

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

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до практичних занять та виконання розрахунково-графічного завдання
з навчальної дисципліни

«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»

*(для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання
спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,
спеціалізації (освітні програми) «Цивільна інженерія (Водопостачання та
водовідведення)», «Гідротехніка (Водні ресурси)»)*

Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2020

Методичні рекомендації до практичних занять та виконання розрахунково-графічного завдання з навчальної дисципліни «Інженерна гідравліка» (для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, спеціалізації (освітні програми) «Цивільна інженерія (Водопостачання та водовідведення)», «Гідротехніка (Водні ресурси)») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. О. П. Галкіна. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 97 с.

Укладач канд. техн. наук О. П. Галкіна

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 29 серпня 2019 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЗМ 1 РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ.....	5
Тема 1 Витікання рідини з отворів і насадків.....	5
Тема 2 Усталений рух рідини у відкритих руслах.....	8
Тема 3 Рівномірний рух рідини у відкритих руслах.....	8
3.1 Визначення елементів живого перерізу потоку і допустимих середніх швидкостей течії	9
3.2 Формула Шезі, коефіцієнт Шезі	11
3.3 Перевірка каналу на розмив і замулення	14
3.4 Основні залежності для гідравлічного розрахунку каналів.....	18
3.5 Розрахунки каналів з неоднорідною шорсткістю.....	21
Тема 4 Гідравлічно найвигідніший переріз каналу.....	22
4.1 Визначення нормальної глибини і середньої в перерізі швидкості потоку.....	25
4.2 Розрахунок русел для русел замкнутого перерізу.....	32
Тема 5 Нерівномірний рух у відкритих руслах.....	35
Тема 6 Водозливи, їх класифікація.....	39
6.1 Пропускна здатність непідтоплених водозливів з тонкою стінкою.....	39
6.2 Пропускна здатність підтоплених водозливів з тонкою стінкою.....	41
6.3 Пропускна здатність водозливів практичного профілю.....	42
6.4 Гідравлічні розрахунки бокових водозливів.....	42
ЗМ 2 СПОЛУЧЕННЯ Б'ЄФІВ.....	50
Тема 7 Сполучення б'єфів	50
7.1 Визначення найменшої глибини за спорудою в нижньому б'єфі	50
7.2 Гідравлічний розрахунок водобійної стінки.....	53
7.3 Гідравлічний розрахунок водобійного колодязя.....	56
Тема 8 Гідравлічний стрибок.....	60
8.1 Рівняння стрибкової функції.....	62
8.2 Довжина гідравлічного стрибка. Геометричні розміри хвилястого стрибка. Втрати енергії в стрибку.....	64
ЗМ 3 РУХ ГРУНТОВИХ ВОД.....	69
Тема 9. Види фільтрації. Основний закон фільтрації.....	69
9.1 Методи визначення коефіцієнта фільтрації.....	69
9.2 Приплив води до горизонтальної галереї.....	71
9.3 Приплив води до вертикального колодязя.....	73
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ	75
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ.....	77

ВСТУП

Вирішення більшості задач 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» є:

– 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 практичних занять та виконання розрахунково-графічної роботи – допомогти студентам, які вивчають «Інженерну гідравліку», 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.

ЗМ 1 РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ

Тема 1 Витікання рідини з отворів і насадків

Класифікація отворів характеризується за:

- *розміром* виділяють малі та великі отвори;
- *товщиною стінки, в якій зроблено отвір* (отвори в тонкій стінці та товстій стінці);
- *формою* розрізняють круглі, квадратні, прямокутні, трикутні та інші отвори.

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 роду 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

№	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).

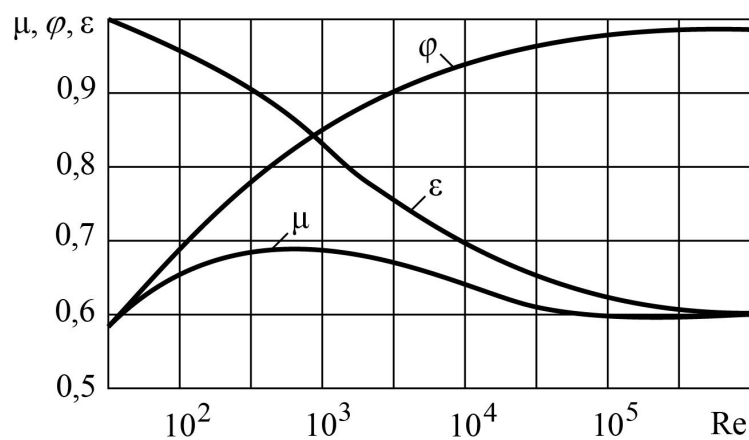


Рисунок 1.1 – Значення коефіцієнтів залежно від числа Рейнольдса

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 графіку (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 .

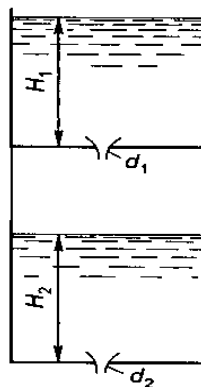


Рисунок 1.2 – Посудина з отворами (завдання до прикладу 3)

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 насадок за три хвилини.

Приклад 5. З малого отвору в тонкій стінці діаметром $d = 5$ мм витікає вода за температури $t = 10$ °C ($\nu = 0,0131$ 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, ухил, швидкість, витрата.

3.1 Визначення елементів живого перерізу потоку і допустимих середніх швидкостей течії

Штучним земляним каналам із практичних міркувань надають трапецеїдального поперечного перерізу з шириною каналу по дну b , глибиною каналу h , і закладенням відкосів a .

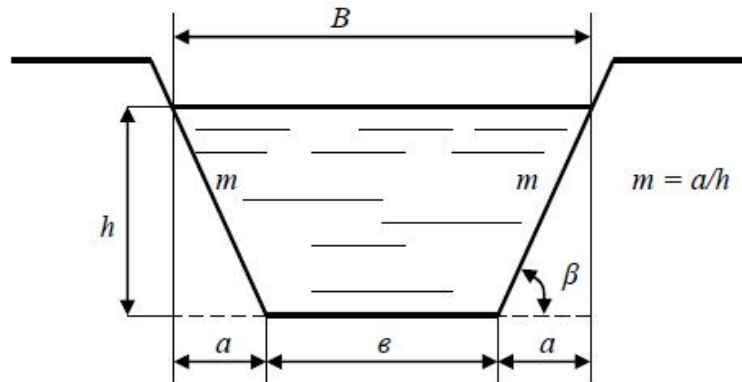


Рисунок 3.1 – Основні елементи живого перерізу каналу за однакової крутизни відкосів

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

$$\omega = (b + mh)h . \quad (3.1)$$

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

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} . \quad (3.2)$$

Ширина русла за вільною поверхнею рідини:

$$B = b + 2mh . \quad (3.3)$$

Гідравлічний радіус – відношення площі живого перетину до змоченого периметру:

$$R = \frac{\omega}{\chi} , \quad (3.4)$$

де b – ширина русла по дну;

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

h – глибина течії у даному перерізі.

За різної крутизни відкосів площа живого перерізу (рис. 3.2):

$$\omega = (b + m_{cp}h)h, \quad (3.5)$$

а, коефіцієнт закладення відкосів визначають за формулою:

$$m_{cp} = \frac{m_1 + m_2}{2}. \quad (3.6)$$

Змочений периметр визначають за формулою:

$$\chi = b + h(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}). \quad (3.7)$$

Ширина русла за вільною поверхнею

$$B = b + 2m_{cp}h. \quad (3.8)$$

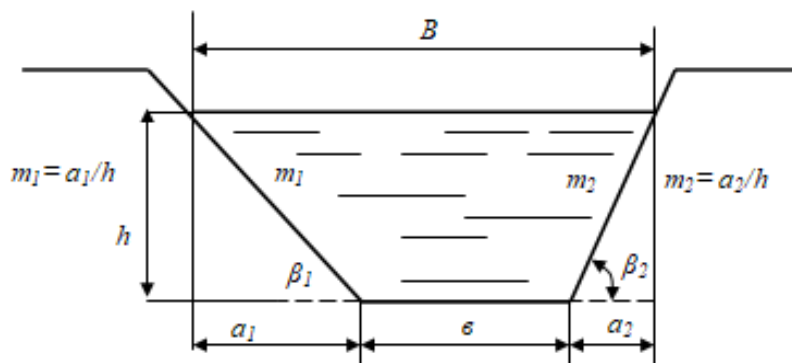


Рисунок 3.2 – Основні елементи живого перерізу каналу за різної крутизни відкосів

При визначенні геометричних елементів русел прямокутного і трикутного поперечного перерізу (рис. 3.3) використовують ті ж залежності, що і для русел трапецеїдального поперечного перерізу, маючи на увазі що $m = 0$ (для прямокутного), або $\epsilon = 0$ (для трикутного).

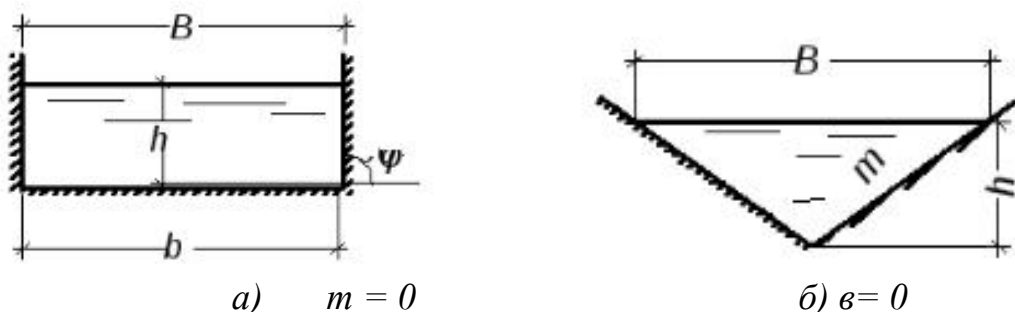


Рисунок 3.3 – Перетини каналів прямокутної (а) і трикутної (б) форми поперечного перерізу

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. Ухил вільної поверхні рідини J дорівнює ухилу дна русла i .

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

$$V = c \cdot \sqrt{Ri}, \quad (3.9)$$

де V – середня швидкість, м/с;

R – гідравлічний радіус, м;

i – ухил дна русла;

c – коефіцієнт Шезі, зв'язаний з коефіцієнтом гідравлічного тертя λ залежністю: $c = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \rightarrow \lambda = \frac{8g}{c^2}$.

Коефіцієнт Шезі також визначають за формулою:

– Павловського:

$$C = \frac{R^y}{n}, \quad (3.10)$$

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 $y = 1/6$):

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}; \quad (3.11)$$

– *Альтишуля*:

$$C = 20 \lg \frac{R}{\varepsilon + 0,385 \cdot \nu / \sqrt{g \cdot R \cdot i}}, \quad (3.12)$$

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

Значення наведеної лінійної шорсткості ε у формулі (3.12) наведені в додатках II наведені значення коефіцієнта Шезі.

Якщо 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:

$$C = \frac{14,8}{i^{1/6}} - 26. \quad (3.13)$$

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 ухил 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 ухил 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 ухил лотка складе: $i_0 = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}$.

1. Площа поперечного перерізу лотка прямокутної форми буде дорівнювати: $\omega = bh = 1,2 \cdot 0,8 = 0,96 \text{ м}^2$.

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 ухил 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 $m = 1,75$. Поздовжній ухил 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 $b = 2 \text{ м}$ і ухил 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, ухил водної поверхні $i = 0,00014$. Визначити середню швидкість течії і витрату води.

Вказівки: коефіцієнт Шезі за формулою (3.13). Відповідь: $Q = 950$ м³/с.

Приклад 6. Визначити витрату води в річці шириною $b = 32,0$ м, середній глибині $h = 1,2$ м, з ухилом вільної поверхні ріки $i = 0,0001$. Грунт ложа – середній пісок. Вказівки: коефіцієнт Шезі за формулою (3.13).

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, ухил лотка $i = 0,00001$. Вказівки: притік на 1 м траншеї $g = Q \cdot 3600 / l$.

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:

$$V_{min} \leq V_{cp} \leq V_{max}. \quad (3.14)$$

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 (дод. 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

$$V_{min} = a\sqrt{R}, \quad (3.15)$$

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

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

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

$$V_{\min} = AQ^{0,2}, \quad (3.16)$$

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:

$$V_{\max} = 3\sqrt{gd} \lg \frac{R}{7d}, \quad (3.17)$$

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 ухил $i = 0,0004$.

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:

$$V = W\sqrt{i}, \quad (3.18)$$

де i – ухил дна русла;

W – швидкісна характеристика.

З урахуванням формули Н. Н. Павловського:

$$W = \frac{1}{n} R^z, \quad (3.19)$$

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 Н. Н. Павловського:

$$Z = 0,37 + 2,5\sqrt{n} - 0,75(\sqrt{n} - 0,1)\sqrt{R}. \quad (3.20)$$

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:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}. \quad (3.21)$$

Ухил і падіння каналу за довжиною (втрати напору):

$$i = \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} = \frac{Q^2}{K^2}; \quad \Delta Z = i \cdot l = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} l = \frac{Q^2}{K^2} l. \quad (3.22)$$

Витратна характеристика (модуль витрати) – витрата при ухилі, рівному 1

$$K = \omega C \sqrt{R} = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (3.23)$$

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

$$W = C \sqrt{R} = \frac{V}{\sqrt{i}}. \quad (3.24)$$

Приклади розв'язання задач та самостійної підготовки

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

а) ухил 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) $i = 0,003$ 6; $b = 2,0$ м; $m = 0$; $n = 0,014$; $h_0 = 0,56$ м;

в) $i = 0,004$ 9; $b = 0$ м; $m = 1,25$; $n = 0,022$ 5; $h_0 = 0,82$ 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 ухил 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 ухил: $i = \left(\frac{Q}{\omega W}\right)^2 = \left(\frac{0,079}{0,24 \cdot 15,5}\right)^2 = 0,00045 \text{ м/с}$.

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

Приклад 14. Визначити глибину протікання потоку і ухил, 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 ухил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{2^2}{51,1^2} = 0,00153$.

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

Приклад 15. Визначити ширину русла по дну і ухил 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 ухил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{2^2}{21,6^2} = 0,0086$.

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

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

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

Приклад 17. Визначити ухил 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 ухил 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:

$$n_{cp} = \frac{X_1 n_1 + X_2 n_2 + \dots + X_m n_m}{X}. \quad (3.25)$$

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

$$n_{cp} = \left(\frac{X_1}{X} n_1^{3/2} + \frac{X_2}{X} n_2^{3/2} + \dots + \frac{X_m}{X} n_m^{3/2} \right)^{2/3}, \quad (3.26)$$

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 слабого типу укріплення.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 19. Визначити глибину в каналі трапецеїдального перерізу. Ширина по дну $b = 2,5$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,5$. Ухил каналу $i_0 = 0,0019$. 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, ухил 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 ухилі $i = 0,0001$, 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.

$$R_{MAX} = \frac{1}{2} h_0 \text{ і } h_0 = 2R_{MAX} \quad (4.1)$$

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:

$$\beta_{Г,Н} = \left(\frac{b}{h}\right)_{Г,Н} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right) \quad (4.2)$$

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

$$\frac{\beta}{h_0} = \beta_{Г,Н} \cdot \quad (4.3)$$

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

$$v = \frac{\beta_{Г,Н.}}{\sqrt{\beta_{Г,Н.} + m}} \sqrt{\omega} \text{ і } h_0 = \frac{1}{\sqrt{\beta_{Г,Н.} + m}} \sqrt{\omega}. \quad (4.4)$$

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

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

$$Q = \omega W \sqrt{i} = (b + mh_0)h_0 \cdot \frac{1}{n} R^Z \sqrt{i}. \quad (4.5)$$

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

$$h_0 = \left(\frac{2^Z}{\beta_{Г,Н.} + m} \right)^{\frac{1}{2+Z}} \left(\frac{nQ}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2+Z}}. \quad (4.6)$$

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

$$h_0 = A \left(\frac{nQ}{\sqrt{i}} \right)^{0,37}, \quad (4.7)$$

де

$$A = \left(\frac{2^{0,7}}{\beta_{Г,Н.} + m} \right)^{0,37}. \quad (4.8)$$

Значення A наведені в додатку Ц.

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Визначити тип укріплення і поздовжній ухил 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 $\beta_{Г,Н.} = 0,39$.

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

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

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

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

Відповідь: б) укріплення – кладка з цегли на цементному розчині; значення ухилу 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 ухилі $i = 0,001$ 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 ухил, 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 ухил, 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 $b = 0,8$ м; коефіцієнт закладення відкосів $m = 2$.

Відповідь: $h = 1,7$ м.

Приклад 7. Знайти найвигідніші розміри трапецеїдального каналу довжиною $L = 8000$ м, який з'єднує дві водойми на різних рівнях $H = 4$ м, якщо витрата каналу $Q = 1$ м³/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 ухил 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:

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (4.9)$$

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. 4.1), за яким знаходимо відповідну глибину за розрахованим K_0 .

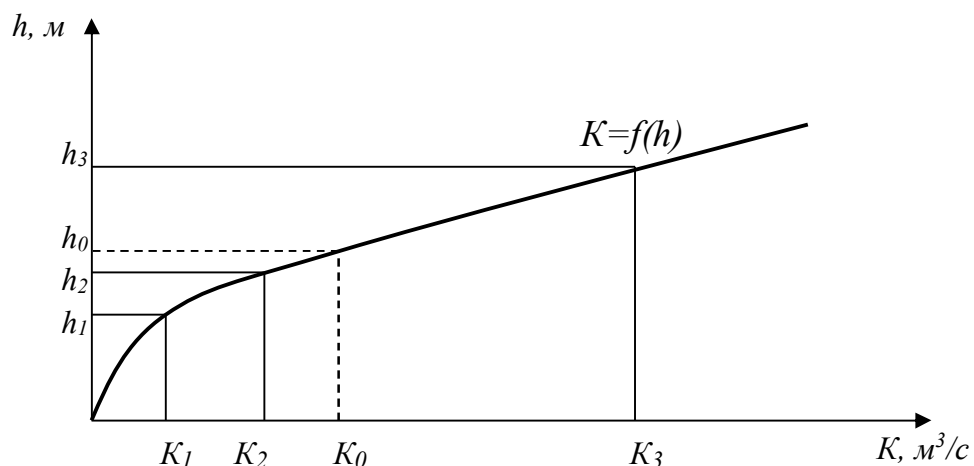


Рисунок 4.1 – Графік залежності витратної характеристики від глибини потоку

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

$$\frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{x_1} . \quad (4.10)$$

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

$$X_1 = \frac{\lg \frac{K_2}{K_1}}{\lg \frac{h_2}{h_1}} . \quad (4.11)$$

Маючи значення витратної характеристики, шукаємо нормальну глибину за формулою:

$$h_0 = h_1 \left(\frac{K_0}{K_1} \right)^{\frac{1}{X_1}} . \quad (4.12)$$

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 Н.Н. Павловського (3.10). 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:

$z = 0,667$ (при $y \approx 1/6$);

$z = 0,700$ (при $y \approx 1/5$).

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

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:

$$\varphi(\Psi) = \frac{b^{2,3} \sqrt[3]{b^2} \sqrt{i}}{nQ}. \quad (4.13)$$

Знаючи $f(\psi)$ додатку Φ , 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:

$$f(\Psi) = \lg \frac{\sqrt{i}}{n} + \lg b^{2,7} - \lg Q. \quad (4.14)$$

Знаючи $f(\psi)$, за додатком Φ 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 Φ 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 наступна:

1. Розраховуємо значення відносної витратної характеристики:

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

2. За додатком Φ 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 $v = 1,0$ м, коефіцієнт закладення відкосів $m = 1,0$, поздовжній ухил 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: $K_1 = w_1 \cdot W_1 = 0,254 \cdot 10,2 = 2,6 \text{ м}^3/\text{с}$, 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 $h_0 = h_4 = 0,61$ 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: $h_1 = 0,21$ м; $h_2 = 0,44$ м; $h_3 = 0,82$ м і знаходимо відповідні їм значення та зводимо дані розрахунку до таблиці 4.1:

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

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

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

За додатком Н знаходимо W_n і розраховуємо $K_n = \omega_n W_n$ (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків

h , м	ω , м ²	X , м	R , м	W , м/с	K , м ³ /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 $K_0 = 18,4$ м³/с (рис. 4.2).

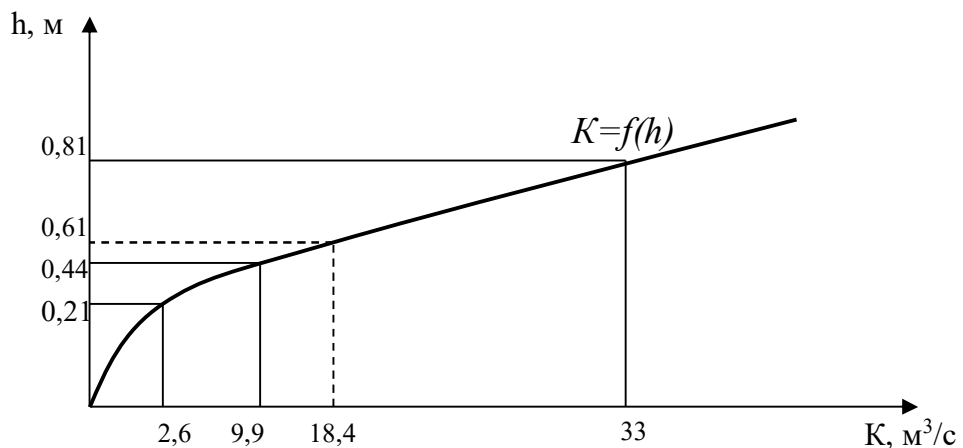


Рисунок 4.2 – Графік $K=f(h)$ для визначення нормальної глибини

Таким чином, з графіка (рис. 4.2) маємо, що при $K_0 = 18,4$ м³/с, нормальна глибина $h_0 = 0,61$ м, а швидкість руху $V = W\sqrt{i} = 0,84$ м/с.

в) «Показникоовий» закон

1. Знаходимо $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = 18,4$ м³/с.

2. Визначаємо глибину $h_1 = 0,44$ м; $h_2 = 0,82$ м і розраховуємо значення витратних характеристик: $K_1 = 9,9$ м³/с; $K_2 = 33$ м³/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 $h_0 = h_1 \left(\frac{K_0}{K_1} \right)^{\frac{1}{\alpha_1}}$ і дорівнює

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

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

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

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

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

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

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

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 $v = 4,0$ м, коефіцієнт закладання відкосів $m = 0$, ухил $i = 0,0009$, 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; $Q = 28,0 \text{ м}^3/\text{с}$;

в) $v = 0$; $m = 2,0$; $i = 0,0025$; ґрунт, що просочений бітумом; $Q = 1,66 \text{ м}^3/\text{с}$;

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), $Q = 2,8 \text{ м}^3/\text{с}$;

б) $b = 1,2$ м; $m = 2,5$; $i = 0,005$; русло закріплене дерен плазом; $Q = 4,29 \text{ м}^3/\text{с}$.

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 $m = 0,5$, ухил $i = 0,00025$. 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 ухилі $i = 0,0004$ 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, ухил 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 ухилом $i = 0,0049$; 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 ухилом $i = 0,01$, 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.

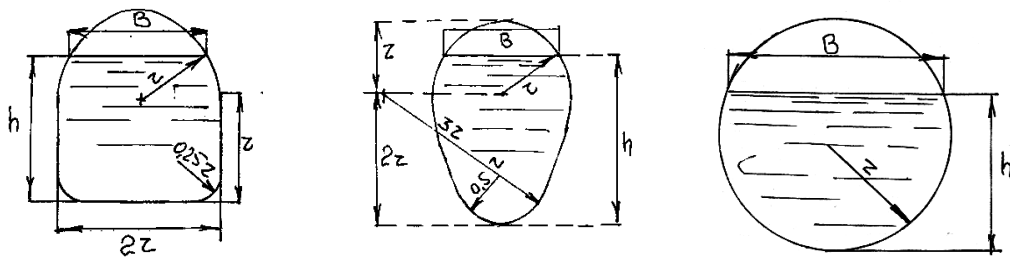
Відповідь: а) $h_0 = 1,8$ м; $V = 5,5$ м/с; б) $h_0 = 2,4$ м; $V = 0,82$ м/с.

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 ухилі $i = 0,0003$, 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. 4.3).



коритоподібний;

овоїдальний;

круглий

Рисунок 4.3 – Криволінійні перерізи русел

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

- відносна площа живого перерізу:

$$\omega' = \frac{\omega}{r^2}, \quad (4.15)$$

- відносний змочений периметр:

$$\chi' = \frac{\chi}{2}, \quad (4.16)$$

- відносна ширина русла по вільній поверхні рідини:

$$B' = \frac{B}{r}, \quad (4.17)$$

- відносний гідравлічний радіус:

$$R' = \frac{R}{r}. \quad (4.18)$$

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

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (4.19)$$

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (4.20)$$

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 ухилі 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 наступні 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 ухил необхідно надати трубі оваїдального перерізу радіусом $r = 1,8$ м, $n = 0,017$, витрата $10,6$ м³/с, глибина $h_0 = 5,04$ м.

Розв'язання. Визначають наступні 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 $\omega' = 4,431$;
 $\omega = \omega' \cdot r^2 = 4,431 \cdot 1,8^2 = 14,36$ м².

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

5. Швидкісна характеристика: $W = 66,5$ м/с.

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

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

Приклад 19. Визначити глибину рівномірного руху і ухил, який слід надати трубі оваїдального 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 ухил: $i = \frac{v^2}{W^2} = \frac{2^2}{71,9^2} = 0,00077$.

Приклади для самостійної підготовки

Приклад 20. Визначити необхідний радіус перерізу й ухил, який слід 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) $r = 0,7 \text{ м}$, облицьований бетоном, насоси $d_{cp} = 2,0 \text{ мм}$; $V = 8,0 \text{ м/с}$, $Q = 5,0 \text{ м}^3/\text{с}$,

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

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 облицьовання; в) буде йти замулювання труби.

Приклад 22. Визначити середню швидкість течії у трубі, переріз – коло, радіус $r = 2,0 \text{ м}$ і встановити, чи буде захищена труба від замулення, якщо глибина течії у перерізі $h = 2,24 \text{ м}$, витрата $Q = 10,86 \text{ м}^3/\text{с}$, а гідравлічна крупність наносів $u = 2 \text{ мм/с}$.

Приклад 23. Порівняти пропускну можливість каналів (перерізи: напівтрикутник, напівтрапеція, напівквадрат, напівколо) з однаковою площею $\omega = 1,0 \text{ м}^2$ і різною формою живого перерізу при бетонному облицюванні ($n = 0,017$) і ухилі $i = 0,005$

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:

$$\frac{\omega^3}{B_k} = \frac{\alpha Q^2}{g}, \quad (5.1)$$

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 прискорення підбору, задаючись декількома глибинами, будують графік (рис. 5.1) залежності $\frac{\omega^3}{B_K} = f(h)$ і за цих даними визначають критичну глибину $h_{к.} =$, яка відповідає співвідношенню (5.1).

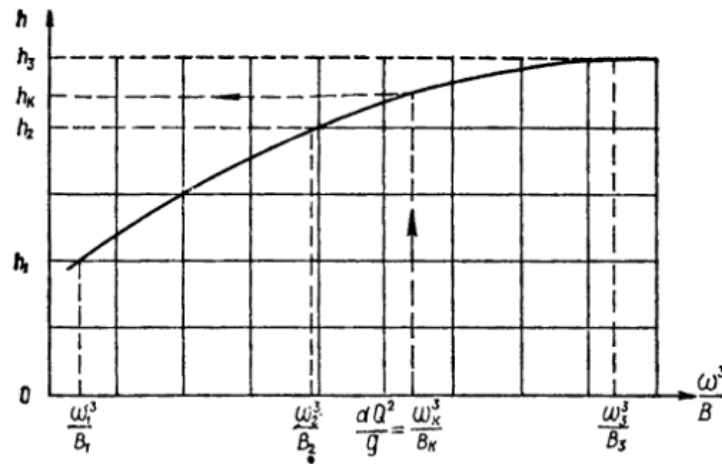


Рисунок 5.1 – Графік залежності $\frac{\omega^3}{B_K} = f(h)$

Виходячи із загальної залежності (5.1) маємо:

– для русел прямокутного перерізу, критична глибина:

$$h_K = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}, \quad (5.2)$$

– для русел трикутного перерізу, критична глибина:

$$h_K = \sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g m^2}}, \quad (5.3)$$

або

$$h_K = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g}, \quad (5.4)$$

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

– для трапецийдального перерізу розраховують значення допоміжної функції:

$$f(\mu) = \left(\frac{Q}{b}\right)^2 \left(\frac{m}{b}\right)^3. \quad (5.5)$$

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

$$h_K = \mu \frac{b}{m}. \quad (5.6)$$

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

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

Величину критичного ухилу можна одержати з рівняння Шезі для рівномірного руху і рівняння (5.1)

$$i_k = \left(\frac{Q}{\omega_K W_K} \right). \quad (5.7)$$

Якщо відомі критична глибина, а витрата не задана, тоді критичний ухил розраховують наступним чином:

$$i_k = \frac{g \omega_K}{\alpha W_K^2 B_K} = \frac{2g W_k}{B_k \alpha C_k^2 R_k}. \quad (5.8)$$

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

$$i_k = \left(\frac{Q}{K_K} \right)^2. \quad (5.9)$$

Залежно від співвідношення h_0 і h_k , а також від ухилу дна водотоку та критичного ухилу 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 бурному 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 залежності:

$$\frac{\omega^3}{B_K} < \frac{\alpha Q^2}{g} \text{ – потік у бурному стані;}$$

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

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

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, критична глибина:

1. $h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g}$ 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 складати $h_k = 0,22 \text{ м}$, 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 трапециїдального 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 трапециїдального 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 невідтоплених водозливів з тонкою стінкою

Водозливом називається перешкода в потоці, яка стискує його знизу та з боків (рис. 6.1).

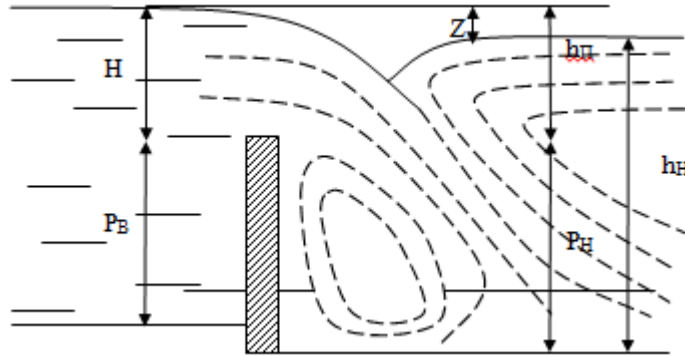


Рисунок 6.1 – Схема руху рідини через водозлив

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 водозлив. Уведемо наступні поняття:

P – висота водозливу;

H – статичний напір на водозлив, 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 умов:

$$h_n < 0; \quad (6.1)$$

$$\frac{z}{P_H} > \left(\frac{z}{P_H} \right)_K, \quad (6.2)$$

де h_n – глибина підтоплення.

$$h_n = h_n - P_n, \quad (6.3)$$

Витрату через непідтоплений водозлив з тонкою стінкою визначають за формулою:

$$Q = m_0 \cdot B \sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (6.4)$$

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 формулами:

– *Базена*:

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,003}{H} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \cdot \left(\frac{H}{H + P_B} \right)^2 \right], \quad (6.5)$$

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 $P_B > 0,5H$:

$$m_0 = 0,402 + 0,054 \cdot \frac{H}{P_B} \quad (6.6)$$

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

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} - 0,03 \frac{B_p - B}{B} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + P_B} \right)^2 \left(\frac{B}{B_p} \right)^2 \right]. \quad (6.7)$$

За дослідженнями Базена коефіцієнт витрати водозливу з нахилом водозливної стінки дорівнює:

$$m_{0H} = m_0 \cdot m_\beta, \quad (6.8)$$

де: m_0 – коефіцієнт витрати, який визначається за формулою (6.5);

m_β – коефіцієнт, залежить від кута нахилу β (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Значення коефіцієнтів 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 при наявності умов:

$$h_{\Pi} = (h_H - P_H) > 0; \quad (6.9)$$

$$\frac{z}{P_H} < \left(\frac{z}{P_H} \right)_k, \quad (6.10)$$

де $\left(\frac{z}{P_H} \right)_k$ – відносний критичний перепад, який визначається за графіком рисунку 6.2;

h_{Π} – глибина підтоплення (рис. 6.1).

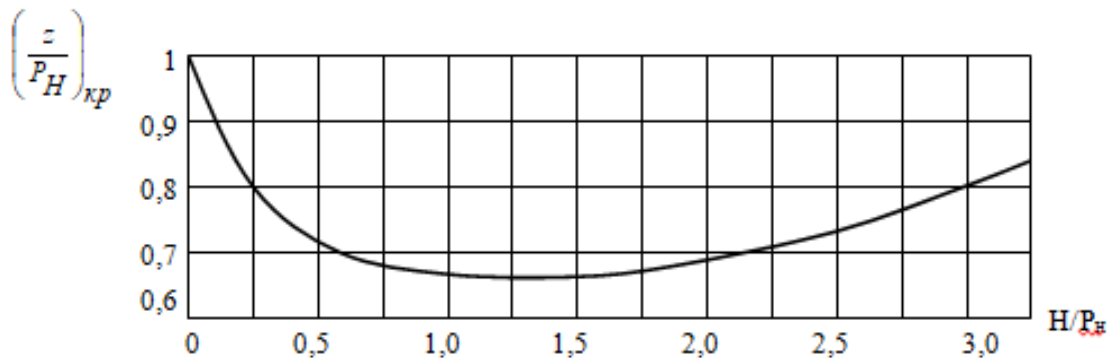


Рисунок 6.2 – Графік $\left(\frac{z}{P_H} \right)_k = fun\left(\frac{H}{P_H} \right)$ для водозливу з тонкою стінкою

Витрату через підтоплений водозлив з тонкою стінкою визначають за формулою:

$$Q = \sigma_n \cdot m_0 \cdot B \sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (6.11)$$

де m_0 – коефіцієнт витрати, який визначається за формулами (6.5–6.7);

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

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_{\Pi}}{P_H} \right) \cdot \left(\frac{z}{H} \right)^{1/3}. \quad (6.12)$$

Слід зазначити, що для не підтопленого водозливу 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:

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{h_n}{H_0} \right) \cdot \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{m}{0,59} \right)^{0,4}} \right]^2}, \quad (6.13)$$

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 так:

$$m = m_{\phi} \cdot \sigma_H \cdot \sigma_{\phi}, \quad (6.13)$$

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

σ_H – коефіцієнт повноти напору, який враховує зміну пропускну 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_H дорівнює:

$$\sigma_H = 0,7 + 0,185 \frac{H}{\delta}; \quad (6.14)$$

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

$$\sigma_{\phi} = 1 + \frac{r}{H}. \quad (6.15)$$

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:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - i_f - \frac{\alpha_0 \cdot (1 - \psi) \cdot Q}{g \cdot \omega^2} \cdot \frac{dQ}{dl}}{1 - \frac{\alpha_0 \cdot Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}} \quad (6.16)$$

та

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - i_f - \frac{\alpha \cdot Q}{g \cdot \omega^2} \cdot \frac{dQ}{dl}}{1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}} \quad (6.17)$$

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

Наближений метод інтегрування рівняння (6.16) 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:

$$E = h_i + \frac{\alpha \cdot Q_i^2}{2g \cdot \omega_i^2} = const. \quad (6.18)$$

Рівняння (6.16) та (6.17) розв'язуються разом з рівнянням бокового водозливу:

$$\frac{dQ}{dl} = -\sigma_n \cdot m_H \sqrt{2g} (h - P)^{3/2}, \quad (6.19)$$

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 (6.18) та (6.19), інтеграл рівнянь (6.16) та (6.18) при $\psi = 1$ Науменко І. І. запропонував у такому вигляді:

$$L_B = \frac{1}{m_H} [C_1 \cdot (A_2 - A_1) - C_2 \cdot (\arctg A_2 - \arctg A_1) - C_3 (h_2 A_2 - h_1 A_1)], \quad (6.19)$$

$$C_1 = \frac{b(2E - 3P) + mP(6,5E - 7,5P)}{E - P}; \quad (6.20)$$

$$C_2 = \frac{3m(5P - E) + 6b}{2}; \quad (6.21)$$

$$C_3 = 2,5m; \quad (6.22)$$

$$A_1 = \sqrt{\frac{E - h_1}{h_1 - P}}; \quad A_1 = \sqrt{\frac{E - h_2}{h_2 - P}}; \quad (6.23)$$

де m – коефіцієнт закладення відкосів каналу;

b – ширина дна каналу;

$h_1; h_2$ – глибини води.

Рівняння (6.19) 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 (6.18):

$$h_1 + \frac{\alpha Q_1^2}{2g\omega_1^2} = h_2 + \frac{\alpha Q_2^2}{2g\omega_2^2}. \quad (6.24)$$

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

а) спокійний потік в каналі і на водозливі:

$$Q_B = m_H \cdot k_B \cdot L_B \sqrt{2g} \cdot (h_2 - P)^{3/2}, \quad (6.25)$$

де m_H – коефіцієнт витрати прямого водозливу;

L_B – довжина водозливу;

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

$$k_B = 1 - \frac{0,42}{H_2} \left(1 + 1,5 \frac{Q_2}{Q_1} \right) \cdot \left(\frac{Q_1^2}{2g\omega_n^2} - \frac{Q_2^2}{2g\omega_2^2} \right), \quad (6.26)$$

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:

$$k_B = 0,9 \sqrt{1 - \left(\frac{h_n}{H_2} \right)^2}, \quad (6.27)$$

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

h_n – глибина води в нижньому б'єсфі водозливу;

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

б) бурхливий потік на водозливі:

$$Q_B = m_H \cdot k_B \cdot L_B \sqrt{2g} \cdot (h_{\kappa 1} - P)^{3/2}, \quad (6.28)$$

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

$$k_B = \frac{1}{1,7 + 0,45 \frac{L_B}{b}}, \quad (6.29)$$

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 (6.4) 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 (6.9): $h_{II} = 3,5 - 2,8 = 0,7 \text{ м}$.

2. Перевіряємо умову (6.10). 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. 6.2) визначають $\left(\frac{Z}{P_H} \right)_K = 0,7$. Отже, $\frac{z}{P_H} < \left(\frac{z}{P_H} \right)_K$.

Оскільки виконуються умови (6.9) та (6.10), то водозлив є підтопленим.

4. За формулою (6.12) 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 (6.11) 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. 6.3). Коефіцієнт витрати $m_H = 0,34$.

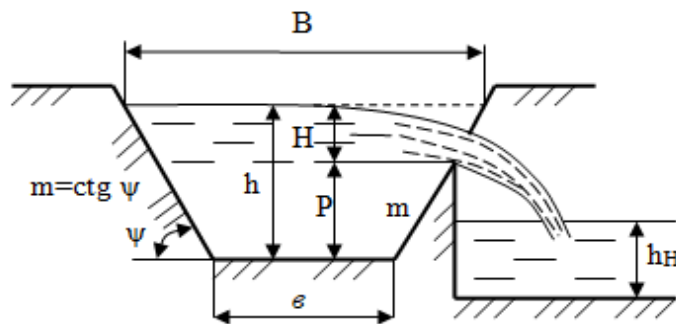


Рисунок 6.3 – Схема бокового водозливу

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 (6.24) 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 (6.24) одержимо $h_l = 2,554$ м.

5. Оскільки $h_{K1} = 1,9 < h_l = 2,554$ м і $h_{K2} = 1,81 < h_2 = 2,74$ м, то потік знаходиться в спокійному стані.

Для визначення довжини бокового водозливу використаємо формули (6.25) та (6.26).

6. За формулою (6.26) 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 (6.25) 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:

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

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

$$C_3 = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ м;}$$

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

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, яка визначена за формулою (6.25).

Такі розбіжності знаходяться 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 (1.92), 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 (6.17) та (6.19), складають розрахунковий алгоритм для обчислення довжини водозливу:

$$\Delta Q = \frac{m_H \cdot \sqrt{2g} \cdot (h-P)^{3/2} \left(1 - \frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot \omega^3}\right) \cdot (h_{i+1} - h_i)}{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} + \frac{Q}{g \omega^2} \left[m_H \cdot \sqrt{2g} \cdot (h-P)^{3/2}\right]}; \quad (6.30)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta Q}{m_H \cdot \sqrt{2g} \cdot (h-P)^{3/2}}. \quad (6.31)$$

2. У формулах (6.30) і (6.31): h , Q – середні значення, відповідно, глибини і витрати на ділянці ΔL між глибинами h_i та h_{i+1} :

$$h = \frac{1}{2}(h_i + h_{i+1}); \quad (6.32)$$

$$Q = Q_i + \frac{\Delta Q}{2}, \quad (6.33)$$

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:

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \cdot \lg R. \quad (6.34)$$

4. Результати розрахунків довжини водозливу за наведеним алгоритмом наведені в таблиці 6.2. У другому стовпчику таблиці 6.2: h_I , м – це глибина води в каналі на початку бокового водозливу, яку отримуємо в результаті розв'язання рівняння (6.30).

Порівнюючи значення довжин водозливу у табл. 6.2 (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 6.2 – 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		
						(6.30), (6.31)	(6.19)	(6.25)
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 з 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:

$$\theta(h_e) = \theta(h_e''). \quad (7.1)$$

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. 7.1).

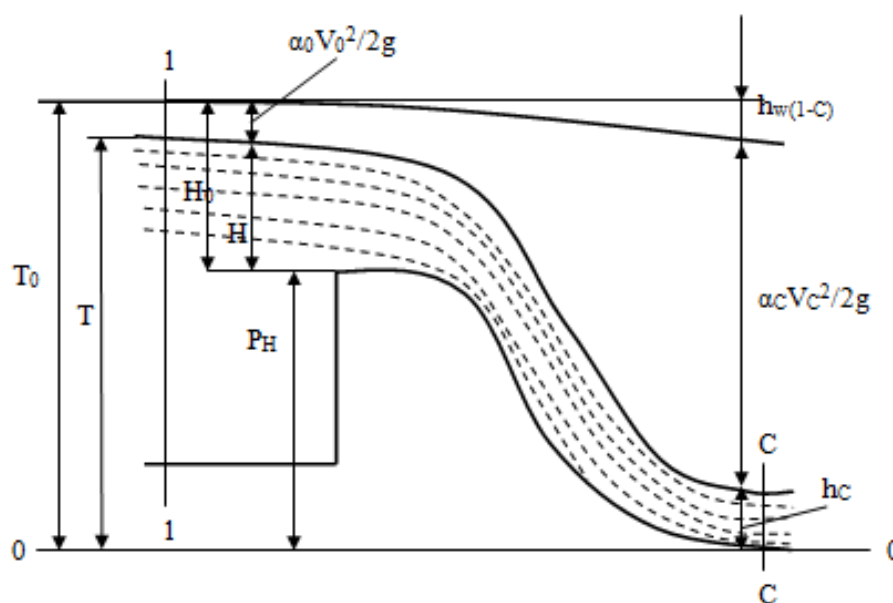


Рисунок 7.1 – Схема визначення глибини потоку h_c

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

$$\left. \begin{aligned} H_{п1} &= z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = T; \\ H_{п2} &= z_2 + \frac{P_2}{\rho g} = h_c. \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

Тоді рівняння Бернуллі відносно площини 0–0 набуває вигляду:

$$T + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha_c V_c^2}{2g} + h_{w(1-c)}, \quad (7.3)$$

або

$$T_0 = h_c + \frac{V_c^2}{2g} (\alpha_c + \xi), \quad (7.4)$$

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

$$T_0 = T + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g}, \quad (7.5)$$

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 тоді одержимо:

$$V_c = \varphi_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}, \quad (7.6)$$

де φ_c – коефіцієнт швидкості:

$$\varphi_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \xi}}. \quad (7.7)$$

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

$$\varphi_1 = 0,98 \cdot \varphi_c, \quad (7.8)$$

де

$$\varphi_c = 0,97 + 0,19 \lg \left(\frac{H_0}{P_H} \right) \quad (7.9)$$

Для перепадів у прямокутному руслі при атмосферному тиску під падаючою струминою:

$$\varphi_c = 0,989 - 0,039 \frac{P}{h_k}, \quad (7.10)$$

де h_K – критична глибина в прямокутному руслі. Формула (7.10) є апроксимацією дослідних даних Ю. С. Алексєєва при $P/h_K = 1 \dots 10$.

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

$$\varphi_c = 0,882 + 0,173 \lg \frac{H_0}{P}, \quad (7.11)$$

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

$$\varphi_c = 1,02 - (0,038 - 0,051 \sin \beta) \frac{P}{h_K}, \quad (7.12)$$

де h_K – критична глибина в прямокутному руслі.

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

$$Q = \varphi_c \omega_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}. \quad (7.13)$$

Вираз (7.13) – це загальне рівняння для визначення глибини h_c в стисненому перерізі в нижньому б'єфі гідротехнічної споруди.

В переважній більшості випадків русло нижнього б'єфу, безпосередньо за спорудою, має прямокутну форму. Для визначення глибини h_c в прямокутному руслі рівняння (7.13) запишемо у вигляді:

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{\varphi_c^2 2g(h_c B)^2}, \quad (7.14)$$

або

$$T_0 = h_c + \frac{q^2}{\varphi_c^2 2gh_c^2}, \quad (7.15)$$

де $q = Q/B$ – питома витрата;

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

Рівняння (7.14) та (7.15) це кубічні рівняння відносно h_c з вільним членом. Для визначення дійсного кореня цих рівнянь можна використати спосіб наближень:

$$h_c = \frac{q}{\varphi_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}}. \quad (7.16)$$

Тоді для першого наближення глибину h_c в правій частині рівняння (7.16) 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. 7.2).

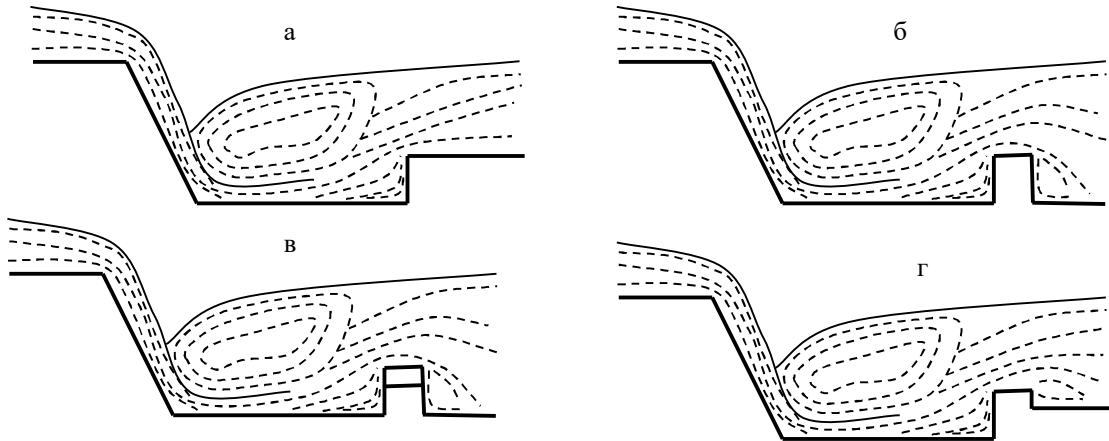


Рисунок 7.2 – Схеми простих гасителів енергії:

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 цьому висота стінки:

$$C = \sigma_3 \cdot h_2 - H_c, \quad (7.17)$$

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

h_2 – друга спряжена глибина стрибка при витраті Q_p ;

H_c – напір над водобійною стінкою, який визначають за формулою

$$H_c = \left(\frac{Q_p}{\sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \quad (7.18)$$

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:

$$h_n = h_n - C, \quad (7.19)$$

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:

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \left(1,8 \frac{h_n}{H_c} - 0,8\right)^2}, \quad (7.20)$$

де H_c, h_n – визначаються за формулами (7.18), (7.20). 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 (7.18) визначають витрати:

$$Q = \sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \sqrt{2g} \cdot H_c^{3/2}. \quad (7.21)$$

Результати розрахунків доцільно зводити в наступну таблицю 7.1.

Таблиця 7.1. – 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 7.1 будують графік $C = f(Q)$ (рис. 7.3), за допомогою якого визначають висоту стінки C .

Віддаль до водобійної стінки від перерізу з глибиною h_1 визначають за формулою

$$l_K = \beta \cdot l_C, \quad (7.22)$$

де l_C – довжина гідравлічного стрибка;
 $\beta = 0,7 \dots 0,9$ – коефіцієнт зменшення гідравлічного стрибка.

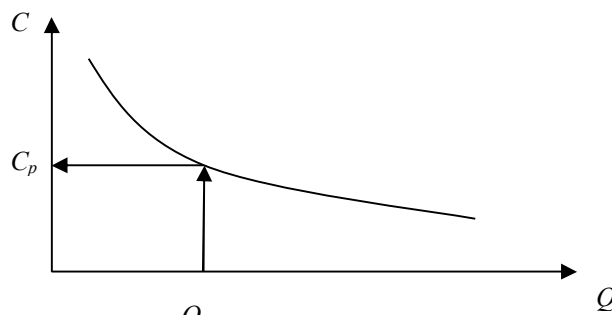


Рисунок 7.3 – Схема графіка $C = f(Q)$ для визначення висоти водобійної стінки

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:

$$h_{c1} = \frac{Q}{\varphi_C \cdot B_{CT} \sqrt{2g \cdot (T_{0C} - h_{c1})}}, \quad (7.23)$$

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

$$\varphi_C = 1,03 - 0,057 \cdot C / h_k, \quad (7.24)$$

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

$$T_{0C} = \sigma_3 \cdot h_2 + \frac{\alpha Q_p^2}{2g(B_{CT} \cdot \sigma_3 \cdot h_2)^2}, \quad (7.25)$$

де $\alpha = 1,1 \dots 1,2$ – 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 колодязь чи комбінований водобійний колодязь.

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. 7.4).

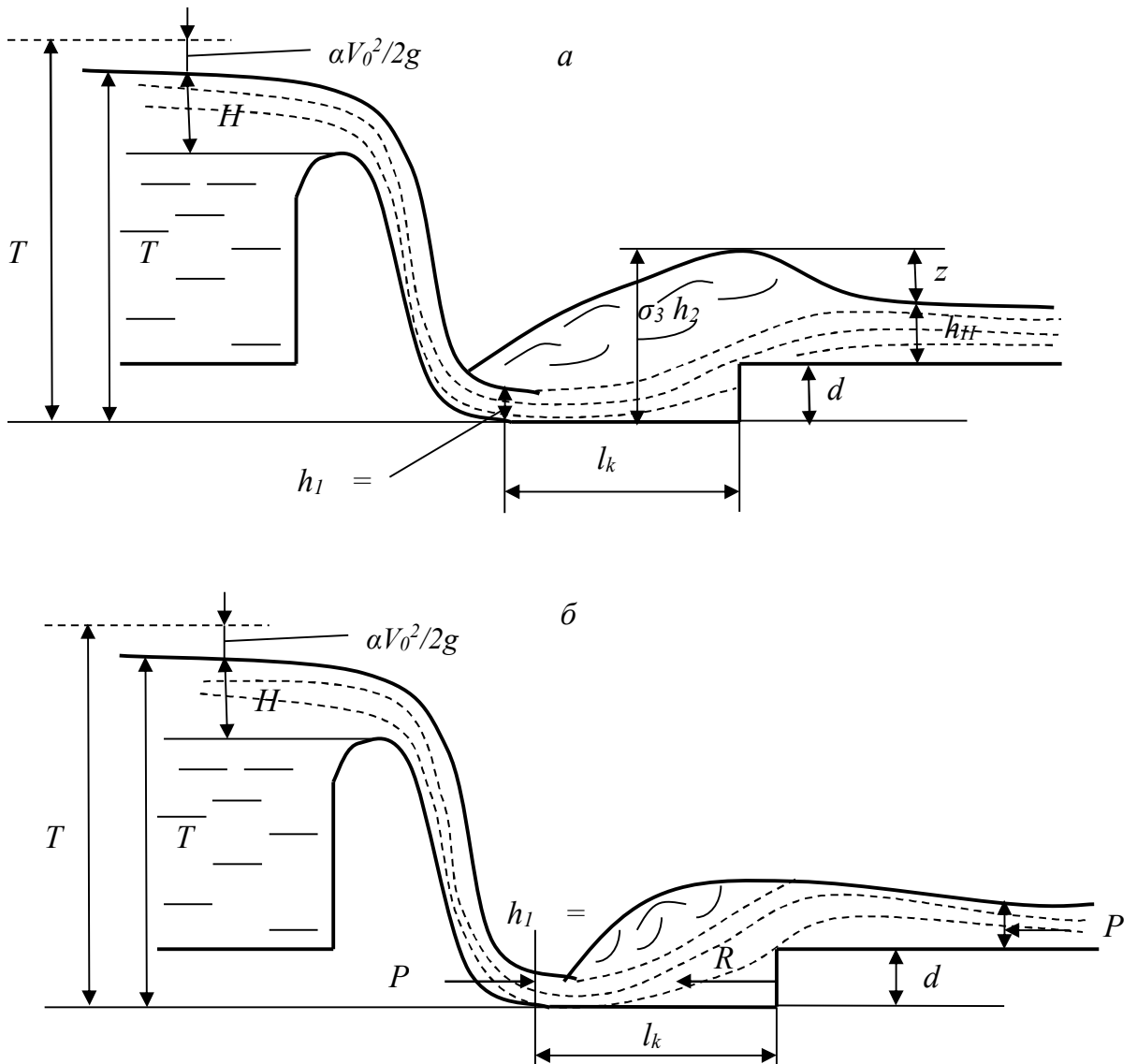


Рисунок 7.4 – Схема до розрахунку глибини водобійного колодезя:
а – за формулою (7.25), б – за формулою (7.34)

Глибину водобійного колодезя можна визначити кількома способами:

1. Припускають, що вихід з водобійного колодезя працює як затоплений водозлив з широким порогом (рис. 7.4, а).

Виходячи з того, що колодезь повинен утворити глибину води для затоплення стрибка, у відповідності зі схемою рисунку 7.4, а, глибину колодезя можна визначити за формулою:

$$d = \sigma_3 h_2 - h_H - z, \quad (7.26)$$

де $\sigma_3 = 1,05 \dots 1,1$ – 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:

$$z_0 = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_p}{\varphi_n B_K h_n} \right)^2, \quad z = z_0 - \frac{\alpha Q_p^2}{2g(\sigma_3 h_2 B_K)^2}, \quad (7.27)$$

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

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 колодязя. Для цього за наступною формулою уточнюють глибину в стисненому перерізі С-С:

$$h_{c1} = \frac{q}{\varphi_c \sqrt{2g(T_{01} - h_{c1})}}, \quad (7.28)$$

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 (7.26), (7.27) обчислюють глибину водобійного колодязя в другому наближенні.

Як правило третього наближення не виконують.

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

$$\alpha_0 \rho Q (V_2 - V_1) = P_1 - P_2 - R, \quad (7.29)$$

де R – реакція водобійного уступу, висота якого дорівнює d_0 (рис. 7.4, 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:

$$P_1 = \rho g y_{c1} \omega_1 = \rho g \frac{h_C}{2} h_C B = \rho g \frac{h_C^2}{2} B; \quad (7.30)$$

$$P_2 = \rho g y_{c2} \omega_2 = \rho g \frac{h_H}{2} h_H B = \rho g \frac{h_H^2}{2} B, \quad (7.31)$$

де B – ширина колодязя.

Підставимо значення P_1 і P_2 із (7.30) – (7.31) в рівняння (7.29) і розділимо всі члени рівняння на $\rho g B$.

Тоді отримаємо:

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{gB^2} \left(\frac{1}{h_H} - \frac{1}{h_C} \right) = \frac{h_C^2}{2} - \frac{h_H^2}{2} - \frac{R}{\gamma}, \quad (7.32)$$

де γ – питома вага рідини.

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

Рівняння (7.32) пишемо в такому вигляді:

$$\frac{h_K^3}{h_C} + \frac{h_C^2}{2} = \frac{h_K^3}{h_H} + \frac{h_H^2}{2} + \frac{R}{\gamma}. \quad (7.33)$$

Рівняння (7.34) – 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:

$$R = \gamma \cdot h_{цв} \cdot \omega_v = \gamma \left(h_2 - \frac{d_0}{2} \right) d_0, \quad (7.34)$$

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

Підставляючи значення R із (7.33) в рівняння (7.34), одержимо

$$d_0 = h_2 - \sqrt{h_2^2 - A}, \quad (7.35)$$

де параметр A дорівнює:

$$A = (h_H - h_C) \cdot \left(\frac{2h_K^3}{h_C \cdot h_H} - h_H - h_C \right). \quad (7.36)$$

Якщо довжина стрибка $l_K < l_C$, то реакція водобійного виступу R відрізняється від тієї, що обчислена за формулою (7.34).

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:

$$d = \sigma_3 d_0 + (\sigma_3 - 1) \cdot h_H, \quad (7.37)$$

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

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

Якщо глибину колодязя визначати за формулами (7.26) і (7.37), то довжину колодязя можна призначати в межах:

$$l_K = \beta l_C = (0,8 \dots 1,0) l_C. \quad (7.38)$$

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 непідтопленою з боку нижнього б'єфу. Тоді коефіцієнт підтоплення $\sigma_{II} = 1$.

4. Задаючись висотами водобійної стінки C , та використовуючи формули (7.17), (7.18), 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 7.2.

Таблиця 7.2 – 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 табл. 7.2 будуємо графік $C = f(Q)$ рис. 7.5 за допомогою якого при $Q = 55 \text{ м}^3/\text{с}$ знаходимо висоту водобійної стінки $C = 1,1 \text{ м}$.

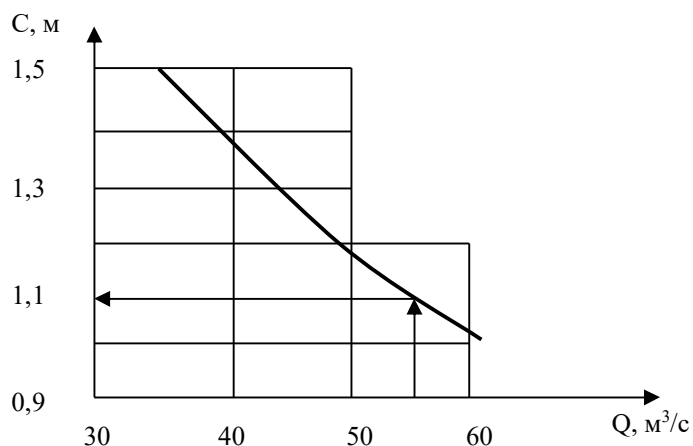


Рисунок 7.5 – Графік для визначення висоти водобійної стінки (до прикладу 1).

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. 8.1).

Експериментальними дослідженнями виявлено, що в гідравлічному стрибку можна виділити 2 зони (рис. 8.1):

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

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

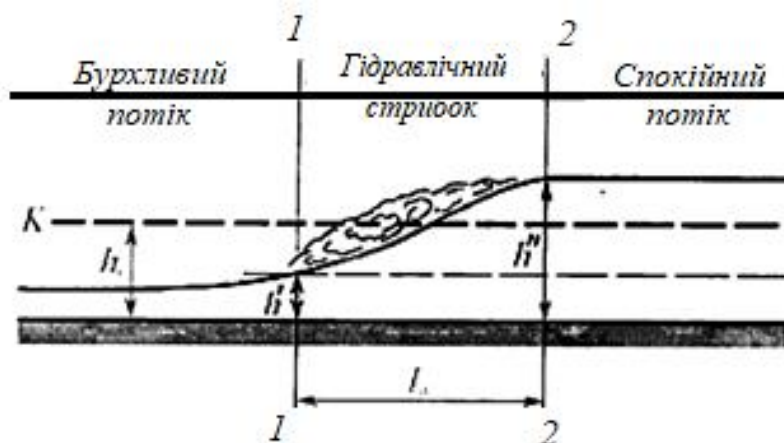


Рисунок 8.1 – Схема гідравлічного стрибка і післястрибкової ділянки

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

При вивченні гідравлічного стрибка будемо користуватися наступними позначеннями (рис. 8.1):

– 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 $a = h'' - h'$ – називається висотою стрибка;

– горизонтальна проекція поверхневого водовороту, що знаходиться між перерізами 1–1 і 2–2 l_c – називається довжиною стрибка.

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

– *досконалий гідравлічний стрибок*, для якого характерно ряд згасаючих хвиль, та характеризується гладкою вільною поверхнею;

– *хвилястий гідравлічний стрибок* (стрибок-хвиля) описується руйнуванням першої хвилі, появою вальца, аерацією потоку.

У руслах прямокутного перетину форма гідравлічного стрибка визначається залежно від співвідношення:

– $\left(\frac{h''}{h'}\right) > 3$ – досконалий гідравлічний стрибок;

– $\left(\frac{h''}{h'}\right) < 3$ – хвилястий гідравлічний стрибок.

У практичних розрахунках зазвичай форма стрибка визначається наступним чином:

– $h'' > 2 h'$ – досконалий гідравлічний стрибок;

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

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

– визначення спряжених глибин h' і h'' ;

– довжини гідравлічного стрибка l_c ;

– супроводжуючих гідравлічний стрибок втрат енергії h_ω .

Довжина трансформації епюр швидкостей називається *ділянкою спряження б'єфів*, і в загальному випадку дорівнює:

$$L_{дсб} = l_c + l_{пст} = l_c + (10...30)h_H, \quad (8.1)$$

де l_C – довжина гідравлічного стрибка;
 $l_{ПСТ}$ – довжина післястрибкової ділянки;
 h_n – глибина потоку в нижньому б'єфі.

8.1 Рівняння стрибкової функції

Спряжені глибини досконалого гідравлічного стрибка в призматичних руслах з довільною формою поперечного перерізу при малому ухилі дна водотоку визначаються з основного рівняння гідравлічного стрибка або допомогою графіка стрибкової функції (рис. 8.2).

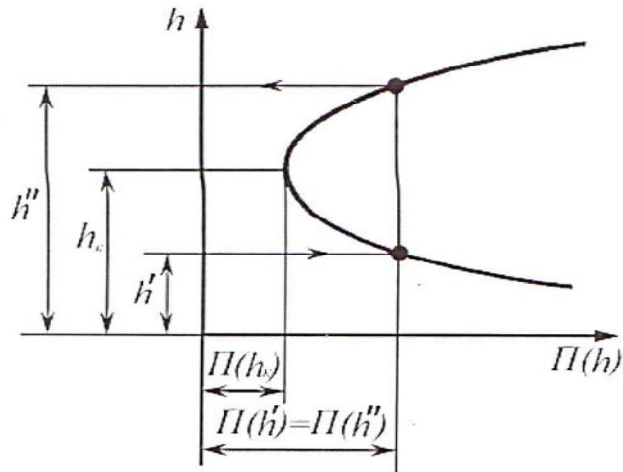


Рисунок 8.2 – Схема графіка стрибкової функції

При цьому зберігається рівність стрибкових функцій функцій $\Pi(h)$:

$$\Pi(h') = \Pi(h''). \quad (8.2)$$

Стрибкова функція визначається за формулою:

$$\Pi(h) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega} + y\omega, \quad (8.3)$$

де α_0 – коефіцієнт кількості руху потоку, в середньому $\alpha_0 = 1,03$ (при практичних розрахунках звичайно приймають $\alpha_0 = 1$);

ω – площа живого перерізу потоку з глибиною h ;

y – глибина занурення центра ваги відповідного перерізу під вільною поверхнею рідини, тобто геометричного центру площі ω .

Для русел трапецієдального поперечного перерізу глибина занурення центра ваги визначається за:

$$y = \frac{h(3b+2mh)}{6(b+mh)}, \quad (8.4)$$

а для русел прямокутного поперечного перерізу використовують такі формули:

$$\omega = bh; \quad y = \frac{h}{2}. \quad (8.5)$$

Якщо невідома друга спряжена глибина h'' , то розрахунок виконують, визначаючи спочатку критичну глибину h_k . Далі розраховують значення стрибкової функції за формулою:

$$\Pi(h_1) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_1} + y_{c1} \cdot \omega_1 \quad (8.6)$$

Задаючись глибинами $h > h_k$, обчислюють за рівнянням (8.6) значення функції $\Pi(h)$ і будують графік (рис. 8.3, а), з якого визначають глибину h'' .

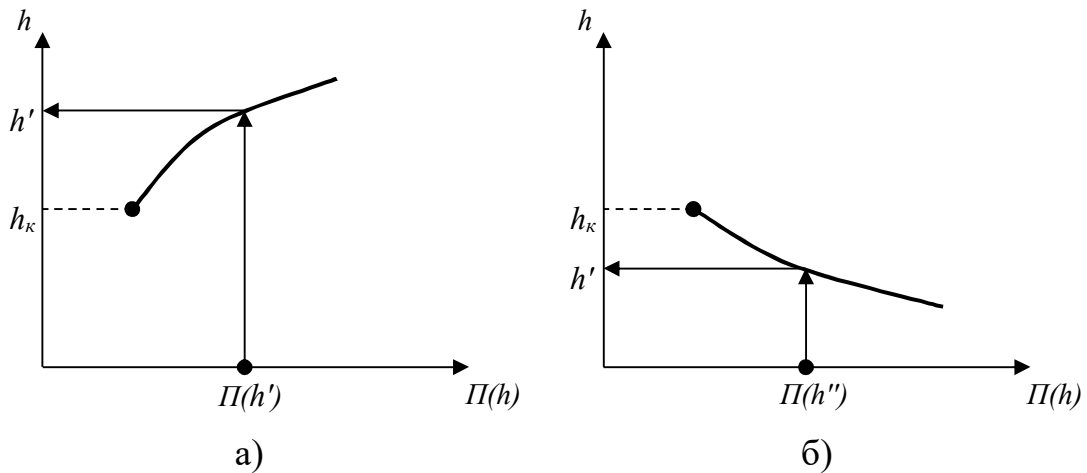


Рисунок 8.3 – Графік для визначення спряжених глибин стрибка

У разі, коли 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 (8.3) обчислюють значення функції $\Pi(h)$; будують графік $\Pi(h) = f(h)$ (рис. 8.3, б), за допомогою якого визначають невідому глибину стрибка h' .

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

$$h'' = \frac{1,2 h_k^2}{h' + 0,2 h_k} \quad ; \quad (8.7)$$

$$h' = 1,2 \frac{h_k^2}{h''} - 0,2 h_k \quad (8.8)$$

Залежності для визначення спряжених глибин стрибка в прямокутному руслі, можна отримати безпосередньо з рівняння (5.1) і (8.5):

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_1} + y_{c1} \cdot \omega_1 = \frac{\alpha_0 Q^2}{g \omega_2} + y_{c2} \cdot \omega_2 \quad (8.9)$$

Припустимо, що $\alpha_0 = \alpha$, де α – коефіцієнт кінетичної енергії. Тоді, враховуючи вище зазначене рівняння (8.9) має вигляд:

$$\frac{\alpha Q^2}{gbh_1} + b \cdot \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha Q^2}{gbh_2} + b \cdot \frac{h_2^2}{2}. \quad (8.10)$$

Розділимо всі члени рівняння (8.10) на ширину b :

$$\frac{\alpha Q^2}{gb^2 h_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha Q^2}{gb^2 h_2} + \frac{h_2^2}{2} \quad (8.11)$$

або

$$\frac{h_K^3}{h_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{h_K^3}{h_2} + \frac{h_2^2}{2}. \quad (8.12)$$

Рівняння (8.12) – це рівняння досконалого гідравлічного стрибка в прямокутному руслі з постійною шириною b . З рівняння (8.12) одержуємо:

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_K}{0,5h'} \right)^3} - 1 \right]; \quad (8.13)$$

$$h' = 0,5h'' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_K}{0,5h''} \right)^3} - 1 \right]. \quad (8.14)$$

У рівняннях (8.12) – (8.14) 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 проекція поверхневого водовороту (рис. 8.1), тобто довжина L ділянки, на якому відбувається різка зміна глибин потоку.

Довжину досконалого гідравлічного стрибка в прямокутному руслі при $b = const$ та похилі дна $i = 0$ можна визначити за формулами:

– М. Д. Чертоусова:

$$l_{II} = 10,3h' \left[\sqrt{\left(\frac{h_K}{h'} \right)^3} - 1 \right]^{0,81}, \quad (8.15)$$

– М. М. Павловського (якщо $3 < \sqrt{\Pi_{K1}} < 10$):

$$l_{II} = 2,5(1,9h'' - h'), \quad (8.16)$$

– С. К. Кузнєцова:

$$l_C = 16,7(h_K - h_1), \quad (8.17)$$

– О. М. Айвазяна:

$$l_c = \frac{8 \cdot (10 + \sqrt{Fr_1}) \cdot (h_2 - h_1)^3}{Fr_1 \cdot 4h_1 \cdot h_2}, \quad (8.18)$$

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:

$$Fr_1 = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{gh_1} > 3, \quad (8.19)$$

або

$$Fr' = \frac{Q}{g(\omega')^2 h'}. \quad (8.20)$$

Довжину гідравлічного стрибка в прямокутному руслі, що розширюється, можна визначити за формулою О.Ф. Васильєва

$$l_{cp} = \frac{l_c}{\left[1 + 0,052 \left(\frac{l_c}{r}\right)\right]}, \quad (8.21)$$

де l_c – довжина стрибка в прямокутному руслі, яку можна обчислити за формулою (8.16) або (8.17), якщо:

$$Fr_1 = \frac{\alpha}{gh_1^3} \left(\frac{Q}{\beta \cdot r}\right)^2, \quad (8.22)$$

де $r = b_1 / \left[2 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right]$;

b_1 – ширина дна при першій спряженій глибині;

$\beta = \beta^0 / 57,3$ – кут розширення, рад. При кутах розширення $\beta < 15^0$ маємо

$\beta r \approx b_1$. Тоді:

$$Fr_1 = \frac{Q^2}{gb_1^2 h_1^3} = \left(\frac{h_{к1}}{h_1}\right)^3. \quad (8.23)$$

Довжину стрибка в трапецеїдальному руслі з постійною шириною дна можна визначити за формулою С. Мейєрова:

$$l_{тр} = l_c \left(1 + 1,76 \frac{m(h_2 - h_1)}{\chi_1}\right); \quad l_{тр} = 10,3h'(\sqrt{Fr'} - 1)^{0,81} \left[1 + 1,76 \frac{m(h'' - h')}{\chi'}\right] \quad (8.24)$$

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 (8.20);

m – коефіцієнт закладання відкосів каналу.

Довжину стрибка в руслах з похилом дна $i > i_k$ наближено можна визначити за формулою:

$$l_{ct} = l_c(1 + k \cdot i), \quad (8.25)$$

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 $Fr_1 = (1,5 \dots 3)$, то найбільшу глибину хвилястого стрибка h_{XB} можна визначити за формулою М. С. Краснітського

$$h_{XB} = h_1 [1 + 0,72(Fr_1 - 1)]. \quad (8.26)$$

Співвідношення між спряженими глибинами хвилястого стрибка $\eta_2 = h_2/h_1$ за дослідженнями О. А. Рябенка можна визначити за формулою:

$$\eta_2 = \frac{1}{3} \left[2\beta_1 + Fr_1 - \sqrt{(2\beta_1 + Fr_1)^2 - 3(2\beta_1 + Fr_1 - 1)} \right], \quad (8.27)$$

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 брати, що $\beta_1 = 1$, а при $Fr_1 = (1,1 \dots 1,5)$ - $\beta_{1max} = 1,045$.

У разі, коли $\beta_1 = 1$, то:

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= \frac{1}{3} h_1 (1 + Fr_1) \\ h_{XB} &= h_1 \cdot Fr_1 \end{aligned} \right\}. \quad (8.28)$$

Втрати енергії в стрибку (втрачений напір), які супроводжують гідравлічний стрибок визначають за формулами:

– для русел прямокутного поперечного перерізу:

$$h_\omega = \frac{(h'' - h')^3}{4 \cdot h' \cdot h''}, \quad (8.29)$$

– для русел трапециїдального поперечного перерізу:

$$h_\omega = \left[h' + \frac{(V')^2}{2g} \right] - \left[h'' + \frac{(V'')^2}{2g} \right], \quad (8.30)$$

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 ухилі наближено визначається за формулою М. С. Краснітського:

$$a = 0,72h' \left[\frac{(h_k)^3}{h'} - 1 \right], \quad (8.31)$$

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 розраховують питому витрату в каналі $q = Q / b = 1/1 = 1 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$; при $\alpha = 1,1$. Тоді критична глибина:

$$h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 1^2}{9,81}} = 0,482 \text{ м}.$$

2. Сполучена глибина після стрибка:

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_k}{0,5h'} \right)^3} - 1 \right] = 0,5 \cdot 0,2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,482}{0,5 \cdot 0,2} \right)^3} - 1 \right] = 0,963 \text{ м}.$$

3. Форма стрибка: $\left(\frac{h_k}{h'} \right)^3 = (0,482/0,2)^3 = 14 > 3$, тоді гідравлічний стрибок – досконалий.

4. 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 складе:

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_k}{0,5h'} \right)^3} - 1 \right] = 0,5 \cdot 0,6 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,765}{0,5 \cdot 0,6} \right)^3} - 1 \right] = 0,96 \text{ м};$$

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») в 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 по формулі Н.Н. 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; $l_{II} = 2,9$ м.

Приклад 5. Визначити форму стрибка, його висоту й глибину після стрибка в руслі прямокутного поперечного перерізу, якщо витрата:

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 підбором, побудовою графіка стрибкової функції, наближеним і графоаналітичним способами А. Н. Рахманова (дод. Щ) невідому спряжену глибину в руслі трапеційдального 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, $l_{II} = 3,4$ м; б) $h' = 0,21$ м, $l_{II} = 4,9$ м.

ЗМ 3 РУХ ГРУНТОВИХ 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*.

Швидкістю 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 (α , отже, від її температури). Коефіцієнт фільтрації може змінюватися під впливом електричних і магнітних полів.

Орієнтовні значення коефіцієнта фільтрації наведені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – 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	Гравій	20 – 150
Льос	0,25 – 0,5	Галечник	100 – 500
Пісок пилюватий	0,5 – 1,0	Великий галечник 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 представити у вигляді

$$K_n = g K/\nu, \quad (9.1)$$

де ν – кінематична в'язкість рідини.

Тоді формулу Дарсі можна представити у вигляді:

$$U = gK_n/\nu. \quad (9.2)$$

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. 9.1).

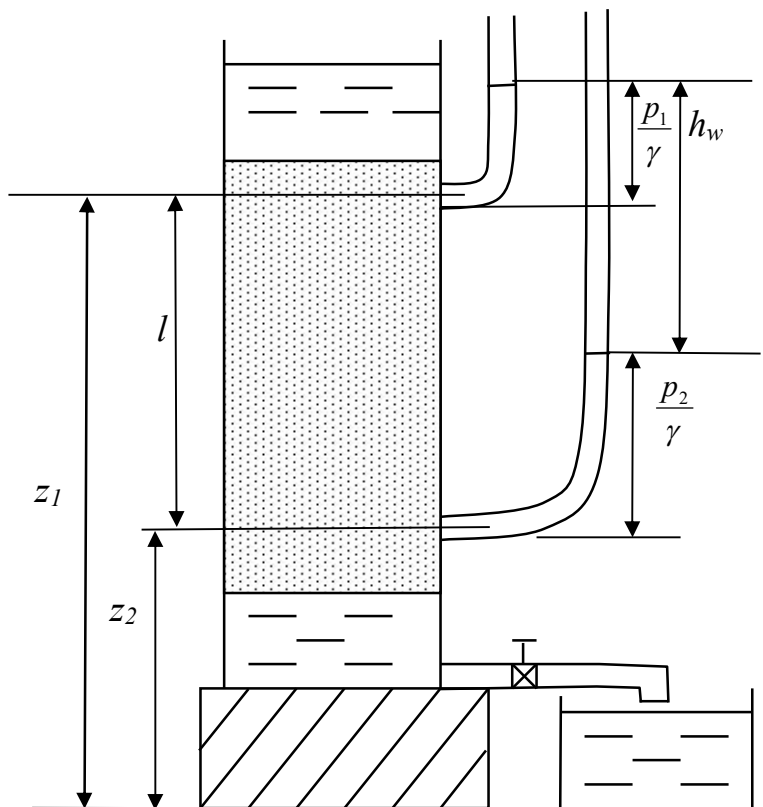


Рисунок 9.1 – Прилад Дарсі

У вертикальному відкритому циліндрі з площею поперечного перерізу W покладений 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 показання п'єзометрів, приєднаних до бічної стінки циліндра в межах частини обсягу, заповненого ґрунтом.

За формулою $U = Q / W$ визначають швидкість фільтрації, гідравлічний ухил $I = h_{mp} / l$ (h_{mp} – різниця показань у двох п'єзометрах на відстані l один від одного). За формулою (9.1) знаходимо коефіцієнт фільтрації k .

У деяких щільних ґрунтах (глини й важкі суглинки) фільтрація починається лише тоді, коли гідравлічний ухил (градієнт напору) перевищить початковий градієнт I_0 . Тоді замість формули (9.1) використовують формулу:

$$U = -k \left(\frac{d}{dl} + I_0 \right) = k(I - I_0). \quad (9.3)$$

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:

$$I = a + b. \quad (9.4)$$

або

$$U = c I, \quad (9.5)$$

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 (9.4), одержуємо формулу Дарсі. Якщо швидкості значні й можна зневажити членом a , одержуємо формулу, що нагадує Шезі:

$$U = K_{кр} I. \quad (9.6)$$

Формулу (9.5) 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 $K_{турб}$ складе:

$$K_{турб} = \left(20 - \frac{14}{d} \right) m \cdot d_m, \quad (9.7)$$

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 збігається з поверхнею непроникливого шару (рис. 9.2).

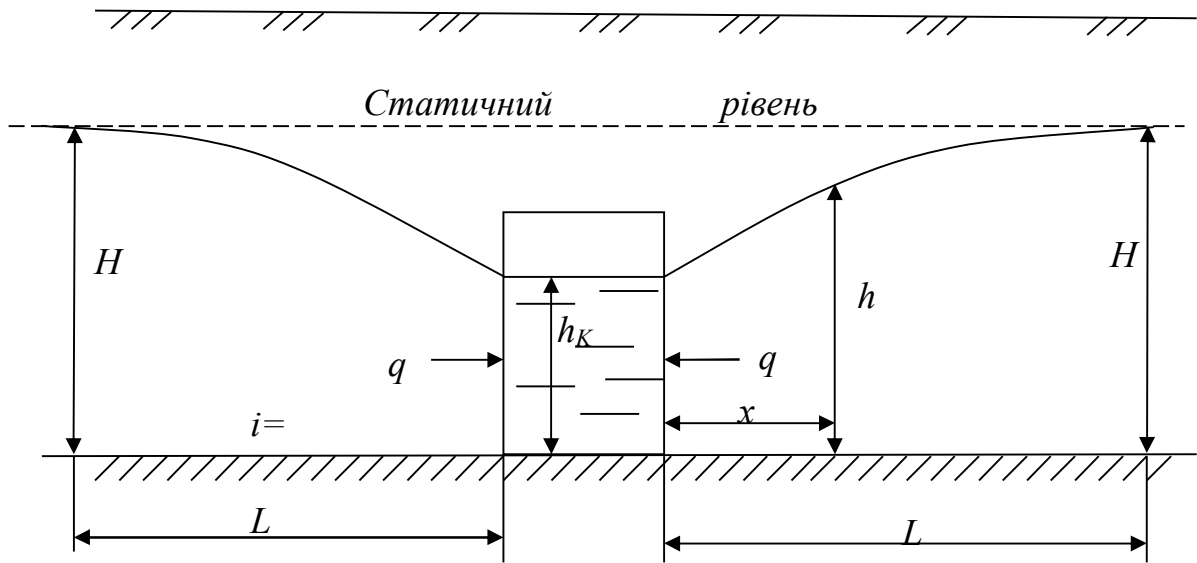


Рисунок 9.2 – Схема до розрахунку водозабірної галереї

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:

$$\frac{2q}{K}l = h_1^2 - h_2^2, \quad (9.8)$$

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 дорівнює:

$$q = \frac{K}{L}(H^2 - h_2^2), \quad (9.9)$$

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

$$Q = q \cdot B, \quad (9.10)$$

де B – довжина галереї.

Маючи витрату q , що обчислена за формулою (9.9) і використовуючи рівняння (9.8), отримаємо формулу для побудови кривої депресії:

$$h = \sqrt{\frac{2q}{K}x + h_2^2}, \quad (9.11)$$

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:

$$L = \frac{K}{q} [(H - a)^2 - h_r^2], \quad (9.12)$$

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. 9.3).

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

$$V = KJ = -K \frac{dh}{dr}, \quad (9.13)$$

а фільтраційна витрата:

$$Q = \omega \cdot V = 2\pi \cdot r \cdot K \frac{dh}{dr}. \quad (9.14)$$

Інтегруючи (9.14) в межах $r = r_0 \dots R$, $h = h_0 \dots H$, отримаємо:

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h_0^2)}{\ln(R/r_0)}, \quad (9.15)$$

де R – радіус впливу колодязя, величину якого наближено можна визначити за формулою Зіхарда:

$$R = 3000(H - h_0)\sqrt{K}. \quad (9.16)$$

Більш точно R можна визначити гідрогеологічними дослідженнями.

Приплив до недосконалого колодязя дорівнює:

$$Q = Q_B + Q_D, \quad (9.17)$$

де Q_B – приплив через бокову поверхню; Q_D – приплив через дно.

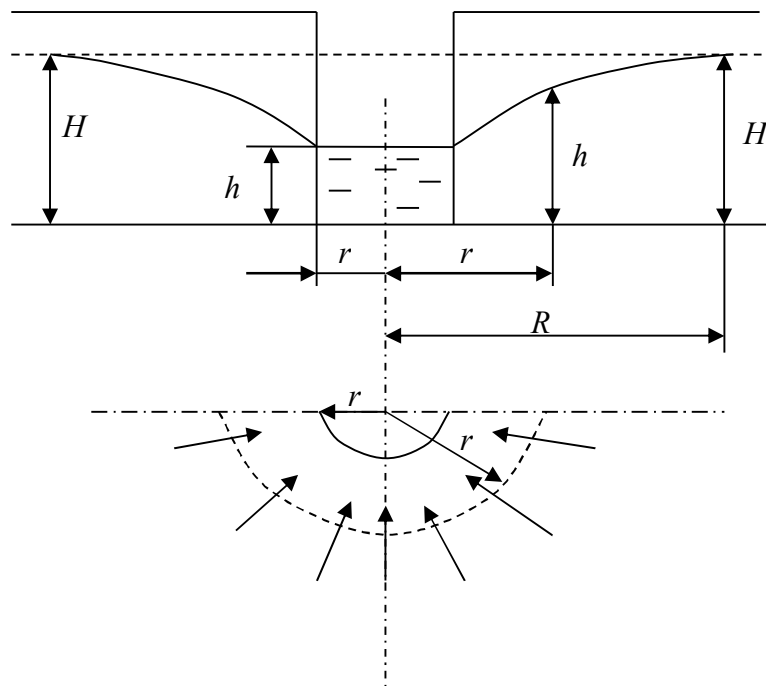


Рисунок 9.3 – Схема до розрахунку вертикального досконалого колодязя

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 ухил підстилаючого водо непроникаючого 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.

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Задачею для розрахунково-графічного завдання студентам передбачена задача визначення сили тиску на плоску чи криволінійну поверхню. Вихідні дані наведені нижче (табл. 1).

Вихідні дані для розрахунково-графічного завдання

Рух води у земляному каналі (рис. 1) рівномірний. Параметри каналу: пропускна здатність каналу Q ; ширина каналу по дну b ; коефіцієнт закладення відкосів m ; коефіцієнт шорсткості n ; ухил дна i_0 .

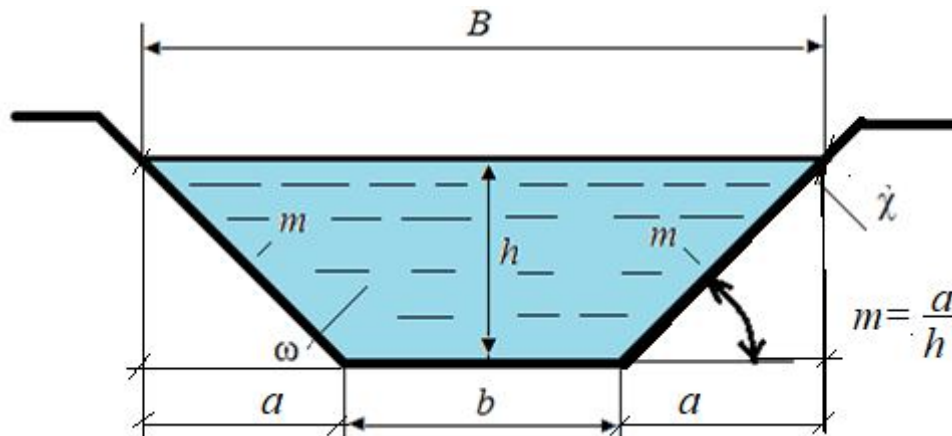


Рисунок 1 – Земляной канал

Необхідно:

1. Визначити нормальну глибину h_0 . Рішення виконати двома способами:
 - а) графоаналітичним – побудовою кривої витратної характеристики $K = f(h)$;
 - б) 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 ухил.
6. Встановити стан потоку в припущенні, що рух в каналі рівномірний.

Таблиця 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

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. Яковенко М. М. Інженерна гідравліка : методичні вказівки до практичних занять / М. М. Яковенко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2016. – 97 с.
5. Шевченко Т. О. Конспект лекцій з дисципліни «Інженерна гідравліка» / Т. О. Шевченко, М. М. Яковенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 90 с.
6. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький. – Львів : Світ, 1994. – 298 с.
7. Hydraulics. Hydraulics machines / [E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński and etc.]. – Lublin : Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.
8. Науменко І. І. Гідравліка / І. І. Науменко. – Рівне : Видавництво НУВГП, 2005. – 360 с.
9. Константинов Ю. М. Гідравліка / Ю. М. Константинов. – Київ : Вища школа, 1988. – 320 с.
10. 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.
11. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. С. Шивотовский, П. П. Иванов. – М. : Стройиздат. – 1987. – 414 с.
12. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – М. : Стройиздат. – 1987. – 440 с.
13. Науменко І. І. Гідравліка. Підручник / І. І. Науменко – Рівне : НУВГП. – 2005. – 475 с.
14. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учеб. пособие для ВУЗов. В 2-х кн. / Д. В. Штеренлихт. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 351 с.
15. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький, Н. П. Ленін. – Львів : Світ, 1994. – 264 с.

ДОДАТКИ

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:

студент гр. _____

Керівник:

к.т.н., доц. Галкіна О. П.

Національна шкала _____

Кількість балів: ___ Оцінка: ECTS ___

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°C)

Рідина	$\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Рідина	$\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
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

Характеристика поверхности	n	$1/n$
Лучшая цементная штукатурка; обструганные доски; деревянные трубы большого диаметра (из клепок) . . .	0,011	90
Стальные трубы большого диаметра с продольным сварным швом; весьма хорошая бетонировка; бетонные и железобетонные трубы, собранные из длинных звеньев с выглаженной внутренней поверхностью; неоструганные доски, хорошо пригнанные	0,012	83,3
Сварные трубы с поперечным клепальным швом; новые чугунные трубы; кладка из кирпича, покрытого глазурью	0,013	76,9
Чугунные трубы, бывшие в эксплуатации; бетонные монолитные трубы, выполненные в деревянных формах; бетонировка каналов в средних условиях	0,014	71,4
Кладка из кирпича с хорошо заделанными швами; облицовка из тесаного камня в средних условиях . . .	0,015	66,7
Сварные трубы внахлестку в продольном направлении и соединенные четырьмя рядами заклепок в поперечном направлении; клепаные трубы с внутренними накладками; бетонные трубы, собранные из коротких звеньев .	0,016	62,5
Глинистые грунты; каналы в лёссе, плотном гравии, плотной земле, затянутые илистой пленкой (в нормальном состоянии)	0,02	50
Каналы и туннели, чисто высеченные в скале (без заметных выступов); гравелистый песок, большие земляные каналы в средних условиях содержания и ремонта и малые — в хороших; булыжная мостовая (без раствора); реки в весьма благоприятных условиях (чистое, прямое в плане, совершенно незасоренное земляное русло со свободным течением)	0,025	40
Русла постоянных водотоков равнинного типа преимущественно больших и средних рек в благоприятных условиях состояния ложа и течения воды; земляные каналы в плохих условиях (например, местами с водорослями, булыжником или гравием по дну); каналы и туннели, высеченные в скале без сплошного сглаживания	0,030	33,3
Русла постоянных равнинных рек в обычных условиях, извилистые (отмели, промоины, местами камни); правильно, хорошо разработанное галечное русло горных рек в нижнем течении; каналы и туннели, высеченные в скале с грубыми выступами; русла (больших и средних рек), значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые, с беспокойным течением	0,04	25
Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (трава, кустарники); однородная наброска из камня крупностью от 15 до 25 см	0,05	20

Рисунок Е.1 – Значения коэффициента шерсткости за формулами Павловського і Манінга

Таблиця Е.2 – Значення коефіцієнтів шорсткості русел n

Характеристика покриття	n
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; гарна бетоніровка	0,012
Добра цегляна кладка, водосточні труби у нормальних умовах, трохи забруднені водопровідні труби	0,013
Забруднені водопровідні та водосточні труби; бетоніровка 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 груба бетоніровка; виключно гладка, добре оброблена скеля	0,017
Канали, покриті товстим стійким іловим шаром; ґрунти пропитані бітумом	0,018
Середня, задовільна бутова кладка; бруківка; канали, висічені у скелі; канали, затягнуті іловою плівкою у нормальному становищі	0,020
Канали у плотній глині; канали, затягнуті місцями переривчастою іловою 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 і в стіну	0,0275
Канали у дуже складних умовах, з неправильним профілем, забруднені камінням і водорослями	0,030
Земляні канали у порівняно поганих умовах, які заросли травою, з місцевими обвалами відкосів, місцями з водорослями, булижниками і гравієм на дні	0,030

Таблиця Е.3 – Значення коефіцієнта шорсткості

Характеристика поверхні	k _з , мм	n
Виключно гладкі поверхні (емальовані, глазуровані тощо)	0 (0 – 0,02)	0 – 0,007
Озалізнена цементна штукатурка або дуже чисто заглажена	0,1 (0,002 – 0,3)	0,007 – 0,010
Звичайна цементна штукатурка	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
Бетоніровка	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

Наименование грунтов или тип укрепления	Глубина потока h , м			
	0,4	1,0	2,0	3,0
Песок, 0,25—1,0 мм	0,4	0,5	0,6	0,7
Гравий, 5—10 мм	0,8	0,9	1,1	1,2
Галька, 25—40 мм	1,3	1,6	1,8	2,0
Булыжник, 100—150 мм	2,8	3,0	3,5	3,8
Лессовидные грунты (плотные)	0,8	1,0	1,2	1,3
Конгломерат, мергель, сланцы	2,0	2,5	3,0	3,5
Пористый известняк, известняковый песчаник	3,0	3,5	4,0	4,5
Доломитовый песчаник, плотный известняк, мрамор	4,0	5,0	6,0	6,5
Граниты, базальты, кварциты	15	18	20	22
Одерновка плашмя на малосвязном основании	1,7	2,0	2,3	2,5
Одерновка плашмя на связном основании	1,9	2,2	2,5	2,7
Одерновка в стенку	2,2	2,5	2,8	3,2
Грунты, стабилизированные битумом	2,3	2,7	3,0	3,3
Фашинные тюфяки	2,5	3,0	3,5	3,8
Мощение на мху (слой мха не менее 5 см):				
из булыжника размером 5 см	2,0	2,5	3,0	3,5
» » » 20 »	2,5	3,0	3,5	4,0
» » » 25 »	3,0	3,5	4,0	4,5
Мощение плашмя на слое глины 10—15 см и соломе (мху):				
камнем размером 13—14 см	2,3	2,9	3,4	3,8
» » 14—16 »	2,5	3,0	3,5	4,0
» » 16—18 »	2,8	3,3	3,8	4,3

Рисунок Ж.1 — Значения допустимых нерозмиваючих середніх в перерізі швидкостей течії води $V_{дон}$, м/с

Наименование грунтов или тип укрепления	Глубина потока h , м			
	0,4	1,0	2,0	3,0
Мошение на щебне (слой щебня не менее 10 см): из рваного камня размером 15 см	2,5	3,0	3,5	4,0
то же, размером 20 »	3,0	3,5	4,0	4,5
» » » 25 »	3,5	4,0	4,5	5,0
Мошение с подбором лица и грубым приколом на щебне (слой щебня не менее 10 см): камнем размером 20 см	3,5	4,5	5,0	5,5
» » 25 »	4,0	4,5	5,5	5,5
» » 30 »	4,0	5,0	6,0	6,0
Кладка из обыкновенного кирпича на цементном растворе	1,6	1,9	2,2	2,4
Бутовая кладка из средних пород	5,5	6,6	7,7	8,3
Кладка из клинкера	6,6	7,7	8,8	10,0
Облицовка из бетона и железобетона	6,6	8,0	9,2	10,0
Бетонные монолитные лотки с гладкой поверхностью	13	16	19	20
Деревянные лотки при надежном основании и течении вдоль волокон	10	12	14	16

Примечание. 1. Для промежуточных значений глубины величина допустимой скорости не интерполируется и определяется по ближайшему значению глубины.

2. Если в начальной стадии расчета глубина потока неизвестна, то для предварительных подсчетов принимается значение $V_{\text{доп}}$, соответствующее глубине 0,4 м.

3. Если глубина потока более 3 м, то первоначально для расчетов принимается значение $V_{\text{доп}}$, соответствующее глубине 3 м, которое уточняется при дальнейших расчетах.

Продовження рисунку Ж.1

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 (0,0 – 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 швидкості

R, м	Коефіцієнт шерохватості λ														R, м
	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,020	0,0225	0,025	0,0275	0,030	0,035	0,040	
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	25,2	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	14,2	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
1,00	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	1,00
1,10	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	1,10
1,20	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	1,20
1,30	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	1,30
1,40	112	103	95,5	88,9	83,1	73,7	69,7	60,3	56,3	50,9	46,4	42,7	36,9	32,5	1,40
1,50	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	1,50
1,60	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	1,60
1,70	127	117	108	101	94,3	83,8	79,4	71,8	64,3	58,3	53,3	49,1	42,6	37,7	1,70
1,80	131	121	112	105	97,9	87,0	82,4	74,6	66,9	60,6	55,5	51,2	44,4	39,3	1,80
1,90	136	125	116	108	101	90,1	85,4	77,4	69,3	62,9	57,6	53,2	46,2	40,9	1,90
2,00	140	129	120	112	105	93,2	88,4	80,1	71,8	65,1	59,7	55,1	47,9	42,5	2,00
2,20	149	137	127	119	111	99,1	94,0	85,3	76,5	69,5	63,7	58,9	51,2	45,5	2,20
2,40	157	145	135	126	118	105	99,5	90,3	81,1	73,7	67,6	62,5	54,4	48,4	2,40
2,60	165	152	142	132	124	110	105	95,2	85,5	77,7	71,3	66,0	57,5	51,1	2,60
2,80	173	160	148	138	130	116	110	99,8	89,7	81,6	74,9	69,3	60,5	53,8	2,80
3,00	181	167	155	145	136	121	115	104	93,8	85,3	78,4	72,5	63,3	56,4	3,00

ДОДАТОК П

Гидравлический радиус R , м	Коэффициент C , $m^{1/2}$ /с, при 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
0,2	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
0,3	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
0,4	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
0,5	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
0,6	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	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	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	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	108,1	92,6	72,5	62,5	51,2	43,6	38,1	33,9
5	111	95,1	74,2	64,1	52,4	44,6	38,9	34,6

Рисунок П.1 – Значення коефіцієнта Шезі за формулою Павловського

e, мм	Гидравлический радиус R, мм	Уклон 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

Рисунок П.2 – Коэффициенты Шези обчислені за формулою (3.12)

$k_{\text{э}},$ мм	Гидравли- ческий радиус $R,$ мм	Уклон 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
	1000	91,4	93,1	94,5	95,8	96,5	97,4	98,4
	2000	105	106	107	108	109	110	110
	3000	113	114	115	116	117	118	118
	5000	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
	1000	74,5	75	75,3	75,5	75,7	75,8	76
	2000	84,1	84,5	84,7	84,9	85	85	85,1
	3000	90,1	90,3	90,5	90,8	90,9	91	91,1
	5000	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	44,1	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
	1000	58	58	58	58	58,1	58,1	58,1
	2000	65	65	65,1	65,1	65,1	65,2	65,2
	3000	69,6	69,6	69,6	69,6	69,7	69,7	69,7
	5000	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
	1000	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4
	2000	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5
	3000	59,4	59,4	59,4	59,4	59,4	59,4	59,4
	5000	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5

Рисунок П.3 – Значения коэффициента C за формулою: $c = 25 \left(\frac{R}{K_{\text{э}} + 0,025 / \sqrt{Ri}} \right)^{1/6}$

ДОДАТОК Р

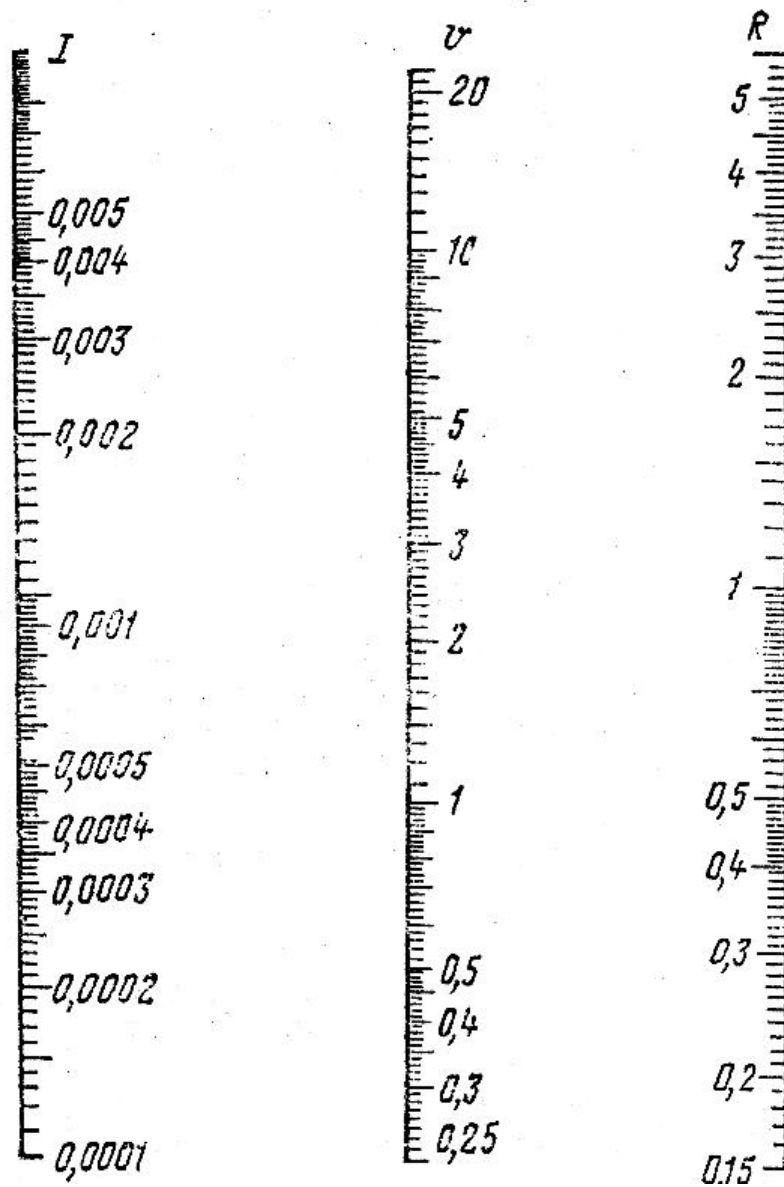


Рисунок Р.1 – Номограма для визначення швидкості течії у відкритих руслах за формулою Павловського при $n = 0,013$

ДОДАТОК С

Таблиця С.1 – Основні геометричні і гідравлічні елементи труб круглого поперечного перерізу при різному наповненні

$\Delta = \frac{h}{r}$	$B' = \frac{B}{r}$	$\omega' = \frac{\omega}{r^2}$	$\gamma' = \frac{\gamma}{r}$	$R' = \frac{R}{r}$	$f(\Delta) = \frac{Q}{r^2 \sqrt{r}}$	$\frac{\omega'}{\Delta^2} = \frac{\omega}{h^2}$
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	19,78	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.2 –
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 Ф.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 Ч

Таблиця Ч.1 – Залежність співвідношення n/b від m

m	n/b	m	n/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 Ш

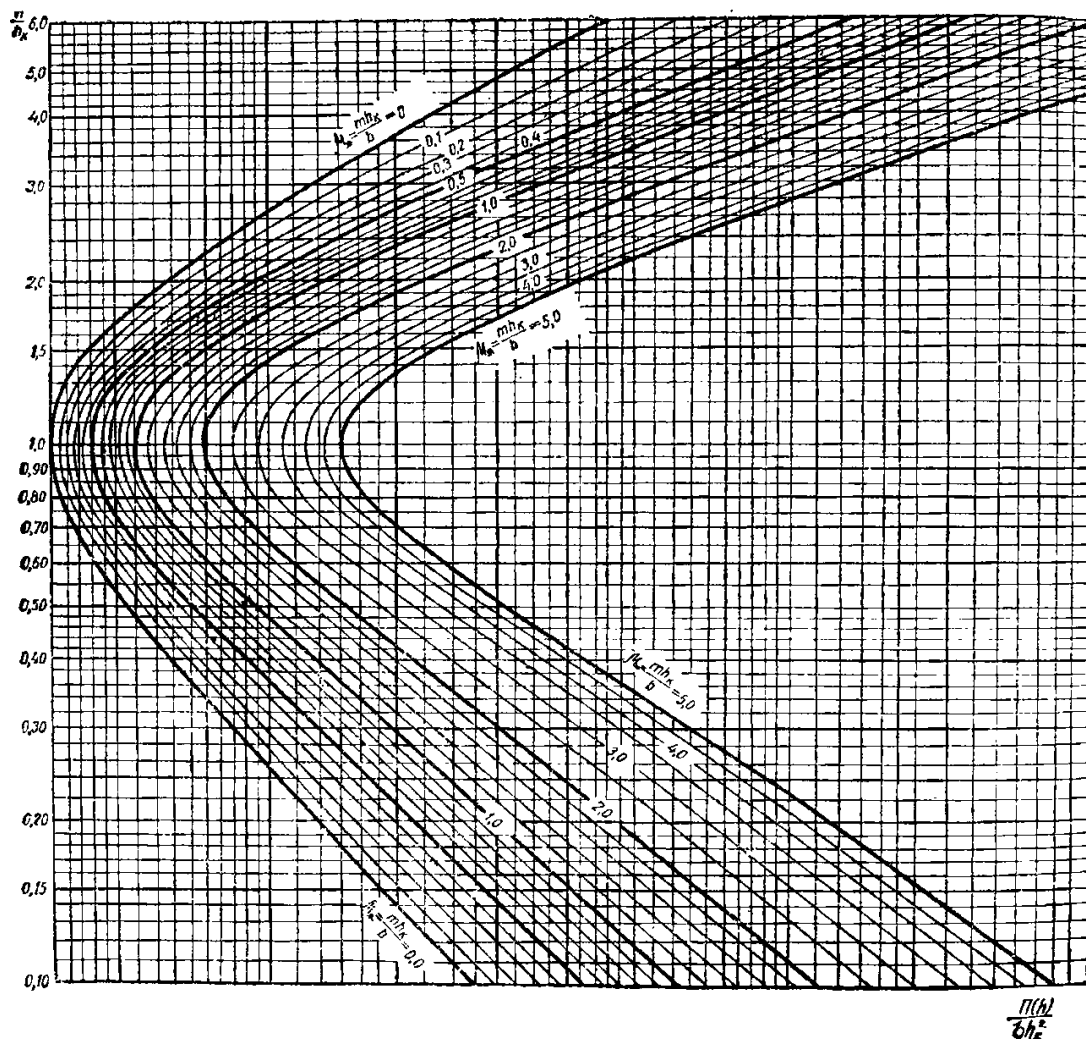
Таблиця Ш.1 – Таблиці для визначення критических глибин для русел прямокутного поперечного перерізу

$q, \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$	$h_{кр}, \text{ м}$	$q, \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$	$h_{кр}, \text{ м}$	$q, \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$	$h_{кр}, \text{ м}$
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

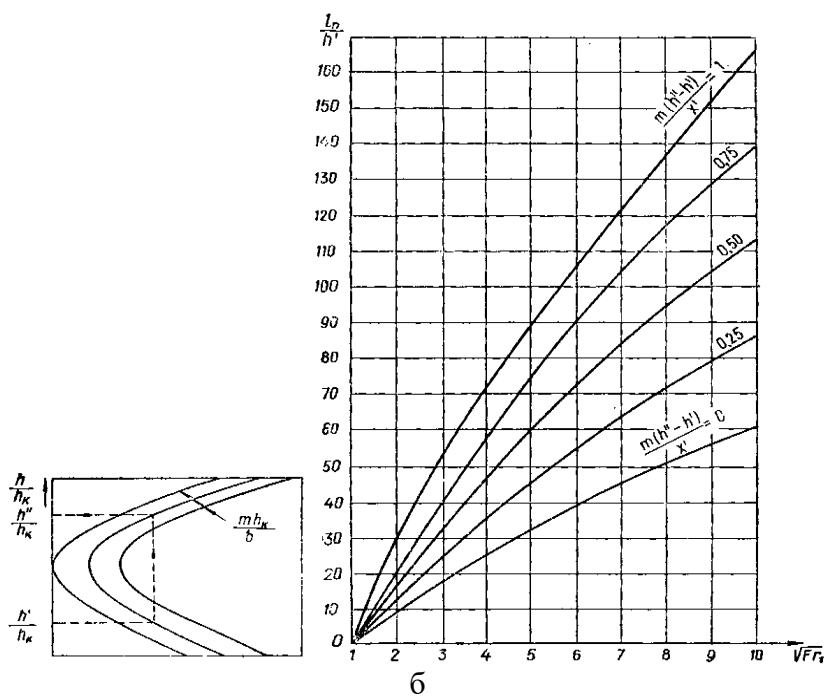
Таблиця Ш.2 – Таблиці для визначення критических глибин для русел трикутного поперечного перерізу

$Q/m, \text{ м}^3/\text{с}$	$h_{кр}, \text{ м}$	$Q/m, \text{ м}^3/\text{с}$	$h_{кр}, \text{ м}$	$Q/m, \text{ м}^3/\text{с}$	$h_{кр}, \text{ м}$
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	0,973
0,14	0,338	0,4	0,514	2,5	1,07
0,15	0,347	0,45	0,539	3	1,15

ДОДАТОК Щ



а



б

Рисунок Щ.1 – Графік А. Н. Рахманова для визначення глибин в руслах трапецієдального перерізу

Виробниче-практичне видання

Методичні рекомендації
до практичних занять та виконання розрахунково-графічного завдання
з навчальної дисципліни

«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»

*(для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання
спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,
спеціалізації (освітні програми) «Цивільна інженерія (Водопостачання та
водовідведення)», «Гідротехніка (Водні ресурси)»)*

Укладач **ГАЛКІНА** Олена Павлівна

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *О. П. Галкіна*

План 2019, поз. 115М.

Підп. до друку 27.01.2020. Формат 60 × 84/16
Друк на ризографі Ум. друк. арк. 5,6
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.