Розділ 1. ПРЕДМЕТ І МЕТОД ДИСЦИПЛІНИ

1.1. Предмет гідравліки, гідрології і гідрометрії

Земна куля з матеріальної точки зору має шарувату будову, яка сформувалась внаслідок дії гравітаційних сил. Вона складається з оболонок, що називається геосферами. Більш за все впливають на життя людства зовнішні геосфери: повітряна (атмосфера), водна (гідросфера) і тверда (літосфера). Всі оболонки перебувають у взаємозв'язку, утворюють в сукупності географічну оболонку.

Гідрологія – наука, яка вивчає гідросферу Землі, її склад, будову, властивості та процеси, що в ній відбуваються у зв'язку з атмосферою, літосферою і біосферою.

Основна маса природних вод зосереджена в океанах і морях, значно менша - на суші. Води, що знаходяться на поверхні суші у вигляді різних водних об'єктів називають поверхневими водами, а розділ гідрології, який їх вивчає, - гідрологією суші. Води, що знаходяться під земною поверхнею або в атмосфері, вивчаються відповідно гідрогеологією і гідрометеорологією.

Основним поняттям в гідрології суші вважається водний об'єкт. Водні об'єкти поділяються на водотоки і водойми. Природний водний об'єкт, в якому вода рухається під дією сил ваги, називається водотоком. Розрізняють постійні водотоки, коли рух води відбувається весь рік або більшу частину року, і тимчасові, коли рух води відбувається меншу частину року. Природний водний об'єкт в заглибленні суші із сповільненим водообміном, при якому водна маса тривалий час знаходиться в улоговині, називається водоймою. До водойм відносять озера і водосховища.

Гідрологія суші залежно від об'єкта вивчення ділиться на гідрологію річок, гідрологію озер та водосховищ, гідрологію боліт, гідрологію підземних вод, гідрологію льодовиків.

Залежно від мети і способу вивчення водних об'єктів в гідрології суші виділяють самостійні розділи: гідрографія, гідрометрія, інженерна гідрологія.

В задачу гідрографії суші входить вивчення закономірностей географічного розповсюдження поверхневих вод, опис конкретних водних об'єктів, їх режиму і господарського значення, а також визначення їх зв'язку з географічними умовами територій.

Гідрометрія розглядає методи спостережень за режимом водних об’єктів, методи та прилади, які при цьому використовуються, а також способи обробки результатів спостережень.

Інженерна гідрологія займається розробкою методів розрахунків і прогнозу різноманітних гідрологічних характеристик, необхідних для цілеспрямованого використання або змінення природного режиму водних об’єктів і для проектування на них гідротехнічних споруд.

Одною з задач інженерної гідрології є знаходження і прогнозування максимальних витрат дощових і снігових вод, об’єму стоку і наносів, які визначають розміри і надійність водоперепускних споруд на дорогах. Ці розрахунки більшою мірою використовуються при проектуванні штучних споруд на малих і середніх водотоках, де через відсутність або недостатність гідрометричних спостережень за витратами, швидкостями і рівнями води цінність методів інженерної гідрології найбільш очевидна.

В даному посібнику розглядаються лише ті розділи інженерної гідрології, які дають практичні навички визначення максимальних розрахункових витрат і об’ємів стоку у відсутність гідрометричних спостережень.

Гідрологічні розрахунки та прогнози неможливі без вивчення фізичних властивостей води, та суті фізичних процесів, які в ній відбуваються за різних умов. Цим займається гідрофізика та окремі її розділи такі як механіка рідини, що вивчає механічний рух води.

1.2. Метод гідравліки, гідрології і гідрометрії

В загальнонауковому плані гідрологія при вивченні явищ і процесів базується на діалектичному підході. При встановленні законів, яким підпорядковані гідросферні процеси, проводиться їх генетичний аналіз, тобто встановлюються якісні і кількісні залежності між елементами, що на них впливають.

Для одержання фактичних відомостей застосовуються спостереження і експеримент. При спостереженнях використовують експедиційний і стаціонарний методи досліджень.

Експедиційний метод полягає в збиранні матеріалів про водні об’єкти шляхом порівняно короткочасного обстеження, а стаціонарний – у проведенні в певних пунктах (гідрологічних

станціях і постах) гідрологічних спостережень за спеціальними програмами як протягом року, та і з року в рік.

При аналізі великих масивів спостережень або при екстраполяції одержаних даних у просторі і часі використовуються статистичні методи.

В гідрології широко використовують лабораторне моделювання, тобто відтворення гідрологічних процесів у малому масштабі в лабораторних умовах. Таким шляхом моделюється рух води через дорожні споруди, ерозійні та інші процеси.

Лабораторне моделювання не можливе без фізико-математичного аналізу відповідних явищ за допомогою теорії подібності. Математичний аналіз базується на диференціальних рівняннях, які описують гідрологічні процеси, і разом з початковими і граничними умовами складають так звану математичну модель. Ці рівняння досить складні і розв'язуються, зазвичай, з використанням обчислювальної техніки. Таким шляхом можна знаходити кількісні закономірності гідрологічних процесів і прогнозувати їх розвиток. Метод математичного моделювання широко використовується при гідрологічних і гідравлічних розрахунках дорожніх споруд.

В інженерній гідрології не втрачають своєї актуальності і спрощені в математичному сенсі методи моделювання, основані на одномірних і двовимірних моделях. Їх недоліки компенсуються зручністю використання, враховуючи велику різноманітність задач, з якими доводиться мати справу в будівництві, і широким застосуванням емпіричних залежностей.

Розділ 2. ГІДРАВЛІКА ВІДКРИТИХ РУСЕЛ

2.1. Рівномірний рух води у відкритих руслах та умови його існування

Як відомо з курсу технічної механіки рідини і газу під рівномірним розуміють рух рідини у випадку, коли швидкості часток рідини не змінюються за величиною і напрямком. Беручи до уваги, що у відкритих руслах на практиці спостерігається турбулентний рух води, будемо розглядати частки розміри яких перевищують певний масштаб турбулентності, що визначається умовами задачі, а швидкість води будемо вимірювати за допомогою

інерційних приладів і осереднювати на протязі часу, що перевищує масштаб турбулентних пульсацій.

Необхідними умовами існування рівномірного руху є призматичне русло з незмінною вздовж потоку шорсткістю і рух рідини під похил. Ці умови є також достатніми у тому розумінні, що через внутрішнє тертя збурений нерівномірний потік при достатній довжині русла і виконанні вказаних умов асимптотично наближається до рівномірного стану.

Очевидно, що при рівномірному русі не тільки геометричні характеристики русла, а й гідравлічні характеристики потоку залишаються незмінними вздовж русла. Наприклад, максимальна глибина потоку h , площа живого перерізу ω , змочений периметр χ, гідравлічний радіус R. Зрозуміло, що за різних умов на певній ділянці русла може існувати як рівномірний, так і нерівномірний рух води. Тому, щоб вказати на винятковий характер рівномірного руху, глибину рівномірного потоку називають нормальною, а всі гідравлічні характеристики рівномірного потоку позначають відповідним індексом, наприклад, $h_0, \omega_0, \chi_0, R_0$.

2.2. Рівняння рівномірного руху у відкритих руслах

Як відомо, у випадку відкритих потоків при використанні рівняння Бернуллі користуються надлишковим тиском, а за геометричну висоту беруть висоту вільної поверхні над площиною зрівняння. Враховуючи це маємо, що при рівномірному русі п’єзометрична лінія співпадає з лінією вільної поверхні, а напірна лінія паралельна дну русла. Відповідно похил дна русла до горизонтальної площини дорівнює похилу напірної лінії. Під похилом дна розуміють величину

$$i = \sin\alpha, \tag{2.1}$$

де α - кут нахилу дна русла до горизонтальної площини.

Похил напірної лінії (гідродинамічний похил)

$$I = -\frac{dH_0}{dl}, \tag{2.2}$$

тобто дорівнює втратам напору H_0 (питомої механічної енергії) на одиницю довжини русла.

З фізичної точки зору похил дна є складовою питомої сили тяжіння, що спрямована вздовж потоку, а гідродинамічний похил можна вважати питомою силою тертя, що врівноважує силу тяжіння, тобто

$$i = I. \tag{2.1}$$

Зважаючи на турбулентний стан потоку і на те, що майже завжди масштабу турбулентності відповідає зона квадратичного опору, робимо висновок, що гідродинамічний похил пропорційний квадрату середньої швидкості

$$v = \frac{Q}{\omega}, \tag{2.2}$$

де Q - витрата, тобто об'єм води, що проходить через живий переріз потоку в одиницю часу. Іншими словами

$$v = W\sqrt{I}, \tag{2.3}$$

де W - коефіцієнт пропорційності, який називають швидкісною характеристикою (русла).

Швидкісна характеристика визначається за формулою

$$W = \frac{1}{n}R^z, \tag{2.4}$$

де n - коефіцієнт шорсткості, R - гідравлічний радіус, що пов'язаний з площею живого перерізу і змоченим периметром формулою

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \tag{2.5}$$

а показник z визначається за формулою М.М. Павловського

$$z = 0,37 + 2,5\sqrt{n} - 0,75\left(\sqrt{n} - 0,1\right)\sqrt{R}. \qquad (2.6)$$

При наближених розрахунках використовують формулу Манінга

$$W = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}}. \qquad (2.7)$$

Враховуючи рівняння рівноваги одержуємо рівняння рівномірного руху

$$v = W_0 \sqrt{i}. \qquad (2.8)$$

Витрата води при рівномірному русі визначається за формулою

$$Q = K_0 \sqrt{i}, \qquad (2.9)$$

де $K_0 = \omega_0 W_0$ - витратна характеристика.

2.3. Гідравлічні елементи живого перерізу потоку

В системах дорожнього водовідведення найбільш поширеними є русла трапецеїдального профілю (рис. 2.1). При однаковій крутизні укосів площа живого перерізу такого русла

$$\omega = \left(b + mh\right)h, \qquad (2.10)$$

довжина змоченого периметра

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}, \qquad (2.11)$$

ширина потоку по вільній поверхні

$$B = b + 2mh, \qquad (2.12)$$

де b - ширина русла по дну; m - коефіцієнт закладення укосів ($m = \operatorname{ctg}\beta$); h - глибина потоку у перерізі (максимальна глибина).

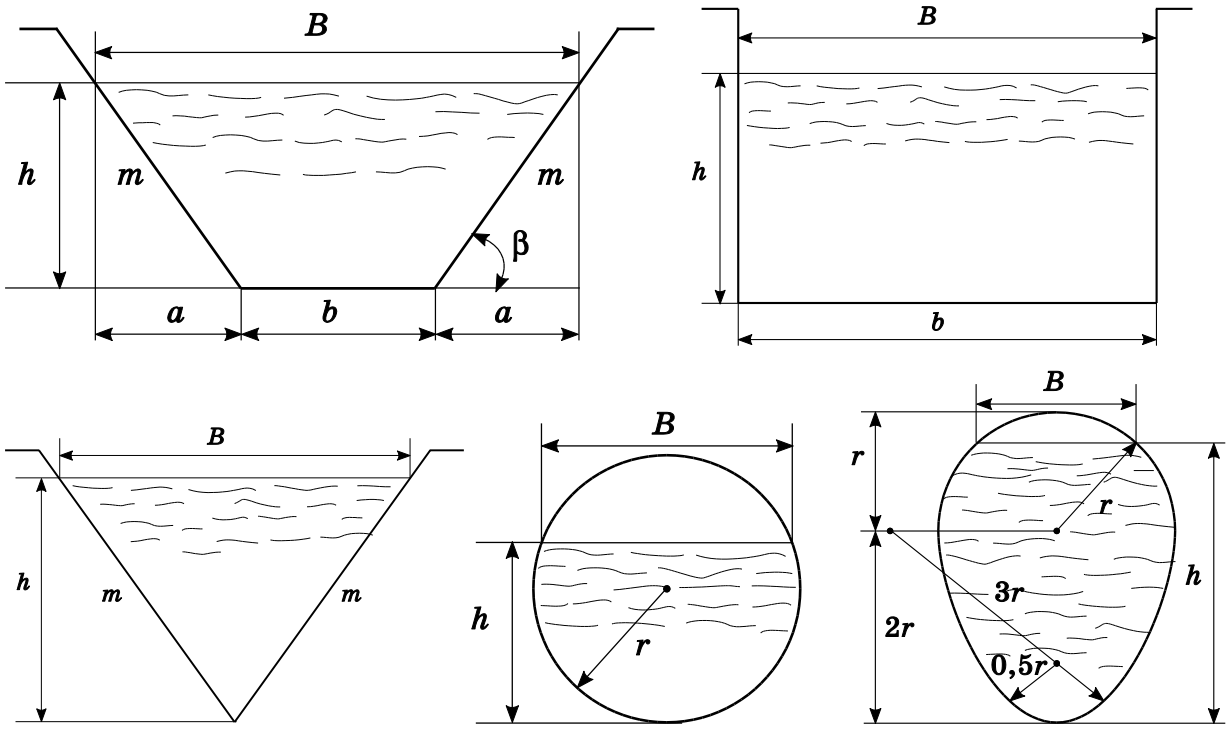

Рис. 2.1 Типи русел

При визначенні елементів живого перерізу у руслах прямокутної і трикутної форм перерізу (рис. 2.1) слід вибирати $m = 0$ і $b = 0$ відповідно. Для розрахунку типових криволінійних поперечних перерізів у вигляді кола, параболи та інших використовуються допоміжні таблиці і графіки.

Аналіз форми улоговин біля малих штучних споруд показав, що в умовах рівнинної місцевості на висоті 1,5 -2 м від дна більшість з них мають майже трикутну форму поперечного перерізу. У зв'язку з цим зазвичай поперечний переріз улоговини приводиться до трикутної форми.

2.4. Гідравлічно найвигідніший переріз русла

Гідравлічно найвигіднішими називаються русла, які мають найбільшу пропускну здатність при заданій формі і площі живого перерізу. Для трапецеїдальних русел, звісно, повинні бути заданими коефіцієнт закладення укосів, похил дна і коефіцієнт шорсткості. Такі русла мають при інших рівних умовах

максимальний гідравлічний радіус. Відповідно змочений периметр має найменше значення при заданій площі перерізу ω_0.

Якщо виразити ширину трапецеїдального русла по дну через глибину

$$b = \frac{\omega_0}{h} - mh \tag{2.13}$$

і підставити в формулу для змоченого периметра (2.11), то з умови екстремуму

$$\frac{d\chi}{dh} = 0 \tag{2.14}$$

одержимо відносну ширину гідравлічно найвигіднішого русла

$$\beta = \frac{b}{h} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right). \tag{2.15}$$

Якщо при розрахунку ширина трапецеїдального русла по дну і глибина потоку невідомі, а задається площа живого перерізу, то

$$\begin{aligned} b &= \frac{\beta}{\sqrt{\beta + m}}\sqrt{\omega_0}, \\ h &= \frac{1}{\sqrt{\beta + m}}\sqrt{\omega_0}. \end{aligned} \tag{2.16}$$

2.5. Визначення допустимих середніх швидкостей

Середні в перерізі швидкості повинні відповідати розрахунковим витратам в нормальних умовах експлуатації, але за умов, що

$$V_{\min} \le v \le V_{\max}, \tag{2.17}$$

де $V_{\min}$ - мінімальна (незамулююча) середня швидкість, тобто швидкість, незначне зниження якої може спричинити замулення

русла наносами; V_{max} - максимальна (нерозмиваюча) швидкість, при якій ще не відбувається розмив дна і стінок русла.

Значення максимальних швидкостей наведені в довідковій літературі для глибин 0,4; 1; 2; 3 м і залежать від найменування грунтів або типу укріплення русла.

Мінімальні середні швидкості залежать від кількості завислих у воді часток, їх розміру, витрати і глибини потоку. Ці швидкості визначаються по формулам і таблицям, складених на основі натурних спостережень і емпіричних даних.

Наприклад, якщо кількість наносів з діаметром часток більше ніж 0,25 мм не перевищує 0,01% по масі, то

$$V_{min} = a\sqrt{R}, \qquad (2.18)$$

де R- гідравлічний радіус, м; a - коефіцієнт, який залежить від середнього діаметра часток переважаючої маси завислих наносів.

Незамулююча швидкість також може бути визначена по залежності

$$V_{min} = AQ^{0,2}, \qquad (2.19)$$

де Q - витрата в $м^3/с$; A - коефіцієнт, який залежить від гідравлічної крупності наносів, тобто швидкості рівномірного падіння часток у нерухомій воді (при $w \le 1,5$ мм/с $A = 0,33$; при $w \le 3,5$ мм/с $A = 0,44$; при $w \ge 3,5$ мм/с A=0,55).

2.6. Розрахунки відкритих русел при рівномірному русі

Форма перерізу русел дорожнього водовідведення визначається умовами проектування , типом грунту, призначенням споруди, типом укріплення або наявністю типових конструкцій, а розміри – гідравлічними розрахунками.

При гідравлічних розрахунках дорожніх канав вірогідність перевищення розрахункових паводків призначають залежно від категорії дороги (1% для доріг I і II категорії, 2% для доріг III категорії, 3% для доріг IV і V категорії). Максимальні витрати під час ливнів заданої вірогідності перевищення визначають статистичними методами.

Для трапецеїдальних русел коефіцієнт закладення укосів, якщо його значення не визначаються специфічними умовами і вимогами проектування, може бути вибраним залежно від типу грунту.

До рівняння рівномірного руху води в трапецеїдальному руслі входять шість величин: середня швидкість або витрата, нормальна глибина, коефіцієнт шорсткості, похил дна русла, коефіцієнт закладення укосів, ширина русла по дну. В загальному випадку з рівняння можна визначити будь яку з перерахованих величин за умови, що відомі значення інших. Врахування певних додаткових умов, наприклад рівняння гідравлічно найвигіднішого русла або допустимих середніх швидкостей, може скоротити кількість величин, що задаються.

Для визначення витрати або середньої швидкості потоку можна безпосередньо скористатися наведеними вище формулами. Для визначення нормальної глибини необхідно розв'язати нелінійне рівняння. Це можна зробити способом послідовних наближень. При цьому задаються глибинами $h_1, h_2, ..., h_n$, визначають відповідні площі живого перерізу, змочені периметри, гідравлічні радіуси. По таблицям знаходять швидкісні характеристики і визначають витратні характеристики, які порівнюють з розрахунковим значенням витратної характеристики

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \qquad (2.20)$$

Якщо $K_n \approx K_0$, то нормальна глибина $h_0 \approx h_n$.

Розрахунки можна прискорити , якщо побудувати графік залежності $K = f(h)$, за яким знаходять глибину, що відповідає розрахунковому значенню витратної характеристики.

Допомогти при розрахунках русел правильної форми можуть спеціальні графіки і таблиці, наведені в спеціальній і довідковій літературі.

2.7. Гідравлічний показник русла

Нормальну глибину можна знайти, використовуючи так званий показовий закон, згідно якому

$$\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^x, \qquad (2.21)$$

де x - гідравлічний показник русла.

У цьому випадку, задаються двома глибинами h_1 і h_2, визначають відповідні значення витратних характеристик K_1 і K_2, одержують гідравлічний показник русла

$$x = \frac{2\ln\frac{K_2}{K_1}}{\ln\frac{h_2}{h_1}}. \qquad (2.22)$$

Визначивши розрахункове значення витратної характеристики знаходять нормальну глибину по формулі

$$h_0 = h_1\left(\frac{K_0}{K_1}\right)^{\frac{2}{x}}. \qquad (2.23)$$