

**БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра « Будівельна механіка і гідравліка »**

**УСТАЛЕНИЙ НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ ВОДИ  
У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ**

**Методичний посібник з практичних розрахунків**

**Харків - 2012**

Методичний посібник розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Будівельна механіка і гідравліка» 7 грудня 2010 р., протокол № 7.

Методичний посібник рекомендовано для студентів спеціальності 7.100502 «Залізничні споруди, колія та колійне господарство» при виконанні відповідного індивідуального навчального завдання, що передбачено програмою дисципліни «Гідравліка».

Укладачі:

доценти В.А. Борщов,  
І.М. Єгорова

Рецензент

доц. М.А. Веревічева

## **УСТАЛЕНИЙ НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ ВОДИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ**

**Методичний посібник з практичних розрахунків**

Відповідальний за випуск Ляшенко О.Л.

Редактор Буранова Н.В.

---

Підписано до друку 07.02.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЧАСТИНА 1. Розрахунок усталеного нерівномірного руху води у відкритих руслах.....	5
1.1 Загальні положення.....	5
1.2 Постановка задачі розрахунку нерівномірного руху води в призматичному руслі й розрахункові співвідношення ...	6
1.3 Розрахунок нерівномірного руху води в призматичному руслі без використання ЕОМ.....	14
1.4 Розрахунок нерівномірного руху води в призматичному руслі з використанням ЕОМ.....	18
ЧАСТИНА 2. ПРАКТИЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	27
2.1 Порядок практичних розрахунків при виконанні індивідуального завдання.....	27
2.2 Приклад розрахунків.....	29
Список літератури.....	39
Додаток А. Варіанти індивідуального завдання до розрахунку усталеного нерівномірного руху води у відкритих руслах .....	40
Додаток Б. Середні значення коефіцієнта шорсткості $n$ .....	43

## ВСТУП

При вивченні студентами дисципліни «Гідравліка» постає необхідність розгляду методів розрахунку усталеного нерівномірного руху води у відкритих руслах. У навчальній літературі ця тема, що передбачена програмою вивчення дисципліни «Гідравліка», розкрита не досить повно. Тобто взагалі не пояснюються особливості математичної моделі усталеного нерівномірного руху води у відкритих руслах і, як правило, не наводяться описи алгоритмів і тексти програм для персональних електронних обчислювальних машин (ПЕОМ) – персональних комп'ютерів.

Даний методичний посібник складається із двох частин.

У першій частині детально розглянуто особливості математичної моделі усталеного нерівномірного руху води у відкритих призматичних руслах. Викладено метод розрахунку такого руху води в каналах полігонального поперечного перерізу систем водовідводу інженерних споруд залізниць як з використанням ПЕОМ, так і без їх застосування. Наведено описи алгоритмів і тексти програм для ПЕОМ реалізації зазначеного методу розрахунку.

У другій частині наведено порядок виконання практичних розрахунків усталеного нерівномірного руху води в каналі полігонального поперечного перерізу, а також як приклад виконання індивідуального завдання, яке передбачене програмою вивчення дисципліни «Гідравліка» студентами спеціальності 7.100502 «Залізничні споруди, колія та колійне господарство», розглянуто такий розрахунок.

Даний посібник і програми для ПЕОМ можуть бути використані при виконанні відповідних практичних гідравлічних розрахунків нерівномірного руху рідини у відкритих призматичних руслах систем водовідводу інженерних споруд залізниць.

# ЧАСТИНА 1. РОЗРАХУНОК УСТАЛЕНОГО НЕРІВНОМІРНОГО РУХУ ВОДИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ

## 1.1 Загальні положення

У відкритих руслах і трубопроводах із частковим заповненням перерізу (каналах замкнутого перерізу) рух рідини викликається дією на неї сили ваги і є безнапірним (потік має вільну поверхню). Характер такого руху рідини, форма й ухил вільної поверхні, глибина потоку залежать від типу, розмірів, форми перерізу русла й ухилу дна.

У системах водовідводу інженерних споруд залізниць найбільш поширені канали полігонального поперечного перерізу, частіше трапецієподібного й прямокутного, з постійними по довжині русла геометричними розмірами елементів перерізу. Такі русла називають призматичними.

Нерівномірний рух води в призматичному руслі з постійним ухилом дна виникає, як відомо, у випадках, коли в потоці є будь-які місцеві опори, наприклад, греблі, мости, водопропускні труби, перепади дна тощо, або змінюється шорсткість русла по довжині.

Форма вільної поверхні потоку при нерівномірному русі характеризується кривою вільної поверхні – слідом вільної поверхні на розташованій уздовж потоку вертикальній площині.

Залежно від причини, що викликає нерівномірний рух, швидкості бігу води можуть зменшуватися уздовж за течією, а глибини потоку збільшуватися або швидкості збільшуватися, а глибини зменшуватися. При цьому форми кривої вільної поверхні потоку будуть відповідно або кривою підпору (при збільшенні глибин уздовж потоку) або кривою спаду (при зменшенні глибин уздовж потоку).

Розрахунок нерівномірного руху рідини зводиться до побудови кривої вільної поверхні потоку. До появи цифрових електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) задача побудови кривої вільної поверхні потоку могла бути розв'язана різними наближеними способами, кожний з яких був заснований на певних припущеннях. Так, наприклад, спосіб Б.О. Бахметєва ґрунтується на припущенні показникової залежності між

відношеннями модулів витрати й глибинами потоку; спосіб М.М. Павловського ґрунтується на припущенні сталості відношення різниці глибин, обчислених для деяких перерізів даного потоку, до різниці відносних модулів витрати. Відомий наближений метод запропоновано В.І. Чарномським у 1914 р., який створено на поданні відповідного диференціального рівняння нерівномірного руху рідини рівнянням у скінченних різницях.

З появою ЕОМ відпала необхідність для зменшення обсягу обчислювальної роботи при розв'язанні зазначеної задачі вводити будь-які припущення. Вона може бути розв'язана чисельним методом на ЕОМ.

## 1.2 Постановка задачі розрахунку нерівномірного руху води в призматичному руслі й розрахункові співвідношення

Усталений плавномірний нерівномірний рух рідини у відкритих руслах, як відомо, описується диференціальним рівнянням [1-3]:

$$\frac{dE}{dl} = i_0 - I, \quad (1)$$

де  $E$  – питома енергія перерізу;  $l$  – відстань уздовж потоку (поздовжня координата);  $i_0$  – поздовжній ухил дна;  $I$  – гідравлічний ухил.

Переріз потоку (живий переріз) у трапецієподібному каналі при довільній глибині потоку  $h$ , ширині по дну  $b$  і коефіцієнті укосу  $m = ctg\psi$  (рисунок 1) характеризується такими параметрами: площею перерізу потоку (площею живого перерізу)

$$\omega = (b + mh) h; \quad (2)$$

змоченим периметром

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} ; \quad (3)$$

гідравлічним радіусом

$$R = \frac{\omega}{\chi} ; \quad (4)$$

шириною потоку по вільній поверхні (по верху)

$$B = b + 2mh . \quad (5)$$

Прямокутні й трикутні перерізи каналів являють собою окремі випадки трапецієподібного перерізу. Для прямокутного перерізу  $m = 0$ , для трикутного –  $b=0$ .

Як це видно з формул (2) – (5), для призматичних русел параметри перерізів потоку, що наведено, є функціями тільки глибини:  $\omega = \omega(h)$ ,  $\chi = \chi(h)$ ,  $R = R(h)$ ,  $B = B(h)$ . Внаслідок цього питома енергія  $E$  й гідравлічний ухил  $I$ , що входять у рівняння (1), у випадку призматичних русел змінюються також тільки як результат зміни глибини потоку:

$$E = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} ; \quad (6)$$

$$I = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} ; \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} , \quad (8)$$

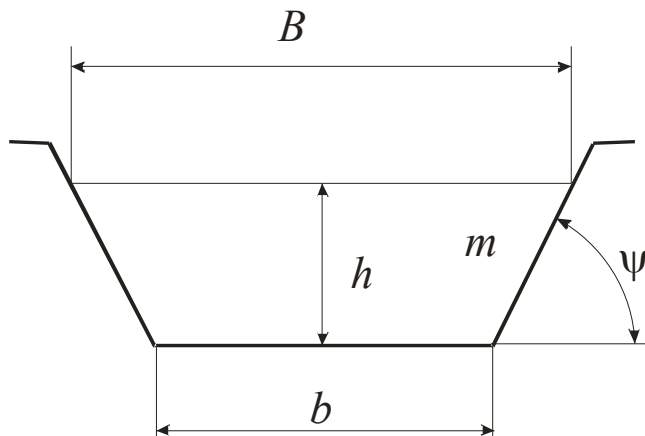


Рисунок 1

де  $\alpha$  – коефіцієнт Коріоліса – коефіцієнт нерівномірності

розподілу швидкості по перерізу (для турбулентного потоку у відкритих руслах можна прийняти  $\alpha=1,1$ );  $Q$  – об’ємна витрата;  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $C$  – коефіцієнт Шезі (формула за Маннінгом);  $n$  – коефіцієнт шорсткості.

Виходячи із цього, диференціальне рівняння (1) для призматичних русел із прямим ухилом дна ( $i_0 > 0$ ) одержують у вигляді

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}} \quad (9)$$

Задача розрахунку нерівномірного руху в призматичному руслі зводиться до інтегрування диференціального рівняння (9) при відомій початковій умові

$$h_{\text{поч}}=h(0) \text{ або } h_{\text{кин}}=h(l_k), \quad (10)$$

де  $h_{\text{поч}}$  – глибина потоку на початку ділянки нерівномірного руху;  $h_{\text{кин}}$  – глибина потоку наприкінці ділянки нерівномірного руху;  $l_k$  – довжина ділянки русла, на якій розраховується нерівномірний рух.

Значення глибини потоку на початку ділянки  $h_{\text{поч}}$  або наприкінці ділянки  $h_{\text{кин}}$  задається за умовами задачі.

Розв’язком задачі Коші (9), (10) є функція  $h=h(l)$ , що описує криву вільної поверхні, яка притаманна заданим умовам нерівномірного руху рідини. Знаючи функцію  $h=h(l)$ , можна визначити всі параметри потоку, що цікавлять. Наприклад, можна визначити середню швидкість у будь-якому перерізі потоку.

У такий спосіб задача розрахунку нерівномірного руху рідини в призматичному руслі фактично зводиться до задачі побудови кривої вільної поверхні – інтегральної кривої задачі Коші (9), (10). Ця крива проходить через точку, яку визначає початкова умова (10).



Сформульоване вище по суті відображує математичну модель (математичне формулювання) задачі розрахунку усталеного плавномірного нерівномірного руху рідини в призматичних руслах.

Якщо при деякому значенні глибини  $h$  ( $0 < h < \infty$ ) чисельник правої частини рівняння (9) обертається в нуль:

$$i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} = 0, \quad (11)$$

то при цьому

$$\frac{dh}{dl} = 0, \quad (12)$$

і ми здобуваємо очевидний розв'язок

$$h = \text{const}, \quad (13)$$

що відповідає рівномірному руху.

Рівність (11) являє собою рівняння рівномірного руху:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri_0}, \quad (14)$$

коренем якого є, як відомо, нормальна глибина потоку  $h_0$ . Виходячи із цього, маємо розв'язок виду (13):

$$h = h_0. \quad (15)$$

При рівності нулю знаменника правої частини рівняння (9) будемо мати

$$1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3} = 0. \quad (16)$$

Ця рівність являє собою, як відомо, рівняння критичного стану потоку:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega^3}{B}, \quad (17)$$

коренем якого є критична глибина  $h_K$ .

Таким чином при  $h=h_K$  функція, що розташована в правій частині рівняння (9), невизначена (має розрив), що порушує, як відомо, умови існування й єдиності розв'язку задачі Коші (9), (10).

Точки  $h=h_0$  і  $h=h_K$  розбивають весь проміжок можливих значень глибин  $0 < h < \infty$  на три інтервали, у кожному з яких при всіх значеннях  $h_{\text{поч}} \neq h_0$  і  $h_{\text{поч}} \neq h_K$  (або  $h_{\text{кін}} \neq h_0$  і  $h_{\text{кін}} \neq h_K$ ) задача Коші (9), (10) має єдиний розв'язок.

Форму (тип) кривої вільної поверхні й відповідні їй граничні глибини, що виділяють проміжок єдиності розв'язку зазначеної задачі  $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ , встановлюють за співвідношеннями між нормальною, критичною й заданою за умовою (10) глибинами потоку.

Як впливає із аналізу функції, що розташована в правій частині рівняння (9), при нерівномірному русі води в руслі із прямим ухилом дна ( $i_0 > 0$ ) можливі три випадки:

**1-й випадок**, якщо  $h_0 > h_K$  ( $i_0 < i_K$ ), де  $h_0$  – нормальна глибина потоку;  $h_K$  – критична глибина потоку;  $i_K$  – критичний ухил, для проміжку можливих значень глибин  $0 < h < \infty$  будемо мати три можливі форми вільної поверхні: криві  $a_1, b_1, c_1$  (рисунок 2);

**2-й випадок**, якщо  $h_0 < h_K$  ( $i_0 > i_K$ ), для проміжку можливих значень глибин  $0 < h < \infty$  будемо мати також три можливі форми вільної поверхні: криві  $a_2, b_2, c_2$  (рисунок 3);

**3-й випадок**, якщо  $h_0 = h_K$  ( $i_0 = i_K$ ), для проміжку можливих значень глибин  $0 < h < \infty$  будемо мати дві можливі форми вільної поверхні: криві  $a_3, c_3$  (рисунок 4).

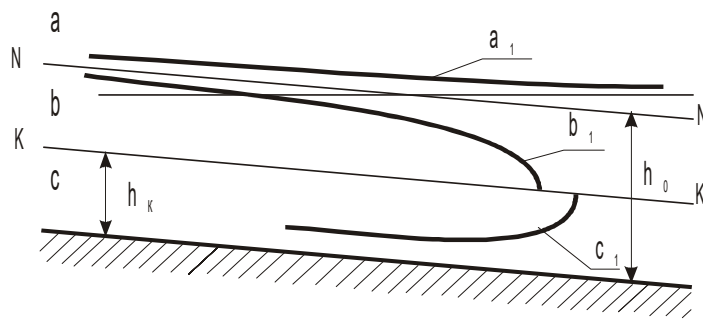


Рисунок 2

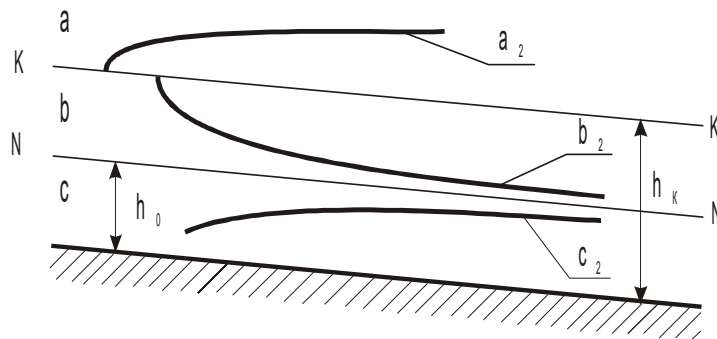


Рисунок 3

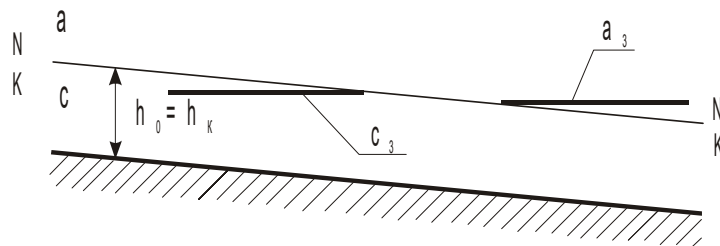


Рисунок 4

Характерні особливості наведених на рисунках 2 – 4 кривих вільної поверхні зазначено в таблиці 1. Глибина  $h$  нерівномірного потоку з кривою вільної поверхні, що відповідає конкретним умовам руху рідини, не може бути більше  $h_{max}$  і менше  $h_{min}$ , які наведено у цій таблиці.

Якщо одна із границь проміжку зміни глибин на розрахунковій ділянці нерівномірного руху дорівнює  $h_0$ , то крива

вільної поверхні асимптотично наближається до лінії нормальної глибини N-N ( $h \rightarrow h_0$ ), коли  $l \rightarrow \pm\infty$ . При цьому довжина кривої вільної поверхні прагне нескінченності. Тому для одержання в інженерних розрахунках кінцевих значень довжин кривих у якості відповідної граничної глибини в цьому випадку замість  $h_0$  беруть трохи більше значення глибини в розрахунковому перерізі, тобто  $h = (1,01 \div 1,05)h_0$ , коли крива прагне зверху до лінії нормальної глибини, і трохи менше, тобто  $h = (0,95 \div 0,99)h_0$ , коли крива прагне до лінії нормальних глибин знизу.

Таблиця 1 – Особливості кривих вільної поверхні потоку із прямим ухилом дна

Крива вільної поверхні		Співвідношення між глибинами	Граничні глибини	
тип	характер		$h_{min}$	$h_{max}$
a <sub>1</sub>	Угнута крива підпору	$h_K < h_0 < h$	$h_0^*$	$h_{KIH}$
b <sub>1</sub>	Опукла крива спаду	$h_K < h < h_0$	$h_K$	$h_0^{**}$
c <sub>1</sub>	Угнута крива підпору	$h < h_K < h_0$	$h_{Поч}$	$h_K$
a <sub>2</sub>	Опукла крива підпору	$h_0 < h_K < h$	$h_K$	$h_{KIH}$
b <sub>2</sub>	Угнута крива спаду	$h_0 < h < h_K$	$h_0^*$	$h_K$
c <sub>2</sub>	Опукла крива підпору	$h < h_0 < h_K$	$h_{Поч}$	$h_0^{**}$
a <sub>3</sub>	Горизонтальна пряма підпору	$h_K = h_0 < h$	$h_K$	$h_{KIH}$
c <sub>3</sub>	Горизонтальна пряма підпору	$h < h_K = h_0$	$h_{Поч}$	$h_K$

\* – у розрахунках  $(1,01 \div 1,05)h_0$ ;    \*\* – у розрахунках  $(0,95 \div 0,99)h_0$

При деяких умовах нерівномірного руху рідини глибина потоку  $h$  може не досягти вказаних у таблиці 1 граничних значень глибин. У цьому випадку розрахунок виконують на ділянці

нерівномірного потоку з кривою вільної поверхні неповної довжини із граничними глибинами, які визначаються з урахуванням початкової умови (10) та є відмінними від вказаних у таблиці. Так, наприклад, при нерівномірному русі рідини із кривою вільної поверхні типу  $b_1$ , якщо задано початкову умову  $h = h_{Поч}$  ( $h_0 > h_{Поч} > h_K$ ), то розрахунок виконують для проміжку  $h_{Поч} \geq h \geq h_K$  ( $h_{min} = h_K$  і  $h_{max} = h_{Поч}$ ); при нерівномірному русі рідини із кривою вільної поверхні типу  $b_2$ , якщо задано початкову умову  $h = h_{КИН}$  ( $h_K > h_{КИН} > h_0$ ), то розрахунок виконують для проміжку  $h_K \geq h \geq h_{КИН}$  ( $h_{min} = h_{КИН}$  і  $h_{max} = h_K$ ).

Зазначені вище особливості математичної моделі нерівномірного руху рідини у відкритих руслах призводять до необхідності виконувати розрахунок такого руху у певному порядку:

1 Визначити нормальну глибину  $h_0$  – дійсний (позитивний) корінь рівняння (14).

2 Визначити критичну глибину  $h_K$  – дійсний (позитивний) корінь рівняння (17).

3 З'ясувати форму (тип) кривої вільної поверхні потоку, зіставляючи між собою нормальну, критичну й задану за умовою (10) глибини потоку (дивись співвідношення між глибинами, що наведені в таблиці 1).

4 З урахуванням характерних особливостей кривої вільної поверхні, форму (тип) якої з'ясовано, а також початкової умови (10) визначити граничні глибини  $h_{min}$  і  $h_{max}$  на розрахунковій ділянці потоку.

5 Проінтегрувати диференціальне рівняння (9) на проміжку єдиності розв'язку задачі Коші (9), (10)  $h_{min} \leq h \leq h_{max}$ .

Необхідно зазначити, що загальний розв'язок диференціального рівняння (9) знайти в аналітичному виді (у вигляді рівняння функціонального зв'язку між  $h$  і  $l$ ) не є можливим. Зазначену задачу Коші розв'язують чисельно.

### 1.3 Розрахунок нерівномірного руху води в призматичному руслі без використання ЕОМ

**Нормальну й критичну глибини потоку** без використання ЕОМ звичайно знаходять графічним методом.

Нормальна глибина, як було зазначено вище, є коренем рівняння рівномірного руху (14). Це рівняння можна зобразити як

$$K_0 = K(h), \quad (18)$$

де  $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_0}}$ ;  $K(h) = \omega C \sqrt{R}$ ;  $K_0$  – модуль витрати, що відповідає нормальній глибині потоку  $h_0$ ;  $K(h)$  – модуль витрати, що відповідає довільній глибині  $h$  (функція глибини  $h$ ).

Для визначення нормальної глибини потоку для даного русла будується графік функції  $K(h)$  (рисунок 5). Потім на осі ординат знаходять значення цієї функції, яке дорівнює обчисленому за заданими  $Q$  і  $i_0$  значенню  $K_0$ .

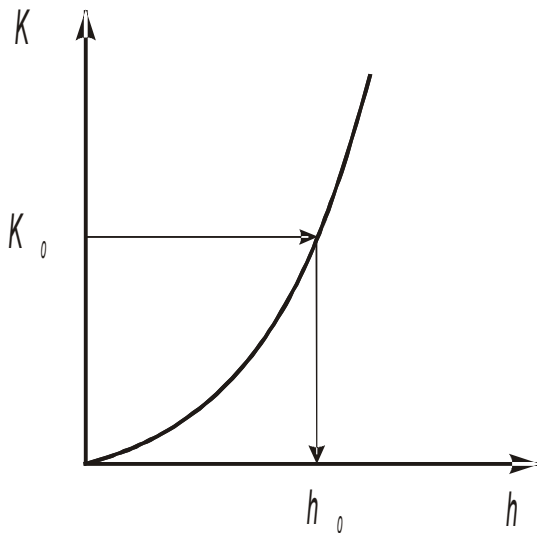


Рисунок 5

Глибина, яка отримана за графіком при  $K = K_0$ , буде дорівнювати нормальній глибині  $h_0$ . У цьому легко переконатися, перевіривши, що

$$\omega_0 C_0 \sqrt{R_0 i_0} = Q, \quad (19)$$

де  $\omega_0, C_0, R_0$  – площа перетину потоку, коефіцієнт Шезі та гідравлічний радіус відповідно при глибині  $h_0$ .

Для прямокутного русла ( $\omega = bh$  і  $B=b$ ) з рівняння критичного стану потоку (17) маємо

$$h_e = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}. \quad (20)$$

У загальному ж випадку при визначенні критичної глибини

будується графік  $\frac{\omega^3}{B}$  – функції змінної  $h$  (рисунок 6). Потім на осі ординат знаходять значення  $\frac{\omega^3}{B}$ , що дорівнює обчисленому за заданою об'ємною витратою значенню  $\frac{\alpha Q^2}{g}$ . Глибина, отримана за графіком при

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{\hat{e}}^3}{B_{\hat{e}}}, \quad (21)$$

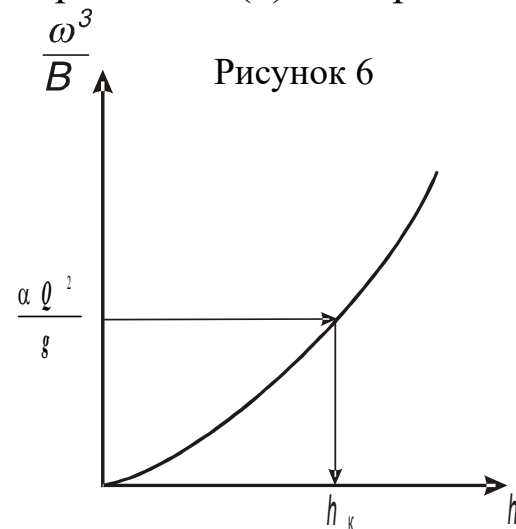
буде дорівнювати критичній глибині  $h_{\hat{e}}$ . Індекс "K" при  $\omega_{\hat{e}}$  і  $B_{\hat{e}}$  показує, що параметри відповідають глибині, яка дорівнює критичній, тобто  $\omega$  і  $B$  обчислюються при  $h = h_{\hat{e}}$ .

Знайдені значення глибин  $h_0$  і  $h_{\hat{e}}$ , а також початкова умова (10) використовуються для встановлення форми (типу) кривої вільної поверхні (див. співвідношення між глибинами в таблиці 1) і граничних глибин  $h_{min}$  і  $h_{max}$  на ділянці нерівномірного руху.

Інтегрування диференціаль-ного рівняння (9) на проміжку єдиності розв'язку задачі Коші (9), (10)  $h_{min} \leq h \leq h_{max}$  виконують чисельно, одержуючи в результаті координати кривої вільної поверхні у вигляді ряду значень  $l$  і  $h$ .

**Визначення координат кривої вільної поверхні при відомих значеннях граничних глибин є задачею, що вимагає великого обсягу обчислювальної роботи.**

Відомий наближений метод, який запропоновано В.І. Чарномським (1914 р.), що дозволяє при відносно невеликих витратах часу з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначати координати кривої вільної поверхні в руслі будь-якої форми.



Суть цього методу полягає в поданні диференціального рівняння (1) рівнянням у скінченних різницях:

$$\frac{\Delta E_i}{\Delta l_i} = i_0 - \bar{I}_i, \quad (22)$$

де  $\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$ ;  $\Delta l_i = l_{i+1} - l_i$ ;

$$\bar{I}_i = \frac{Q^2}{\bar{\omega}^2 \bar{C}^2 \bar{R}}; \quad \bar{\omega} = \frac{\omega_i + \omega_{i+1}}{2};$$

$$\bar{C} = \frac{C_i + C_{i+1}}{2}; \quad \bar{R} = \frac{R_i + R_{i+1}}{2};$$

$i=1, \dots, m$ ;  $m$  – число елементарних інтервалів різної довжини  $\Delta l_i$ , на які розбивається ділянка нерівномірного руху, що розглядається (рисунок 7).

Алгоритм використання цього методу полягає в такому:

1 У межах від  $h_{min}$  до  $h_{max}$  задаються рядом глибин  $h_i$  ( $i=1, \dots, m+1$ ) із кроком їхньої зміни

$$\Delta h = |h_{i+1} - h_i| = \frac{h_{max} - h_{min}}{m}. \quad (23)$$

Від вибору значення  $m$  залежить точність визначення координат кривої вільної поверхні та обсяг обчислень (зі збільшенням  $m$  підвищується точність розрахунків, але збільшується їхній обсяг).

При цьому для кривої спаду

$$h_{i+1} = h_i - \Delta h, \quad h_1 = h_{max}; \quad (24)$$



для кривої підпору

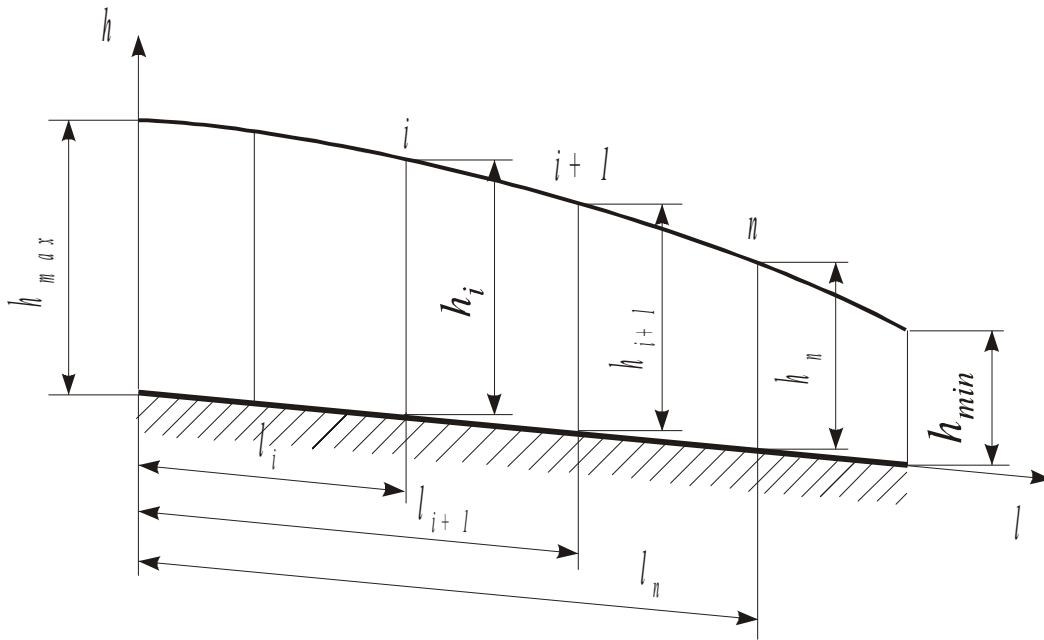


Рисунок 7

$$h_{i+1} = h_i + \Delta h, \quad h_1 = h_{\min}. \quad (25)$$

2 Знаходять зміни питомої енергії перетину  $\Delta E_i$  й ухил тертя  $\bar{I}_i$  для кожної пари сусідніх глибин  $h_i$  і  $h_{i+1}$  із зазначеного ряду.

3 Знаходять усі відстані між перерізами потоку із глибинами  $h_i$  і  $h_{i+1}$

$$\Delta l_i = \frac{\Delta E_i}{i_0 - \bar{I}_i}. \quad (26)$$

4 Знаходять усі поздовжні координати (відстані), що відповідають  $n$ -м перерізам потоку (рисунок 7) із глибинами  $h_n$  ( $n=2, \dots, m+1$ )

$$l_n = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l_i. \quad (27)$$

5 За координатами  $\{l_n, h_n\}_{n=1}^{m+1}$  ( $l_1=0, h_1=h_{\max}$  для кривої спаду

або  $h_l = h_{min}$  для кривої підпору) будують криву вільної поверхні потоку (графік зміни глибин по довжині).

#### 1.4 Розрахунок нерівномірного руху води в призматичному руслі з використанням ЕОМ

Нормальну й критичну глибини потоку на ЕОМ звичайно визнають за програмою, що реалізує алгоритм якого-небудь чисельного методу розв'язання нелінійних рівнянь відповідно до рівномірного руху рідини й критичного стану потоку у відкритих руслах.

Рівняння (14) і (17) можна зобразити у вигляді

$$\varphi(h) = A - f(h) = 0, \quad (28)$$

де  $A$  – величина, що не залежить від глибини  $h$ ;  $\varphi(h)$ ,  $f(h)$  – функції глибини.

Для рівняння рівномірного руху рідини (14):  $A = K_0$ ,  $f(h) = K(h)$  (див. рівняння (18)). Для рівняння критичного стану потоку (17):

$$A = \frac{\alpha Q^2}{g}, \quad f(h) = \frac{\omega^3}{B} \quad (\text{див. рівняння (17)}).$$

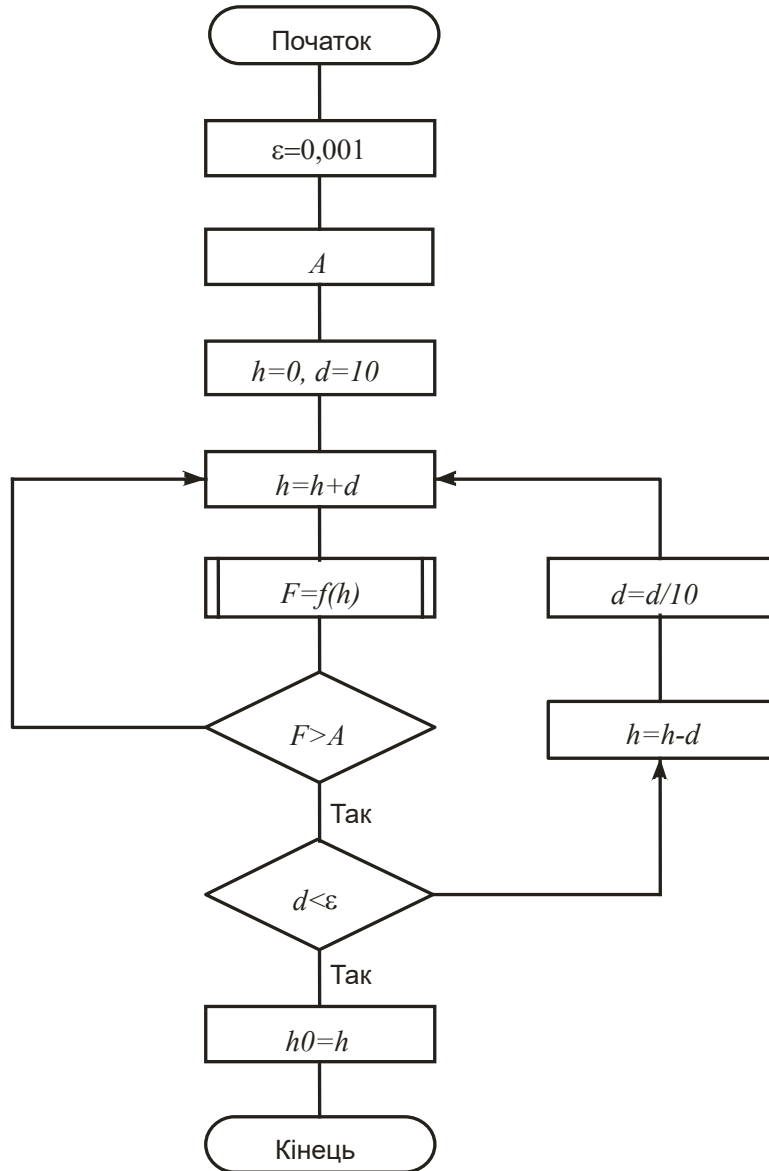
З усіх ітераційних методів (методів послідовного наближення) для одержання розв'язків цих рівнянь щонайкраще підходить метод порозрядного (подекадного) наближення.

Блок-схема алгоритму цього методу знаходження розв'язку рівняння виду (28) з монотонно зростаючою функцією  $f(h)$  наведена на рисунку 8, а вихідні коди програм, що реалізують його мовою програмування Pascal для рівнянь (14) і (17), – на рисунках 9,10.

Переваги методу порозрядного наближення при чисельному розв'язанні рівнянь виду (28) виявляються в тім, що функція  $f(h)$  обчислюється на кожному кроці ітерацій тільки один раз і не потрібно обчислень похідної. Крім того, при розв'язанні рівнянь (14) і (17) не потрібно попередньо з'ясовувати інтервал локалізації кореня рівняння. Ітераційний процес сходиться за кінцеве число циклів, що залежить від необхідної точності

обчислень. Метод дає всі правильні цифри результату в межах заданої похибки обчислень  $\varepsilon$ .

Алгоритм розв'язання рівнянь (14) і (17), які перетворено до виду (28), вищезазначеним методом, наведено нижче.



procedure NG (Q,b,m,n,i<sub>0</sub>: real; var h<sub>0</sub> : real);

{ Підпрограма обчислення нормальної глибини потоку h<sub>0</sub>.

Вхідні дані: Q – об'ємний витіток; m – коефіцієнт укосу; n – коефіцієнт шорсткості;  
i<sub>0</sub> – ухил дна.

Вихідні дані: h<sub>0</sub> – нормальна глибина потоку. }

```

const
    Eps=0.001; { Похибка обчислення  $h_0$  }

var
    H, Omega, hi, R, C, K0, K, A, F, D :real; { Змінні, які
        використовуються усередині підпрограми }

begin
    K0:=Q/sqrt(i0); {Значення модуля витрати при  $h = h_0$ }
    A:=K0;
    h:=0; { Початкове наближення глибини }
    d:=10; { Початковий крок збільшення глибини }
    repeat { Початок циклу за умовою  $d < Eps$  }
    repeat { Початок циклу за умовою  $F > A$  }
        h:=h+d;
        { Параметри перетину потоку: }
        Omega:=(b+m*h)*h; { площа перетину }
        hi:=b+2*h*sqrt(1+m*m); { змочений периметр }
        R:=Omega/hi; { гідравлічний радіус }
    { ..... }
        C:=1/n*exp(1/6*ln(R)); { Коефіцієнт Шезі }
        K:=Omega*C*sqrt(R); {Значення модуля витрати
            при довільній глибині  $h$  }

        F:=K; {  $F=f(h)$  }
    until (F-A)>0; { Закінчення циклу за умовою  $F > A$  }
    if d>=Eps then
        begin
            h:=h-d;
            d:=d/10;
        end;
    until d<Eps { Закінчення циклу за умовою  $d < Eps$  - }
    h0:=h; { кінець обчислень }
end;

```

Рисунок 9

procedure KG ( Q,b,m :real; var hk :real );  
 { Підпрограма обчислення критичної глибини потоку  $h_k$ .  
 Вхідні дані: Q – об’ємна витрата; b – ширина русла по  
 дну; m – коефіцієнт укусу.  
 Вихідні дані:  $h_k$  – критична глибина потоку }

```

const
    Eps=0.001;    { Похибка обчислення  $h_k$  }
    Alfa=1.1;    { Коефіцієнт Коріоліса }
    g=9.81;      { Прискорення сили ваги }

var
    h, Omega, Bb, A, F, D :real; { Змінні, які
        використовуються усередині підпрограми }

begin
    A:=Alfa*sqrt(Q)/g;
    h:=0;    { Початкове наближення глибини }
    d:=10;   { Початковий крок збільшення глибини }
    repeat { Початок циклу за умовою  $d < Eps$  }
        repeat { Початок циклу за умовою  $F > A$  }
            h:=h+d;
            { Параметри перетину потоку: }
            Omega:=(b+m*h)*sqrt(h); { площа перетину }
            Bb:=b+2*m*sqrt(h);      { ширина потоку по верху }
            { ..... }
            F:=exp(3*sqrt(h)*ln(Omega))/Bb; {  $F=f(h)$  }
        until (F-A)>0; { Закінчення циклу за умовою  $F > A$  }
    if d>=Eps then
        begin
            h:=h-d;
            d:=d/10;
        end;
    until d<Eps { Закінчення циклу за умовою  $d < Eps$  - }
    hk:=h;      { кінець обчислень }
end;

```

Рисунок 10

1 Задається похибка обчислення кореня рівняння (при  $\varepsilon = 0,001$  результат обчислень буде містити правильні цифри до розряду тисячних включно).

2 Обчислюється значення величини  $A$ , що не залежить від глибини  $h$ .

3 Задаються початкові наближення глибини  $h=0$  м і кроку її зміни  $d=10$  м (первинний приріст глибини чиниться в розряді десятків).

4 Обчислюється нове значення глибини  $h=h+d$ .

5 Обчислюється значення функції  $F=f(h)$ .

6 При невиконанні умови  $F>A$  розрахунок повторюється за пунктом 4.

7 При невиконанні умови  $d < \varepsilon$  відновлюється попереднє значення глибини  $h=h-d$ , зменшується крок її зміни до одиниці наступного молодшого розряду ( $d=d/10$ ) і розрахунок повторюється за пунктом 4.

8 Обчислене значення глибини  $h$  приймається як корінь рівняння ( $h_0=h$ ), який знайдено із заданою точністю.

**Визначення координат кривої вільної поверхні** при відомих значеннях граничних глибин може бути зведене до обчислення на ЕОМ визначеного інтеграла.

Диференціальне рівняння (9) після розподілу змінних набуде вигляду:

$$dl = \frac{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}} dh. \quad (29)$$

Розв'язання рівняння (29) може бути зведене до обчислення визначеного інтеграла із змінною верхньою межею:

$$l = \int_{h_{\max}}^h \eta(h) dh, \quad (30)$$

$$\text{де } \eta(h) = \frac{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}} dh; \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}.$$

Функція (30) являє собою інтегральне вираження функції, що є зворотною відносно до функції  $h=h(l)$ , яка описує криву вільної поверхні нерівномірного потоку із граничними глибинами

$h_{min}$  і  $h_{max}$ . При цьому за початок відліку поздовжньої координати  $l$  обрано перетин потоку з максимальною глибиною  $h_{max}$ , а позитивний напрямок відліку збігається з направленистю потоку. У зв'язку з цим, для кривої підпору при  $dh/dl > 0$  координата  $l < 0$ , для кривої спаду при  $dh/dl < 0$  координата  $l > 0$ .

Таким чином, визначення координат кривої вільної поверхні потоку звелось до обчислення значень функції (30) для деякого ряду значень глибин  $h$ , що задовольняють умову  $h_{min} \leq h \leq h_{max}$ .

Блок-схема алгоритму визначення координат кривої вільної поверхні потоку (обчислення значень функції (30) для ряду глибин, що встановлюється за значеннями  $h_{min}$  і  $h_{max}$ ) наведена на рисунку 11, а вихідний код програми, що реалізує цей алгоритм мовою програмування Pascal, – на рисунку 12.

Координати кривої вільної поверхні обчислюються на ЕОМ у такому порядку:

1 Задається число інтервалів розбиття розрахункової ділянки нерівномірного потоку  $k$ , що визначає число розрахункових точок кривої вільної поверхні (на рисунках 11 та 12 прийнято  $k=10$ , тобто обчислюються координати десяти точок кривої вільної поверхні).

2 Обчислюється крок зміни глибини при переході від однієї розрахункової точки до іншої  $\Delta h = (h_{max} - h_{min}) / k$ .

3 Приймаються значення координат точки кривої вільної поверхні в початковому розрахунковому перерізі (значення лічильника числа точок  $i=1$ ):  $l_1=0$  і  $h_1=h_{max}$ .

4 Встановлюється значення лічильника (параметра) циклу  $i=2$ .

5 Обчислюється глибина в  $i$ -му перерізі потоку  $h_i = h_{i-1} - \Delta h$ .

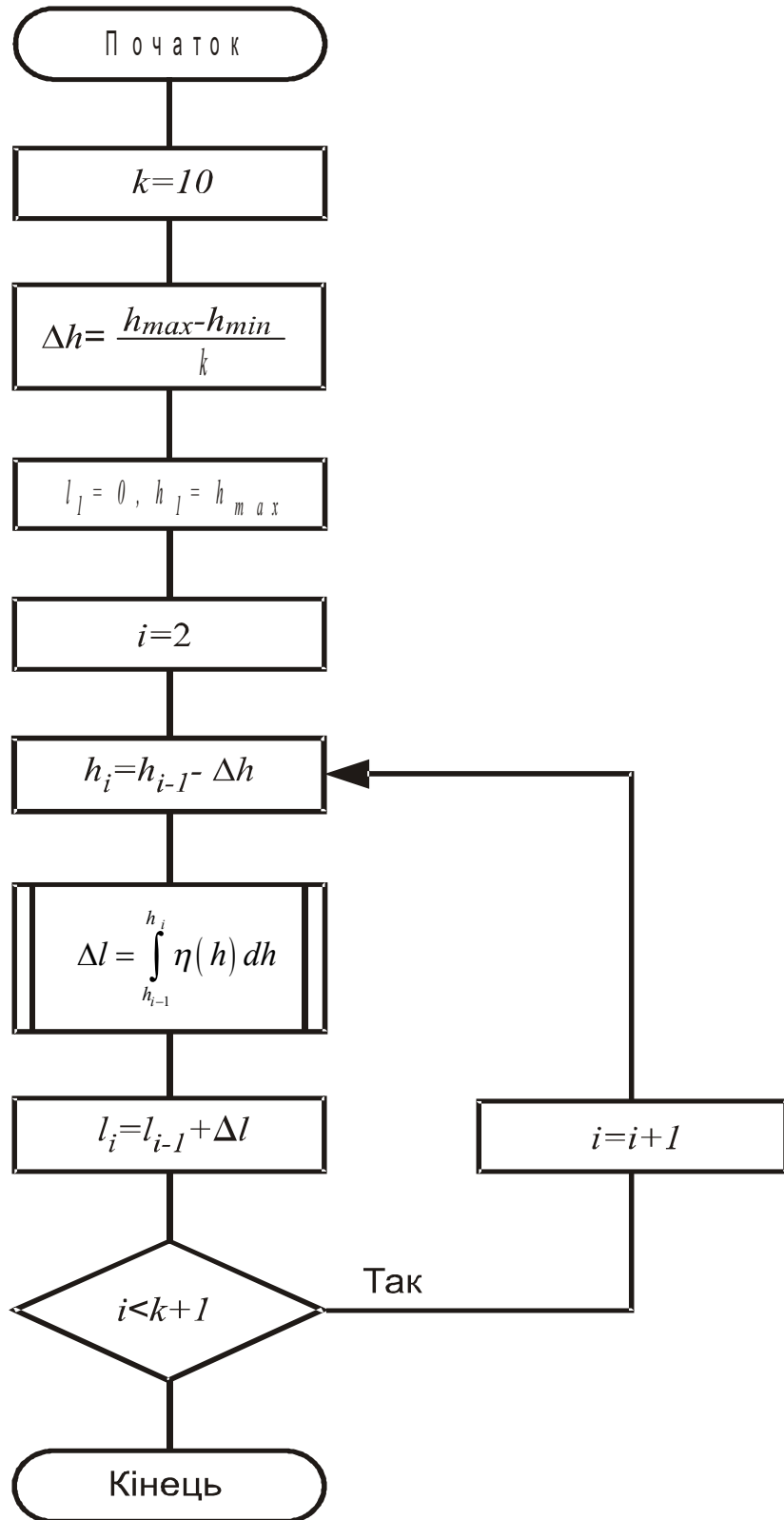


Рисунок 11

6 Обчислюється поздовжня координата  $\Delta l$ , що визначає положення  $i$ -го перетину потоку відносно  $(i-1)$ -го, як визначений



інтеграл (30) з нижньою й верхньою межами інтегрування  $h_{i-1}$  і  $h_i$  відповідно. При цьому використано відомий метод чисельного інтегрування – метод трапецій. Фактичний крок зміни глибини при чисельному інтегруванні становить  $\Delta h/20$ , тобто при  $k=10$  дорівнює  $(h_{max}-h_{min})/200$ . Ця величина визначає точність обчислення координати  $\Delta l$  і, в остаточному підсумку, точність обчислення поздовжніх координат точок кривої вільної поверхні.

7 Обчислюється поздовжня координата  $i$ -го перерізу  $l_i = l_{i-1} + \Delta l$ .

8 Перевіряється умова закінчення циклу обчислень. При виконанні умови  $i < k+1$  розрахунок триває для наступної точки за пунктом 5. При цьому лічильник (параметр) циклу збільшується на одиницю:  $i=i+1$ .

```

procedure RKSP ( Q,b,m,n,i0,hmin,hmax :real;
                var h, l :Krivaya );
{ Підпрограма обчислення координат кривої вільної поверхні.
Вхідні дані: Q – об’ємна витрата; b – ширина русла
по дну; m – коефіцієнт укосу;
n – коефіцієнт шорсткості;
i0 – ухил дна; hmin, hmax – граничні
глибини на розрахунковій ділянці.
Вихідні дані: h,l – масиви координат точок кривої
вільної поверхні потоку
(опис типу масивів містить
основна програма:
type Krivaya=array [1..11] of real; ) }
const
    Alfa=1.1; { Коефіцієнт Коріоліса }
    g=9.81;   { Прискорення сили тяжіння }
    k=10;    { Число розрахункових інтервалів }

var
    dh,d,DeltaL :real; { Змінні, які використовуються }
    i,j :integer;      { усередині підпрограми }

```

## Рисунок 12

```

function Eta( h:real ):real; { Підінтегральна функція }
var

```

```

    Omega,hi,R,C,Bb,V1,V2 :real; { Змінні, які
використовуються усередині підпрограми-функції }

begin
{
    Параметри перерізу потоку:
    Omega:=(b+m*h)*h; { площа перерізу, }
    hi:=b+2*h*sqrt(1+m*m); { змочений периметр, }
    R:=Omega/hi; { гідравлічний радіус, }
    Bb:=b+2*m*h; { ширина потоку по верху. }
{
    .....
    C:=1/n*exp(1/6*ln(R)); { Коефіцієнт Шезі }
    V1:=Alfa*sqrt(Q)*Bb/(g*exp(3*ln(Omega)));
    V2:=sqrt(Q/(Omega*C))/R;
    Eta:=(1-V1)/(i0-V2);
end;

begin
    dh:=(h_max-h_min)/k; { Крок зміни глибин на
    розрахунковій ділянці потоку
    (розбиття на k інтервалів) }
    l[1]:=0; { Координати точки в початковому }
    h[1]:=h_max; { розрахунковому перерізі потоку }
    for i:=2 to k+1 do { Цикл обчислення координат для }
    begin { k точок }
        h[i]:=h[i-1]-dh;
    { Обчислення визначеного інтеграла методом трапецій }
    d:=dh/20; { Крок зміни глибини при
    обчисленні інтеграла (розбиття на
    20 інтервалів) }
    DeltaL:=0.5*(Eta(h[i-1])+Eta(h[i]));
    for j:=1 to 19 do
        DeltaL:=DeltaL+Eta(h[i-1]-j*d);
    DeltaL:=-DeltaL*d; { Координата положення перерізу
    потоку із глибиною h[i] відносно

```

Рисунок 12, аркуш 2

```

{
    перерізу із глибиною h[i-1]
    .....
}

```

```
l[i]:=l[i-1]+DeltaL;  
end; { Закінчення циклу for i:=2 to k+1 do ... }  
end;
```

Рисунок 12, аркуш 3

## **ЧАСТИНА 2. ПРАКТИЧНІ РОЗРАХУНКИ**

### **2.1 Порядок практичних розрахунків при виконанні індивідуального завдання**

Навчальне індивідуальне завдання передбачає виконання розрахунків усталеного нерівномірного руху води у відкритому руслі при заданих відповідно до варіанта завдання умовах (див. додаток А) як з використанням комп'ютера, так і частково без нього.

Етапу розрахунків має передувати вивчення рівномірного і усталеного нерівномірного рухів рідини у відкритих руслах, особливо питань, пов'язаних з поняттям нормальної та критичної глибин, способами їх визначення, а також з існуванням різноманітних форм вільної поверхні потоку та встановленням граничних глибин на ділянці нерівномірного руху.

Практичні розрахунки, що пов'язані з виконанням навчального індивідуального завдання, як це впливає із розглянутих в частині 1 особливостей математичної моделі усталеного нерівномірного руху рідини у відкритих руслах і умов цього завдання, варто виконувати в такій послідовності:

1 Сформулювати задачу розрахунку усталеного нерівномірного руху води при заданих відповідно до варіанта завдання умовах.

2 Визначити нормальну та критичну глибини потоку графічним методом (без використання комп'ютера) з перевіркою правильності їх знаходження.

3 З'ясувати форму (тип) кривої вільної поверхні та граничні глибини на ділянці нерівномірного руху.

4 Виконати повний розрахунок на комп'ютері нерівномірного руху води в призматичному руслі з контрольною перевіркою правильності встановлення форми (типу) кривої вільної поверхні та граничних глибин.

5 Побудувати криву вільної поверхні потоку як графік функції  $h=h(l)$  у косокутній системі координат, яка пов'язана із дном русла.

6 Здійснити без використання комп'ютера (за методом В.І. Чарномського) розрахунок кривої вільної поверхні на зазначеній викладачем ділянці нерівномірного руху, використовуючи розраховані на комп'ютері значення глибин для близько розташованих перерізів потоку.

7 Порівняти результати розрахунку за методом В.І. Чарномського з розрахунком на комп'ютері шляхом визначення відносних нев'язок

$$\delta = \frac{\Delta l_{\text{еііі}} - \Delta l}{\Delta l_{\text{еііі}}} \cdot 100\%, \quad (31)$$

де  $\Delta l_{\text{еііі}}$  – відстань між близько розташованими перерізами потоку з відомими глибинами, яку знайдено розрахунком на комп'ютері;  $\Delta l$  – відстань між тими ж перерізами потоку, що знайдена за методом В.І. Чарномського.

Всі перелічені вище етапи виконання навчального індивідуального завдання описуються з наведенням комп'ютерної роздруковки в пояснювальній записці, оформленої за встановленими правилами.

## 2. 2 Приклад розрахунків

Виконати розрахунок усталеного нерівномірного руху води перед малим мостом при витраті  $Q=24\text{м}^3/\text{с}$  у трапецієподібному каналі із грубим бетонним облицюванням.

Ширина каналу по дну  $b=6\text{м}$ , коефіцієнт укошу  $m=1$ , поздовжній ухил дна  $i_0=3,5 \cdot 10^{-4}$ . Глибина потоку перед отвором мосту  $h_m=3,5\text{м}$ .

### Розрахунки

1 Задача розрахунку усталеного нерівномірного руху води перед малим мостом полягає в інтегруванні диференціального рівняння нерівномірного руху (9) при заданій початковій умові  $h_{\text{кон}}=h_m=3,5\text{ м}$  і побудові кривої вільної поверхні потоку, що відповідає заданим умовам течії.

2 Згідно із довідковими даними (див. додаток Б) для грубого бетонного облицювання коефіцієнт шорсткості  $n=0,017$ .

Визначимо нормальну глибину потоку графічним методом. Для ряду довільних значень глибини  $h$  за формулами (2), (3), (4), (8) визначаємо відповідно цим значенням глибин площі перерізу потоку, змочені периметри, гідравлічні радіуси, коефіцієнти Шезі, а також модулі витрати  $K(h)$  (див. рівняння (18)). Результати розрахунку зводимо до таблиці 2. За даними цієї таблиці будемо графік функції  $K=K(h)$ , який зображено на рисунку 13.

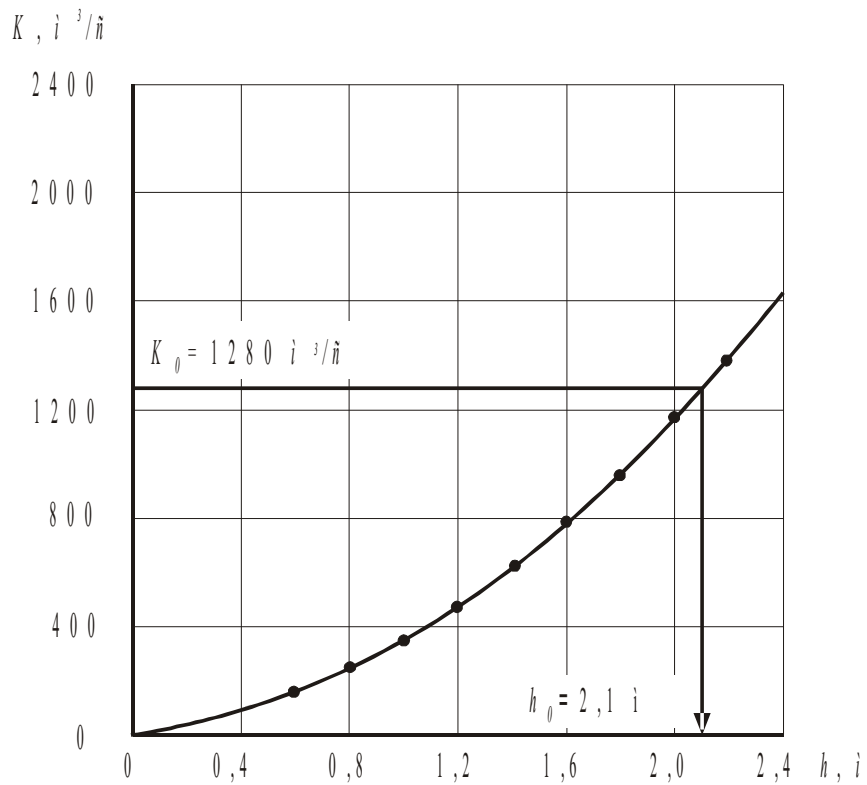
За відомою витратою й заданим поздовжнім ухилом дна каналу обчислюємо модуль витрати, що відповідає нормальній глибині потоку  $h_0$ :

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_0}} = \frac{24}{\sqrt{0,00035}} = 1280 \text{ м}^3/\text{с}.$$

За модулем витрати  $K_0$  визначаємо, використовуючи графік на рисунку 13, нормальну глибину потоку:  $h_0=2,1\text{ м}$ .

Таблиця 2

$h, м$	$\omega, м^2$	$\chi, м$	$R, м$	$C, м^{0,5}/с$	$K, м^3/с$
0,0					
0,6	3,96	7,70	0,51	52,7	150
0,8	5,44	8,26	0,66	54,9	242
1,0	7,00	8,83	0,79	56,6	353
1,2	8,64	9,39	0,92	58,0	481
1,4	10,4	9,96	1,04	59,2	626
1,6	12,2	10,5	1,16	60,3	788
1,8	14,0	11,1	1,27	61,2	966
2,0	16,0	11,7	1,37	62,0	1162
2,2	18,0	12,2	1,48	62,8	1376
2,4	20,2	12,8	1,58	63,5	1606



Виконаємо перевірку правильності визначення нормальної

Рисунок 13

глибини. Підставляючи знайдене за графіком значення  $h_0$  у

формули (2), (3), (4) і (8), здобудемо:

$$\omega = (b + mh)h = (6 + 1 \cdot 2,1) \cdot 2,1 = 17,0 \text{ м};$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 6 + 2 \cdot 2,1 \cdot \sqrt{1 + 1^2} = 11,9 \text{ м};$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{17,0}{11,9} = 1,43 \text{ м};$$

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,017} \cdot 1,43^{\frac{1}{6}} = 62,4 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

Використовуючи рівняння рівномірного руху (14), обчислимо величину об'ємної витрати:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri_0} = 17,0 \cdot 62,4 \cdot \sqrt{1,43 \cdot 0,00035} = 23,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Обчислене значення витрати відрізняється від заданого на - 1,25%, що можна припустити прийнятним, а отриману за графіком глибину вважати за нормальну.

Визначимо критичну глибину потоку, знаходячи графічним методом розв'язок рівняння критичного стану (17). Для ряду довільних значень глибини  $h$  за формулами (2), (5) визначаємо відповідні цим значенням глибин площі перерізу потоку, ширини потоку по верху, а також значення функції  $\frac{\omega^3}{B}$ . Результати розрахунку зводимо до таблиці 3. За даними цієї таблиці будемо графік функції  $\frac{\omega^3}{B}$ , який зображено на рисунку 14.

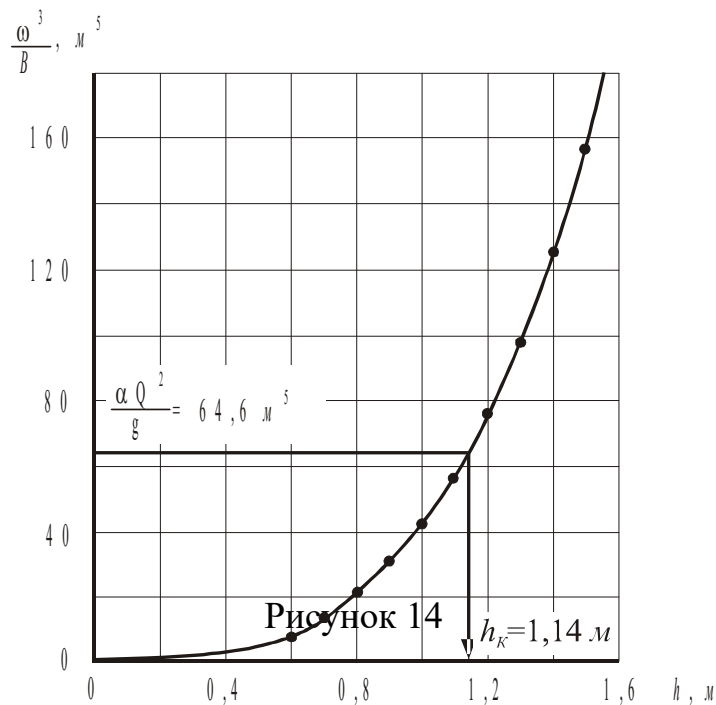
За відомою витратою, приймаючи  $\alpha = 1,1$ , обчислюємо

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{1,1 \cdot 24^2}{9,81} = 64,6 \text{ м}^5.$$

За цим значенням  $\frac{\alpha Q^2}{g}$ , використовуючи графік на рисунку 14, визначаємо критичну глибину потоку:  $h_K = 1,14 \text{ м}$ .

Таблиця 3

$h, м$	$\omega, м^2$	$B, м$	$\frac{\omega^3}{B}, м$
0,0			
0,6	3,96	7,20	8,62
0,7	4,69	7,40	13,9
0,8	5,44	7,60	21,2
0,9	6,21	7,80	30,7
1,0	7,00	8,00	42,9
1,1	7,81	8,20	58,1
1,2	8,64	8,40	76,8
1,3	9,49	8,60	99,4
1,4	10,4	8,80	126
1,5	11,3	9,00	158



Виконаємо перевірку правильності визначення критичної глибини. Підставляючи знайдене за графіком значення  $h_K$  у формули (2) і (5), одержимо:



$$\omega = (b + mh)h = (6 + 1 \cdot 1,14) \cdot 1,14 = 8,14 \text{ м};$$

$$B = b + 2mh = 6 + 2 \cdot 1 \cdot 1,14 = 8,28 \text{ м}.$$

Обчислюємо праву частину рівняння (17) при  $h_K=1,14 \text{ м}$ :

$$\frac{\omega^3}{B} = \frac{8,14^3}{8,28} = 65,1 \text{ м}^5.$$

Обчислене значення правої частини рівняння (17) приблизно дорівнює наведеному вище значенню  $\frac{\alpha Q^2}{g}$  (розбіжність становить 0,77%). Це дозволяє вважати тотожність (21) приблизно виконаною, а отриману за графіком глибину прийняти за критичну.

3 Зіставляємо між собою нормальну, критичну й задану за умовою глибини потоку:

$$(h_m=3,5 \text{ м}) > (h_0=2,1 \text{ м}) > (h_K=1,14 \text{ м}).$$

Таке співвідношення глибин характерно для кривої вільної поверхні типу  $a_1$  (див. таблицю 1). При цьому  $h_{max}=h_m=3,5 \text{ м}$ ,  $h_{min}=h_0=2,1 \text{ м}$ .

4 Виконуємо на комп'ютері повний розрахунок нерівномірного руху води перед малим мостом при заданих умовах течії (відомості про використання комп'ютерної програми отримати у викладача). Результат цього розрахунку (можливий вигляд) наведено на рисунку 15.

5 За обчисленими координатами  $l$  і  $h$  у пов'язаній з руслом косокутній системі координат (вісь поздовжньої координати  $l$  спрямована уздовж русла по напрямку потоку, а вісь глибини  $h$  – вертикально угору) будуємо криву вільної поверхні потоку, яку зображено на рисунку 16.

## РОЗРАХУНОК КРИВОЇ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПОТОКУ

### ВИХІДНІ ДАНІ:

1 Об'ємна витрата  $Q$ , м<sup>3</sup>/с ..... 24.00

2 Ширина русла по дну $b$ , м.....	6.000
3 Коефіцієнт укосу $m$ .....	1.000
4 Коефіцієнт шорсткості $n$ .....	0.01700
5 Ухил дна $i_0$ .....	0.000350

ПОПЕРЕДНІЙ РЕЗУЛЬТАТ:

1 Критична глибина $h_k$ , м .....	1.137
2 Нормальна глибина $h_o$ , м .....	2.114

КРИВА ТИПУ  $a_1$

РОЗРАХУНКОВІ ЗНАЧЕННЯ:

1 Максимальна глибина $h_{max}$ , м .....	3.500
2 Мінімальна глибина $h_{min}$ , м .....	2.156

Відстань  $h$ , м      Глибина  $l$ , м

0.000	3.500
-452.943	3.366
-919.800	3.231
-1404.793	3.097
-1914.096	2.963
-2457.200	2.828
-3049.721	2.694
-3719.990	2.559
-4527.817	2.425
-5639.546	2.291
-8054.740	2.156

Рисунок 15

## **Примітки**

*1 Значення мінімальної глибини, яке використано у розрахунках на комп'ютері, прийнято рівним  $1,02h_0$  (таблиця 1).*

2 Негативні значення відстаней (поздовжніх координат) обумовлені вибором системи координат (див. пояснення до формули (30)) і є характерними тільки для кривої підпору.

6 Визначаємо, використовуючи метод В.І. Чарномського, відстані між сусідніми перерізами потоку із глибинами, що наведено на рисунку 10 (результат розрахунку на комп'ютері координат кривої вільної поверхні потоку).

Як приклад обрано ряд послідовно розташованих за напрямком потоку перерізів з такими поздовжніми координатами й глибинами:

$$\begin{aligned} l_1 &= -3050 \text{ м}; & h_1 &= 2,694 \text{ м}; \\ l_2 &= -2457 \text{ м}; & h_2 &= 2,828 \text{ м}; \\ l_3 &= -1914 \text{ м}; & h_3 &= 2,963 \text{ м}. \end{aligned}$$

Тут для дотримання відповідності рівнянню в скінченних різницях (22) і формулам (23),(25) індексація перерізів прийнята за напрямком потоку (при виконанні розрахунку на комп'ютері для кривої підпору перерізи потоку індексуються у зворотному порядку).

Відстані між перерізами потоку, які знайдено за даними результату розрахунку на комп'ютері, становлять:

$$\Delta l_{1\hat{e}i\hat{i}} = l_2 - l_1 = -2457 - (-3050) = 593 \text{ м};$$

$$\Delta l_{2\hat{e}i\hat{i}} = l_3 - l_2 = -1914 - (-2457) = 543 \text{ м}.$$

За формулами (2)–(4),(6),(8),(22) визначаємо зміни питомої енергії перерізу й ухил тертя для кожної пари сусідніх глибин  $h_i$  і  $h_{i+1}$  із наведеного ряду, а потім за формулою (26) відповідні відстані між перерізами потоку.

7 Порівнюємо ці відстані зі знайденими за результатом розрахунку на комп'ютері шляхом обчислення за формулою (31) відносних нев'язок  $\delta$ .

Результати розрахунку й порівняння знайдених різними методами відстаней між перерізами потоку відображуємо у вигляді таблиці 4.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

- 1 Железняков Г.В. Гидравлика и гидрология. – М.: Транспорт, 1989. – 375 с.
- 2 Константинов Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия.

– М.: Высшая школа, 1987. – Ч. 1,2. – 600 с.

3 Чугаев Р.Р. Гидравлика. . – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

4 Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. – 4-е изд. – М. – Л.: Энергоиздат, 1972. – 352 с.

## **Додаток А**

**Варіанти індивідуального завдання  
до розрахунку усталеного нерівномірного руху води у  
відкритих руслах**

Виконати розрахунок усталеного нерівномірного руху води в трапецієподібному руслі (каналі) як з використанням комп'ютера, так і без нього. Побудувати криву вільної поверхні потоку.

Вихідними даними для розрахунку є: об'ємна витрата води  $Q$ ; ширина русла (каналу) по дну  $b$ ; коефіцієнт укосу  $m$ ; поздовжній ухил дна  $i_0$ ; характер русла (каналу); глибина в початковому або кінцевому перерізі потоку (початкова умова)  $h$ .

Зазначені вихідні дані вибрати з таблиці А.1 відповідно до варіанта завдання.

Таблиця А.1

Варіант	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	$m$	$i_0$	Характер русла (каналу)	$h, \text{ м}$
1	2	3	4	5	6	7
1	20	4,0	1,0	$2,5 \cdot 10^{-4}$	Русло з добре обробленим бетонним облицюванням	2,0
2	5,0	0,8	1,0	0,4	Збірний залізобетонний лотік	0,35
3	40	5,0	1,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Русло з накиданням із каменю	0,40
4	70	10	1,7 5	$5,0 \cdot 10^{-4}$	Зрошувальний канал	4,8
5	30	8,0	1,7 5	$3,5 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, торф	3,2
6	15	4,0	2,0	$4,0 \cdot 10^{-4}$	Русло в щільному дрібному гравії з піском	1,7

**Продовження таблиці А.1**

1	2	3	4	5	6	7
7	10	2,5	1,7 5	$8,0 \cdot 10^{-4}$	Обдєрноване русло	0,3



8	6,0	1,0	1,0	0,5	Русло із грубим бетонним облицюванням	0,4
9	26	5,0	1,5	$2,0 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, глинистий ґрунт	2,8
10	32	12	2,0	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, піщаний ґрунт	3,0
11	4,0	0,6	1,0	0,15	Збірний залізо-бетонний лотік	0,5
12	18	2,0	1,7 5	$4,5 \cdot 10^{-4}$	Обдерноване русло	2,8
13	35	9,0	1,7 5	$6,0 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, гравійно-галечний ґрунт	5,5
14	20	7,0	1,5	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Русло з накиданням із каменю	2,7
15	4,0	0,4	1,0	0,8	Русло з добре обробленим бетонним облицюванням	0,4
16	18	2,5	1,5	0,07	Земляне русло, глинистий ґрунт	0,2
17	15	4,0	1,7 5	0,06	Зрошувальний канал	2,6
18	10	2,0	1,5	$9,0 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, глинистий ґрунт	0,4
19	6,0	1,0	2,0	$2,5 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, піщаний ґрунт	1,8
20	10	2,5	1,7 5	$3,0 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, торф	2,9
21	16	4,0	2,0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Русло в щільному дрібному гравії з піском	0,5

**Продовження таблиці А.1**

1	2	3	4	5	6	7
22	8,0	1,2	1,0	0,25	Збірний залізо-бетонний лотік	0,4
23	3,5	0,4	1,5	0,8	Русло з добре обробленим бетонним облицюванням	0,3
24	24	8,0	1,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Русло з накиданням із каменю	1,6
25	5,0	1,8	2,0	$2,4 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, гравійно-галечний ґрунт	0,25
26	15	2,5	1,75	$2,5 \cdot 10^{-4}$	Земляне русло, торф	2,9
27	12	2,0	1,5	0,09	Земляне русло, глинистий ґрунт	0,2
28	6,0	1,2	1,0	0,3	Збірний залізо-бетонний лотік	0,35
29	15	3,5	2,0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Русло в щільному дрібному гравії з піском	0,8
30	30	3,0	1,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Русло з накиданням із каменю	0,60

## Додаток Б

### Середні значення коефіцієнта шорсткості $n$

Середні значення коефіцієнта шорсткості  $n$  подані у таблиці Б.1 [4]

Таблиця Б.1

Характеристика поверхні, русла	$n$
Бетонне облицювання:	
добре оброблене	0,013
грубе	0,017
Збірні залізобетонні лотоки	0,014
Обдерноване русло	0,032
Накидання із каменю	0,035
Щільний дрібний гравій з піском	0,019
Земляне русло, витрата води $Q \leq 25 \text{ м}^3/\text{с}$ , грунт:	
піщаний	0,026
глинистий	0,024
торф	0,027
гравійно-галечний	0,028
Земляне русло, витрата води $Q > 25 \text{ м}^3/\text{с}$ , грунт:	
піщаний	0,025
глинистий	0,022
торф	0,024
гравійно-галечний	0,027
Зрошувальні канали	0,030







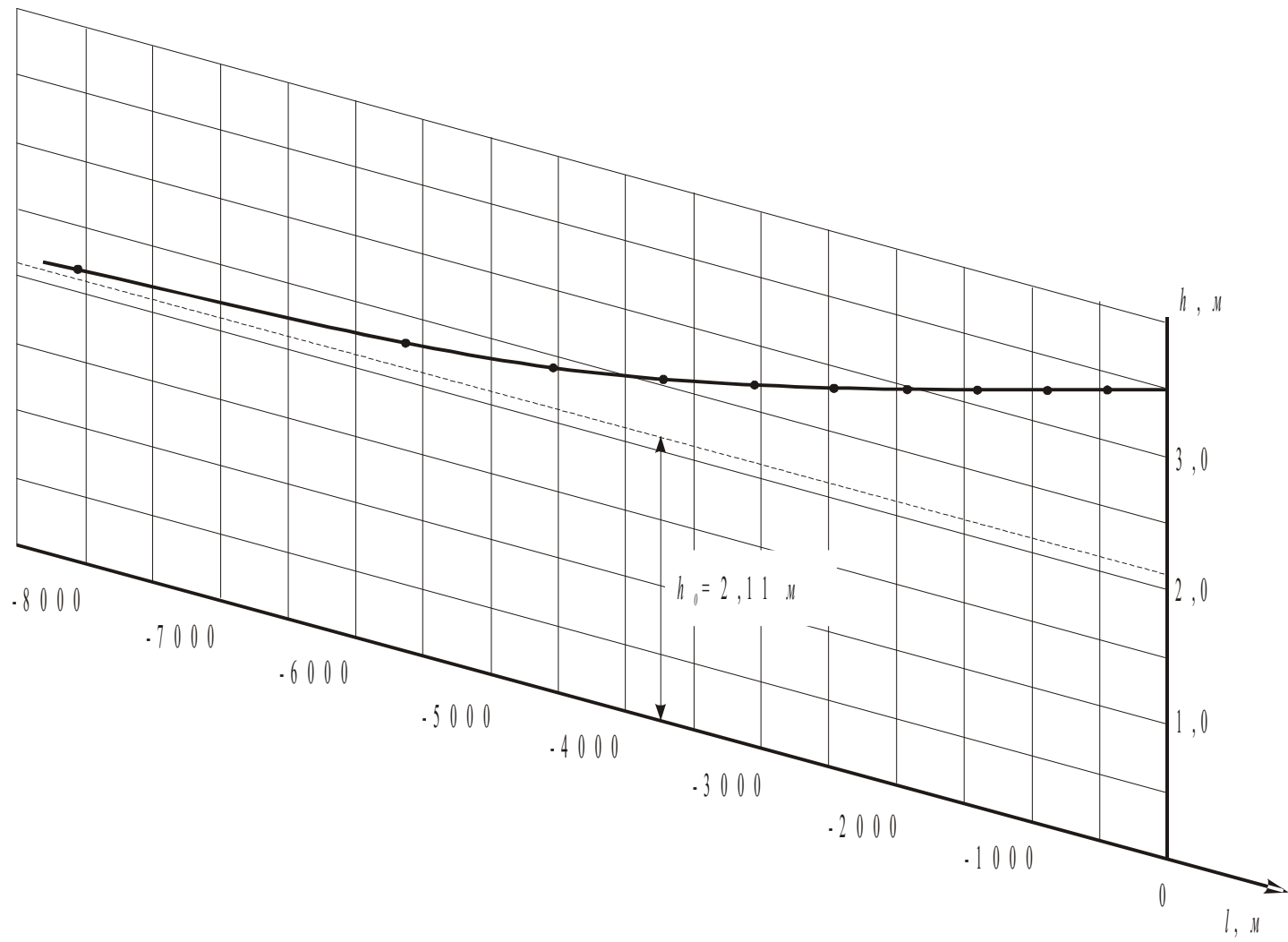


Рисунок 16





Таблица 4

$i$	$h_i, м$	$\omega_i, м$	$\chi_i, м$	$R_i, м$	$C_i, м^{0,5}/с$	$E_i, м$	$\bar{\omega}, м$	$\bar{R}, м$	$\bar{C}, м$	$I_i$	$\Delta E_i, м$	$\Delta I_i, м$	$\Delta I_{i(комп)}, м$	$\delta, \%$
1	2,694	23,4	13,6	1,72	64,4	2,75								
2	2,828	25,0	14,0	1,79	64,8	2,88	24,2	1,76	64,6	$1,34 \cdot 10^{-4}$	0,130	602	593	-1,52
3	2,963	26,6	14,4	1,85	65,2	3,01	25,8	1,82	65,0	$1,13 \cdot 10^{-4}$	0,130	549	545	-1,10

