\frac{\omega'}{\Delta^2} = \frac{\omega}{h^2}$ |
|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------|---|
| 0,200 | 1,20 | 0,164 | 1,29 | 0,127 | 0,18 | 4,10 |
| 0,250 | 1,32 | 0,227 | 1,45 | 0,157 | 0,28 | 3,64 |
| 0,284 | 1,40 | 0,273 | 1,55 | 0,177 | 0,36 | 3,38 |
| 0,318 | 1,46 | 0,322 | 1,64 | 0,196 | 0,45 | 3,18 |
| 0,352 | 1,52 | 0,372 | 1,73 | 0,215 | 0,55 | 3,00 |
| 0,398 | 1,60 | 0,444 | 1,85 | 0,240 | 0,70 | 2,81 |
| 0,440 | 1,66 | 0,513 | 1,95 | 0,262 | 0,85 | 2,64 |
| 0,478 | 1,71 | 0,576 | 2,04 | 0,282 | 1,00 | 2,53 |
| 0,500 | 1,73 | 0,614 | 2,09 | 0,293 | 1,09 | 2,45 |
| 0,505 | 1,74 | 0,623 | 2,11 | 0,296 | 1,11 | 2,44 |
| 0,665 | 1,88 | 0,914 | 2,46 | 0,372 | 1,90 | 2,08 |
| 0,795 | 1,96 | 1,164 | 2,73 | 0,427 | 2,68 | 1,85 |
| 1,00 | 2,00 | 1,571 | 3,14 | 0,500 | 4,16 | 1,57 |
| 1,12 | 1,99 | 1,810 | 3,38 | 0,535 | 5,16 | 1,45 |
| 1,25 | 1,94 | 2,066 | 3,65 | 0,566 | 6,37 | 1,33 |
| 1,36 | 1,87 | 2,275 | 3,88 | 0,587 | 7,50 | 1,23 |
| 1,50 | 1,73 | 2,527 | 4,19 | 0,603 | 9,12 | 1,12 |
| 1,626 | 1,56 | 2,735 | 4,49 | 0,609 | 10,82 | 1,04 |
| 1,65 | 1,52 | 2,772 | 4,56 | 0,608 | 11,18 | 1,02 |
| 1,70 | 1,43 | 2,846 | 4,69 | 0,606 | 12,00 | 0,99 |
| 1,75 | 1,32 | 2,915 | 4,84 | 0,603 | 12,92 | 0,96 |
| 1,80 | 1,20 | 2,978 | 5,00 | 0,596 | 14,01 | 0,92 |
| 1,85 | 1,05 | 3,038 | 5,17 | 0,587 | 15,38 | 0,89 |
| 1,872 | 0,98 | 3,057 | 5,26 | 0,581 | 16,13 | 0,87 |
| 1,90 | 0,87 | 3,083 | 5,38 | 0,573 | 17,32 | 0,86 |
| 1,95 | 0,63 | 3,121 | 5,65 | 0,553 | 20,84 | 0,82 |

Таблиця С.2 – Основні геометричні і гідравлічні елементи труб коритоподібного поперечного перерізу при різному наповненні

| $\Delta = \frac{h}{r}$ | $B' = \frac{B}{r}$ | $\omega' = \frac{\omega}{r^2}$ | $\chi' = \frac{\chi}{r}$ | $R' = \frac{R}{r}$ | $f(\Delta) = \frac{Q}{r^2 \sqrt{r}}$ | $\frac{\omega'}{\Delta^2} = \frac{\omega}{h^2}$ |
|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------|---|
| 0,20 | 1,99 | 0,448 | 2,18 | 0,205 | 0,63 | 11,20 |
| 0,30 | 2,00 | 0,573 | 2,38 | 0,240 | 0,92 | 6,36 |
| 0,40 | 2,00 | 0,773 | 2,58 | 0,299 | 1,43 | 4,84 |
| 0,50 | 2,00 | 0,973 | 2,78 | 0,349 | 2,03 | 3,89 |
| 0,60 | 2,00 | 1,173 | 2,98 | 0,392 | 2,68 | 3,26 |
| 0,70 | 2,00 | 1,373 | 3,18 | 0,431 | 3,40 | 2,80 |
| 0,80 | 2,00 | 1,573 | 3,38 | 0,464 | 4,17 | 2,46 |
| 0,90 | 2,00 | 1,773 | 3,58 | 0,494 | 4,99 | 2,19 |
| 1,00 | 2,00 | 1,973 | 3,78 | 0,521 | 5,85 | 1,97 |
| 1,10 | 1,99 | 2,193 | 4,01 | 0,547 | 6,88 | 1,81 |
| 1,20 | 1,96 | 2,370 | 4,19 | 0,565 | 7,79 | 1,65 |
| 1,30 | 1,91 | 2,564 | 4,39 | 0,583 | 8,88 | 1,53 |
| 1,40 | 1,83 | 2,751 | 4,61 | 0,597 | 10,07 | 1,41 |
| 1,50 | 1,73 | 2,930 | 4,83 | 0,606 | 11,38 | 1,30 |
| 1,60 | 1,60 | 3,097 | 5,07 | 0,610 | 12,87 | 1,21 |
| 1,624 | 1,56 | 3,135 | 5,13 | 0,611 | 13,26 | 1,19 |
| 1,64 | 1,54 | 3,159 | 5,17 | 0,610 | 13,53 | 1,17 |
| 1,66 | 1,50 | 3,190 | 5,23 | 0,610 | 13,88 | 1,16 |
| 1,70 | 1,43 | 3,248 | 5,34 | 0,608 | 14,63 | 1,13 |
| 1,76 | 1,30 | 3,330 | 5,51 | 0,604 | 15,92 | 1,08 |
| 1,80 | 1,20 | 3,380 | 5,64 | 0,599 | 16,95 | 1,04 |
| 1,86 | 1,02 | 3,447 | 5,86 | 0,588 | 18,92 | 1,00 |
| 1,871 | 0,98 | 3,458 | 5,90 | 0,586 | 19,40 | 0,99 |
| 1,88 | 0,95 | 3,467 | 5,94 | 0,583 | 19,87 | 0,98 |
| 1,90 | 0,87 | 3,485 | 6,02 | 0,578 | 20,81 | 0,97 |
| 1,96 | 0,56 | 3,529 | 6,36 | 0,554 | 26,46 | 0,92 |

Таблиця С.3 – Основні геометричні і гідравлічні елементи труб овоїдального поперечного перерізу при різному наповненні

| $\Delta = \frac{h}{r}$ | $B' = \frac{B}{r}$ | $\omega' = \frac{\omega}{r^2}$ | $\chi' = \frac{\chi}{r}$ | $R' = \frac{R}{r}$ | $f(\Delta) = \frac{Q}{r^2 \sqrt{r}}$ | $\frac{\omega'}{\Delta^2} = \frac{\omega}{h^2}$ |
|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------|---|
| 0,20 | 0,80 | 0,112 | 0,93 | 0,121 | 0,12 | 2,80 |
| 0,30 | 0,94 | 0,199 | 1,17 | 0,170 | 0,27 | 2,21 |
| 0,40 | 1,08 | 0,300 | 1,41 | 0,212 | 0,47 | 1,88 |
| 0,50 | 1,20 | 0,414 | 1,65 | 0,251 | 0,73 | 1,65 |
| 0,60 | 1,31 | 0,539 | 1,88 | 0,287 | 1,03 | 1,49 |
| 0,70 | 1,41 | 0,675 | 2,10 | 0,321 | 1,40 | 1,38 |
| 0,80 | 1,50 | 0,820 | 2,32 | 0,354 | 1,81 | 1,28 |
| 0,90 | 1,58 | 0,974 | 2,54 | 0,384 | 2,28 | 1,20 |
| 1,00 | 1,66 | 1,136 | 2,75 | 0,413 | 2,81 | 1,14 |
| 1,20 | 1,78 | 1,481 | 3,17 | 0,467 | 4,03 | 1,03 |
| 1,40 | 1,88 | 1,848 | 3,58 | 0,516 | 5,47 | 0,94 |
| 1,60 | 1,95 | 2,231 | 3,99 | 0,560 | 7,13 | 0,87 |
| 1,80 | 1,99 | 2,624 | 4,39 | 0,598 | 9,01 | 0,81 |
| 2,00 | 2,00 | 3,023 | 4,79 | 0,631 | 11,10 | 0,76 |
| 2,20 | 1,96 | 3,421 | 5,19 | 0,659 | 13,50 | 0,71 |
| 2,40 | 1,83 | 3,801 | 5,61 | 0,677 | 16,35 | 0,66 |
| 2,50 | 1,73 | 3,980 | 5,84 | 0,682 | 18,02 | 0,64 |
| 2,53 | 1,70 | 4,031 | 5,91 | 0,683 | 18,56 | 0,63 |
| 2,564 | 1,65 | 4,088 | 5,99 | 0,683 | 19,21 | 0,62 |
| 2,65 | 1,52 | 4,225 | 6,20 | 0,681 | 21,04 | 0,61 |
| 2,68 | 1,47 | 4,270 | 6,28 | 0,679 | 21,76 | 0,60 |
| 2,74 | 1,34 | 4,354 | 6,45 | 0,675 | 23,39 | 0,58 |
| 2,80 | 1,20 | 4,431 | 6,64 | 0,667 | 25,42 | 0,57 |
| 2,86 | 1,02 | 4,497 | 6,86 | 0,656 | 28,19 | 0,55 |
| 2,89 | 0,91 | 4,527 | 6,98 | 0,648 | 30,12 | 0,54 |
| 2,95 | 0,63 | 4,573 | 7,29 | 0,627 | 36,96 | 0,53 |

ДОДАТОК Т

Таблиця Т.1 – Значення швикісних та витратних характеристик при різному наповненні двох стандартних труб радіусом 1 і 2 м круглого перерізу

| $\Delta = \frac{h}{r}$ | $r = 1,0 \text{ м}$ | | | | $r = 2,0 \text{ м}$ | | | |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | $n = 0,013$ | | $n = 0,0015$ | | $n = 0,013$ | | $n = 0,015$ | |
| | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $W, \text{ м}/\text{с}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $W, \text{ м}/\text{с}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $W, \text{ м}/\text{с}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $W, \text{ м}/\text{с}$ |
| 1,0 | 77,1 | 49,1 | 66,2 | 42,1 | 483 | 76,9 | 419 | 66,7 |
| 1,1 | 90,3 | 51,0 | 77,5 | 43,7 | 566 | 79,9 | 491 | 69,3 |
| 1,2 | 103,5 | 52,6 | 88,8 | 45,1 | 648 | 82,3 | 562 | 71,4 |
| 1,3 | 116,1 | 53,8 | 100,0 | 46,2 | 728 | 84,2 | 633 | 73,2 |
| 1,4 | 128,8 | 54,9 | 110,5 | 47,1 | 807 | 85,8 | 701 | 74,6 |
| 1,5 | 140,2 | 55,5 | 120,3 | 47,7 | 878 | 86,8 | 763 | 75,4 |
| 1,6 | 150,3 | 55,7 | 129,0 | 47,9 | 941 | 87,2 | 816 | 75,8 |
| 1,7 | 158,4 | 55,7 | 136,2 | 47,9 | 992 | 87,1 | 864 | 75,8 |
| 1,8 | 163,9 | 55,1 | 140,6 | 47,3 | 1026 | 86,1 | 893 | 74,9 |
| 1,9 | 165,4 | 53,6 | 141,7 | 46,0 | 1035 | 84,0 | 899 | 72,9 |
| 2,0 | 154,3 | 49,1 | 131,8 | 42,1 | 967 | 76,9 | 839 | 66,7 |

ДОДАТОК У

Таблиця У.1 – Орієнтовні значення Z

| Межі вимірювання коефіцієнта шорсткості | Орієнтовні значення $Z = 0,5 + Y$ при | |
|---|---------------------------------------|---------------------|
| | $R < 1,0 \text{ м}$ | $R > 1,0 \text{ м}$ |
| 0,015–0,017 | 0,667 | 0,667 |
| 0,018–0,0225 | 0,700 | 0,667 |
| 0,025–0,030 | – | 0,700 |

ДОДАТОК Ф

Таблиця Ф.1 – Значення допоміжної функції $\Phi(\psi)$ $z = 0,667$ (при $y \approx 1/6$)

| $\psi = \frac{h_0}{b}$ | Значення допоміжної функції $\Phi(\psi)$ при коефіцієнті закладення відкосів n | | | | |
|------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| 0,10 | 52,30 | 46,90 | 45,00 | 43,90 | 42,60 |
| 0,20 | 18,25 | 14,53 | 13,52 | 12,75 | 12,16 |
| 0,30 | 10,20 | 7,21 | 6,53 | 5,98 | 5,56 |
| 0,40 | 6,81 | 4,35 | 3,82 | 3,43 | 3,12 |
| 0,50 | 5,04 | 2,91 | 2,48 | 2,20 | 1,96 |
| 0,60 | 3,97 | 2,07 | 1,74 | 1,50 | 1,33 |
| 0,70 | 3,25 | 1,58 | 1,27 | 1,08 | 0,948 |
| 0,80 | 2,74 | 1,20 | 0,965 | 0,815 | 0,708 |
| 0,90 | 2,37 | 0,953 | 0,751 | 0,626 | 0,540 |
| 1,00 | 2,08 | 0,770 | 0,602 | 0,498 | 0,426 |

Таблиця Ф.2 – Значення допоміжної функції $\Phi(\psi)$ при $z = 0,700$ ($y \approx 1/5$)

| $\psi = \frac{h_0}{b}$ | Значення допоміжної функції $\Phi(\psi)$ при коефіцієнті закладення відкосів n | | | | |
|------------------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| 0,10 | 1,755 | 1,705 | 1,690 | 1,678 | 1,666 |
| 0,20 | 1,291 | 1,190 | 1,159 | 1,134 | 1,111 |
| 0,30 | 1,032 | 0,882 | 0,873 | 0,800 | 0,768 |
| 0,40 | 0,855 | 0,658 | 0,602 | 0,554 | 0,514 |
| 0,50 | 0,722 | 0,480 | 0,413 | 0,357 | 0,310 |
| 0,60 | 0,617 | 0,332 | 0,254 | 0,191 | 0,139 |
| 0,70 | 0,529 | 0,203 | 0,117 | 0,048 | -0,009 |
| 0,80 | 0,455 | 0,090 | -0,004 | -0,078 | -0,139 |
| 0,90 | 0,391 | -0,011 | -0,113 | -0,192 | -0,256 |
| 1,00 | 0,334 | -0,104 | -0,210 | -0,295 | -0,363 |

ДОДАТОК X

Таблиця X.1 – Значення відносних швидкісних і витратних характеристик при різному наповненні двох стандартних труб круглого перерізу

| $\Delta = \frac{h}{r}$ | $n = 0,015$ | | $n = 0,017$ | |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | $K' = \frac{K}{r^{2,667}}$ | $W' = \frac{W}{r^{0,667}}$ | $K' = \frac{K}{r^{2,667}}$ | $W' = \frac{W}{r^{0,667}}$ |
| 1,0 | 66,1 | 42,1 | 58,2 | 37,1 |
| 1,1 | 77,4 | 43,7 | 68,2 | 38,5 |
| 1,2 | 88,8 | 45,1 | 78,2 | 39,7 |
| 1,3 | 100,0 | 46,3 | 88,1 | 40,7 |
| 1,4 | 110,7 | 47,1 | 97,5 | 41,5 |
| 1,5 | 120,5 | 47,7 | 106,2 | 42,0 |
| 1,6 | 129,2 | 47,9 | 113,8 | 42,2 |
| 1,7 | 136,2 | 47,8 | 120,0 | 42,2 |
| 1,8 | 140,9 | 47,3 | 124,1 | 41,7 |
| 1,9 | 142,0 | 46,1 | 125,1 | 40,6 |
| 2,0 | 132,2 | 42,1 | 116,4 | 37,1 |

ДОДАТОК Ц

| m | $\beta_{г.н.}$ | $\frac{1}{\sqrt{\beta_{г.н.} + m}}$ | $\frac{\beta_{г.н.}}{\sqrt{\beta_{г.н.} + m}}$ | A |
|-----|----------------|-------------------------------------|--|------|
| 0 | 2,00 | 0,71 | 1,41 | 0,94 |
| 0,5 | 1,24 | 0,76 | 0,94 | 0,98 |
| 1,0 | 0,83 | 0,74 | 0,61 | 0,96 |
| 1,5 | 0,61 | 0,69 | 0,42 | 0,91 |
| 2,0 | 0,47 | 0,64 | 0,30 | 0,85 |
| 2,5 | 0,39 | 0,59 | 0,23 | 0,80 |
| 3,0 | 0,33 | 0,55 | 0,18 | 0,77 |

ДОДАТОК Ш

Таблиця Ш.1 – Залежність співвідношення h/b від m

| m | h/b | m | h/b |
|-----|-------|-----|-------|
| 0 | 0,5 | 2,0 | 2,1 |
| 0,5 | 0,8 | 2,5 | 2,6 |
| 1,0 | 1,2 | 3,0 | 3,1 |
| 1,5 | 1,65 | | |

ДОДАТОК Щ

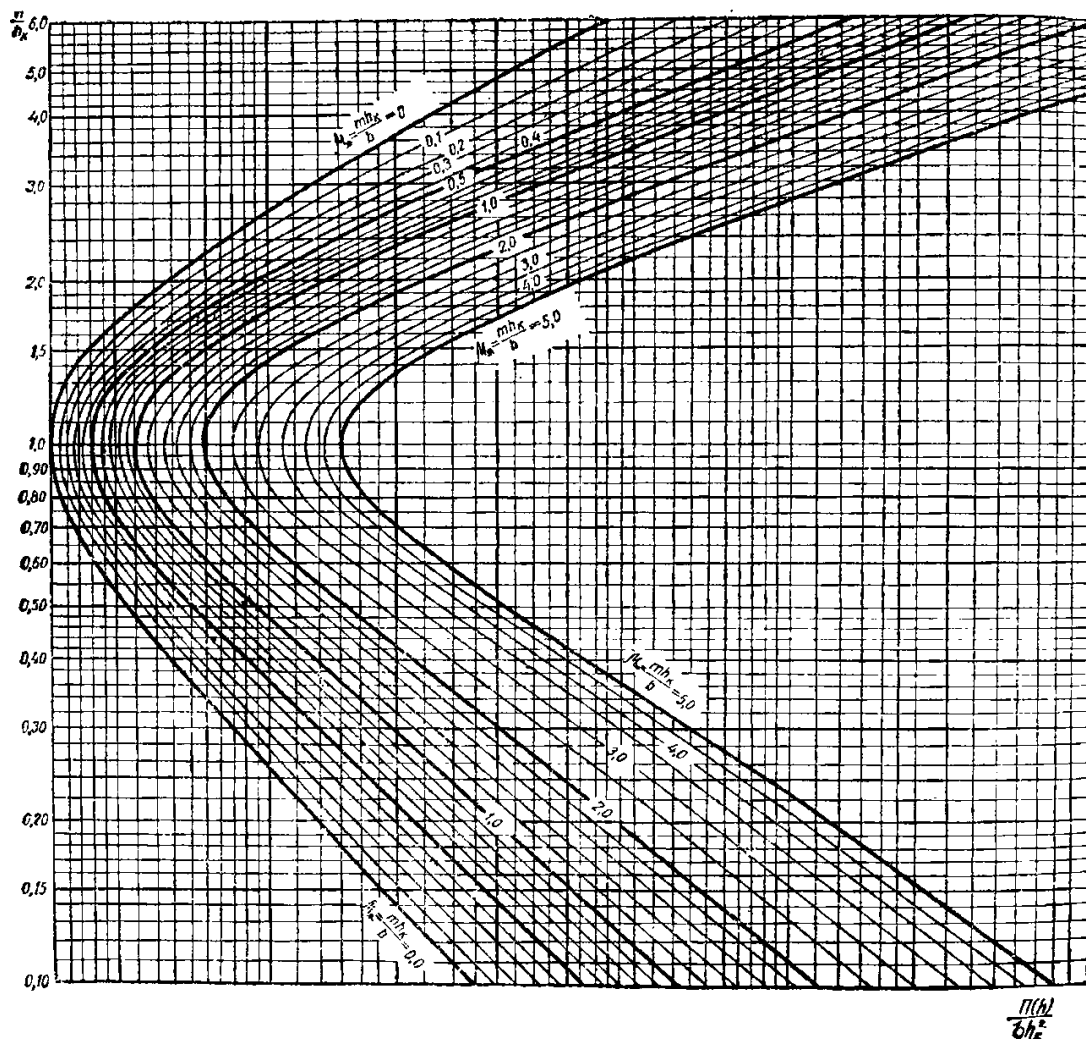
Таблиця Щ.1 – Таблиці для визначення критичних глибин для русел прямокутного поперечного перерізу

| $q, (m^3/c)/m$ | h_k, m | $q, (m^3/c)/m$ | h_k, m | $q, (m^3/c)/m$ | h_k, m |
|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 0,33 | 0,23 | 0,5 | 0,304 | 1 | 0,482 |
| 0,37 | 0,246 | 0,58 | 0,335 | 1,5 | 0,632 |
| 0,41 | 0,266 | 0,66 | 0,365 | 2 | 0,765 |
| 0,45 | 0,283 | 0,74 | 0,394 | 3 | 1,003 |
| 0,49 | 0,3 | 0,82 | 0,422 | 4 | 1,215 |

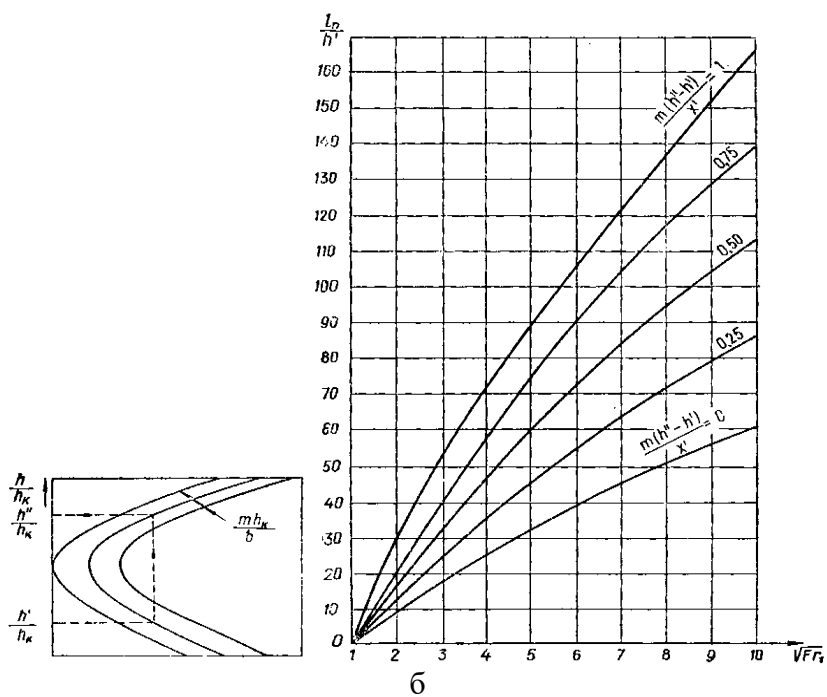
Таблиця Щ.2 – Таблиці для визначення критичних глибин для русел трикутного поперечного перерізу

| $Q/m, (m^3/c)$ | h_k, m | $Q/m, (m^3/c)$ | h_k, m | $Q/m, (m^3/c)$ | h_k, m |
|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 0,1 | 0,295 | 0,2 | 0,39 | 0,5 | 0,562 |
| 0,11 | 0,307 | 0,25 | 0,426 | 1 | 0,742 |
| 0,12 | 0,318 | 0,3 | 0,459 | 1,5 | 0,872 |
| 0,13 | 0,328 | 0,35 | 0,487 | 2 | 0,979 |
| 0,14 | 0,338 | 0,4 | 0,514 | 2,5 | 1,07 |
| 0,15 | 0,347 | 0,45 | 0,539 | 3 | 1,159 |

ДОДАТОК Ю



а



б

Рисунок Ю.1 – Графік А. Н. Рахманова для визначення глибин в руслах трапецієдального перерізу

Виробниче-практичне видання

Методичні рекомендації
до проведення практичних і лабораторних занять та виконання
розрахунково-графічної і самостійної робіт
з навчальної дисципліни

«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»

*(для для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі
спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні
технології)*

Укладачі: **ГАЛКІНА** Олена Павлівна,
ШЕВЧЕНКО Тамара Олександрівна

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *Т. О. Шевченко*

План 2021, поз. 160М

Підп. до друку 03.02.2022. Формат 60 × 84/16
Електронне видання. Ум. друк. арк. 8,4

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.