

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
київський національний університет будівництва і архітектури

## **ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК КОНСОЛЬНОГО ВОДОСКИДУ**

Методичні вказівки

до виконання розрахунково-графічної роботи  
для студентів факультету інженерних систем та екології,  
які навчаються за напрямом підготовки 6.060101 “Будівництво”  
професійного спрямування “Гідротехнічне будівництво”

Київ 2016

ББК 30.123

В62

Укладачі: Є.І. Павлов, канд. техн. наук, доцент;  
А.М. Кравчук, д-р техн. наук, професор

Відповідальний за випуск А.М. Кравчук, д-р техн. наук,  
професор.

*Затверджено на засіданні кафедри водопостачання та  
водовідведення, протокол № 11 від 18 квітня 2016 року.*

**Гідравлічний** розрахунок консольного водоскиду: методичні  
В62 вказівки / уклад.: Є.І. Павлов, А.М. Кравчук. – К.: КНУБА, 2016.– с.

Містять гідравлічний розрахунок елементів консольного водоскиду для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни “Інженерна гідравліка”.

Призначено для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.060101 “Будівництво” професійного спрямування “Гідротехнічне будівництво”.

© КНУБА, 2016

## Загальні положення

Питання, що їх розглядають у курсах лекцій з «Інженерної гідравліки» і «Спеціальних питань з інженерної гідравліки» для спеціальності «Гідротехнічне будівництво», є профілюючими. Після вивчення цих дисциплін передбачено виконання індивідуальної курсової роботи. Характерним для цієї роботи є те, що в ній необхідно розрахувати й об'єднати між собою комплекс окремих споруд, призначенням яких є сполучення б'єфів у тих чи інших умовах. Консольний водоскид якраз і є яскравим прикладом такого об'єднання.

## 1. Консольні перепади

Консольні перепади (скорочено консолі) влаштовують у місцях зосередженого падіння траси каналу або скиду води з каналу до найближчої низини. За великої відстані від каналу, з якого відбувається живлення, до початку консолі, їх з'єднують за допомогою підвідного каналу. Сама консоль складається з лотка типу швидкотечії, нижня частина якої розташована над схилом на глибоко занурених у ґрунт опорах. Лоток швидкотечії має продовження за опори, утворюючи консоль. Це і було покладено в основу загальної назви всієї споруди (рис.1).

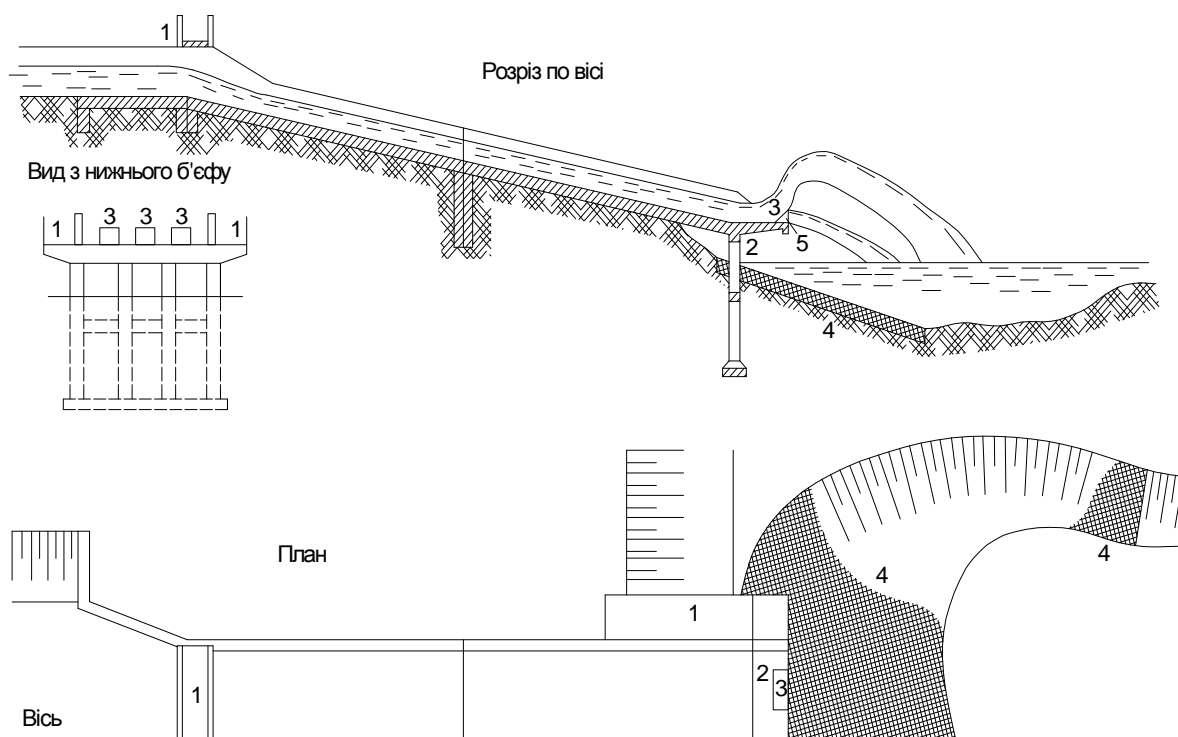


Рис. 1. Конструктивна схема консольного водоскиду:

- 1 – службові містки; 2 – консоль; 3 – трампліни; 4 – укріплення ґрунту;
- 5 – носок консолі

Вода, що падає з консолі, розмиває ґрунт і утворює воронку до глибини, що забезпечує гасіння енергії спадного струменя.

У консольних перепадах вільне падіння струменя відбувається тільки з висоти  $P_2$  (рис. 2).

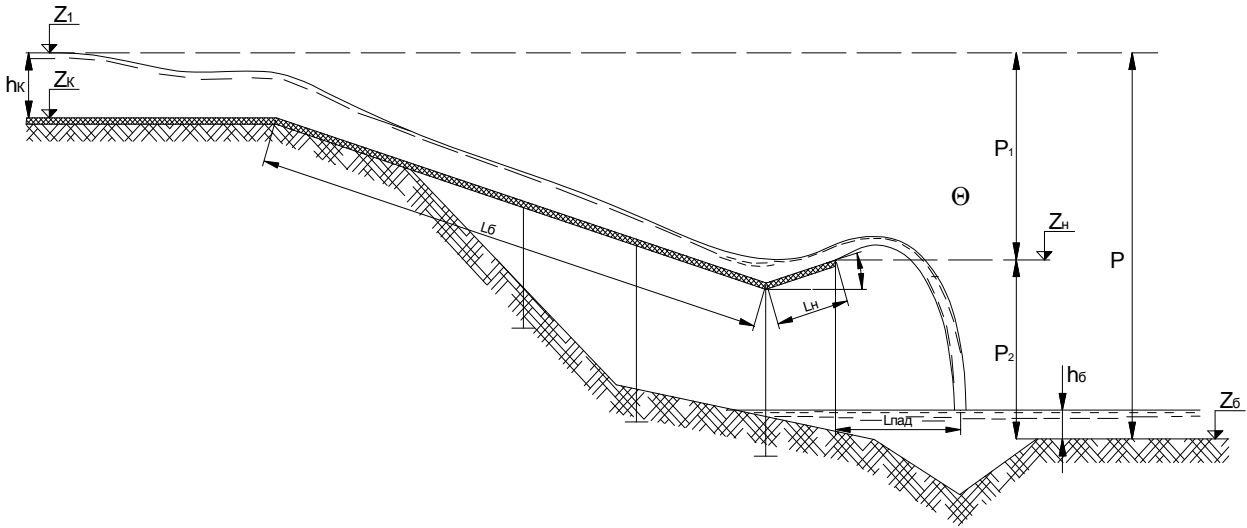


Рис. 2. Розрахункова сема консольного перепаду

Таким чином, загальний перепад складається з двох частин: лотка-швидкотечії, на якій долається частина загального падіння  $P_1$ , і струмененапрямого носка з вільним скидом струменя з висоти  $P_2$ . Відносний перепад консолі  $\sigma = \frac{P_1}{P}$  призначають у таких межах

$$1 > \sigma > 0,5.$$

Носок консолі проектують або горизонтальним, або зі зворотним ухилом з метою збільшення довжини падіння струменя. Під час облаштування носка консолі зі зворотним ухилом необхідно мати на увазі, що перехід швидкотечії на носок має здійснюватись плавно, щоб запобігти удару. Тому підйом носка консолі обмежують кутом  $\Theta \leq 15^\circ$ , що відповідає поздовжньому ухилу  $i \leq 0,25$ . Довжина носка консолі проектується в межах

$$L_H = 1 \div 2 \text{ м.}$$

З метою зменшення глибини і ширини воронки розмиву, в кінці носка консолі встановлюють зубчасті трампліни (див. рис. 1), які розщеплюють спадний струмінь води.

Консолі з великими витратами води не дуже розповсюджені, проте в гірській місцевості північного Кавказу побудовані й експлуатуються консолі з витратами до  $1200 \text{ м}^3/\text{с}$ .

## 2. Підвідний канал

Як уже зазначалось, призначенням підвідного каналу є транспортування води від основного каналу або якогось водоймища, до швидкотечії. Форма перерізу підвідного каналу – трапеція, а під час транспортування невеликих витрат він може бути і прямокутним. Матеріал поверхні підвідного каналу – залізобетон, тому у процесі вибору швидкості руху потоку води в каналі основоположним буде не фактор протидії розмиву русла, а безпека обслуговуючого персоналу. Йдеться про те, що виконання будь-яких робіт у середині каналу має бути безпечним. Зважаючи на це призначають середню швидкість руху потоку води в підвідному каналі у межах  $v = 0,5 \div 1,0$  м/с.

Визначившись із середньою швидкістю течії, можна підрахувати і площу живого перерізу потоку:

$$\omega = \frac{Q}{v},$$

де  $Q$  – розрахункові витрати, м<sup>3</sup>/с.

Розміри каналу необхідно брати такими, за яких русло матиме гідравлічно найвигіднішу форму. В руслах трапецеїдального поперечного перерізу гідравлічно найвигіднішого профілю відношення ширини русла  $b$  до глибини потоку  $h_0$  за рівномірного руху (відносна ширина русла) позначають як  $\beta_{г.н.}$ . За заданого коефіцієнта закладання відкосів

$$\beta_{г.н.} = \frac{b}{h_0} = 2(\sqrt{1 + m^2} - m) \quad (1.1)$$

Якщо у розрахунках трапецеїдального каналу ширина русла по дну  $b$  і глибина потоку  $h_0$  невідомі, а задана площа живого перерізу  $\omega$ , то

$$b = \frac{\beta_{г.н.}}{\sqrt{\beta_{г.н.} + m}} * \sqrt{\omega}; \quad (1.2)$$

$$h_0 = \frac{1}{\sqrt{\beta_{г.н.} + m}} * \sqrt{\omega} \quad (1.3)$$

Для каналів прямокутної форми за  $m = 0$  відносна ширина русла дорівнюватиме  $\beta_{г.н.} = 2$  (див. залежність (1)):

$$\beta_{г.н.} = \frac{b}{h_0} = 2 \Rightarrow b = 2h_0 \Rightarrow h_0 = \frac{b}{2} \quad (1.4)$$

Площа живого перерізу, що має прямокутну форму:

$$\omega = b * h_0 \Rightarrow \omega = b * \frac{b}{2} = \frac{b^2}{2} \Rightarrow b = \sqrt{2 * \omega}, \quad (1.5)$$

а нормальна глибина потоку становитиме:

$$\omega = 2 h_0 * h_0 = 2 h_0^2 \Rightarrow h_0 = \sqrt{\frac{\omega}{2}}. \quad (1.6)$$

Коли розміри каналу відомі, можна знайти і ухил його дна з рівняння

$$Q = \omega * W * \sqrt{i} \Rightarrow i = \frac{Q^2}{\omega^2 * W^2}, \quad (1.7)$$

де  $i$  – ухил дна каналу;

$W$  – швидкісна характеристика  $W = f(R; n)$ ;

$R$  – гідравлічний радіус;

$N$  – шорсткість поверхні русла.

Гідравлічний радіус визначають за формулою:

$$R = \frac{\omega}{\chi},$$

де  $\omega$  – площа живого перерізу;

$\chi$  – змочений периметр.

У випадку, коли русло має прямокутну форму

$$R = \frac{b * h_0}{b + 2h_0} = \frac{b * \frac{b}{2}}{b + 2 * \frac{b}{2}} = \frac{\frac{b^2}{2}}{2b} = \frac{b}{4}.$$

Ухил дна підвідного каналу, що його визначено за залежністю (1.7), уточнюють (округляють) і заново знаходять нормальну глибина потоку  $h_0$ , при цьому вважають, що визначена раніше ширина каналу  $b$  залишається незмінною.

### 3. Швидкотечія

Швидкотечія – це канал або лоток, поздовжній ухил дна якого більший за критичний. Тобто, за рівномірного руху в таких каналах потік знаходиться у бурхливому стані.

Гідравлічний розрахунок швидкотечії зводиться до розрахунків вхідної частини і лотка.

На вхідній ділянці швидкотечії визначають ширину русла, глибину, швидкість потоку і тип укріплення на зломі. Як правило, вхідну частину і лоток швидкотечії влаштовують вужчими ніж підвідне русло.

### 3.1. Вхідна частина швидкотечії

У випадку, коли ширина і форма підвідного каналу відрізняються від перерізу лотка швидкотечії, його вхідну частину потрібно розглядати як водозлив із широким порогом, при цьому:

$$3h_0 \leq \delta \leq 8h_0 \quad (2.1)$$

Форма такого водозливу може бути із неплavnим входом (рис. 3,а), або із плавним входом (рис.3, б). У тому випадку, коли вхідна ділянка швидкотечії має довжину менше ніж

$$\delta < (2 \div 3)h_0,$$

її розраховують як водозлив практичного профілю (рис. 4).

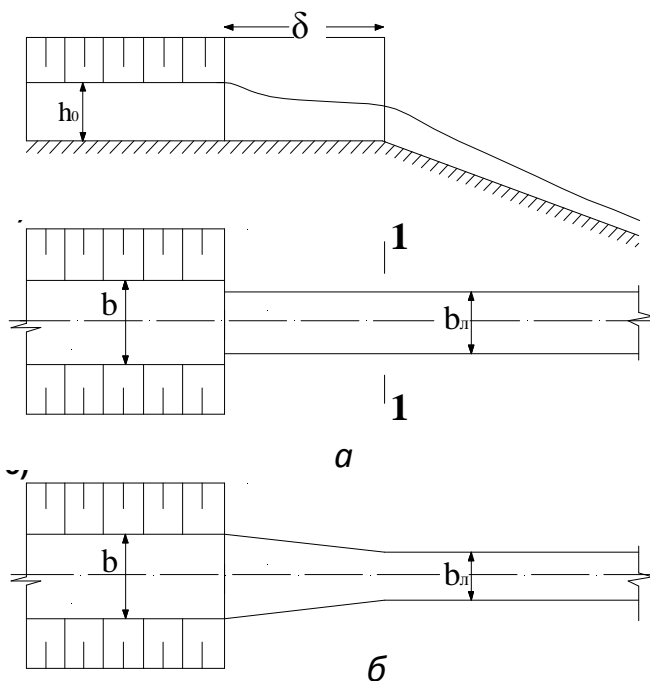


Рис. 3. Конструкція вхідної частини як водозливу із широким порогом

Підсумовуючи, робимо висновок, що під час розрахунку вхідної частини швидкотечії слід визначитися з такими двома величинами, як  $\delta$  і  $b_{л}$ . Довжину вхідної частини швидкотечії  $\delta$  задають, виходячи із конструктивних міркувань, а ширину лотка  $b_{л}$  визначають за методом розрахунку водозливів. При цьому відомими величинами будуть витрати  $Q$



і напір на водозливі  $h$ , який дорівнює нормальній глибині у підвідному каналі  $h_0$ .

На вході у швидкотечію водозлив завжди працює як незатоплений, тому, виходячи з умови підтримання у верхньому б'єфі заданої глибини  $h_0$ , маємо:

$$Q = m * b_{л} * \sqrt{2g} * H_0^{3/2} \quad (2.2)$$

Звідки ширина лотка швидкотечії буде

$$b_{л} = \frac{Q}{m * \sqrt{2g} * H_0^{3/2}},$$

$$H_0 = h_0 + \frac{v_0^2}{2g}, \quad (2.3)$$

де  $v_0$  – середня швидкість потоку в підвідному каналі у момент підходу до водозливної частини.

Якщо вхідна частина швидкотечії працює як водозлив із широким порогом, то коефіцієнт витрат такого водозливу дорівнюватиме:

$$m = 0,36 \div 0,37, \quad (2.4)$$

причому для плавних оголовків слід брати більші значення, а для неплавних, – менші.

Під час виконання вхідної частини швидкотечії за схемою (рис. 4), вона працюватиме як водозлив практичного профілю, коефіцієнт витрат якого визначають за формулою:

$$m = 0,36 + 0,1 \frac{2,5 - \frac{\delta}{h_0}}{1 + 2\delta/h_0}. \quad (2.5)$$

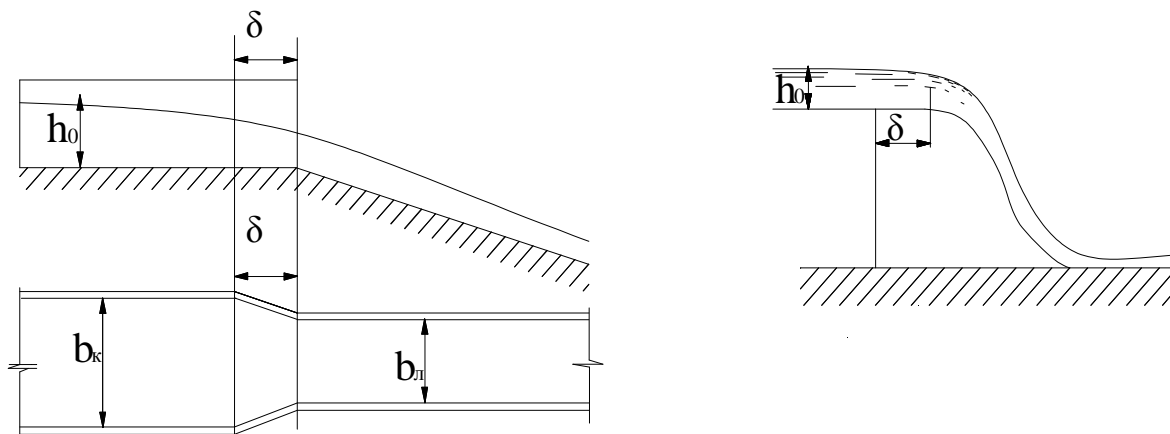


Рис. 4. Схема конструкції вхідної частини швидкотечії, що розраховується за принципом водозливу практичного профілю

Якщо ширина і форма перерізу транспортувального каналу такі ж, як і лотка швидкотечії, то глибину потоку в кінці вхідної частини

підвідного русла, тобто на вхідній ділянці швидкотечії (на зломі) беруть такою:

$$h_{\text{зал}} = h_k, \quad (2.6)$$

де  $h_k$  – критична глибина для лотка швидкотечії.

Коли буде з'ясовано, що критична глибина  $h_k$  набагато більша за нормальну  $h_{0б}$  на швидкотечії (в два або більше разів), то глибину на заломі за даними дослідів В.О.Большакова беруть такою:

$$h_{\text{зал}} = (0,7 \div 0,8)h_k. \quad (2.7)$$

Нормальну глибину на швидкотечії  $h_{0б}$  визначають графічним способом, або за методом послідовних наближень, виходячи з умови, що швидкотечія довга. У подальших розрахунках співвідношення  $h_k/h_{0б}$  уточнюють і розрахунок глибини на заломі корегують.

### 3.2. Лоток швидкотечії

Розрахунок лотка швидкотечії зводять до визначення нормальної та кінцевої глибин і до побудови вільної поверхні потоку. Оскільки ухил дна швидкотечії більший за критичний ( $i > i_k$ ), то утворюється крива спаду типу II б (рис. 5). Такий тип кривої будують за способами розрахунків між глибинами  $h_{\text{зал}}$  і  $h_{0б}$ .

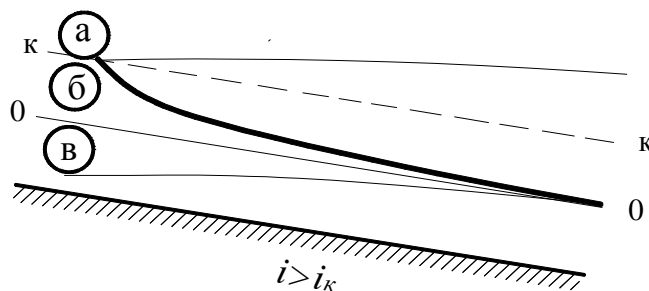


Рис.5. Форми кривих вільної поверхні потоків за  $i > i_k$

За довжини швидкотечії  $L_б$  більшої за довжину кривої спаду  $l_{\text{сн}}$ , остання буде довгою (рис. 6, а) і глибина в кінці швидкотечії становитиме

$$h_{\text{кін}} = h_{0б}.$$

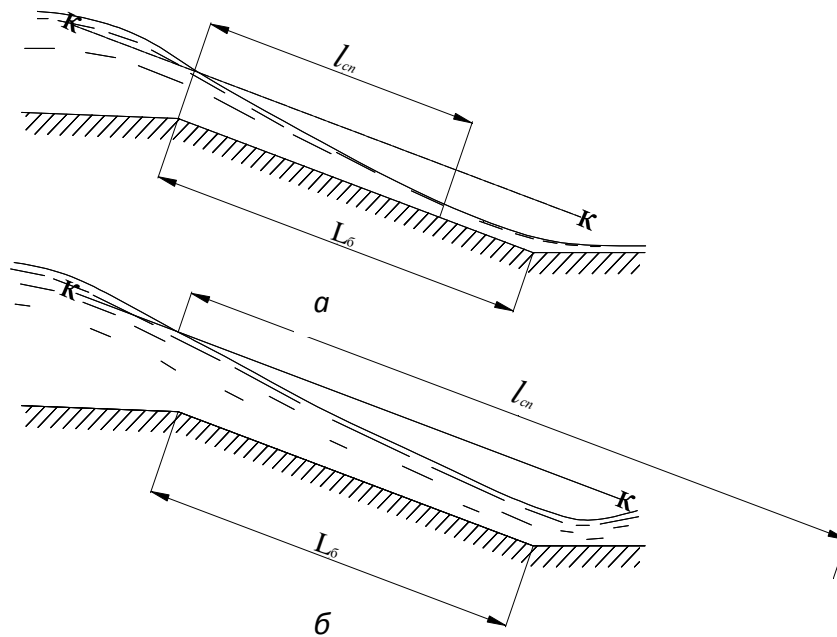


Рис.6. Схеми довгої (а) та короткої (б) швидкотечії

У випадку коли довжина швидкотечії менша за криву спаду ( $L_{\delta} < l_{кр}$ ), така швидкотечія буде коротким і в її кінцевій частині глибина  $h_{кін}$  буде більша за нормальну.

У коротких швидкотечіях  $h_{кін}$  визначають з рівняння вільної поверхні, як глибину в перерізі, що знаходиться на відстані  $L_{\delta}$  від початкового перерізу.

### 3.3. Визначення типу швидкотечії

Для визначення типу швидкотечії необхідно визначити довжину кривої спаду типу П б (рис. 5), що встановлюється на швидкотечії. Вихідними даними для проведення цих розрахунків є:

- витрати  $Q = 15 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- швидкотечія прямокутного перерізу  $b_{л} = 3 \text{ м}$ ;
- матеріал швидкотечії – залізобетон  $n = 0,017$ ;
- ухил швидкотечії  $i = 0,02$ ;
- довжина швидкотечії  $l_{\delta} = 40 \text{ м}$ ;
- перед швидкотечією підвідний канал з ухилом дна  $i < i_{к}$ .

Порядок розрахунків такий:

1. Знаходять нормальну глибину на швидкотечії з рівняння

$$Q = \omega W \sqrt{i} \quad (\omega = b * h) \quad (2.8)$$

Це рівняння розв'язують методом підбору. Порядок розрахунків і їх послідовність наведено в табл.1. Показник ступеня  $z$  визначають за формулою Н.Н. Павловського:

$$z = 0,37 + 2,5\sqrt{n} - 0,75 (\sqrt{n} - 0,1) \sqrt{R}. \quad (2.9)$$

Таблиця 1

**Визначення нормальної глибини**

	$h_{0б}$	$\omega=bh$	$\chi=b+2h$	$R=\frac{\omega}{\chi}$	$z$	$R^z$	$W=\frac{1}{n}R^z$	$Q_i=\omega W\sqrt{i}$	$Q-Q_i$
	0,2	0,6	3,4	0,176	0,686	0,304	17,86	1,52	+13,48
	0,4	1,2	3,8	0,316	0,683	0,455	26,78	4,54	+10,46
	0,6	1,8	4,2	0,428	0,681	0,561	33,00	8,40	+6,60
	0,8	2,4	4,6	0,522	0,679	0,643	37,83	12,83	+2,17
$h_1-h_2$	1,0	3,0	5,0	0,600	0,678	0,707	41,60	17,60	-2,60
0,8-1,0	0,9	2,7	4,8	0,563	0,679	0,677	39,82	15,20	-0,20
0,8-0,9	0,85	2,55	4,7	0,543	0,679	0,661	38,86	14,01	+0,99
0,85-0,9	0,88	2,64	4,76	0,555	0,679	0,670	39,44	14,73	+0,27
0,88-0,9	0,89	2,67	4,78	0,559	0,679	0,674	39,63	14,96	+0,04

За результатами розрахунків нормальна глибина на швидкотечії дорівнює:

$$h_{0б} = 0,89 \text{ м.}$$

2. Знаходять критичну глибину:

$$\left(\frac{\omega_R^3}{b} = \frac{\alpha Q^2}{g}\right) \Rightarrow \left(\frac{b^3 h_K^3}{b} = \frac{\alpha Q^2}{g}\right) \Rightarrow h_K = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}} \Rightarrow h_K = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 15^2}{9,81 \cdot 3^2}} = 1,41 \text{ м.}$$

3. Знаходять довжину кривої спаду за укрупненими показниками:

$$l_{сн} = \frac{E_{кін} - E_{поч.}}{i - i_{фср}}; \quad (2.10)$$

$$E_{поч} = h_K + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g\omega^2} = 1,41 + \frac{1,1 \cdot 15^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 4,23^2} = 2,12;$$

$$E_{кін} = (h_{0б} + \Delta h) + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} = 0,9 + \frac{1,1 \cdot 15^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 2,7^2} = 2,63;$$

$$i_{ф1} = \left(\frac{Q}{\omega_R W_R}\right)^2 = \left(\frac{15}{4,23 \cdot 47,42}\right)^2 = 0,0056;$$

$$i_{f2} = \left( \frac{Q}{\omega_0 * W_0} \right)^2 = \left( \frac{15}{2,7 * 39,82} \right)^2 = 0,0195;$$

$$i_{fcp} = \frac{i_{f1} + i_{f2}}{2} = \frac{0,0056 + 0,0195}{2} = 0,0126;$$

$$l_{cn} = \frac{2,63 - 2,12}{0,02 - 0,0126} = 69 \text{ м.}$$

Довжина швидкотечії ( $L_{\delta} = 40$  м) менша за довжину кривої спаду ( $l_{cn} = 69$  м):

$$L_{\delta} < l_{cn},$$

отже швидкотечія коротка, а глибину потоку в її кінці визначають через побудову кривої спаду.

Слід зазначити, коли ухил швидкотечії  $i_{\delta} > 0,1$ , то у процесі розрахунків потрібно враховувати аерацію потоку, внаслідок впливу якої коефіцієнт шорсткості поверхні швидкотечії збільшується порівняно з її нормальним значенням. Коефіцієнт шорсткості знаходять за формулою проф. М.О.Нечипоров:

$$n_a = a * n,$$

де  $a$  – коефіцієнт аерації, який приймається за даними табл. 2;

$n_a$  – коефіцієнт шорсткості з урахуванням аерації потоку;

$n$  – нормальне значення коефіцієнту шорсткості.

У розглянутому вище прикладі, ухил дна швидкотечії менший за 0,1 ( $i_{\delta} < 0,1$ ), тому вплив аерації на потік, що рухався по швидкотечії не враховувався.

Таблиця 2

**Значення коефіцієнту аерації потоку на бистроточі в залежності від ухилу дна бистроточу**

Ухил дна швидкотечії $i$	<0,1	0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,4	>0,4
Коефіцієнт аерації $a$	1	1,33	1,33 ÷ 2,0	2,0 ÷ 3,33

**3.4. Побудова кривої вільної поверхні потоку на швидкотечії.**

**Знаходження глибини в кінці швидкотечії**

Побудуємо криву спаду в бетонному лотку швидкотечії, використовуючи вихідні дані табл. 1.

Аналізуючи форму кривих вільної поверхні потоків до залому і після нього робимо висновок, що глибина на початку швидкотечії дорівнюватиме:

$$h_{\text{поч}} = h_{\text{к}} = 1,41 \text{ м.}$$

У лотку утворюється крива спаду типу II б (див. рис. 6) від глибини  $h_{\text{поч}} = h_{\text{к}}$  до глибини, що встановиться в кінці швидкотечії. Оскільки швидкотечія коротка, то значення цієї глибини можна визначити за допомогою побудови кривої спаду по всій її довжині від початку ( $h_{\text{к}}$ ) до “умовної” нормальної глибини за межами швидкотечії (див. рис. 6). За даними розрахунків “умовна” нормальна глибина за межами швидкотечії становитиме  $h_{0б} = 0,89 \text{ м}$  (див. табл. 1). Значить

$$h_{\text{кін}} = h_{0б} + \Delta h = 0,89 + 0,01 = 0,90 \text{ м} \quad (2.11)$$

Щоб побудувати криву спаду на швидкотечії переходимо до розрахунків за методом В.І. Чарномського.

Основні гідравлічні елементи і розрахункові величини для перерізу з глибиною  $h_{\text{поч}} = h_{\text{к}} = 1,41 \text{ м}$  становлять:

$$\omega_{\text{поч}} = b * h_{\text{к}} = 3 * 1,41 = 4,23 \text{ м;}$$

$$\chi_{\text{поч}} = b + 2h = 3 + 2 * 1,41 = 5,82 \text{ м;}$$

$$R_{\text{поч}} = \frac{\omega}{\chi} = \frac{4,23}{5,82} = 0,727 \text{ м;}$$

$$z = 0,37 + 2,5\sqrt{n} - 0,75(\sqrt{n} - 0,1)\sqrt{R};$$

$$z = 0,37 + 2,5\sqrt{0,017} - 0,75(\sqrt{0,017} - 0,1)\sqrt{0,727} = 0,676;$$

$$R^z = 0,727^{0,676} = 0,806;$$

$$W = \frac{1}{n} R^z = \frac{0,806}{0,017} = 47,82;$$

$$E_{\text{поч}} = \frac{\alpha Q^2}{2g} * \frac{1}{\omega^2} + h_{\text{поч}} = \frac{1,1 * 15^2}{2 * 9,81 * 4,23^2} + 1,41 = 2,12;$$

$$i_{\text{фпоч}} = \left(\frac{Q}{\omega * W}\right)^2 = \left(\frac{15}{4,23 * 47,82}\right)^2 = 0,0195.$$

Для побудови вільної поверхні потоку беремо проміжні значення глибин у перерізах швидкотечії (табл. 3):

Таблиця 3

Проміжні значення глибин для побудови кривої споруди

Номер перерізу	1 початковий	2	3	4	5	6	7	8 кінцевий
Глибини	1,41	1,35	1,25	1,15	1,05	1,00	0,95	0,90

Результати розрахунків зводимо в табл. 4.

Таблиця 4

**Визначення ухилів між перерізами**

Розрахункові формули і параметри	Одиниця виміру	Глибини в перерізах							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		1,41	1,35	1,25	1,15	1,05	1,00	0,95	0,90
$\omega = b * h$	м <sup>2</sup>	4,23	4,05	3,75	3,45	3,15	3,00	2,85	2,70
$\chi = b+2h$	м	5,82	5,70	5,50	5,30	5,10	5,00	4,90	4,80
$R = \frac{\omega}{\chi}$	м	0,727	0,711	0,682	0,651	0,618	0,60	0,58	0,56
$z = 0,696 - 0,023\sqrt{R}$	—	0,676	0,677	0,677	0,677	0,678	0,678	0,678	0,679
$R^z$	—	0,806	0,794	0,772	0,748	0,722	0,707	0,691	0,675
$W = \frac{1}{n}R^z$	м/с	47,42	46,69	45,40	43,99	42,45	41,60	40,66	39,68
$E = h + \frac{\alpha * Q^2}{2g * \omega^2}$	м	2,115	2,119	2,147	2,210	2,308	2,387	2,503	2,630
$i_f = \left(\frac{Q}{\omega * W}\right)^2$	—	0,0056	0,0063	0,0078	0,0098	0,0126	0,0144	0,0168	0,0196

Тепер знаходимо довжини між цими перерізами. Результати розрахунків наведено у табл.5.

## Результати розрахунків довжин між перерізами

Розрахункові формули і параметри	І н т е р в а л      п о м і ж      г л и б и н а м и													
	$h_1$	$h_2$	$h_1$	$h_2$	$h_1$	$h_2$	$h_1$	$h_2$	$h_1$	$h_2$	$h_1$	$h_2$	$h_{11}$	$h_2$
	1,41	1,35	1,35	1,25	1,25	1,15	1,15	1,05	1,05	1,00	1,00	0,95	0,95	0,90
$i_{fcp} = \frac{i_{f1} + i_{f2}}{2}$	0,00595		0,00705		0,0088		0,0112		0,0125		0,0156		0,0182	
$i_0 - i_{fcp}$	0,01405		0,01295		0,0112		0,0088		0,0065		0,0044		0,0018	
$E_2 - E_1$	0,004		0,028		0,063		0,098		0,079		0,116		0,127	
$l_{1-2} = \frac{E_2 - E_1}{i_0 - i_{fcp}}$	0,28		2,16		5,63		11,14		12,15		26,36		70,56	
Довжина кривої спаду	$l_{cn} = 31,36$ м													
	$l_{cn} = 57,72$ м													



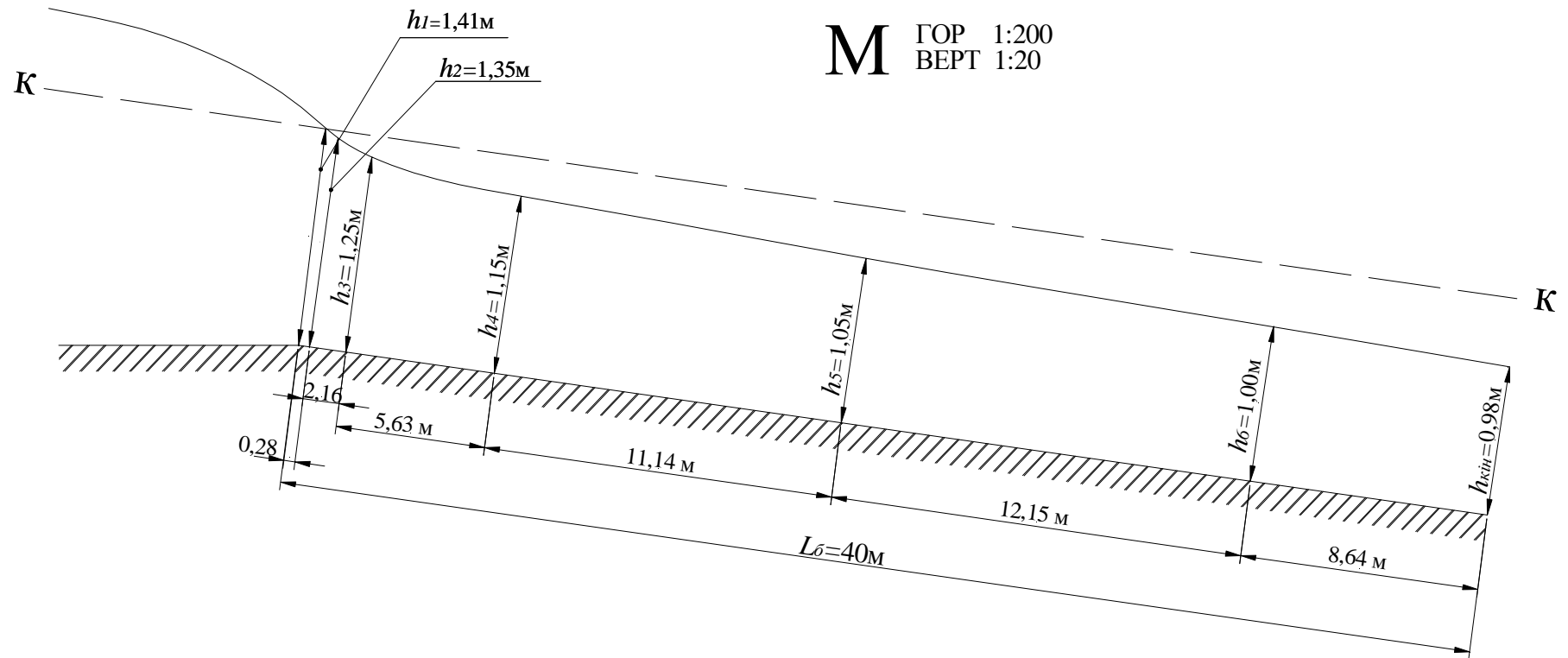


Рис. 7. Крива спаду на швидкотечії

Аналізуючи дані табл. 5 робимо висновок, що у кінці швидкотечії, довжина якої  $l_0 = 40$  м, встановиться глибина, що буде знаходитись між глибинами:

$$h_1 = 1,00\text{м};$$

$$h_2 = 0,95 \text{ м.}$$

Фактичне значення  $h_{кін}$  знайдемо за допомогою лінійної інтерполяції (рис. 8):

$$h_{кін} = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{26,36} * (40,00 - 31,36);$$

$$h_{кін} = 1,00 - \frac{1,00 - 0,95}{26,36} * 8,64 = 0,98 \text{ м.}$$

Криву спаду, що утворюється на швидкотечії показано на мал.7. Для відтворення більшої наочності, у кресленнях беруть вертикальний масштаб таким, щоб перевищував горизонтальний у 10 разів. Горизонтальний масштаб беруть 1:200, а вертикальний – 1:20.

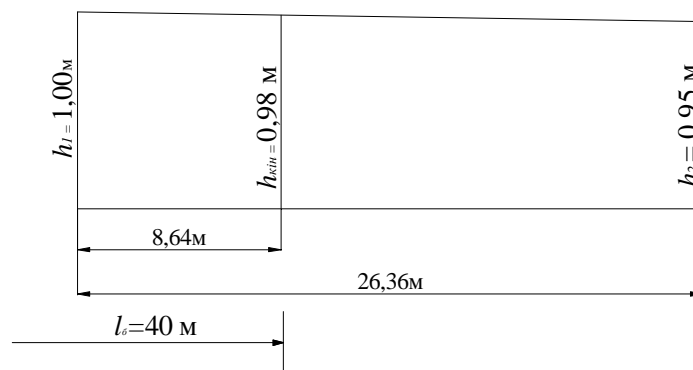


Рис.8. Схема для знаходження кінцевої глибини на швидкотечії

#### 4. Струмененапрямний носок

Струмененапрямний носок має невелику довжину – від одного до двох метрів. У зв'язку з чим допускають, що глибина на сході з носка ( $h''$ ) дорівнює глибині, що утворюється в кінці швидкотечії, тобто

$$h'' = h_{кін}.$$

Глибина  $h''$  завжди більша ніж  $h_{кін}$  (за  $\Theta \geq 0$ ), а це означає, беручи  $h_{кін} = h''$  ми дещо збільшуємо швидкість  $h''$  при сході з носка, тобто вносимо у подальші розрахунки деякий запас.

Ці величини необхідні для подальшого визначення дальності падіння струменя на дно нижнього б'єфу. Для консольних водоскидів відстань падіння  $l_{над}$  має надважливе значення адже чим більша відстань падіння,

тим далі від консолі утворюється воронка розмиву, і менша небезпека підмиву та руйнування опор консолі.

Визначимо дальність польоту струменя від кінця консолі, не враховуючи при цьому опір, який чинить повітря. Розташуємо координатні осі у центрі кінцевого перерізу носка консолі так, як показано на рис.9 і запишемо рівняння руху для частинки рідини, що вилітає з центру перерізу.

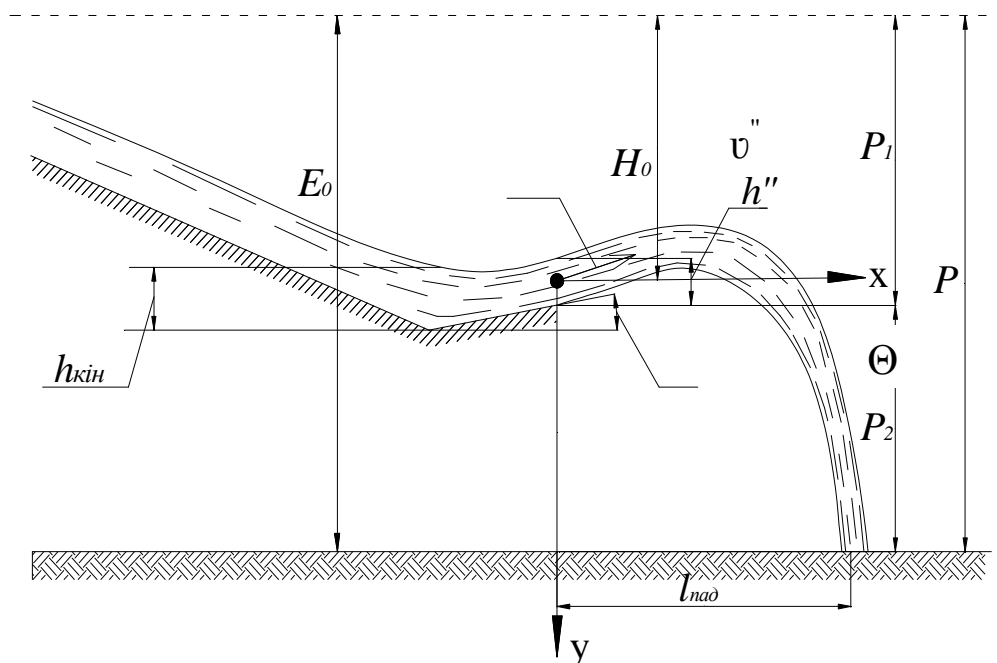


Рис. 9. Схема падіння струменя з носка консолі

Швидкість частинки позначимо  $v''$ ,

$$\begin{cases} x = v'' t * \cos\Theta \\ y = \frac{1}{2}gt^2 - v'' t \sin\Theta \end{cases} \quad \left| \quad t = \frac{x}{v'' \cos\Theta}, \right. \quad (3.1)$$

де  $\Theta$  – кут підйому носка консолі.

Виключимо час  $t$  з останніх рівнянь. Отримаємо

$$y = \frac{1}{2}g \frac{x^2}{(v'')^2 \cos^2 \theta} - v'' \frac{x}{v'' \cos \theta} * \sin \theta,$$

$$y = \frac{gx^2}{2(v'')^2 \cos^2 \theta} - \frac{x \sin \theta}{\cos \theta},$$

$$\frac{g}{2(v'')^2 \cos^2 \theta} x^2 - \frac{\sin \theta}{\cos \theta} x - y = 0;$$

$$x = \frac{\frac{\sin \theta}{\cos \theta} + \sqrt{\frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{4gy}{2'' \cos^2 \theta}}}{\frac{2g}{2'' \cos^2 \theta}},$$

$$x = \frac{(\prime\prime)^2 \cos^2 \theta}{g} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \left[ \frac{1}{\cos \theta} * \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2gy}{(\prime\prime)^2}} \right],$$

$$x = \frac{(\prime\prime)^2}{g} \cos \theta \left[ \sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2gy}{(\prime\prime)^2}} \right].$$

Швидкість у точці О можна виразити за такою залежністю:

$$v'' = \varphi \sqrt{2gH_0}$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт, що враховує втрати напору від початкового перерізу швидкотечії до кінцевого перерізу струмененапрямого носка;

$H_0$  – повний напір відносно площі порівняння, що проходить через точку О, яка знаходиться в кінці носка консолі.

Швидкість на виході з носка консолі в точці О, можна брати із деяким запасом рівною швидкості в кінці швидкотечії, тобто  $v'' = v_{кін}$ . Врахуємо також, що

$$\sin \theta = i'', \quad \cos \theta = \sqrt{1 - i''};$$

отримаємо

$$x = l_{nad} = \frac{(\prime\prime)^2}{g} \sqrt{1 - i''} i'' + \left[ \sqrt{(i'')^2 + \frac{2g}{(\prime\prime)^2} (p_2 + 0,5h)} \right], \quad (3.2 a)$$

або

$$l_{nad} = \frac{(\prime\prime)^2}{g} \cos \theta \left[ \sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2g}{(\prime\prime)^2} (p_2 + 0,5h)} \right]. \quad (3.2 б)$$

**Приклад.** За даними прикладу розрахунку швидкотечії визначити дальність падіння струменя і побудувати траєкторію падіння, якщо  $p_2 = 4$  м, кут нахилу носка консолі  $\theta = 30^\circ$ , а швидкість і глибина потоку в кінці носка консолі дорівнюють швидкості і глибині в кінці швидкотечії, тобто

$$h'' = h_{кін} = 0,98 \text{ м};$$

$$v'' = v_{кін} = \frac{Q}{b \cdot h_{кін}} = \frac{15}{3 \cdot 0,98} = 5,1 \text{ м/с}.$$

Дальність падіння струменя з носка консолі підраховуємо за формулою (3.2 б):

$$l_{пад} = \frac{5.1^2}{9.81} * 0,866 \left[ 0.5 + \sqrt{0,25 + \frac{2 * 9.81}{5.1^2} \left( 4 + \frac{0.98}{2} \right)} \right] = 5,52 \text{ м.}$$

Розрахунок траєкторії, що описує центр струменя під час падіння, виконано в табличній формі (табл. 6).

Таблиця 6

**Розрахунок координат вісі струменя, падаючого з носка консолі**

t, c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
$x = v'' t * \cos\Theta$	0.44	0.88	1.32	1.77	2.21	2.65	3.09	3.53	3.97	4.42	4.86	5.30	5.74
$y = \frac{1}{2}gt^2 - v'' t \sin\Theta$	-0.21	-0.31	-0.33	-0.24	-0.05	+0.24	+0.61	+1.10	+1.67	+2.36	+3.13	+4.00	+4.97

Траєкторію падіння осі струменя за даними розрахунків показано на рис.10.

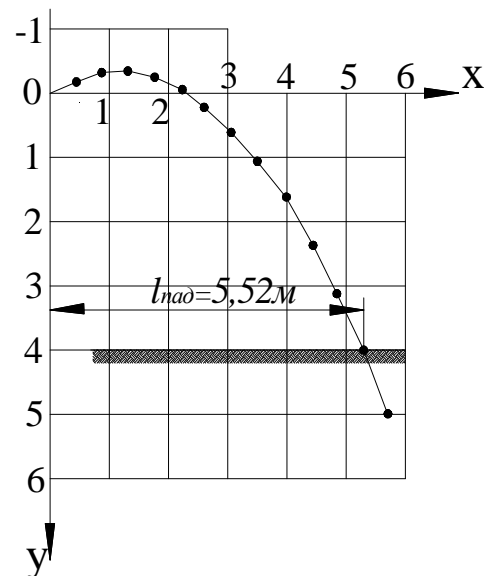


Рис.10. Траєкторія падіння осі струменя у нижній б'єф

Зазначимо деякі аспекти відносно дальності падіння струменя:

1. За горизонтального спрямування носка консолі ( $i'' = 0$ ) максимальна довжина падіння  $l_{max}$  спостерігатиметься за перепаду на консолі  $p_2 = \frac{1}{2}E_0$ ;  $p_2 = \frac{1}{2}p$ ;  $p_2 = p_1$ .

2. Зі збільшенням ухилу носка консолі максимальна відстань падіння струменя відповідатиме значенням перепаду консолі  $p_2 < \frac{1}{2}E_0$ .

3. За ухилу носка  $i'' = 0,5$  ( $\Theta = 30^\circ$ ) максимальна довжина падіння матиме місце, коли  $p_2 = 0$ . Це зводить нанівець поняття консольного водоскиду. В цьому випадку відмітки кінця консолі і dna нижнього б'єфу співпадають, а струмінь відкидається тільки носком консолі;

У табл. 6 наведено максимальні значення дальності падіння струменя з носка консолі ( $l_{\max}/E_0$ ) для заданого ухилу носка ( $i''$ ) за відповідного перепаду ( $p_2/E_0$ ).

Таблиця 6

**Максимальні значення дальності падіння струменя з носка консолі**

Ухил носка консолі ( $i''$ )	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Перепад консолі $p_2/E_0$	0,500	0,444	0,375	0,285	0,1665	0,000
Дальність падіння $l_{\max}/E_0$	1,000	1,105	1,225	1,362	1,525	1,732

### 5. Воронка розмиву

У тому місці, де струмінь падає на ґрунт dna нижнього б'єфу, відбуватиметься розмив русла, який називають місцевим розмивом. У результаті більш або менш тривалої дії струменя утворюється воронка розмиву. Максимальна глибина розмиву утворюється у місці падіння струменя.

З практичних міркувань важливо визначити глибину воронки розмиву і встановити її ширину по верху. Визначення розмірів воронки розмиву відбувається на основі теорії сполучених глибин досконалого гідравлічного стрибка, враховуючи що струмінь під час падіння на дно нижнього б'єфу зберігає ширину, що дорівнює ширині носка консолі. На початку розрахунків встановлюють швидкість  $v$  і кут  $\beta$ , з яким струмінь досягає dna нижнього б'єфу (рис. 11).

Середня швидкість  $v$ , з якою струмінь досягає dna нижнього б'єфу, буде визначатися без урахування аерації струї, за формулою

$$v = \varphi * \sqrt{2gE_0}, \quad (4.1)$$

де  $\varphi$  — коефіцієнт, що враховує втрати напору від початкового перерізу швидкотечії до кінцевого перерізу струменепрямого носка.

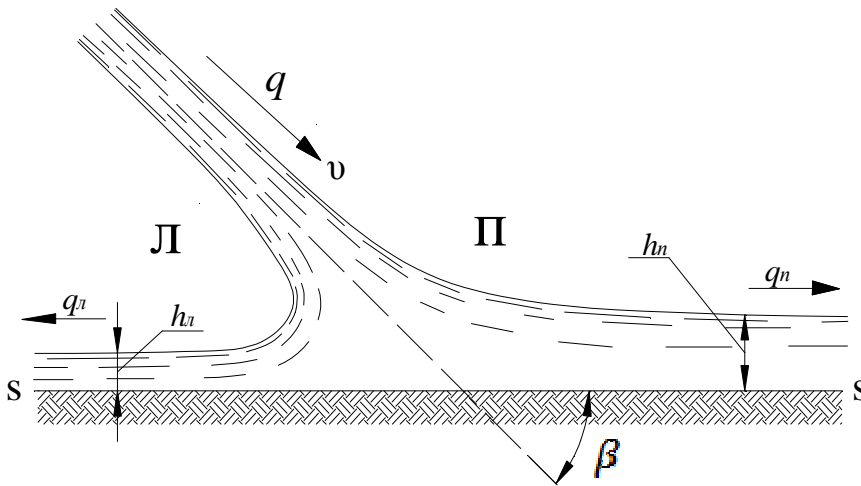


Рис. 11. До визначення кута падіння струменя на дно нижнього б'єфу

Враховуючи, що горизонтальна складова швидкості не змінюється під час падіння струменя, і  $\varphi = 1$  отримаємо

$$v_x = \sqrt{2gH_0} * \cos \theta. \quad (4.2)$$

Кут між напрямком швидкості  $v$  і горизонтальним напрямком визначають з рівняння:

$$\cos \beta = \frac{v_x}{v} = \sqrt{\frac{H_0}{E_0} * \cos \theta}. \quad (4.3)$$

Оскільки  $\cos \theta = \sqrt{1 - i''}$ , то можна записати

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - i''^2) * \frac{H_0}{E_0}} \quad (4.4)$$

У тому місці, де вода падає на розмивне дно нижнього б'єфу, відбуватиметься місцевий розмив. Струмінь, що має середню швидкість  $v$ , після удару об нерухому площину S – S, поділяється на два самостійних струмені, спрямованих протилежно (рис. 11). Якщо погонні витрати основного струменя дорівнюють  $q$ , погонні витрати лівого струменя  $q_l$ , а правого  $q_{np}$ , то

$$q_l + q_{np} = q/4.5/$$

Залежної від кута падіння струменя на дно нижнього б'єфу матимемо:

$$1) \beta = 90^\circ \Rightarrow q_l = q_{np};$$

$$2) \beta = 0^\circ \Rightarrow q_l = 0; \quad q_{np} = q;$$

$$3) 0^\circ < \beta < 90^\circ \Rightarrow q_l = \frac{\beta}{180} * q; \quad q_{np} = \left(1 - \frac{\beta}{180}\right) * q.$$

Якщо середні швидкості в обох струменях будуть однаковими і дорівнюватимуть швидкості основного струменя  $\vartheta$ , знайдемо глибини води в струменях після розподілу:

$$\begin{aligned} h_l &= \frac{q_l}{\vartheta}, \\ h_{np} &= \frac{q_{np}}{\vartheta}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Розмив русла відбуватиметься до тих пір, поки глибини розмиву не досягнуть відповідних значень:

$$\begin{aligned} d_l &= h_l'' - h_{н.б}, \\ d_{np} &= h_n'' - h_{н.б}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

де  $h_l''$  і  $h_n''$  – глибини, що взаємні з глибинами  $h_l$  і  $h_n$ :

$$h'' = \frac{h_c}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{g h_c^3}} - 1 \right], \quad (4.8)$$

$h_c$  – глибина, що відповідає глибинам  $h_l$  і  $h_n$ .

Аналізуючи залежності (4.7), робимо висновок, що під час визначення вертикальних параметрів воронки розмиву зовсім не враховуються властивості ґрунту нижнього б'єфу. Тому, на основі дослідних матеріалів рекомендують отримані значення розмиву  $d_l$  і  $d_n$  множити на коефіцієнт запасу  $\sigma_3$ . Тоді розрахункова глибина розмиву можна визначити за формулою:

$$d = \sigma_3 * (h'' - h_{н.б}) \quad (4.9)$$

де  $\sigma_3 = 2$  – для щільного лесу;

$\sigma_3 = 1,5 \div 2,5$  для гравелисто-пісчаних ґрунтів.



Горизонтальні розміри воронки розмиву рекомендують визначати за формулами довжини досконалого гідравлічного стрибка:

$$\begin{aligned} l_{л} &= \beta * l_{стр.л}, \\ l_{пр} &= \beta * l_{стр.п} \end{aligned} \quad (4.10)$$

У цих залежностях коефіцієнт, що дорівнює  $\beta$  0,7 ÷ 0,8, був введений М.Д. Чертоусовим.

Параметри воронки розмиву і основні розміри, за якими вона побудована, показано на рис. 12.

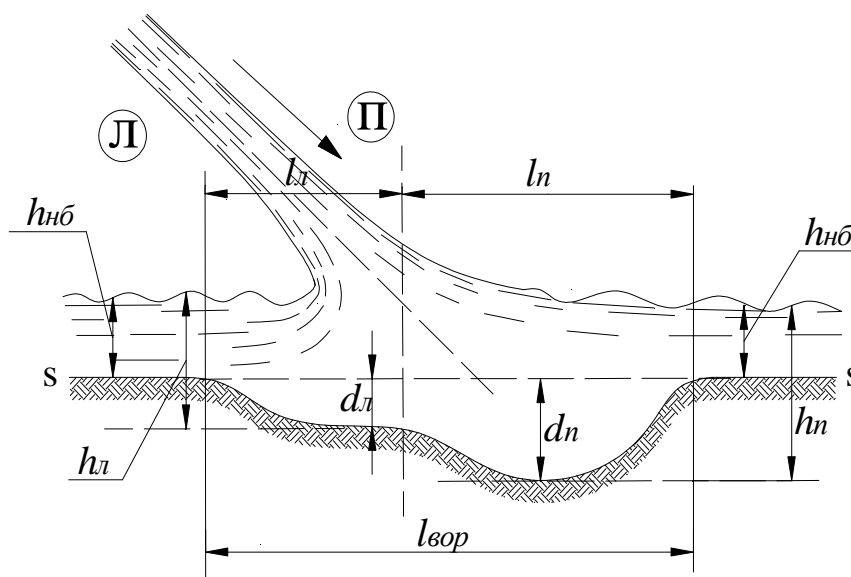


Рис. 12. Воронка розмиву

### Список літератури

1. Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И. Гидравлика. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
2. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. – М., Стройиздат, 1972. – 648с.
3. Замарин Е.А. Проектирование гидротехнических сооружений. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1961. – 232 с.
4. Чугаев Р.Р. Гидравлика, – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

Навчально-методичне видання

# ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК КОНСОЛЬНОГО ВОДОСКИДУ

Методичні вказівки

до виконання розрахунково-графічної роботи  
для студентів факультету інженерних систем та екології,  
які навчаються за напрямом підготовки 6.060101 “Будівництво”  
професійного спрямування “Гідротехнічне будівництво”

Укладачі: ПАВЛОВ Євген Ігорович,  
КРАВЧУК Андрій Михайлович

Редагування та коректура *В.С. Ясінської*  
Комп’ютерне верстання *Ю.Г. Томащука*

Підписано до друку. 28.03. 2016. Формат 60 × 84<sub>1/16</sub>  
Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк.1,5.  
Електронний документ. Вид. №27/III-16.

Видавець і виготовлювач  
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680  
E-mail: [red-isdat@ukr.net](mailto:red-isdat@ukr.net), тел. (044)241-54-22, 241-54-87

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб’єктів  
Видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.

