

Лекція 9. Вимірювання витрат води

Мета лекції: ознайомлення з методами вимірювання витрат води, засвоєння методу «швидкість-площа» для вимірювання витрати водного потоку, засвоєння кількісних характеристик термічного і кригового режиму річок, усвідомлення методів прискореного вимірювання витрат води.

План

1. Методи вимірювання витрат води.
2. Вимірювання витрат води методом “швидкість-площа”.
3. Вимірювання витрат води поплавками.
4. Методи прискореного вимірювання витрат води.

1. Методи вимірювання витрат води. Витрата води визначається як середній за час вимірювання об’єм води, який проходить через поперечних перетин потоку за одну секунду.

Витрата води геометрично представляється як об’єм водного простору, обмежений між вертикальною плоскістю живого перерізу і поверхнею, яка проходить через кінці векторів швидкостей течії. Це водяне тіло називається гідрометричною моделлю витрати води. Застосовуються наступні методи вимірювання витрат води.

Метод “швидкість – площа” заснований на вимірюванні поперечного перерізу потоку та швидкості течії в точках або інтегрально на вертикалях.

Метод змішування із вводом у потік індикаторів і визначенням ступеню їх розбавлення.

Гідравлічні методи, які реалізуються за допомогою спеціальних витратовимірювальних улаштувань.

Об’ємний метод, заснований на фіксації часу наповнення мірних ємностей.

Фізичні методи – з використанням ультразвуку, електромагнітної індукції, тощо.

Внаслідок змінності гідравлічних елементів у часі і просторі витрату не можна визначити за допомогою прямих вимірювань. Значення витрати можна отримати в результаті вимірювання відстані, глибин та швидкостей потоку. На їх основі витрати води можна визначити різним чином, тому має місце поняття математичної моделі витрати води – як форми аналітичного уявлення про сукупність елементів водного потоку.

Метод “швидкість – площа” – різновидність дотичних вимірювань, при яких значення витрати представляється через інтеграл швидкості: $Q = \int v dF$. Якщо дискретизація витрат проводиться за елементарними витратами $q = vh$, то інтеграл має вигляд:

$$Q = \int_0^B v h db, \quad (1)$$

де v – середня швидкість на вертикалі глибиною h .

Основний елемент моделей витрат – часткові витрати q_s :

$$Q = \sum_{s=1}^N q_s. \quad (2)$$

Моделі витрат відрізняються за формою інтерполяції елементів витрат води. Відомі такі детерміновані моделі:

1) Модель Гарляхера:

$$Q = \sum_{s=1}^N 0,5(q_i + q_j) b_s, \quad (3)$$

де q_i, q_j - елементарні витрати через граничну i -у та j -у вертикалі;

b_s - ширина відсіку.

2) Середньосекційна модель:

$$Q = \sum_{s=1}^N 0,25(v_i + v_j)_s \cdot (h_i + h_j)_s \cdot b_s \quad (4)$$

3) Центральносекційна модель:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=N-1} 0,5 \cdot v_i \cdot h_i (b_s + b_{s+1}) \quad (5)$$

4) Модель, яка застосовувалась в колишньому СРСР:

$$Q = \sum_{s=1}^N 0,5(v_i + v_j) S f_s. \quad (6)$$

Гідрометричні створи обладнують гідрометричними дистанційними установками, які застосовують для вимірювань витрат води на річках шириною до 100 м, глибиною до 12 м и швидкостями течії до 5 м/с (рис. 2.18).

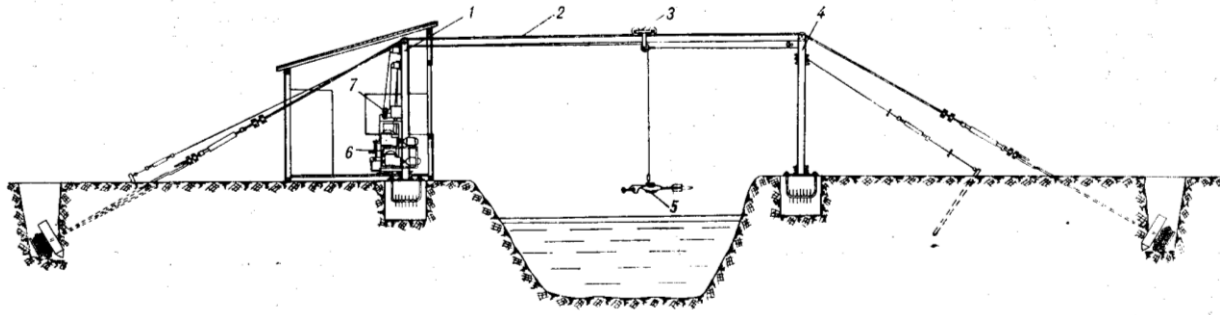


Рисунок 1 - Гідрометрична дистанційна установка ГР-64

1, 4 – берегові опори, 2 – сталеві канати, 3 – каретка, 5 – вертушка з вантажем, 6 – лебідка з електроприводом, 7 – блок-лічильник

Звичайні вимірювання витрат води (без дистанційних установ) найбільш зручно виконувати із залізничних та автомобільних мостів. Гідро створ розташовують з низового боку моста, кожний прокат моста розглядається як окрема частина русла, в якій призначають не менше 3 швидкісних вертикалей.

Вимірювання витрат з човнів вимагає особливих заходів безпеки (рис.2).

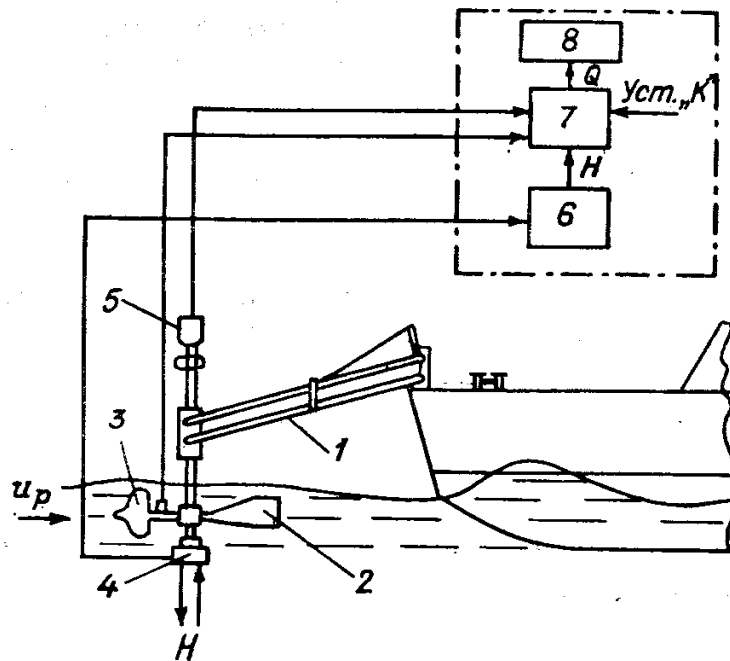


Рисунок 2 - Комплект обладнання і приладів для замірів витрат води із судна, що рухається

1 – конструкція для занурення приладів у потік; 2 – перогідрофлюгера; 3 – вимірювач швидкості течії; 4 – гідрофон ехолоту; 5 – індукційний датчик кута; 6 – апаратура для реєстрації глибин; 7 – лічильник витрати води; 8 – цифровий індикатор витрати.

2. **Вимірювання витрат води методом “швидкість-площа”**. Існують декілька варіантів методу “швидкість-площа”:

- багатоточечний (детальний), при якому в гідростворі призначають 10-15 швидкісних вертикалей, швидкість вимірюють на кожній вертикалі в п’яти та більше місцях;
- основний, коли число швидкісних вертикалей зменшують у 1,5-2 рази, швидкість потоку на кожній вертикалі вимірюють в 2 або 3 точках;
- прискорений.

Для виміру глибин **промірні вертикалі** призначають через рівні відстані у кількості 20-35. З появою шуги глибини проміряють при кожному визначенні витрати води. Під час кригоставу вимірюють відстані від постійного початку до урізу нижньої поверхні криги. Уріз поверхні води встановлюється по профілю. На промірних вертикалях вимірюється глибина занурення криги та шару шуги з похибкою відповідно 1 та 10 см.

Головна вимога до розміщення **швидкісних вертикалей** полягає в тому, щоб відсіки між ними пропускали рівні долі загальної витрати води. Для визначення положення вертикалей вимірюють витрати при збільшеній їх кількості, викреслюють поперечний профіль русла та будують інтегральну криву часткових витрат в долях від загальної витрати $q_s = q_s / Q$ (рис. 2.20).

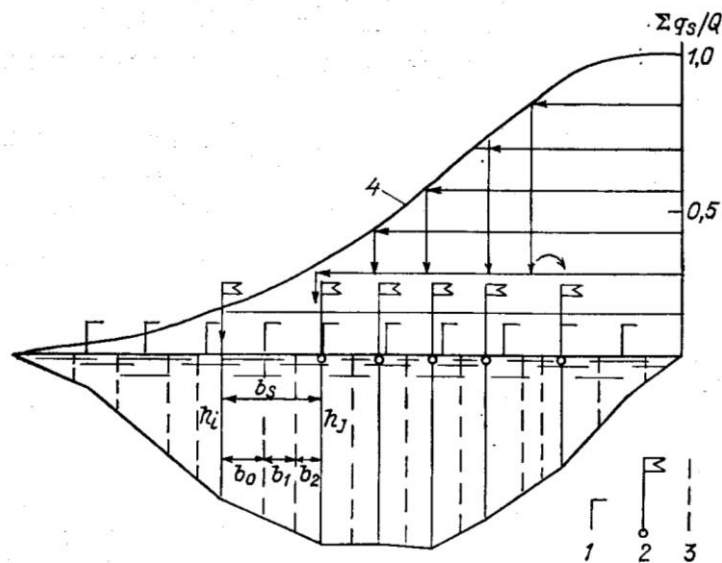


Рисунок 3 - Уточнення розташування швидкісних вертикалей
 1 – рівномірне розташування вертикалей по ширині; 2 – оптимальне розташування вертикалей; 3 – промірні вертикалі; 4 – інтегральний графік початкових витрат води

Необхідно, щоб розташування швидкісних вертикалей співпадало з місцями перелому поперечного профілю русла, щоб одна із вертикалей знаходилась на стрезені ріки.

Робочою глибиною вертикалі при вільному від криги руслі вважається відстань від дна до поверхні води, при наявності криги – відстань від дна до нижньої поверхні криги.

При багатоточечному способі швидкості вимірюють:

- якщо русло вільне від водної рослинності та криги в 5 точках: у поверхні води; на 0,2; 0,6; 0,8 робочої глибини та біля дна;
- при наявності водної рослинності та під криговим покривом до 5 точок додається шоста – на 0,4 робочої глибини;
- при наявності водної рослинності та під криговим покривом до 5 точок додається шоста – на 0,4 робочої глибини.

При основному та прискореному способах швидкість вимірюють:

- у вільному руслі та при наявності кригового покриву у двох точках 0,2 та 0,8 робочої глибини, якщо глибина недостатня – в одній точці на 0,6 або 0,5 робочої глибини;
- одноточечні вимірювання швидкості виконують на 0,6h – при вільному руслі; 0,5h – при наявності криги або водної рослинності.

Спостереження за рівнем води виконують на протязі всього періоду вимірювання витрат води: на початку та в кінці проміру глибин, перед початком та в кінці проміру глибин, перед початком та в кінці вимірювання швидкостей течії. Витрата води визначається за даними оброблених вимірених значень елементів.

1. Визначається площа відсіків між швидкісними вертикалями:

$$f_s = 0.5 (h_0+h_1) b_0 + 0.5 (h_1+h_2) b_1 + \dots + 0.5 (h_{N_s}+h_k) b_{N_s}, \quad (7)$$

де N_s – кілька промірних вертикалей;

h_0, h_1, h_n – значення глибин;

b_0, b_1, b_{N_s} – відстань між промірними вертикалями.

2. Середня швидкість на вертикалях v_b визначається за даними вимірювання швидкості течії в точках.

При одноточечних вимірюваннях за формулою:

$$v_b = \bar{U} \cdot 0,6 h \quad (8)$$

При двохточечних вимірюваннях:

$$v_b = 0.5 (U_{0.2h} + U_{0.8h}) \quad (9)$$

При вимірюванні у 3 точках

$$v_b = \frac{1}{36} (17 U_{0.2h} + 3 U_{0.6h} + 16 U_{0.8h}) \quad (10)$$

При вимірюванні у 5 точках

$$v_B = 0.05 U_0 + 0.347 (U_{0.2h} + U_{0.6h}) + 0.173 U_{0.8h} + 0.083 U_g \quad (11)$$

При наявності водної рослинності і криговому покриві – відповідно в 6, 3 і 2 точках:

$$v_B = 0.1 (U_n + 2 U_{0.2h} + 2 U_{0.4h} + 2 U_{0.6h} + 2 U_{0.8h} + U_g) \quad (12)$$

$$v_B = \frac{1}{3} (U_{0.15h} + U_{0.5h} + U_{0.8h}) \quad (13)$$

$$v_B = 0.5 (U_{0.2h} + U_{0.8h}) . \quad (14)$$

3. Середня швидкість у відсіку між швидкісними вертикалями:

$$v_s = 0.5 (v_i + v_j) . \quad (15)$$

4. Повна витрата води як сума часткових витрат дорівнює:

$$Q = k v_1 f_1 + 0.5 (v_1 + v_2) f_2 + \dots + (v_{n-2} + v_{n-1}) f_{n-1} + K_N v_{N-1} f_N \quad (16)$$

3. Вимірювання витрат води поплавками. Глибинні поплавки застосовують для вимірювання невеликих швидкостей течії (до 0,15 – 0,2 м/с), коли вимірювання вертушкою малонадійні.

Вимірювання витрат води поверхневими поплавками виконують при невеликому вітрі 2-3 м/с, на великих ріках – при швидкості вітру до 5 м/с. Вибирається прямолінійна ділянки ріки з однотиповими глибинами, шириною та повздовжнім ухилом водної поверхні на протяжності трьох-п'ятикратної ширини ріки. По берегу паралельно напрямленню течії прокладають магістраль та перпендикулярно до неї влаштовують 3 створа : верхній, середній і нижній. Тривалість ходу поплавків між крайніми створами повинна бути менша, ніж 20с. За 5-10 м вище від верхнього створу призначають пусковий створ, з якого пускають поплавки (15...20 штук). Вимірювання швидкості полягає у визначенні часу проходження ними відстані від верхнього створу та місць проходження через середній створ.

Перемножуючи площі відсіків між швидкісними вертикалями на напівсуму поверхневих швидкостей на них, отримують часткові фіктивні витрати $Q_{\phi s}$. Їх сума з урахуванням коефіцієнту дає повну фіктивну витрату Q_{ϕ} . Повна витрата

$$Q = K \cdot Q_{\phi} , \quad (17)$$

де K – коефіцієнт

$$K = 0,77 + 0,043 \sqrt{\bar{C} - 3,8} , \quad (18)$$

де $\bar{C} = C / g \geq 3,8$

C - коефіцієнт Шезі;

g - прискорення вільного падіння.

4. **Методи прискореного вимірювання витрат води.** Багатоточечні вимірювання вимагають багато часу, це може додавати додаткових похибок при паводках, випусках із водосховищ.

При використанні скорочених методів вимірювання зменшується кількість швидкісних вертикалей до 1-3. Існує два варіанта скорочених вимірювань.

- 1) застосування інтерполяційно-гідравлічної моделі витрати води;
- 2) використання його репрезентативних елементів.

Інтерполяційно-гідравлічна модель заснована на уявленні середньої швидкості на вертикалі у вигляді суми двох складових :

$$v_i = \tilde{v}_i + w_i \quad (19)$$

де \tilde{v}_i - компонента гідравлічно зумовленої глибиною на вертикалі.

Якщо ухил J та коефіцієнт шорсткості n незмінні за шириною потоку:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_i &= ah_i^{2/3} \\ a &= \sqrt{I} / n \end{aligned} \quad (20)$$

w_i – структурна складова середньої швидкості на вертикалі: Значення w_i не змінюються із зміною глибин, тому припустима їх інтерполяція:

$$w_s = 0,5(w_i + w_j) \quad (21)$$

І.Ф. Карасьовим та В.А. Ременюком синтезована інтерполяційно-гідравлічна модель витрат води:

$$Q = \sum_{s=1}^N \left\{ a_0 h_s^{\frac{2}{3}} + P_s \left[v_i + v_j - a_0 \left(h_i^{\frac{2}{3}} + h_j^{\frac{2}{3}} \right) \right] \right\} f_s \quad (22)$$

де h_s – середня глибина у відсіку між вертикалями;

P_s – коефіцієнт, $P_s=0,7$ - для прибережних відсіків; $P_s=0,5$ – для інших відсіків;

a_0 - коефіцієнт, значення якого дорівнює:

$$a_0 = \frac{I}{N_b} \sum \frac{v_i}{hl^{2/3}}, \quad (23)$$

де N_B – кількість швидкісних вертикалей.

Переваги інтерполяційно-гідравлічної моделі витрати води: виключення систематичної похибки – занижень витрат при скороченні числа швидкісних вертикалей.

Середня швидкість потоку v пов'язана з середньою швидкістю на вертикалі, яка називається репрезентативною швидкістю.

За репрезентативну швидкість приймають максимальну швидкість в поперечному січенні потоку або в точці стрезеневої вертикалі на глибині $0,2h$.

За даними багатоточечних вимірювань $f(U_{кр})$ або $f(U_{доп})$ будують залежності

$$\begin{cases} v_{cp} = a_0 + a_1 U_{макс} , \\ v_{cp} = a_0 + a_1 u_{0,2h} . \end{cases} \quad (24)$$

Внаслідок того, що коефіцієнт точки з максимальною швидкістю не залишається постійним, використовуються в якості репрезентативних середні швидкості на вертикалях, розташованих на відстанях $0,2B$ і $0,8B$ (рис. 2.21), де B – ширина річки. Розрахункове рівняння має вигляд:

$$Q = S \cdot v_{cp} \quad (25)$$

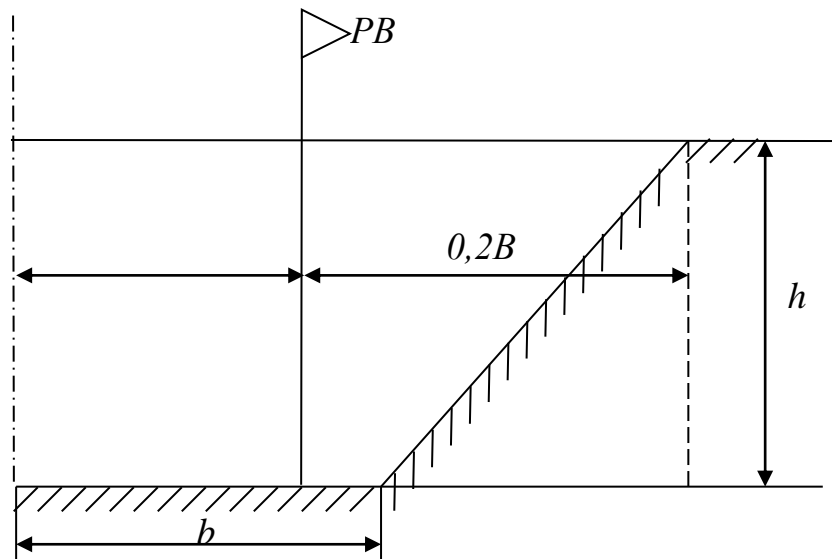


Рисунок 4 - Положення репрезентативної вертикалі

Метод ефективний при відносно великих витратах:

$$Q/Q_{\text{макс}} > 0,25,$$

де $Q_{\text{макс}}$ - середня багаторічна максимальна витрата води.

Серед скорочених методів вимірювання застосовують також інтеграційні заміри із судна, що рухається, методи з використанням фізичних ефектів, аерогідрометричні методи [2].

5. Вимірювання витрат води на малих водотоках. Застосування методу – швидкість-площа на невеликих водотоках ускладнюється у зв'язку з малими глибинами, значною косоstrуминністю, нестійкістю дна і берегів. В таких умовах найкращі результати можна отримати при застосуванні контрольних русел та гідрологічних витратомірів.

Впорядкування природних русел передбачає роботи по їх сплануванню, закріпленню берегів, очищенні від каміння, сміття. Якщо ці заходи неефективні, треба будувати штучні русла (рис. 2.22).

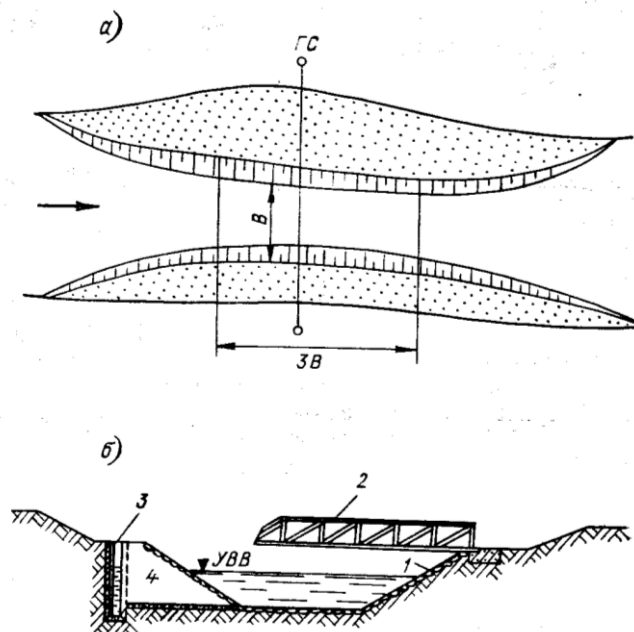


Рисунок 5 – Звуження русла (а) та контрольне русло (б)

1 – бетонний пояс; 2 – гідрометричний місток; 3 – колодязь самописця; 4 – з'єднувальна труба колодязя; 5 – підсіпка.

Водозлив – це перешкода на шляху потоку у вигляді вертикальної стіни або порогу, через який переливається вода. В залежності від товщини перешкоди та її форми повздовжнього профілю розрізняють водозливи з тонкою стінкою, широким порогом практичного профілю.

На рис. 2.23 показано трикутний водозлив з тонкою стінкою. Застосовується при значних коливаннях витрат води.

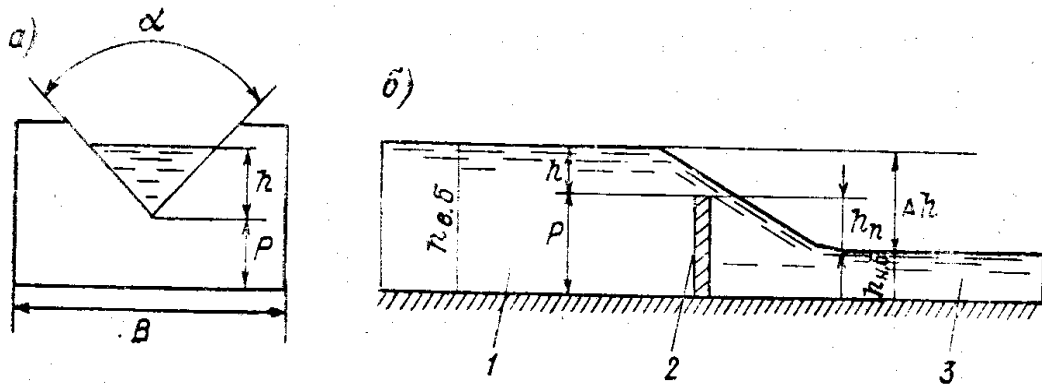


Рисунок 6 - Трикутний водозлив з тонкою стінкою

1 – канал (в.б. – верхній б’єф); 2 – стінка водозлива;
3 – н.б. – нижній б’єф.

Робоча формула водозливу для витрати води має вигляд:

$$Q = 2,361 \cdot c \cdot h_e^{5/2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (26)$$

де $h_1 = h + \Delta h$ – приведений напір над центральним кутом у створі вимірювання рівня, для $\alpha = 90^\circ$ $\Delta h = 0,85$ мм;

c – коефіцієнт витрати, який залежить від кута α , співвідношення висоти порога P , ширини каналу B , напору h . При $P/\beta \leq 0,2$, $h/P \leq 0,8$ та $\alpha = 90^\circ$ коефіцієнт витрати $c = 0,578$.

Трапецеїдальний водозлив з тонкою стінкою (рис. 7) встановлюється в каналах з пологими відкосами.

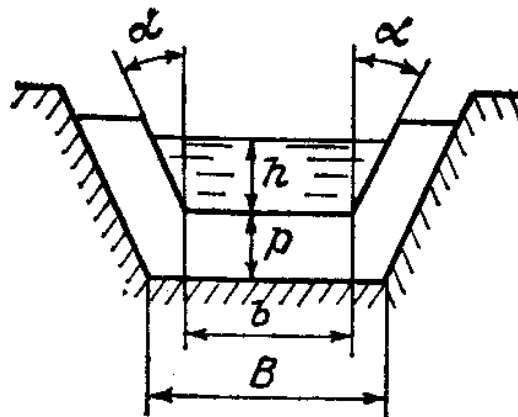


Рисунок 7 - Трапецеїдальний водозлив з тонкою стінкою

Витрата води через такий водозлив:

$$Q = 1,86 C_f \cdot b_0 h^{2/3}, \quad (27)$$

де $C_f = (b_0 + h) / (b_0 + 0,25 h)$.

Недоліком застосування водозливів з тонкою стінкою полягає в тому, що вони не пристосовані до пропуску наносів. Водозливи практичного профілю та лотки не перешкоджають транспортуванню наносів.

Лоток Паршала – один із найбільш розповсюджених типів витратомірів, які застосовують на меліоративних каналах та природних водотоках (рис. 2.25).

Емпірична формула для розрахунку витрати води:

$$Q = 0.372 b (3.278 h)^n, \quad (28)$$

де $n=1,569 b^{0,026}$.

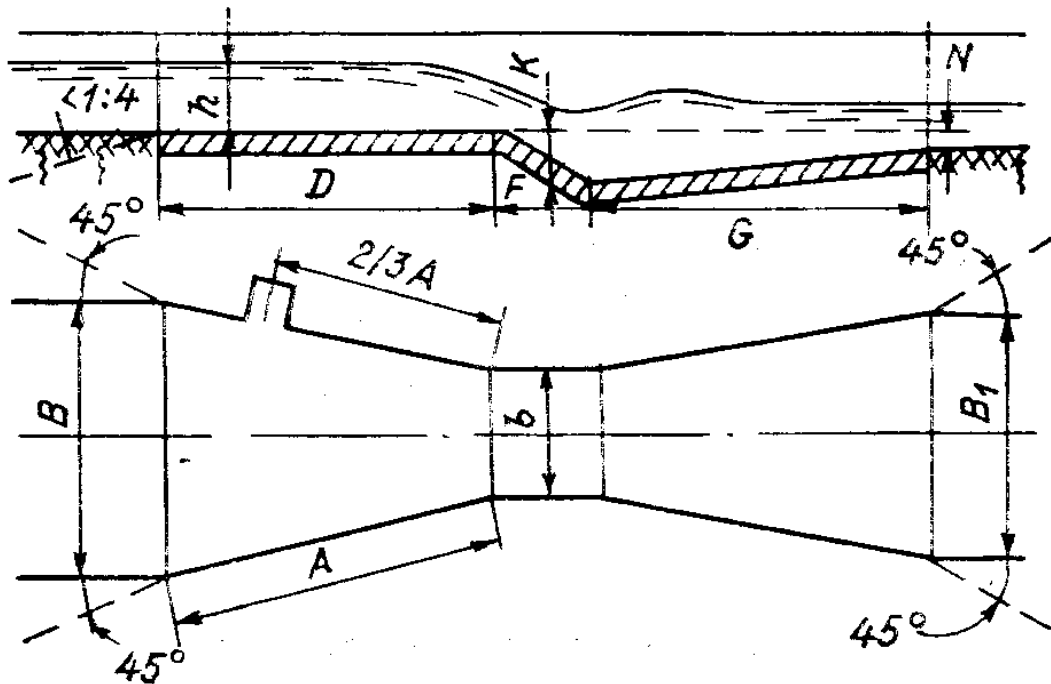


Рисунок 8 - Лоток Паршала

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що представляє собою гідрометрична модель витрати води?
2. Які методи вимірювання витрат води вам відомі?
3. Назвіть існуючі моделі витрат води.
4. В чому полягає точний спосіб вимірювання швидкості течії?
5. Як визначають витрату води за допомогою глибинних поплавків?
6. Як вимірюється витрата води на малих водотоках?