

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

О. М. Коваленко, Т. О. Шевченко

**ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА**

**РОЗДІЛ І. «Рух рідини в закритих руслах»**

***Конспект лекцій***

(для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання,  
екстернів і іноземних студентів напряму підготовки  
6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)»)

Коваленко О. М. Інженерна гідравліка. Розділ І. «Рух рідини в закритих руслах». Конспект лекцій (для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання, екстернів і іноземних студентів напряму підготовки 6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. М. Коваленко, Т. О. Шевченко. – Х.: ХНАМГ, 2007. – 75 с.

Автори: О. М. Коваленко,  
Т. О. Шевченко

Рецензент: докт. техн. наук, проф. С. С. Душкін

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очистки вод,  
протокол № 3 від 05.12.2006 р.

## ВСТУП

Конспект лекцій написаний відповідно до програми курсу «Інженерна гідравліка» і навчального плану для студентів денної і заочної форм навчання, екстернів й іноземних студентів спеціальності 7.092601 «Водопостачання та водовідведення». В конспекті наведені теоретичні основи і основні поняття курсу «Інженерна гідравліка», гідравлічний розрахунок трубопроводів і водопровідних мереж. При цьому приділено увагу розрахунку трубопроводів, які призначені для різних цілей водопостачання, наприклад: розрахунок сифонного трубопроводу, всмоктуючого трубопроводу насосу, самопливного трубопроводу, а також розрахунок паралельного та послідовного з'єднання трубопроводів.

Також в конспекті розглянуті питання виникнення гідравлічних опорів, поняття гідравлічного удару, витікання рідини через отвори та насадки, вільні гідравлічні струмені.

Конспект лекцій призначений для студентів 3 курсів вищих навчальних закладів, які готують спеціалістів в галузі водопостачання, каналізації, раціонального використання і охорони водних ресурсів.

## ТЕМА 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ КУРСУ «ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»

**Гідравліка** - це наука, яка вивчає закони рівноваги і руху рідини, а також взаємодію між рідиною і твердими тілами в стані спокою і щодо їх руху. Крім того, в Інженерній гідравліці розробляються способи застосування цих законів до конкретних питань інженерної справи.

Рішення задач в галузі водопостачання і водовідведення ґрунтується на законах гідравліки. До цих завдань відносяться завдання, пов'язані із загальними питаннями подачі і розподілу води, методами розрахунку мереж, водопропускних і водорозбірних споруд.

*Найголовніші завдання інженерної гідравліки:*

- встановлення законів розподілу швидкостей і тиску під час руху рідини;
- вивчення взаємодії між рідиною і твердими тілами, розміщеними в ній.

Причому в інженерній гідравліці в більшості випадків вважають достатньою інформацію щодо усереднених значень швидкості і тиску.

**Потоком рідини** в гідравліці називають масу рідини, обмежену твердими поверхнями, направляючими, поверхнями розділу рідин або вільними поверхнями.

Рух рідини може бути напірним і безнапірним.

**Безнапірний або вільний рух потоку** - це такий рух, при якому потік по довжині обмежується лише частиною з жорсткими стінками і має вільну поверхню, причому рух рідини відбувається під дією сили тяжіння. При безнапірному русі на поверхні рідини тиск рівний атмосферному.

**Напірний рух потоку** - це такий рух, який здійснюється в обмеженому з усіх боків (по довжині) жорсткими стінками просторі під впливом тиску, що створюється водонапірним резервуаром або насосом. При напірному русі потік завжди повністю заповнює поперечний переріз труби.

**Живий переріз потоку** - поперечний переріз потоку, проведений нормально за напрямом руху ( $\omega$ ).

**Змочений периметр** - довжина лінії, за якою рідина в живому перерізі стикається з твердими поверхнями, що обмежують потік.

При напірних потоках довжина змоченого периметра ( $\chi$ ) рівна довжині всього периметра перерізу, а в безнапірних потоках змочений периметр складає деяку частину повного периметра.

**Гідравлічний радіус** - відношення площі живого перерізу до змоченого периметра в цьому перерізі.

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (1.1)$$

У напірному потоці для круглого перерізу:

$$R = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}. \quad (1.2)$$

**Витрата рідини** - об'ємна кількість рідини, що протікає через даний поперечний переріз потоку в одиницю часу.

**Середня швидкість** - однакова для всіх точок перерізу уявна швидкість, при якій через живий переріз проходить та же витрата, що і при дійсних місцевих швидкостях в різних точках перерізу.

$$V_{CP} = \frac{Q}{\omega}. \quad (1.3)$$

Якщо швидкість в кожній точці поперечного перерізу потоку рідини з часом залишається незмінною як за величиною, так і за напрямом, а також тиск в даній крапці з часом не змінюється, то такий рух називають **сталим**. При такому русі швидкість і тиск в потоці залежать тільки від координат точки в просторі. Наприклад, рух води в каналі або річці при постійному рівні води і витікання рідини з отвору або крана при постійному натиску.

Якщо швидкість і тиск в кожній даній точці потоку рідини з часом змінюються, то такий рух називають **несталим**. У цьому випадку швидкість і тиск окрім координат точки залежать ще від часу. Наприклад, рух води в річці при зміні рівня води, витікання через отвір в резервуарі при змінному натиску.

За характером зміни поля швидкостей за координатами сталий рух розподіляється на:

**Рівномірний** - рух рідини, при якому живі перерізи потоку однакові по всій його довжині і при цьому швидкості потоку у відповідних точках всіх живих перерізів також однакові.

Приклад: рух потоку в каналі з постійною формою живого перерізу і постійною глибиною або рух рідини в циліндровій трубі.

Рух потоку, при якому по довжині потоку змінюється живий переріз або при постійному перерізі змінюється розподіл швидкостей у відповідних точках різних живих перерізів, називається **нерівномірним**.

Приклад: рух води в річці на ділянці перед дамбою, тобто по довжині потоку в напрямі його руху живий переріз і його глибини збільшуються, а швидкості убувають; рух води в річці на її звуженні або розширенні.

Потік рідини, в якому відсутні як порожнечі (розриви суцільності перерізу), так і переущільнення неможливі в однорідній рідині, називають **суцільним (нерозривним)**.

Рівняння нерозривності потоку:

$$U_1\omega_1 = U_2\omega_2 = \dots = U_n\omega_n = \text{const} = Q, \quad (1.4)$$

де  $U_1, U_2, U_n$  - швидкості в живих перерізах елементарної цівки нев'язкої рідини, у ряді випадків рівні середнім швидкостям в перерізах потоку ( $V$ );

$\omega_1, \omega_2, \omega_n$  - площі живих перерізів;

$Q$  - витрата.

## 1.1. Рівняння Бернуллі для потоку рідини, його енергетичний та геометричний зміст

Рівняння Бернуллі для елементарної цівки нев'язкої рідини при сталому русі, складене відносно довільно вибраної площини порівняння:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} = \text{const} . \quad (1.5)$$

Рівняння може бути застосовано до потоку нев'язкої рідини тоді, коли швидкості руху рідини в усіх точках живого перерізу однакові.

При русі у в'язкій рідині частина енергії потоку витрачається на подолання сил опору між розрахунковими перерізами. Причини цього - сили тертя між потоком і стінками русла і між частинками рідини. Звідси випливає - питома енергія в будь-якому подальшому перерізі (за напрямом руху) буде менша, ніж попередня.

Так рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини (реальної):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{w1-2} , \quad (1.6)$$

де  $V_1, V_2$  - середні швидкості руху рідини;

$\alpha$  - коефіцієнт кінетичної енергії, величина якого для турбулентних потоків як в трубах, так і у відкритих руслах  $1 \leq \alpha \leq 1,1$ .

Для ламінарних потоків в трубах  $\alpha = 2$ .

$h_{w1-2}$  - питома енергія рідини, витрачена на подолання сил опору руху потоку на ділянці між перерізами (втрати енергії).

Рівняння Бернуллі встановлює зв'язок між швидкістю руху, тиском і геометричним положенням будь-якої точки живого перерізу, для якого воно написано.

З енергетичної точки зору рівняння Бернуллі виражає закон збереження енергії і представляє питому енергію, віднесену до одиниці ваги

рідини і підраховану щодо довільно вибраної горизонтальної площини (площини порівняння).

Така питома енергія складається з питомої потенційної енергії -  $Z + p/\gamma$ ,

де  $Z$  - енергія положення;

$p/\gamma$  - енергія тиску,

а також складається з питомої кінетичної енергії -  $\alpha V^2/2g$ .

З енергетичної точки зору втрати енергії на подолання сил опору є розсіюванням енергії. Це означає, що при русі рідини частина механічної енергії переходить безповоротно в теплову енергію, тобто для потоку втрачається.

У рівняння Бернуллі входять наступні лінійні величини:

$Z$  - геометрична висота положення (геометричний нахил або відмітка крапки від площини порівняння  $O_1 - O_1$ );

- п'єзометрична висота, що відповідає гідродинамічному тиску  $p$ ;

$Z + \frac{P}{\gamma} = H$  - п'єзометричний або гідростатичний натиск;

$\frac{\alpha V^2}{2g}$  - швидкісний натиск;

$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H_0$  - гідродинамічний або повний натиск.

Геометричне місце точок верхніх кінців відрізка  $(Z + \frac{P}{\gamma})$  називають

***п'єзометричною лінією.***

Зміну п'єзометричної лінії на одиницю довжини називають ***п'єзометричним ухилом.*** Відмітки п'єзометричної лінії по довжині можуть зменшуватися або збільшуватися. П'єзометричний ухил вважається позитивним, якщо за течією рідини п'єзометрична лінія знижується.

Геометричне місце точок відрізка  $(Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g})$  називається ***напірною лінією або лінією питомої енергії***, яка для потоку невязкої рідини -

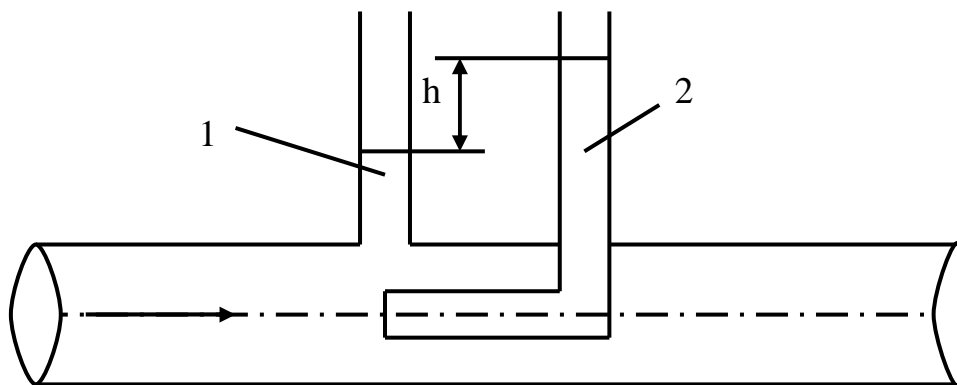


горизонтальна. При русі у в'язкій рідині зміну напірної лінії на одиницю довжини називають *гідралічним ухилом*.

Рівняння Бернуллі є основним рівнянням гідродинаміки, з його допомогою виводяться розрахункові формули для різних випадків руху рідини.

## 1.2. Трубка Піто і витратомір Вентурі

Для вимірювання швидкості застосовується спеціальна гідродинамічна трубка, яка називається трубка Піто. Ця трубка поміщається у вимірюваній точці потоку рідини зігнутим кінцем проти руху і працює в комплексі з п'єзометром.



*Рис. 1.1 – Трубка Піто*

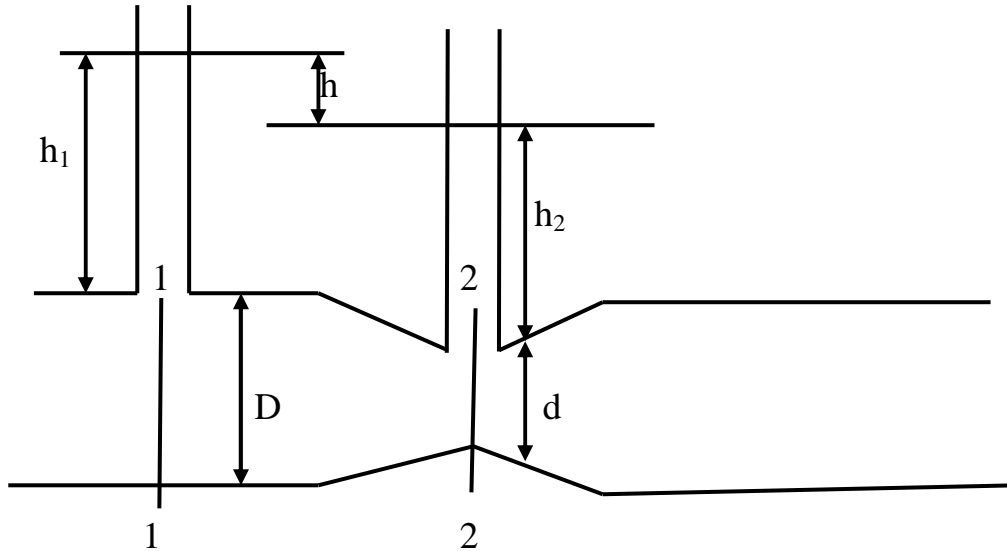
1 - п'єзометр;

2 - трубка Піто.

Під впливом швидкісного натиску вода в трубці Піто підіймається вище за рівень води в п'єзометрі на величину  $h = \frac{U^2}{2g}$ , знаючи висоту, знаходимо значення швидкості:

$$U = \sqrt{h2g} . \quad (1.7)$$

Простим типом водомірного пристрою в трубах є п'єзометричний водомір (витратомір Вентурі), який є вставкою в основну трубу діаметром  $D$  труби меншого діаметра з плавним входом і виходом.



*Рис. 1.2 – Витратомір Вентурі*

Складаємо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2, втрати натиску рівні 0, оскільки відстань між перерізами мала:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{1 - \frac{d^4}{D^4}}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{d^4}{D^4} - 1}} \quad (1.8)$$

Фактична витрата буде дещо менше теоретичної через втрати енергії і може бути надана залежно від:

$$Q = \frac{\mu \cdot \pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{1 - \frac{d^4}{D^4}}} = \frac{\mu \cdot \pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{d^4}{D^4} - 1}}, \quad (1.9)$$

де  $\mu$ - тарировочний коефіцієнт, який визначається дослідним шляхом (звичайно 0,95-0,97).

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Дайте визначення основних гідравлічних показників потоку.
2. Рівняння Бернуллі для ідеальної і реальної рідини.
3. Енергетичний зміст рівняння Бернуллі.
4. Геометричний зміст рівняння Бернуллі.
5. П'єзометрична лінія, п'єзометричний ухил.
6. Напірна лінія, гідравлічний ухил.
7. Призначення і розрахунок трубки Піто, витратомір Вентурі.

## ТЕМА 2. РЕЖИМИ РУХУ РІДИНИ

Рух в'язкої рідини відносно взаємних переміщень окремих її частинок характеризується двома режимами - ламінарним і турбулентним.

Рух рідини, при якому відсутні зміни місцевих швидкостей, що приводять до перемішування рідини, називають **ламінарним**.

Рух рідини, при якому відбувається зміна місцевих швидкостей, що приводять до перемішування рідини, називають **турбулентним**.

Швидкість потоку, при якій відбувається зміна режиму руху рідини, називається **критичною**. Існує дві критичні швидкості:

1) під час переходу ламінарного руху в турбулентний режим - *верхня критична швидкість*;

2) навпаки - *нижня критична швидкість*.

Значення верхньої критичної швидкості залежить від зовнішніх умов, нижня критична швидкість у великому діапазоні зміни зовнішніх умов залишається незмінною і дорівнює:

$$V_{н.кр.} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d}, \quad (2.1)$$

де  $\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості;

$d$  - діаметр труби;

$Re_{кр}$  - критичне число Рейнольдса.

Для різних значень коефіцієнта в'язкості і діаметра труби:

**$Re_{кр} = 2320$ .**

Для будь-якого потоку за відомими  $V$ ,  $\nu$  і  $d$  можна скласти та визначити число Рейнольдса  $Re$  і порівняти його з критичним числом Рейнольдса.

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (2.2)$$

Якщо  $Re < Re_{кр}$ , то режим руху рідини ламінарний і  $V < V_{кр}$ ;

Якщо  $Re > Re_{кр}$ , то режим руху рідини турбулентний і  $V > V_{кр}$ ;

Число Рейнольдса характеризує відношення сил інерції до сил тертя (в'язкості).

Числа Рейнольдса можуть мати індекс, який указує на вибрану характерну лінійну величину, найчастіше як характерні лінійні величини використовують діаметр або гідравлічний радіус.

Для відкритих русел:  **$Re_{кр} = 580$** .

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Які ви знаєте режими руху рідини?
2. Верхня і нижня критичні швидкості.
3. Число Рейнольдса, критичне число Рейнольдса.
4. Визначення режиму руху рідини залежно від числа Рейнольдса.

### ТЕМА 3. ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ І ВТРАТИ НАПОРУ ПРИ РУСІ РІДИНИ

При русі рідини виникають втрати енергії (напору). Їх причина - різні гідравлічні опори, обумовлені фізичною властивістю рідини чинити опір дотичним зусиллям при русі. Опори можуть бути викликані в'язкісними або інерційними силами. В'язкісні сили залежать від внутрішнього тертя між частинками рухомої рідини, а інерційні - від здатності частинок рідини чинити опір зміні свого руху. Опори можуть виявлятися рівномірно по всій довжині потоку і називаються *опори по довжині*. Вони виникають при протіканні води в трубах або каналах при рівномірному, а також нерівномірному русі, що плавно змінюється. Інший вид опорів виявляється на короткій ділянці в місцях різкої зміни конфігурації потоку. Такі опори називають *місцевими*. Втрати напору також діляться на:

- втрати напору по довжині;
- місцеві втрати напору.

Втрати напору по довжині виявляються рівномірно по довжині потоку і пропорційні їй.

Місцеві втрати напору утворюються в результаті зміни швидкісної структури потоку в межах коротких ділянок в безпосередній близькості до тих або інших місцевих конструктивних пристроїв труб або каналів (вхід, вихід, розширення, звуження, поворот, трубопровідна арматура). У загальному випадку мають місце обидва види втрат, значення яких підсумовують:

$$h_w = \Sigma h_l + \Sigma h_m \quad (3.1)$$

де  $\Sigma h_l$  - сума втрат по довжині послідовних ділянок з різними поперечними перерізами;

$\Sigma h_m$  - сума всіх місцевих втрат.

Ці втрати енергії обумовлені переходом механічної енергії потоку в теплову і цей процес незворотний.

Для визначення втрат по довжині в трубах прийнято використовувати формулу Дарсі

$$\Sigma h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3.2)$$

де  $\lambda$  - гідравлічний коефіцієнт тертя, коефіцієнт втрат тертя на одиницю довжини потоку; коефіцієнт Дарсі.

Місцеві втрати напору не залежать від довжини, для їх визначення використовують формулу Вейсбаха:

$$\Sigma h_m = \Sigma \xi \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3.3)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт місцевого опору.

За наявності місцевих втрат і втрат по довжині загальні втрати енергії визначаються підсумовуванням втрат енергії, обумовлених різними опорами.

#### ***Величина коефіцієнта місцевих втрат для деяких видів опорів***

|   |   |      |
|---|---|------|
| 1 | При вході в трубу при гострих кромках           | 0,5  |
| 2 | При вході в трубу з сіткою                      | 6    |
| 3 | При вході в трубу з сіткою і зворотним клапаном | 10   |
| 4 | При виході з труби під рівень                   | 1    |
| 5 | При проходженні вентиля                         | 4,1  |
| 6 | При плавному закругленні трубопроводу           | 0,45 |

#### ***Коефіцієнти опорів при раптовому розширенні трубопроводу***

|                     |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
|---------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| $\omega_2/\omega_1$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| $\xi$               | 0 | 1 | 4 | 9 | 16 | 25 | 36 | 49 | 64 | 81 |

### *Коефіцієнти опорів при раптовому звуженні трубопроводу*

|                     |      |     |     |     |     |   |
|---------------------|------|-----|-----|-----|-----|---|
| $\omega_2/\omega_1$ | 0,1  | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| $\xi$               | 0,45 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0 |

Крім того, для визначення втрат напору при раптовому розширенні використовують формулу Борда

$$h_{\text{рапт. розш.}} = \alpha \cdot \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}, \quad (3.4)$$

де  $V_1, V_2$  - швидкості руху потоку в трубопроводі до і після розширення.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Причини виникнення втрат опору по довжині.
2. Причини виникнення місцевих втрат опору.
3. Формули визначення втрат опору по довжині і місцевих втрат опору.
4. Формула Борда.



## ТЕМА 4. РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

### 4.1. Класифікація трубопроводів і завдання їх гідравлічного розрахунку

Передача рідини по трубопроводах набула широкого поширення в інженерній практиці. У загальному випадку трубопроводи розділяють на *магістральні*, які передають рідину на великі відстані від місця забору води до споживача, і *розгалужені* мережі труб, що розподіляють рідину. Рух рідини в трубопроводі звичайно здійснюється за рахунок різниці рівнів (різниці геодезичних відміток) або за рахунок енергії, яка передається рідині при проходженні через насоси. В окремих випадках переміщення рідини по трубопроводах здійснюється під тиском газу, який створюється пневматичними установками. Всі трубопроводи мають циліндрову або призматичну форму, тому рух рідини в них рівномірний. Нерівномірний рух може спостерігатися тільки на тих ділянках, де знаходяться місцеві опори. Залежно від довжини, числа і характеру місцевих опорів розрізняють довгі і короткі трубопроводи. До довгих відносяться трубопроводи, в яких місцеві опори в порівнянні з втратами по довжині є незначними. Тому при розрахунку таких трубопроводів місцеві втрати енергії не підраховуються, а приймаються 5-10 % від встановлених розрахунком втрат енергії по довжині, наприклад, всі магістральні трубопроводи.

До коротких трубопроводів відносять трубопроводи, в яких місцеві втрати енергії майже рівні за значенням з втратами по довжині (трубопроводи малої довжини з великим числом місцевих опорів). При розрахунку таких трубопроводів підраховують втрати по довжині і місцеві втрати. Звичайно довжина коротких трубопроводів рідко перевищує 50 м. наприклад, всмоктуюча труба насоса, сифонні трубопроводи, дюкери, труби випуску води. Враховуючи гідравлічну схему роботи трубопроводів, їх підрозділяють на:

- прості;
- складні.

Прості - трубопроводи, що складаються з однієї лінії послідовно сполучених труб, які проводять постійну витрату рідини.

Складні - трубопроводи, системи, що складаються з магістралі з декількома відгалуженнями, з паралельними гілками і кільцеві мережі. Всякий складний трубопровід можна розглядати як сукупність простих трубопроводів, сполучених між собою послідовно, паралельно або змішаним шляхом.

Залежно від матеріалу трубопроводи можуть бути:

- металеві (чавунні, сталеві);
- неметалічні (бетонні, залізобетонні, азбестоцементні, пластмасові).

Труби з різних матеріалів мають різну шорсткість внутрішньої поверхні, тому у них відрізняються коефіцієнти гідравлічного тертя, що потрібно враховувати при розрахунку.

За характером роздачі рідини трубопроводи бувають:

- з транзитною витратою;
- шляховою витратою.

У трубопроводі з транзитною витратою відбора рідини не відбувається і витрата по його довжині зберігається незмінною. У трубопроводі з шляховою витратою по його довжині від початкової до кінцевої точки проводиться роздача рідини, тому витрата уздовж трубопроводу змінна.

Складні трубопроводи можуть бути розімкненими і кільцевими. У кільцевих трубопроводах до будь-якої точки рідина поступає з 2-х або більш напрямів, а в розімкнутих - тільки в одному напрямі.

Гідравлічний розрахунок трубопроводів в основному зводиться до рішення задач 3-х типів:

- задача визначення необхідного напору при заданих геометричних розмірах трубопроводу і заданій витраті;
- задача знаходження витрати при заданих напорі і геометричних розмірах трубопроводу;

- при заданих значеннях витрати, напорі і трасування трубопроводів потрібно визначити діаметр труб.

#### ***4.2. Основні розрахункові формули при русі рідини в напірних трубопроводах***

Найбільшого поширення для визначення швидкості набула формула Шезі

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (4.1)$$

де  $C$  - коефіцієнт Шезі;

$R$  - гідравлічний радіус;

$i$  - гідравлічний ухил.

Формула Шезі для витрати

$$Q = \omega \cdot V = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i}. \quad (4.2)$$

Оскільки для трубопроводів заданого діаметра, величини площі живого перерізу і гідравлічний радіус сталі величини, то  $C = \text{const}$ . Отже для всіх труб, що випускаються по ГОСТ, можна підрахувати величину  $\omega C \sqrt{R} = K$ :

$$Q = K \sqrt{i}, \quad (4.3)$$

де  $K$  - це витратна характеристика,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; л/с.

З формули 4.3 одержимо вираз для гідравлічного ухилу:

$$i = \frac{Q^2}{K^2}. \quad (4.4)$$

Ця формула дозволяє визначити втрату напорі по довжині трубопроводу, тобто

$$h_w = i \cdot l = \frac{Q^2}{K^2} l. \quad (4.5)$$

Формули Шезі і одержані з них вирази 4.4 і 4.5 відповідають умовам цілком в шорсткій зоні руху, коли опори по довжині не залежать від числа Рейнольдса. Але в деяких випадках рух води по трубопроводу відповідає умовам перехідної зони, при якій втрати напору по довжині можуть опинитися більше, ніж в 1-му випадку, тому використовується формула 4.5 може дати сильно зменшене значення втрат напору в порівнянні з дійсними, тому для розрахунку трубопроводу доцільніше застосовувати універсальну формулу Дарсі

$$\Sigma h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}. \quad (4.6)$$

За формулою Дарсі може бути одержана величина гідравлічного ухилу:

$$i = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}. \quad (4.7)$$

За дослідженнями Шевельова коефіцієнт опору тертя по довжині ( $\lambda$ ) для ненових сталевих і чавунних труб може бути визначений за формулами

$$\text{При } \frac{V}{\nu} \geq 9,2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}; \quad \lambda = \frac{0,021}{d^{0,3}}; \quad (4.8)$$

$$\text{При } \frac{V}{\nu} < 9,2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}; \quad \lambda = \frac{0,0179}{d^{0,3}} \left[ 1 + \frac{0,867}{V} \right]^{0,3}. \quad (4.9)$$

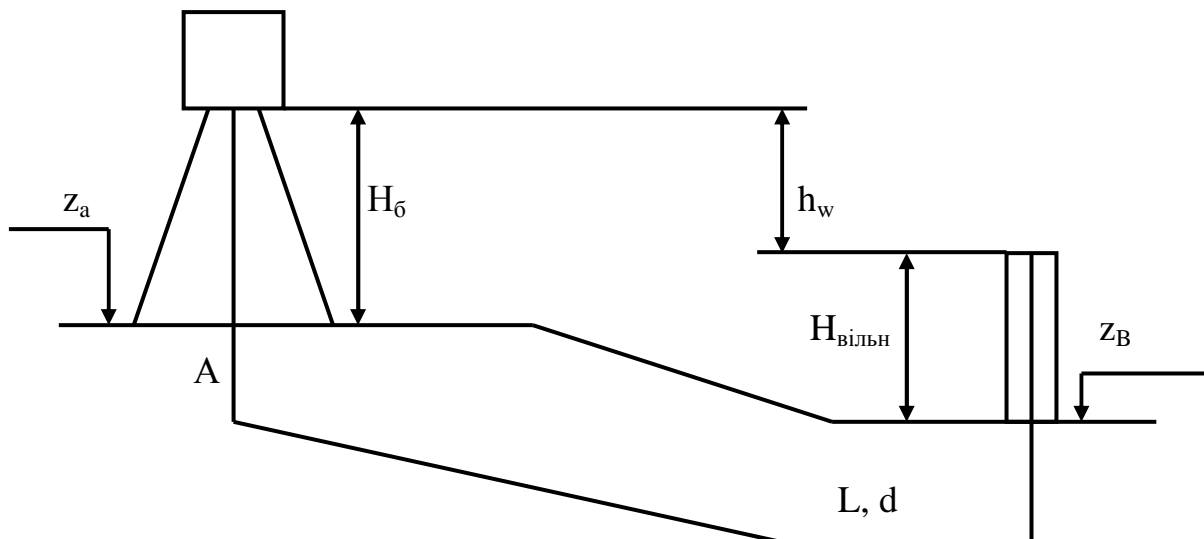
Після підстановки у формулу Дарсі значень по формулах 4.8 і 4.9 і заміни кінематичного коефіцієнта в'язкості його чисельним значенням при  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  Шевельовим були одержані формули для визначення гідравлічного ухилу для ненових сталевих і чавунних труб.

$$\text{При } V \geq 1,2 \text{ м/с} \quad i = 0,00107 + \frac{V^2}{d^{1,3}} . \quad (4.10)$$

$$\text{При } V < 1,2 \text{ м/с} \quad i = 0,000912 \frac{V^2}{d^{1,3}} \left[ 1 + \frac{0,867}{V} \right]^{0,3} . \quad (4.11)$$

Для полегшення використання даних формул Шевельовим були складені таблиці для гідравлічного розрахунку водопровідних труб. У них для різних витрат і різних діаметрів дані величини швидкості і втрати напору в метрах на 1000 м довжини трубопроводу.

#### 4.3. Основні типи задач щодо розрахунку простого трубопроводу



*Рис. 4.1 – Схема простого трубопроводу*

На рис. 4.1 зображена схема простого трубопроводу, з якого вода з т. А, де встановлена водонапірна башта, прямує до споживача в т. В.

$z_a, z_B$  - нівелірні відмітки в т. А і т. В, м;

$H_б$  - висота водонапірної башти, м;

$L$  - довжина трубопроводу, м;

$d$  - діаметр трубопроводу, мм;

$H_{\text{вільн.}}$  - вільний напір в т. В, що забезпечує підйом води вгору до точки споживання, м. Вільний напір залежить від об'єкта водоспоживання. Для житлових будівель по ДНіП визначається залежно від поверховості:

1-поверхова будівля –  $H_{\text{вільн.}} = 10$  м;

2-поверхова будівля –  $H_{\text{вільн.}} = 14$  м.

Основні типи задач з розрахунку простих трубопроводів в основному зводяться до трьох задач, які наведені у Додатку 1.

#### **4.4. Питомий опір. Опір ділянки трубопроводу.**

Величина, зворотна  $K^2$ , називається **питомим опором**.

$$\frac{1}{K^2} = S_0;$$

$$h_w = \frac{Q^2}{K^2} \cdot l = Q^2 S_0 l;$$

$$S_0 l = S; \quad (4.12)$$

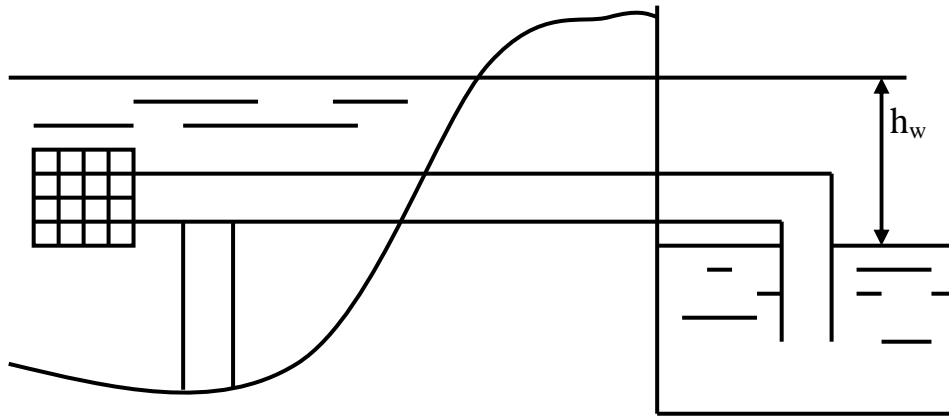
$$h_{wl} = Q^2 S, \quad (4.13)$$

де  $S$  - це опір ділянки трубопроводу завдовжки  $l$  з питомим опором  $S_0$ .

#### **4.5. Розрахунок самопливного трубопроводу, всмоктуючого трубопроводу насосу і сифонного трубопроводу**

Трубопровід, по якому з річки, озера або іншого водоймища вода поступає в береговий колодязь під рівень, називається **самопливним**.

Самопливний трубопровід в більшості випадків має невелику довжину, при якій місцеві опори достатньо великі і майже однакові з опорами по довжині. До місцевих опорів відносять: опір на вхід в трубопровід, на 2 коліна, які є на початку трубопроводу, на засувку в кінці трубопроводу, на вихід.

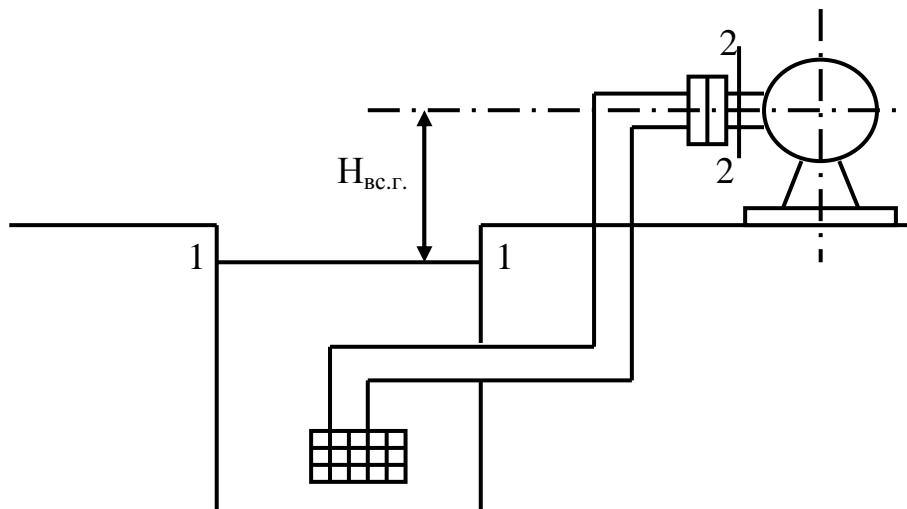


**Рис. 4.2 – Схема будови самопливного трубопроводу**

$$h_w = h_{wl} + \Sigma h_m = \frac{V^2}{2g \left( \frac{\lambda l}{d} + 2\xi_{кол} + \xi_{ex} + \xi_{засув} + \xi_{вих} \right)}$$

При розрахунку самопливного трубопроводу звичайно витрата задана, потрібно визначити діаметр трубопроводу. Враховуючи, що в реальних умовах натиск на подолання опорів невеликий, то при виборі діаметра трубопроводу швидкість руху води, як правило, складає 0,75-1,0 м/с.

**Всмоктуючий трубопровід** насоса має невелику довжину. На трубопроводі при вході в трубу через приймальний клапан з сіткою і при протіканні через 3 коліна виникають місцеві опори.



**Рис. 4.3 – Схема всмоктуючого трубопроводу насоса**

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{w1-2};$$

$$Z_1 = 0; p_1 = p_{атм}; V_1 = 0; Z_2 = H_{вс.г.}; \alpha = 1;$$

$$h_{w1-2} = \frac{V_2^2}{2g} \left( \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх} \right);$$

$$\frac{p_{атм}}{\gamma} = H_{вс.г.} + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх} \right);$$

$$H_{вс.г.} + \frac{p_2 - p_{атм}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх} \right) = 0.$$

При розрахунку всмоктуючого трубопроводу насосу можуть бути наступні три задачі:

1. Визначити діаметр трубопроводу при заданих величинах  $H_{вс.г.}$ , допустимій величині вакууму  $(P_{атм} - P_2)/\gamma$ , довжині трубопроводу.

Завдання розв'язується методом підбору втрат напору разом з напором, які витрачаються на утворення швидкості в трубопроводі, і не повинні перевищувати:

$$(P_{атм} - P_2)/\gamma - H = A.$$

Задаючись різними значеннями діаметра, визначаємо наступний вираз:

$$\frac{V_2^2}{2g} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх} \right).$$

Підрахунки ведемо в табличній формі:

| № | d,<br>мм | $\omega,$<br>м <sup>2</sup> | V,<br>м/с | $V_2^2/2g$ | $\lambda$ | $\lambda l d$ | $\frac{V_2^2}{2g} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх} \right)$ |
|---|----------|-----------------------------|-----------|------------|-----------|---------------|---|
|   |          |                             |           |            |           |               |   |

На підставі даних таблиці можна побудувати криву

$$h_w = \frac{V_2^2}{2g} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх} \right) = f(d).$$

Приймаємо найближчий більший діаметр по ДОСТу.



2. Визначити геометричну висоту всмоктування при заданих мінімальних величині вакууму, витрати, діаметра і довжини:

$$H_{вс.з.} = \frac{p_{атм} - p_2}{\gamma} - \frac{V_2^2}{2g} \left(1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх}\right).$$

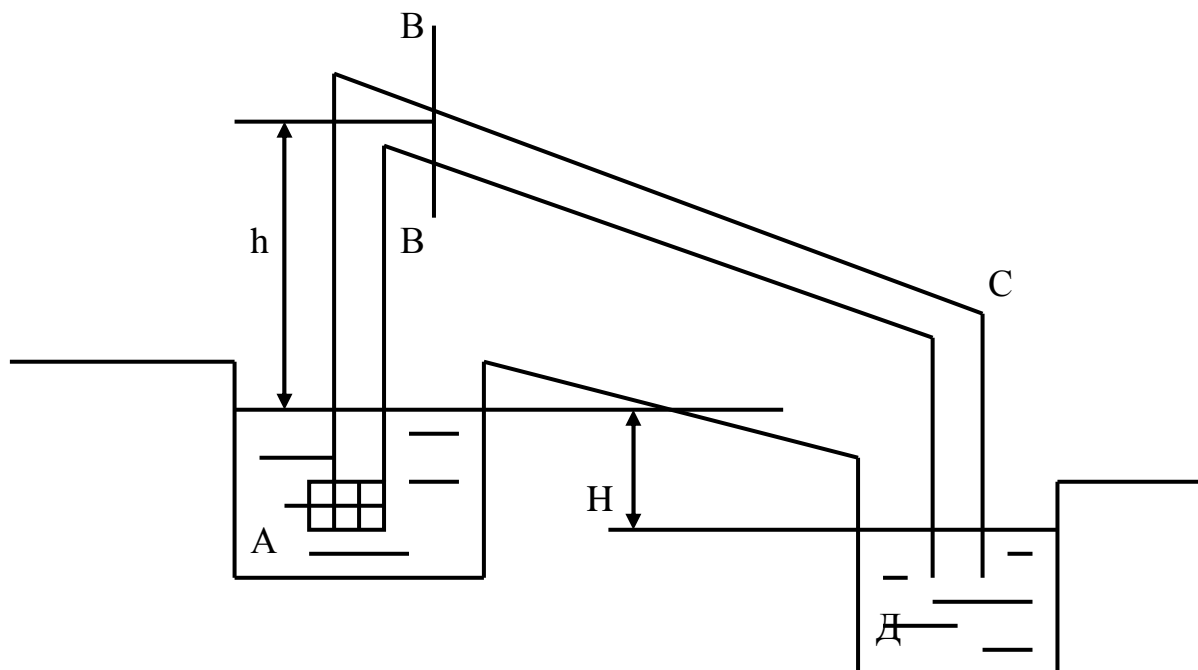
3. Визначити величину вакууму у всмоктуючому трубопроводі при заданих  $H_{вс.г.}$ , витраті, діаметрі і довжині:

$$\frac{p_{атм} - p_2}{\gamma} = H_{вс.з.} + \frac{V_2^2}{2g} \left(1 + \frac{\lambda l}{d} + 3\xi_{кол} + \xi_{вх}\right).$$

**Сифонний трубопровід** - це трубопровід, який сполучає 2 резервуари або колодязі, при цьому трубопровід повинен бути прокладений вище за рівень води в резервуарі.

Рух води по сифонному трубопроводу з резервуару А в резервуар Д можливо лише в тому випадку, якщо рівень води в першому резервуарі буде більше рівня води в другому на деяку величину  $H$ .

У сифонному трубопроводі має місце вакуум, при цьому найбільше його значення буде в перерізі С.



**Рис. 4.4 – Схема сифонного трубопроводу**

Втрати напору в сифонному трубопроводі складаються з втрат напору по довжині і місцевих втрат (на вхід, 2 коліна, на вихід).

$$h_w = \frac{V_2^2}{2g} \left( \frac{\lambda}{d} + 2\xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вих}} \right).$$

З іншого боку можлива втрата напору в сифонному трубопроводі визначається різницею рівнів води в резервуарах (H).

$$H = \frac{V_2^2}{2g} \left( \frac{\lambda}{d} + 2\xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вих}} \right);$$

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{\xi_{\text{вх}} + 2\xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{вих}} + \frac{\lambda}{d}}};$$

$$Q = V\omega = \frac{\pi \cdot d}{4} \sqrt{\frac{2gH}{\xi_{\text{вх}} + 2\xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{вих}} + \frac{\lambda}{d}}}.$$

Найбільший вакуум в перерізі С рівний:

$$V_{ac} = h_c + \frac{V_2^2}{2g} \left( \frac{\lambda_c}{d} + \xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{вх}} + 1 \right),$$

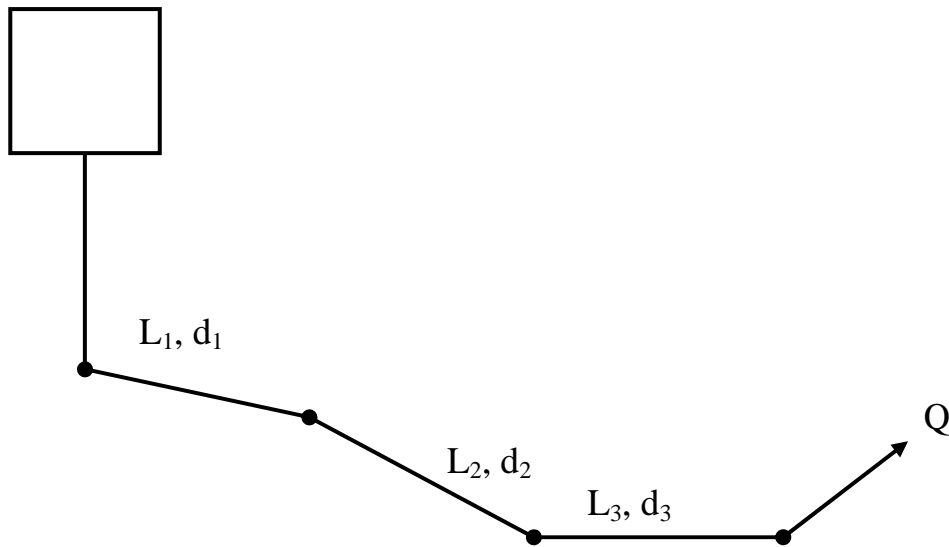
де  $h_c$  - перевищення центру перерізу С над рівнем води в першому резервуарі;

$l_c$  - довжина сифонного трубопроводу до перерізу С.

#### **4.6. Трубопровід з послідовно сполучених ділянок труб різних діаметрів і довжин**

Трубопровід, що складається з послідовно сполучених ділянок труб різної довжини і діаметра, називають *послідовним трубопроводом*.

Втрата напору в подальшому трубопроводі рівна сумі втрат напору на кожній з ділянок послідовного трубопроводу.



*Рис.4.5 – Схема послідовного трубопроводу*

У цьому випадку вводять поняття про трубопровід, **еквівалентний** заданому - це трубопровід, який пропускає ту же витрату при тій же втраті напору, що і заданий, такий, що має ту же довжину, але складається з іншого числа ділянок, іншої довжини і діаметра, тобто

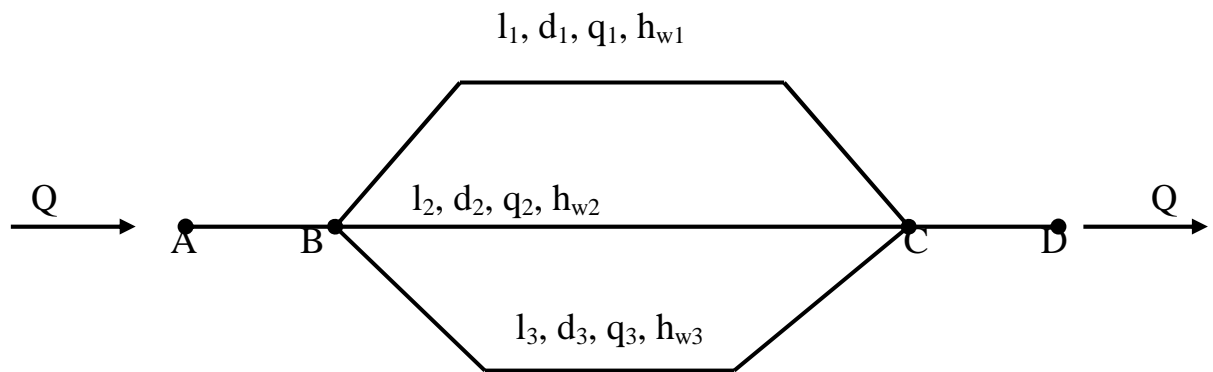
$$Q_{екв} = Q_{зад};$$

$$\Sigma l_{i\ экв} = \Sigma l_{i\ зад}.$$

Задачу з розрахунку еквівалентного трубопроводу вирішують методом підбору. При заданій витраті так підбирають число ділянок і діаметр еквівалентного трубопроводу, щоб сума втрат напору еквівалентного трубопроводу була рівна сумі втрат напору в заданому трубопроводі.

#### **4.7. Паралельне з'єднання трубопроводів**

*Паралельними* трубопроводами називають трубопроводи, які беруть початок в одній загальній точці і закінчуються в іншій загальній точці.



**Рис. 4.6 – Паралельне з'єднання трубопроводів**

Між крапками В і С лежать три паралельні трубопроводи, які мають свої довжини, діаметри і пропускають певну витрату при деякій втраті натиску. Оскільки паралельні трубопроводи розгалужуються в одній загальній крапці (у т.В), яка має напір  $H_B$ , і закінчуються в т.С з напором  $H_C$ , то втрати напору в кожному з трубопроводів складуть:

$$H_B - H_C = h_{w1} = h_{w2} = h_{w3}$$

Таким чином, незалежно від числа паралельних трубопроводів, їх довжини і діаметра, втрати напору у всіх паралельних трубопроводах будуть рівні між собою.

Сума витрат у всіх паралельних трубопроводах рівна витраті до розгалуження трубопроводу.

Якщо паралельні трубопроводи входять до складу послідовного трубопроводу, як одна з його ділянок, то втрата напору на цій ділянці приймається рівній втраті напору в одному з трубопроводів (у будь-якому).

#### 4.8. Вузлова, шляхова, транзитна і розрахункова витрати

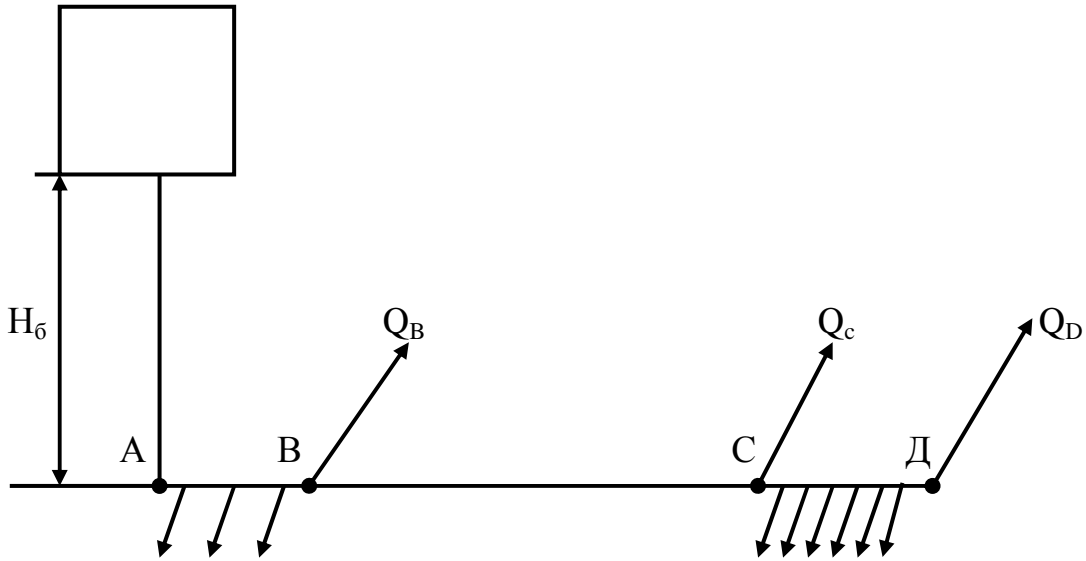


Рис. 4.7. – Схема розрахунку витрат

**Вузлова витрата** - витрата рідини з трубопроводу, зосереджена в тій або іншій точці трубопроводу ( $Q_B$ ,  $Q_C$ ,  $Q_D$ ).

**Шляхова** - витрата рідини з трубопроводу, яка рівномірно розподілена на даній ділянці (А-В, С-Д).

Шляхова витрата, що доводиться на одиницю довжини ділянки, називається **питомою шляховою витратою** (л/с·м). Знаючи питому шляхову витрату і довжину ділянки, можемо знайти загальну шляхову витрату:

$$Q_{шл} = q_0 \cdot l. \quad (4.14)$$

**Транзитна** - витрата, що проходить через дану ділянку трубопроводу без використання рідини з нього. На даному малюнку вузлова витрата в точці Д буде транзитною для ділянки СД. На ділянці ВС транзитна витрата буде рівна сумі вузлових витрат в т. С, в т. Д і шляховому на ділянці СД.

На ділянці АВ:

$$Q_{транз} = Q_B + Q_C + Q_D + Q_{шл. СД}$$

Транзитна витрата проходить через ділянку трубопроводу повністю по всій його довжині. Шляхова витрата проходить цілком тільки в початкових ділянках, далі вона зменшується і в кінці ділянки дорівнює 0.

**Розрахункова** витрата є фіктивною витратою.

$$Q_{розр} = Q_{транз} + a Q_{шл.}$$

У цілях спрощення розрахунку приймають  $a = 0,5$ , вважаючи, що 50 % шляхової витрати споживаються на початку ділянки, а інші 50 % споживаються в кінці ділянки.

Розрахунок послідовного трубопроводу починають з кінцевої крапки і ведуть в напрямі, зворотному руху води, поступово складаючи витрату.

| Найменування вузлів | Найменування ділянок | Довжина, м | діаметр, мм | $Q_{шл.}$ , л/с | $Q_{транз}$ , л/с | $Q_{розр.}$ , л/с | $h_w$ , м |
|---------------------|----------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------|
| Д                   | ДС                   |            |             |                 |                   |                   |           |
| С                   |                      |            |             |                 |                   |                   |           |
| В                   | СВ                   |            |             |                 |                   |                   |           |
| А                   | ВА                   |            |             |                 |                   |                   |           |

#### 4.9. Розрахунок дірчастих трубопроводів

**Дірчастий трубопровід** - трубопровід, що забезпечується уздовж своєї довжини на однаковій відстані отворами, через які вода може йти з більш-менш рівномірною шляховою витратою. Таким чином, дірчастий трубопровід може служити моделлю водопроводу з шляховою витратою уздовж нього. Враховуючи, що відтік води з труби спостерігається не по всій її довжині, а з  $n$  окремих отворів, розташованих на однаковій відстані один від одного, Грабовським була запропонована наступна формула для розрахунку дірчастого трубопроводу:

$$\frac{(P_t - P_0)}{\gamma} = \frac{V_0^2}{2g} \left[ 1 - \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{1}{6} \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \left( 2 + \frac{1}{n} \right) \right]. \quad (4.15)$$

Довжину дірчастої труби, при якій втрати напору повністю компенсуються відновленням напору за рахунок зменшення швидкостей при роздачі витрати, називають **критичною**. При збільшенні числа отворів збільшується критична довжина.

Дірчасті трубопроводи, в яких втрати напору менше відновленого напору за рахунок зменшення швидкості, називають **гранично короткими трубопроводами**, в яких довжина менше критичної довжини.

Таким чином втрати напору по трубопроводу з діаметром  $d$  і завдовжки  $l$  з витратою  $Q$  уздовж всієї довжини дірчастого трубопроводу визначаються за формулою

$$h_w = \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{V_0^2}{2g}, \quad (4.16)$$

де  $V_0$  - швидкість в початковому перерізі трубопроводу.

Витрата води уздовж трубопроводу є шляховою витратою.

При транзитній витраті, яка чисельно дорівнює шляховій, втрати напору по довжині визначаються за формулою

$$h_w = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{V_0^2}{2g}. \quad (4.17)$$

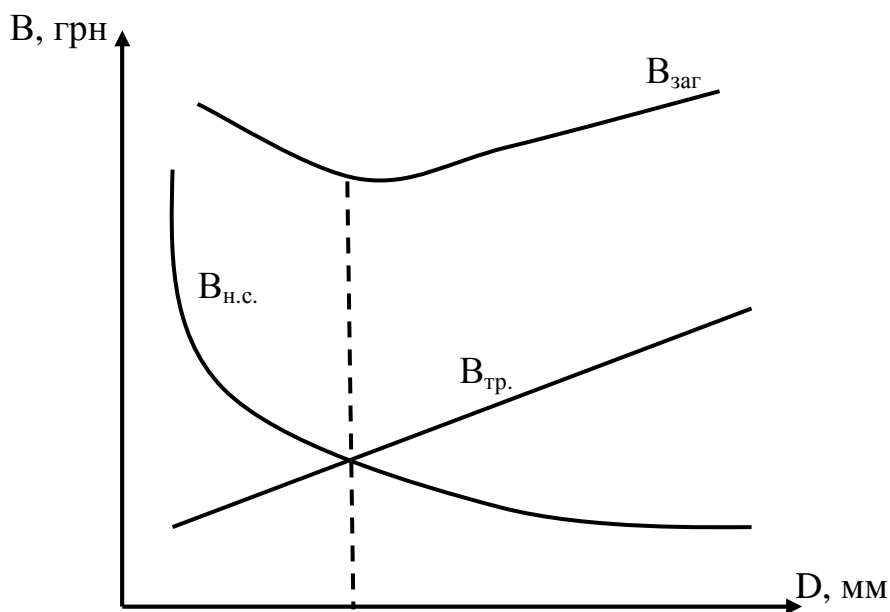
Тобто при транзитній витраті втрати напору будуть в три рази більші.

#### **4.10. Поняття про економічний розрахунок трубопроводу**

При проектуванні виникає проблема, яким слід прийняти діаметр трубопроводу і як обґрунтувати цей вибір. Теоретично через трубу будь-

якого діаметра можна пропустити будь-яку витрату, проте при пропуску заданої витрати через трубопроводи малого діаметра в них виходять великі швидкості і великі втрати напору. Оскільки рух рідини в напірних трубопроводах, як правило, турбулентний, то втрати напору пропорційні  $V^2$ . При великому діаметрі трубопроводу швидкості будуть невеликими, отже, втрати теж будуть невеликими.

Будь-який водопровід складається з трубопроводу і насосної станції. Тому залежно від діаметра трубопроводу визначатиметься вартість будівництва, тобто вартість самого трубопроводу і насосної станції. Чим менше діаметр трубопроводу за всіх рівних інших умов, тим менша вартість трубопроводу, але буде більша вартість насосної станції і вище експлуатаційні витрати. Задаючись різними діаметрами трубопроводу, можна розрахувати щорічні витрати по трубопроводу; щорічні витрати по насосній станції; сумарні щорічні витрати. Ці дані відображаються графічно.



**Рис. 4.8 - Сумарні щорічні витрати**

Крива  $V_{заг.}$  має мінімальний діаметр, при якому загальні витрати мінімальні. Це і буде економічно найвигідніший діаметр трубопроводу.

У загальному випадку цей розмір не відповідає розмірам по ДЕСТ, тому приймають найближчий розмір. З точки зору економії металу доцільно



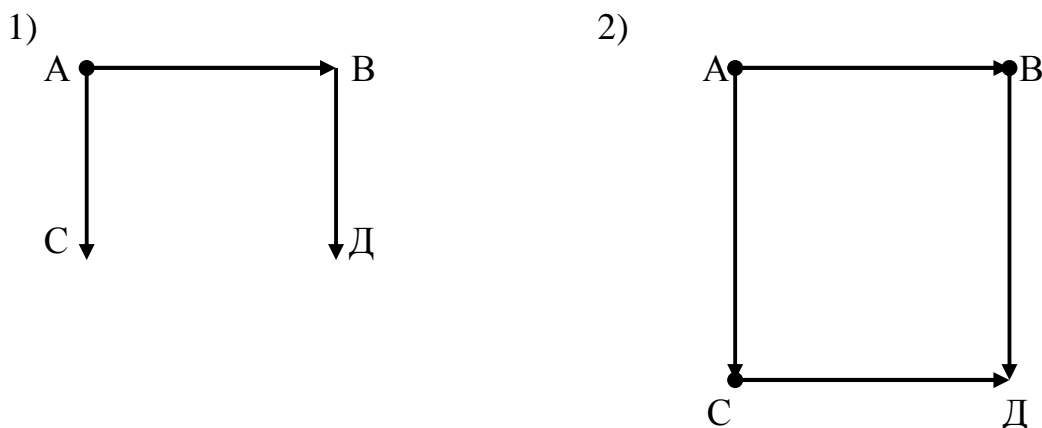
вибирати найближчий менший діаметр. Швидкості, які відповідають економічно найвигіднішому діаметру, називають *економічними швидкостями*.

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Магістральні і розгалужені мережі труб.
2. Класифікація трубопроводів залежно від матеріалу труб і від характеру роздачі рідини.
3. Типи задач для гідравлічного розрахунку трубопроводів.
4. Основні розрахункові формули при русі рідини в напірних трубопроводах
5. Основні типи задач з розрахунку простого трубопроводу.
6. Питомий опір, опір ділянки трубопроводу.
7. Розрахунок самопливного, сифонного трубопроводу і всмоктуючого трубопроводу насосу.
8. Послідовне сполучення трубопроводів різних діаметрів і довжин.
9. Паралельне з'єднання трубопроводів.
10. Вузлова, шляхова, транзитна і розрахункова витрати.
11. Розрахунок дірчастих трубопроводів.
12. Економічний розрахунок трубопроводу, найвигідніший діаметр.

## ТЕМА 5. ЗАМКНУТІ (КІЛЬЦЕВІ) І РОЗІМКНЕНІ (ТУПИКОВІ) ВОДОПРОВІДНІ МЕРЕЖІ

Загальна довжина трубопроводу розімкненої мережі менша за кільцеву. Це єдиний позитивний показник розімкненої мережі. Основний її недолік - це неможливість забезпечення водою об'єктів у разі аварії на мережі.



*Рис. 5.1– Схема розімкненої (1) та кільцевої (2) водопровідної мережі*

Кільцева водопровідна мережа на випадок можливої аварії забезпечує подачу води з другого боку кільця, проте вже в зменшеній кількості. Тому в містах водопровідна мережа влаштовується кільцевою.

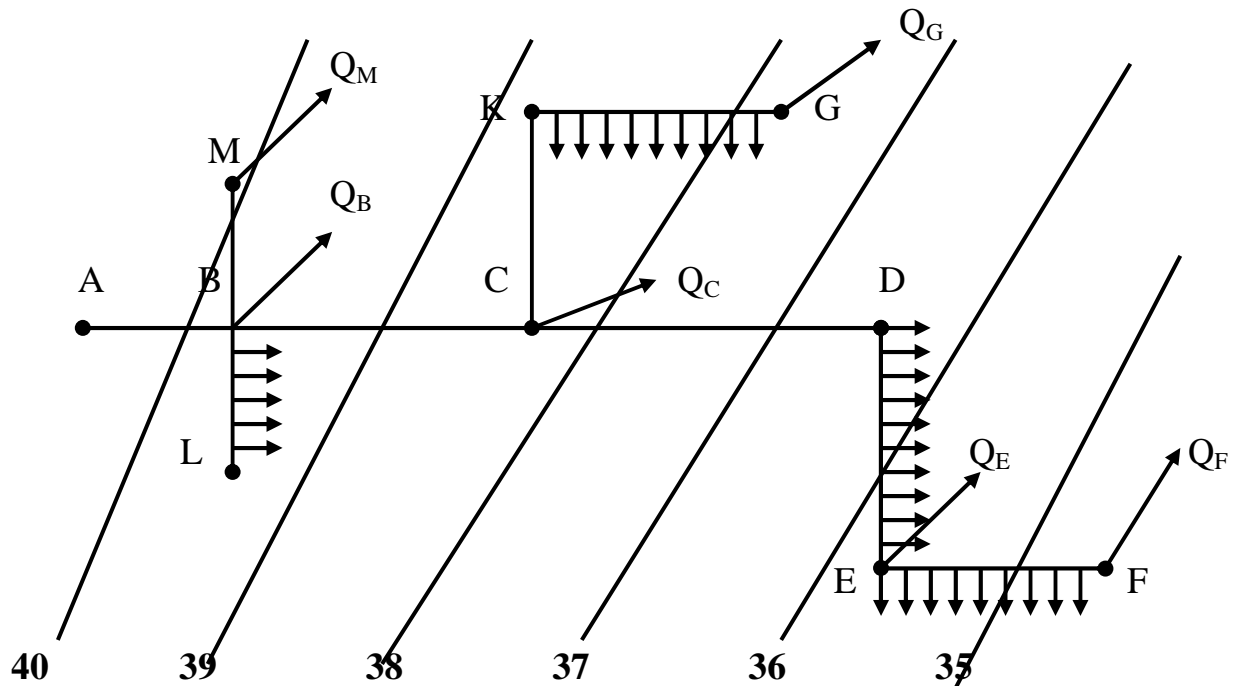
### 5.1. Розрахунок розімкненої мережі водопроводу.

На рис. 5.2 водонапірна башта розташована в т. А. У точках В, С, Е, F, М, G є вузлові витрати. Шляхові витрати  $\epsilon$  на ділянках BL, KG, DE, EF.

Розрахунок розімкненої мережі починають з найбільш віддалених точок мережі і ведуть в напрямі, зворотному руху води. На кожній ділянці визначають шляхову, транзитну і розрахункову витрату, втрати напору на ділянках визначаються за формулами або таблицями.

Діаметр трубопроводу приймають як економічно найвигідніший, виходячи з розрахункової витрати. Визначення п'езометричних відміток

проводять таким чином: у кінцевих точках мережі п'єзометричні відмітки рівні нівелювальним відміткам з урахуванням вільного напору. У наступній крапці п'єзометрична відмітка буде рівна сумі п'єзометричної відмітки першої крапки і втратам напору між цими двома крапками.



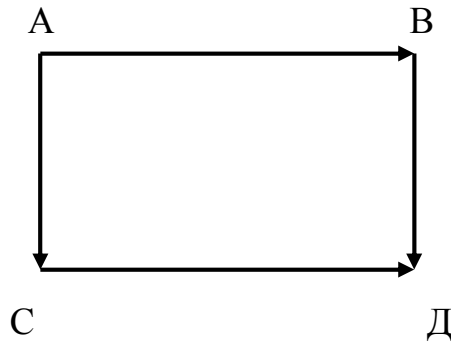
*Рис.5.2 – Схема розімкненої водопровідної мережі*

Якщо вільний напір в новій крапці опиниться менше заданого, то п'єзометричну відмітку в крапці потрібно збільшити, потім переходимо до наступної крапки.

Оскільки в крапці С з'єднуються гілки, то перш ніж перейти до т. В слід визначити необхідну п'єзометричну відмітку в т. С для забезпечення водою відгалуження СКГ. З двох розрахункових п'єзометричних відміток в т. С слід прийняти більшу і, виходячи з неї, продовжувати розрахунок.

## **5.2. Схема розрахунку кільцевої мережі**

Розрахунок кільцевої мережі зводиться до розрахунку окремих кілець, що становлять загальну водопровідну мережу об'єкта.



**Рис. 5.3 – Схема кільцевої мережі**

Звичайно для живлення кільця призначена одна крапка (т. А). В першу чергу визначають вузлові і шляхові витрати, загальна витрата в т. А буде рівна сумі всіх вузлових і шляхових витрат. Ця витрата розподілятиметься по ділянках АВ і АС. Розподіл цієї витрати спочатку приймають орієнтовно, також визначають витрати і на інших ділянках кільця. Знаючи орієнтовні витрати на всіх ділянках кільця, приймають розміри діаметрів трубопроводів на окремих ділянках, виходячи з економічно найвигідніших швидкості і розмірів діаметра по ГОСТу. Потім визначають втрати напору на окремих ділянках і записують їх із знаком «+», якщо вода на цих ділянках рухається за годинниковою стрілкою, і знаком «-», якщо вода рухається проти годинникової стрілки.

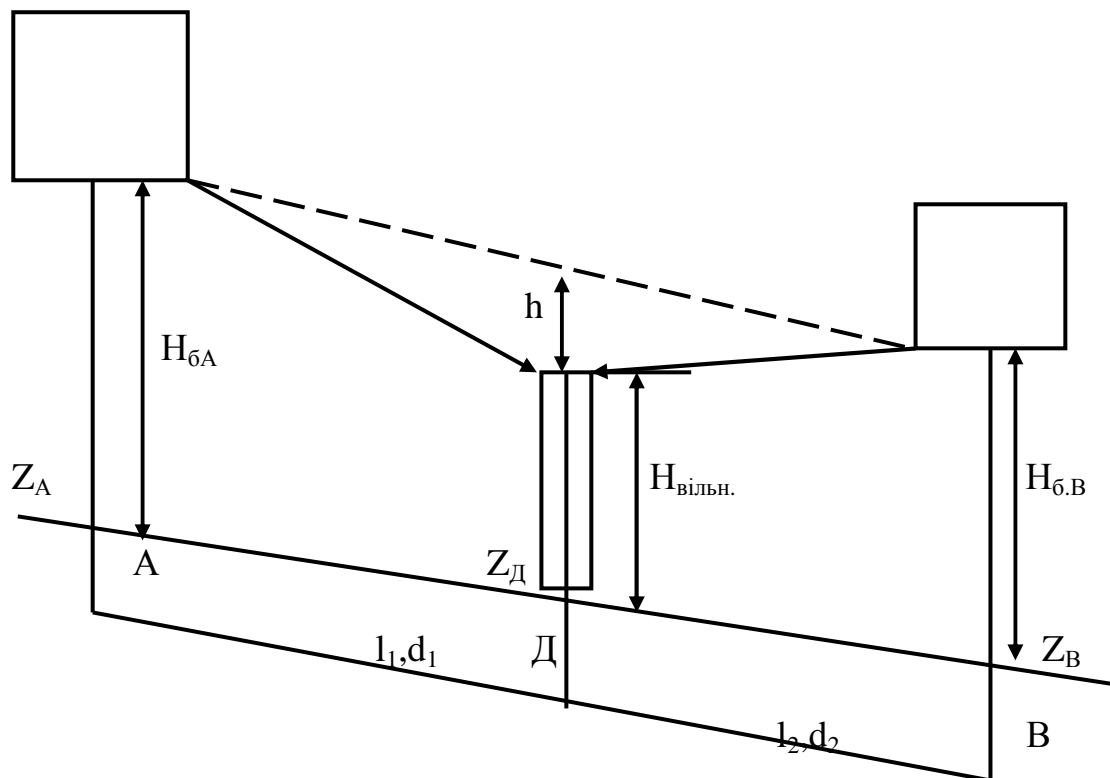
Сума втрат напору при правильному розподілі витрат і виборі діаметрів окремих ділянок повинна бути рівна 0 або близька до 0. У випадку, якщо сума втрат більше 0,2 - 0,5 м, то слід перерозподілити напрям витрат, направивши більші витрати на ті ділянки, де втрати напору виявилися меншими. Якщо у результаті виходить непогодження зі знаком «+», то слід збільшити витрату у напрямі руху води проти годинникової стрілки, зменшивши при цьому витрату в напрямі за годинниковою стрілкою і навпаки.

### **КОТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Розрахунок розімкненої мережі водопроводу.
2. Розрахунок кільцевої мережі.

## ТЕМА 6. ЗАДАЧА ПРО ДВА І ТРИ РЕЗЕРВУАРИ

Звичайна схема водопостачання складається з водонапірної башти, яка живить мережу, і водопровідної мережі. Щоб зменшити висоту водонапірної башти, а отже і вартість будівництва, башту розташовують в найбільш високій точці місцевості, але в деяких випадках необхідне влаштування не однієї башти, а двох або трьох.



*Рис. 6.1 – Розташування двох водонапірних башт в мережі водопостачання*

Задача про два резервуари зводиться до наступного: живлячий об'єкт, розташований в т.Д, що одержує воду з двох резервуарів, які розташовані в т.А і т.В. При цьому відмітки точок А, В і Д різні, різні висоти башт, різні відмітки днищ резервуарів. На схемі резервуар А має більшу відмітку, тому він є основним. При максимальному водоспоживанні об'єкта в т.Д потрібен напір  $H_{\text{вільн.}}$ . При зменшенні водоспоживання із-за зменшення витрати напір в

т.Д збільшується, він може опинитися більше, ніж рівень води в резервуарі в т.В і тоді резервуар, розташований в т.А забезпечуватиме водою не тільки об'єкт в т.Д, але і резервуар в т.В. У години максимального водоспоживання об'єкт споживає воду з обох резервуарів.

Визначимо режим роботи водопроводу в години максимального водоспоживання. Витрата води в т.Д рівна сумі витрат, що протікають по трубопроводу від першого і другого резервуарів.

$$Q_D = Q_1 + Q_2;$$

$$Q_1 = K_1 \cdot \sqrt{i_1} = K_1 \sqrt{\frac{(Z_A + H_{\delta A}) - (Z_D + H_{\text{вільн.}})}{1, l_1}};$$

$$Q_2 = K_2 \cdot \sqrt{i_2} = K_2 \sqrt{\frac{(Z_B + H_{\delta B}) - (Z_D + H_{\text{вільн.}})}{1, l_2}}.$$

У години мінімального водоспоживання в т. Д напір підвищиться на деяку величину  $h$ :

$$H = H_{\text{вільн.}} + h.$$

Тоді відмітка в т. Д буде більша, ніж відмітка т.В.

$$Z_D + H_{\text{вільн.}} + h > H_{\delta B} + Z_B;$$

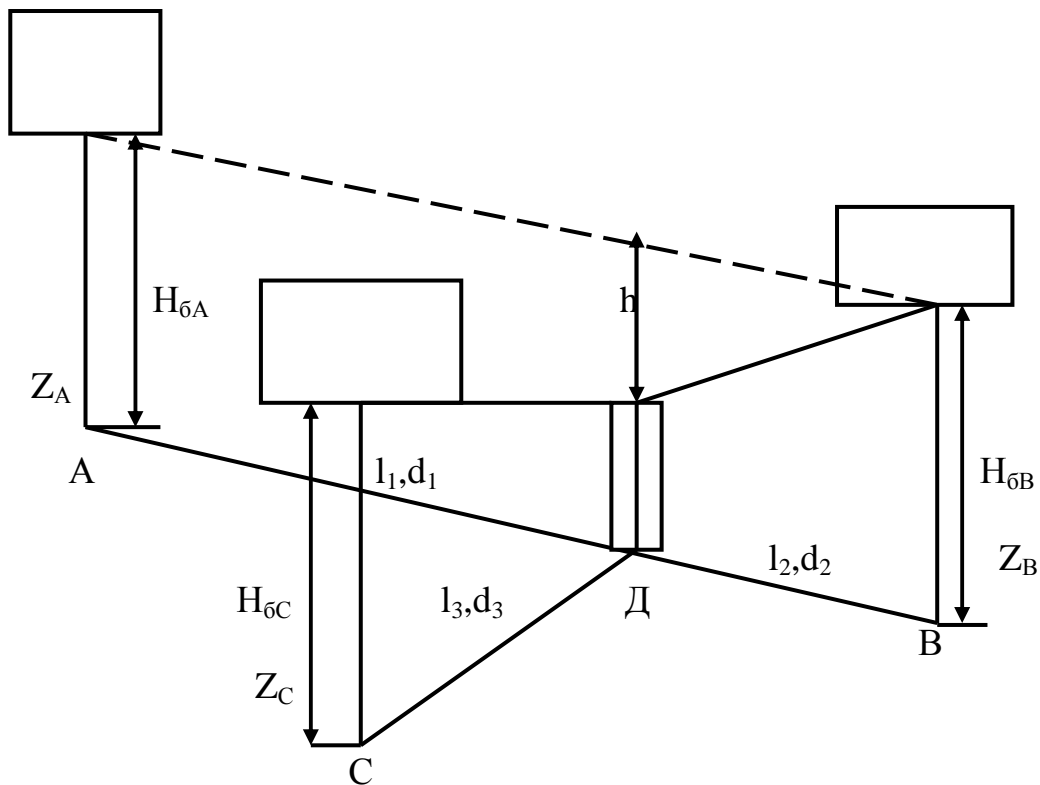
$$Q_1 = K_1 \cdot \sqrt{i_1} = K_1 \sqrt{\frac{(Z_A + H_{\delta A}) - (Z_D + h + H_{\text{вільн.}})}{1, l_1}};$$

$$Q_2 = K_2 \cdot \sqrt{i_2} = K_2 \sqrt{\frac{(Z_B + H_{\delta B}) - (Z_D + h + H_{\text{вільн.}})}{1, l_2}}.$$

У формулі для другої витрати чисельник виходить негативним, виходячи з нерівності  $Z_D + H_{\text{вільн.}} + h > H_{\delta B} + Z_B$ . Це говорить про те, що неправильно вибрано напрям руху води. Отже, вода поступає від т.Д до т.В.

$$Q_D = Q_1 - Q_2$$

Залежно від зміни витрати в т.Д буде змінитися і напір від  $H_{\text{вільн.}}$  до  $(H_{\text{вільн.}} + h)$ .



**Рис. 6.2 - Розташування трьох водонапірних башт в мережі водопостачання**

У години максимального водоспоживання в т.Д витрата буде дорівнювати:

$$Q_D = Q_1 + Q_2 + Q_3;$$

$$Q_1 = K_1 \cdot \sqrt{i_1} = K_1 \sqrt{\frac{(Z_A + H_{6A}) - (Z_D + H_{\text{вільн.}})}{1, l_1}};$$

$$Q_2 = K_2 \cdot \sqrt{i_2} = K_2 \sqrt{\frac{(Z_B + H_{6B}) - (Z_D + H_{\text{вільн.}})}{1, l_2}};$$

$$Q_3 = K_3 \cdot \sqrt{i_3} = K_3 \sqrt{\frac{(Z_C + H_{6C}) - (Z_D + H_{\text{вільн.}})}{1, l_3}}.$$

У години мінімального водоспоживання напір в т.Д збільшується на величину  $h$  і стає рівним  $(H_{\text{вільн.}} + h)$ . При цьому дотримуються наступні нерівності:

$$Z_D + H_{\text{вільн.}} + h > H_{\text{бВ}} + Z_B;$$

$$Z_D + H_{\text{вільн.}} + h > H_{\text{бС}} + Z_C.$$

Резервуар, розташований в т.А, є основним, через нього йде водопостачання до т.Д і поповнюються запаси води в резервуарах В і С, тому в години мінімального водоспоживання витрата в т.Д буде дорівнювати:

$$Q_D = Q_1 - Q_2 - Q_3.$$

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Розташування водонапірної башти в мережі водопостачання.
2. Визначення витрати води в години максимального водоспоживання в задачі про 2 резервуари.
3. Визначення витрати води в години мінімального водоспоживання в задачі про 2 резервуари.
4. Визначення витрати води в години максимального водоспоживання в задачі про 3 резервуари.
5. Визначення витрати води в години мінімального водоспоживання в задачі про 3 резервуари.



## ТЕМА 7. ГІДРАВЛІЧНИЙ УДАР У ТРУБАХ

*Гідравлічний удар* - явище зміни (підвищення або пониження) тиску в трубопроводах при різкій зміні швидкості руху рідини за малий проміжок часу.

Гідравлічний удар характеризується виникненням хвилі підвищеного або зниженого тиску, яка розподіляється від місця зміни швидкості і викликає в кожному перерізі коливання тиску і деформації стінок водопроводу.

При різкому зменшенні швидкості на кожен 1 м/с втраченої швидкості тиск зростає приблизно на 10-12 атм. Внаслідок цього можуть виникнути ускладнення в нормальній роботі трубопроводу аж до розриву стінок труб і аварії на насосній станції. При гідравлічному ударі можливо також і різке падіння тиску до тиску насиченої пари рідини при даній температурі. Як наслідок зниженого тиску при гідравлічному ударі можливий розрив рідини. Проте в деяких випадках гідравлічний удар має позитивне значення.

Жуковський дійшов висновку, що у зв'язку з швидким закриттям засувки на водопровідній мережі і різким зменшенням швидкості до 0 відбувається перехід кінетичної енергії рухомого по трубопроводу потоку в потенційну енергію, яка витрачається на стиснення води. Чим більша довжина трубопроводу, тим більше в ній маса рідини і величина кінетичної енергії, і тим більше буде підвищення тиску. До виникнення гідравлічного удару можуть наводити різні причини:

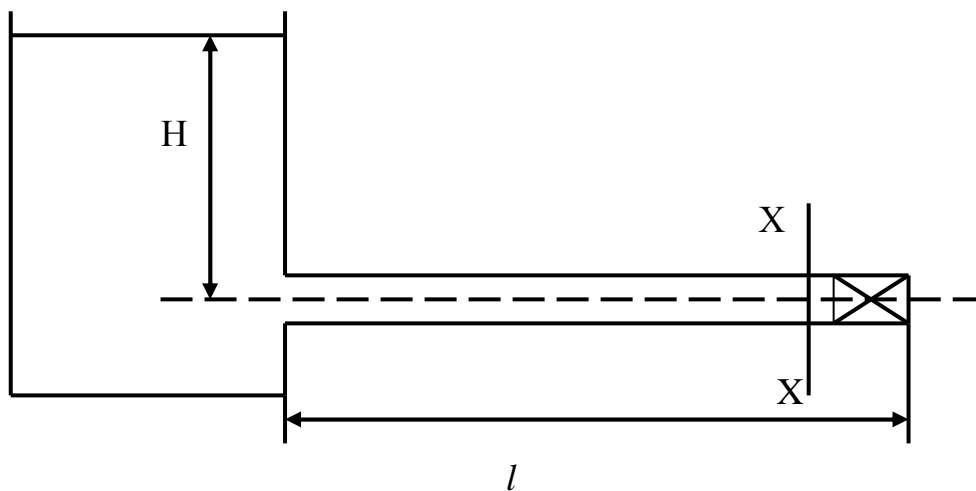
- 1) швидке закриття або відкриття запірних і регулюючих пристроїв;
- 2) раптова зупинка насосу;
- 3) випуск повітря через гідранти на зрошувальній мережі при заповненні трубопроводів водою;
- 4) пуск насосу при відкритій засувці на напірній лінії.

Характер процесу гідравлічного удару залежить від його причин. При різкому закритті засувки в кінці трубопроводу гідравлічний удар почнеться з

підвищеного тиску, який від засувки розповсюджуватиметься вгору по трубопроводу, а потім зміниться зниженим тиском. Якщо закрита засувка в кінці трубопроводу різко відкриється і гідравлічний удар почнеться зі зниженого тиску, який потім зміниться підвищеним. Гідравлічний удар, що починається з хвилі підвищеного тиску, називається *позитивним*, а що починається із зниженого тиску - *негативним*.

### 7.1. Теорія гідравлічного удару Жуковського

Жуковським було виділено 4 етапи розвитку гідравлічного удару.



*Рис. 7.1 – Етапи розвитку гідравлічного удару*

1) при миттєвому закритті засувки шар рідини біля неї зупиниться, а решта рідини в трубі продовжуватиме рухатися з колишньою швидкістю. Через деякий час почнуть зупинятися шари рідини зліва від засувки, тобто фронт рідини, що зупинилася, рухатиметься від засувки до резервуару. У об'ємі рідини, що зупинилася, між засувкою і перерізом X-X виникне додатковий тиск ( $\Delta p$ ). Праворуч від перерізу X-X рідина нерухома і її тиск рівний:  $(p + \Delta p)$ , а зліва від перерізу X-X рідина рухається з колишньою швидкістю, тиск в трубі  $p$ . Фронт стиснення рухомої рідини у напрямі резервуару із швидкістю розповсюдження ударної хвилі  $C$ .

Описаний процес поширеного стиснення продовжуватиметься до тих пір, поки ударна хвиля не дійде до резервуару: вся рідина в трубі нерухома, стисла під тиском і деякий її об'єм поступить з резервуару в трубу;

2) початок другого етапу співпадає із закінченням першого етапу, тобто рідина в трубі стисла, далі, розширюючись, рідина почне рухатися у бік резервуару. Спочатку прийдуть у рух шари рідини поблизу резервуару, а потім і віддаленіші шари. При цьому фронт спаду тиску почне переміщатися від резервуару до засувки. До кінця фази вся рідина в трубі рухається у бік резервуару, а тиск відновлюється до первинного;

3) рідина в трубі тече у бік резервуару, біля засувки утворюються шари рідини, в яких тиск рівний –  $(p - \Delta p)$ .

У цьому випадку фронт зниженого тиску рухається у бік резервуару, зліва від нього тиск  $p$  і швидкість, що направлена вліво; справа рідина буде нерухома, а тиск –  $(p - \Delta p)$ . Цей етап закінчується приходом даного фронту до резервуару;

4) початок 4-го етапу характеризується ситуацією, при якій тиск біля входу в трубу з боку резервуару  $(p)$  більше, ніж з боку труби  $(p - \Delta p)$ . Тому рідина з резервуару почне витікати в трубу із швидкістю  $V$  і тиск в ній зростатиме до  $p$ . При цьому фронт первинного тиску стане переміщатися до засувки із швидкістю розповсюдження ударної хвилі. До кінця етапу швидкість у всій трубі буде  $V$ , а тиск –  $p$ . Але оскільки засувка закрита, то починаючи з кінця 4-го етапу, процес гідравлічного удару почне повторюватися.

При гідравлічному ударі частина енергії рідини переходить в тепло, тому з часом амплітуда коливання  $\Delta p$  затухає і процес припиняється.

Час проходження ударної хвилі по трубопроводу від місця виникнення удару до кінця трубопроводу і назад, називають *фазою ударної хвилі*:

$$T = \frac{2l}{C}. \quad (7.1)$$

Якщо час закриття засувки менше фази ударної хвилі, то при поверненні ударної хвилі до засувки вона вже буде повністю закрита. Гідравлічний удар у даному випадку називається *прямим*.

У разі прямого удару створюється повна сила гідравлічного удару.

Якщо час закриття засувки більше фази ударної хвилі, то при поверненні ударної хвилі засувка буде не повністю закрита. В цьому випадку гідравлічний удар називається *непрямим*.

Для визначення максимального підвищення тиску при прямому ударі використовують формулу Жуковського:

$$\Delta p = \rho \cdot V_0 \cdot C, \quad (7.2)$$

де  $\rho$  - щільність рідини, 1000 кг/м<sup>3</sup>;

$V_0$  - швидкість руху води в трубопроводі до закриття засувки, м/с;

$C$  - швидкість розповсюдження ударної хвилі, м/с.

При непрямому гідравлічному ударі для визначення підвищення тиску необхідно застосувати закон зміни швидкості руху рідини в трубопроводі, яка залежить від характеру закриття засувки. Для приблизного підрахунку використовують формулу

$$\Delta p = \frac{2\rho \cdot V_0 \cdot l}{t_3}, \quad (7.3)$$

де  $l$  - довжина трубопроводу від місця удару до розрізу, в якому підтримується постійний тиск (наприклад, до резервуару або до місця приєднання до трубопроводу більшого діаметра);

$t_3$  - час закриття засувки, с.

Швидкість розповсюдження ударної хвилі залежить від пружних характеристик матеріалу труб, стисливості рідини і відношення діаметра труби до товщини її стінок:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot \delta}}}, \quad (7.4)$$

де  $K$  - модуль об'ємної пружності рідини (для води  $K = 2030$  МПа);

$E$  - модуль пружності матеріалу стінок труби, Па;

$D$  - діаметр труби, м;

$\delta$  - товщина стінок труби, м.

Для абсолютно непружних стінок  $E \rightarrow \infty$ , тому

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (7.5)$$

Ця швидкість рівна швидкості звуку в необмеженій пружній масі рідини ( $C = 1425$  м/с).

## **7.2. Заходи з локалізації явища гідравлічного удару у водопровідних трубах і на насосних станціях**

Є заходи щодо недопущення небезпечних підвищень або понижень тиску в трубопроводах і заходи з їх захисту, якщо небезпечні коливання виникнуть.

Заходи щодо боротьби з гідравлічним ударом залежать:

1. Від умов подачі води, якщо вода йде самопливно з водоймища вниз і засувка знаходиться на нижньому кінці трубопроводу, то можливі наступні заходи:

- використовують засувки, що поволі закриваються. Цей захід заснований на тому, що чим більший час закриття засувки, тим менше втрачена швидкість в трубопроводі і тим менше підвищення тиску від гідравлічного удару;

- на трубопроводах можуть встановлюватися зрівняльні резервуари, що сполучені з трубопроводом, і проміжні резервуари, заповнені водою до висоти, яка відповідає нормальному тиску. При гідравлічному ударі в резервуар поступає деякий об'єм води і додатковий тиск в трубопроводі швидко гаситься;

- можуть використовувати повітряні ковпаки, де стиснене повітря амортизує підвищення тиску.

2. У разі зупинки насоса, який подає воду від низу до верху в резервуар, зворотний клапан, встановлений у насоса, закривається дуже швидко і на початку напірного трубопроводу може виникнути гідравлічний удар. Для боротьби прийнято влаштовувати:

- скидні пристрої, які при підході ударної хвилі відкриваються і пропускають воду на вилів. Ці спеціальні протиударні апарати ставлять на початкових ділянках напірних трубопроводів.

### 7.3. Поняття про гідравлічний таран

Принцип роботи і пристрій гідравлічного тарану, призначеного для підйому рідини, заснований на явищі гідравлічного удару.

За допомогою гідравлічного тарану можливо частину води  $Q_2$ , що поступає з джерела в кількості  $Q_1$ , з напором  $H_1$  підняти на висоту  $H_2$ , при цьому  $Q_2 < Q_1$ .

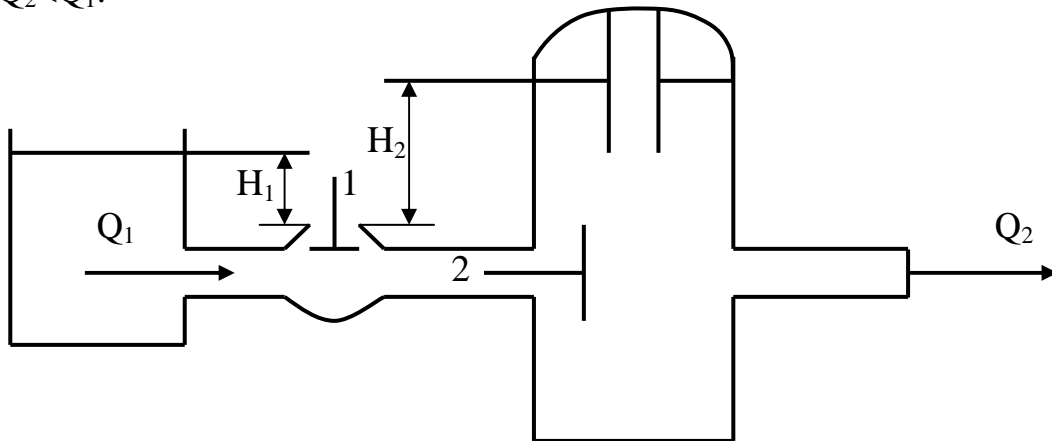


Рис. 7.2 – Схема роботи гідравлічного тарану

Основними частинами тарану є коробка з двома клапанами (1 - пусковий клапан; 2 - робочий клапан) і повітряний ковпак.

Якщо таран не працює, обидва клапани закриті. Клапан 1 закритий під дією напору  $H_1$ , клапан 2 - під дією  $H_2$ . Для пуску тарану в роботу потрібно натиснути на клапан 1, він привідчиняється і створює умови для витікання води назовні. При цьому витрата води наростатиме, оскільки після відкриття клапана 1 основну енергію буде витрачено на подолання інерції маси води в трубопроводі, який сполучає джерело і клапанну коробку. Надалі  $H_1$  буде повністю використаний на подолання опору.

Коли  $Q_1$  досягне певної величини, клапан 1 різко закриється через різницю тиску. Цей перший період роботи тарану називають **розгінним**. Як тільки клапан 1 закриється швидкість руху рідини по трубопроводу у напрямі клапанної коробки впаде до 0, відбудеться гідравлічний удар і в коробці з'явиться ударний тиск, який відповідає напору  $H_2$ . Цей період називають **ударним**. Після цього відкриється клапан 2 і частина води з клапанної коробки потрапить в напірний трубопровід. Її надходження продовжуватиметься до тих пір, поки тиск в клапанній коробці не впаде і клапан 2 закриється. Цей період називають **робочим**. За робочим періодом слідує період відтоку води, коли тиск в клапанній коробці менше за  $H_2$ , але більше за  $H_1$ . Вода з клапанної коробки піде у бік джерела живлення. В результаті клапан 1 відкриється і знову почнеться розгінний період.

Таким чином, робота гідравлічного тарану полягає в безперервному повторенні вказаних 4-х періодів.

ККД тарану рівний відношенню корисної роботи до витраченої роботи:

$$\eta = \frac{\gamma Q_2 \cdot H_2}{\gamma Q_1 \cdot H_1} = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1}. \quad (7.6)$$

На практиці ККД тарану не перевищує 0,4-0,5.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке гідравлічний удар?
2. Причини виникнення гідравлічного удару.
3. Позитивний і негативний гідравлічний удар.
4. Теорія гідравлічного удару Жуковського.
5. Фаза ударної хвилі.
6. Прямий і непрямий гідравлічний удар.
7. Визначення максимального підвищення тиску при прямому і непрямому ударі.
8. Швидкість розповсюдження ударної хвилі.
9. Заходи по локалізації явища гідравлічного удару у водопровідних трубах і на насосних станціях.
10. Поняття про гідравлічний таран.
11. ККД гідравлічного тарану.



## ТЕМА 8. ВИТІКАННЯ РІДИНИ З ОТВОРІВ І НАСАДКІВ.

### КЛАСИФІКАЦІЯ ОТВОРІВ І НАСАДКІВ

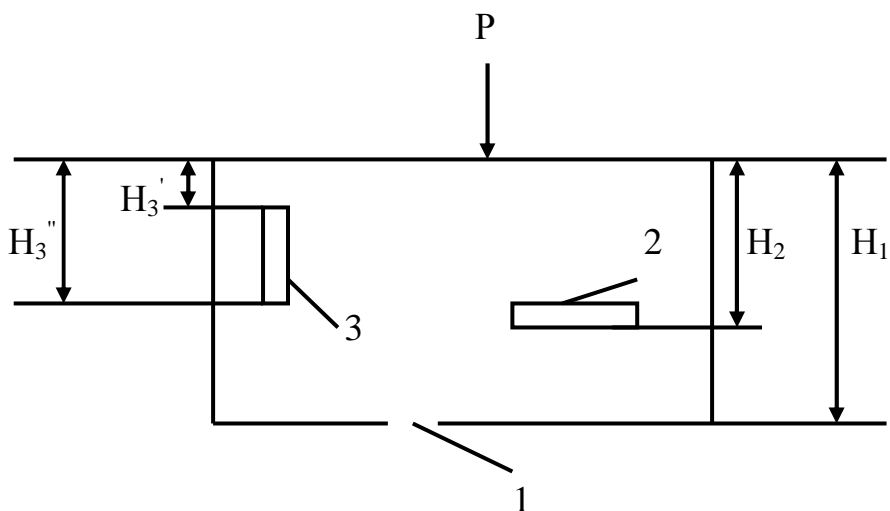
Відповідно до особливостей гідравлічного розрахунку отвори підрозділяються на великі і малі

**Малий отвір** - отвір, в різних точках якого геометричний напір (відстань по вертикалі від вільної поверхні рідини до даної точки отвору) практично однаковий. Висота такого отвору, розташованого у вертикальній стінці не перевищує  $0,1 H$ .

**Великим** називають отвір, геометричний напір в різних крапках по висоті якого не однаковий.

Таким чином, вузька вертикальна щілина є великим отвором, а отвір будь-якого розміру в дні резервуару - малим.

Отвори можуть бути правильної і неправильної форми. Форма отвору впливає на витікання рідини і у багатьох випадках змінює поперечний перетин витікаючого струменя. Це явище називають *інверсією*.



Отвір може бути в тонкій і товстій стінці.

Стінка вважається тонкою, якщо її товщина менше  $0,67H$ . У цьому випадку товщина стінки не робить вплив на характер витікання з отвору.

Товстою називається стінка при товщині стінки більш або рівної  $0,67H$ , тут товщина стінки робить вплив на витікання рідини. Крім того, на характер витікання рідини з отворів істотно впливає стиснення струменя при підході до отвору, постійність або зміна напору і рівень рідини за отвором.

Стиснення називається *досконалим*, коли бічні стінки і дно судини не впливають на витікання. Якщо отвір знаходиться від бічної стінки або дна на відстані трьох розмірів отвору (для круглого отвору  $3d$ , для квадратного -  $3a$ ), то витікання відбувається з *недосконалим* стисненням. У цьому випадку бічні стінки або дно судини роблять вплив на витікання.

Стиснення струменя при підході до отвору може бути повним по всьому периметру і неповним, коли з однієї або декількох сторін рідини при підході до отвору не зазнає стиснення.

Якщо при витіканні рівень рідини в судині не змінюється, то має місце сталий рух і вважається, що витікання відбувається при постійному напорі.

При зміні рівня рідини має місце несталий рух, оскільки витікання відбувається при змінному напорі і гідравлічні елементи потоку змінюються за часом.

Розрізняють витікання за наявності притоку рідини і при його відсутності. В останньому випадку відбувається спорожнення судини.

Якщо рівень рідини за отвором не впливає на умови витікання, воно називається *вільним*.

При впливі рівня рідини на характер витікання, такі отвори називаються *підтопленими* (при приватному затопленні) або *затопленими* (витікання відбувається під рівень прилеглої нижче рідини).

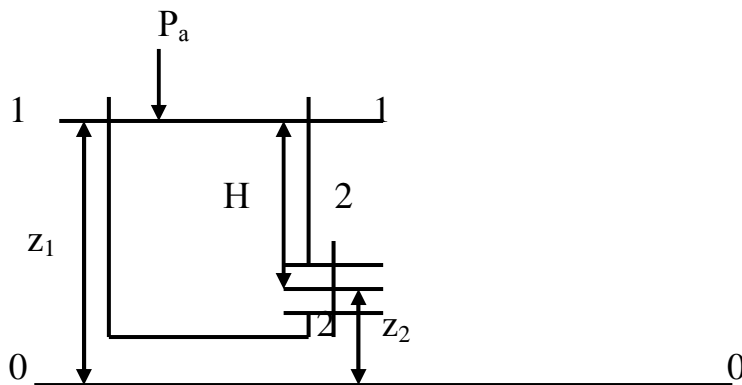
Пропускна спроможність отвору залежить від умови стиснення струменя, для оцінки якого вводиться поняття коефіцієнта стиснення струменя:

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_0}, \quad (8.1)$$

де:  $\omega_c$  - площа стислого живого перетину;

$\omega_0$  - площа отвору.

### 8.1. Витікання рідини з малих отворів при постійному напорі



*Рис. 8.2 - Витікання рідини з малих отворів при постійному напорі*

У бічній тонкій вертикальній стінці судини є малий отвір. Витікання вільне в атмосферу відбувається при постійному напорві, тобто рівень рідини в резервуарі не змінюється.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Sigma h_w;$$

$$p_1 = p_2 = p_{атм}; \quad z_1 - z_2 = H.$$

Оскільки площа поперечного перерізу судини значно перевершує площу перерізу струменя, то  $V_1 = 0$ .

$$H = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Sigma h_w;$$

$$\Sigma h_w = \xi \frac{V_2^2}{2g};$$

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{V_2^2}{2g}(\alpha + \xi); \\
 V_2 &= \sqrt{\frac{H2g}{(\alpha + \xi)}}; \\
 \frac{1}{(\alpha + \xi)} &= \varphi,
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$

де  $\varphi$  - коефіцієнт швидкості.

$V_2 = \varphi\sqrt{H2g}$  - швидкість при витіканні з малих отворів у тонкій стінці при постійному напорі.

$$Q = W_2 V_2; W_2 = \varepsilon \omega_0;$$

$$Q = \varepsilon \varphi \omega_0 \sqrt{H2g};$$

$$\varepsilon \varphi = \mu,$$

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{H2g} - \text{витрата}$$

при витіканні з малих отворів в тонкій стінці при постійному напорі.

Звичайно при вільному витіканні води з малих отворів в тонкій вертикальній стінці приймають такі середні значення коефіцієнтів:

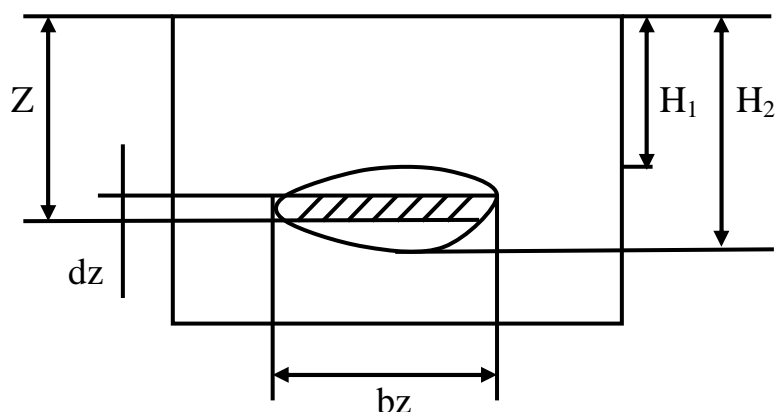
$$\varphi = 0,97; \xi = 0,06; \varepsilon = 0,64; \mu = 0,62.$$

Одержані залежності справедливі для будь-яких інших малих отворів за умови, що витікання відбувається при постійному напорі.

Мінятися будуть тільки значення коефіцієнтів, які приводяться в спеціальних довідниках.

У загальному випадку коефіцієнти, які характеризують витікання з отворів, залежать від роду рідини, товщини стінки, температури, форми і розміру отвору, величини напору.

## 8.2. Витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі



*Рис. 8.3 - Витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі*

Нехай в тонкій вертикальній бічній стінці резервуару є великий отвір довільної форми. Напір до верхньої кромки отвору  $H_1$ , до нижньої -  $H_2$ .

Виділимо в межах великого отвору елементарні смужки завтовшки  $dz$  і шириною  $bz$ , які знаходяться на глибині  $Z$  від вільної поверхні рідини. Тоді для цієї смужки як для малого отвору можна обчислити витрату.

$$dQ = \mu dV \sqrt{2gz} ;$$

$$dQ = \mu dz bz \sqrt{2gz} .$$

Оскільки коефіцієнт витрати для отворів визначається дослідним шляхом і береться за довідковими даними, при інтеграції виразу його можна винести за знак інтеграла. Тоді в загальному випадку витікання рідини з великого отвору в тонкій вертикальній стінці при постійному рівні рідини в резервуарі витрата може бути обчислена за формулою

$$dQ = \mu_0 \sqrt{2g} \int_{H_1}^{H_2} Z^{1/2} dz bz, \quad (8.3)$$

де  $\mu_6$  - коефіцієнт витрати для великого отвору.

### **Окремий випадок.**

Для великого прямокутного отвору в тонкій вертикальній стінці при постійному рівні рідини в судині  $bz = b$ , тоді

$$dQ = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}). \quad (8.4)$$

Для визначення витрати при витіканні з великого круглого отвору при постійному рівні рідини в резервуарі використовують формулу

$$dQ = \mu_6 \omega \sqrt{2gH}. \quad (8.5)$$

### **8.3. Витікання рідини з отворів при змінному напорі**

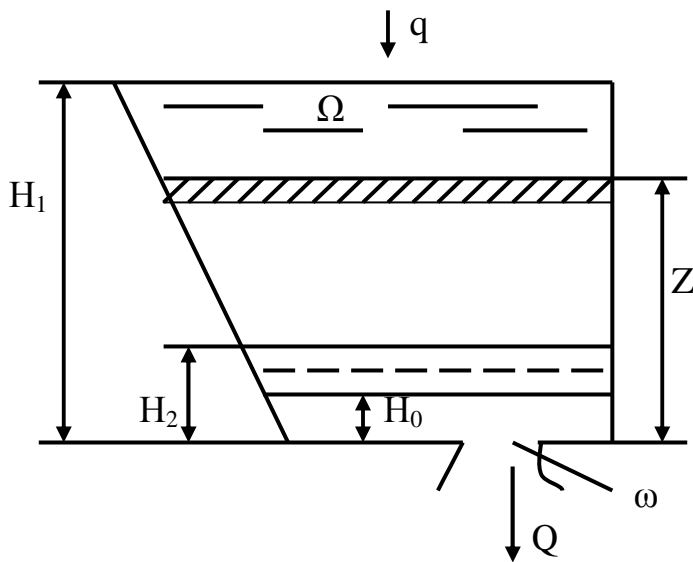
Витікання рідини з отворів при змінному напорі має місце тоді, коли рівень води в резервуарах підвищується або знижується. Розрахунки за визначенням витікання рідини при змінному напорі звичайно зводяться до визначення часу спорожнення або наповнення, величини початкового напору і розміру отвору.

**Непризматичний резервуар** - резервуар з непостійною площею горизонтального перерізу на рівні  $H$ , який при зміні глибини має різну площу вільної поверхні.

**Призматичний** - резервуар з постійним перерізом на будь-якому рівні води.

Витікання рідини при змінному напорі - це несталий рух, тому в цьому випадку рівняння Бернуллі непридатне.

Розглянемо витікання рідини з резервуару при витраті витікання, на рівній притоці в резервуар.



**Рис. 8.4 - Витікання рідини з резервуару при витраті витікання, не рівній притоці в резервуар**

Рівень води в резервуарі підвищується, якщо  $q > Q$  і навпаки знижується, якщо  $q < Q$ .

Витікання рідини нестале. За час  $dt$  об'єм рідини змінюється на величину  $\Omega dz$ .

$\Omega$  - площа поверхні рідини в резервуарі на відмітці  $z$ .

$dz$  - зміна відмітки  $z$  за час  $dt$ .

Зміна в об'ємі рівна різниці об'єму, що поступив в резервуар, і об'єму, що витік з резервуару, тобто

$\Omega dz = q dt - Q dt$  - рівняння балансу води або рівняння несталої руху в резервуарі.

При постійній притоці такий несталий рух прагне стати сталим, тобто у будь-який момент часу витрата з резервуарі:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gz}.$$

Для визначення напору, при якому  $q = Q$ , використовують формулу

$$H_0 = \frac{q^2}{\mu^2 \omega^2 2g}. \quad (8.6)$$

Час, необхідний для зміни рівня рідини в резервуарі на величину  $dz$  складає:

$$dt = \frac{\Omega \cdot dz}{\mu \omega \sqrt{2g} (\sqrt{H_0} - \sqrt{z})}. \quad (8.7)$$

Для рідини з невеликою в'язкістю (води) можна вважати, що коефіцієнт  $\mu = \text{const}$ , тоді час зміни рівня води від  $H_1$  до  $H_2$  складе:

$$t = \frac{1}{\mu \omega \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{\Omega dz}{\sqrt{H_0} - \sqrt{z}}. \quad (8.8)$$

Для вирішення цього рівняння необхідно знати: закон зміни площі поверхні води в резервуарі залежно від її відмітки.

#### **8.4. Витікання рідини через насадки**

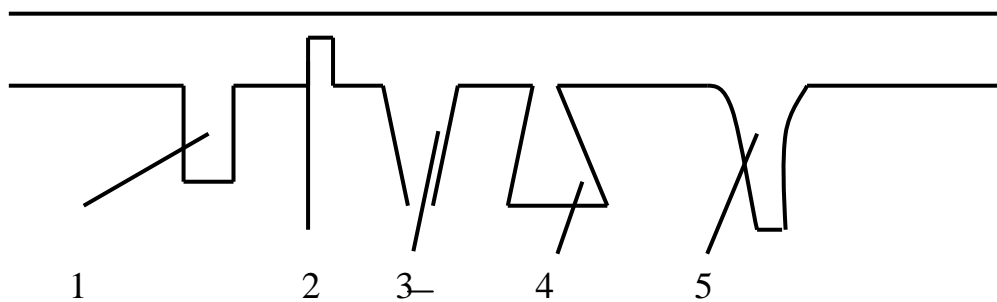
За характерними особливостями гідравлічного розрахунку труби діляться на наступні види:

- довгі труби - це такі труби, в яких втрати по довжині більше місцевих втрат;
- короткі труби - це труби, в яких втрати по довжині майже рівні з місцевими втратами;
- дуже короткі труби (патрубки) - це такі труби, в яких втрати по довжині менше місцевих втрат;
- насадки - це приєднані до отвору короткі патрубки звичайно завдовжки  $2-4d$ , які дозволяють істотно змінювати швидкість і витрату при витіканні рідини.



Як правило, насадки є незатопленими, тобто витікання рідини відбувається в газове середовище. При цьому рух рідини в насадках напірний. Насадки бувають:

- зовнішні і внутрішні;
- циліндрові;
- що конічно сходяться і розходяться;
- коноїдальні.



**Рис. 8.5 – Форми насадків**

1 - зовнішній циліндровий; 2 - внутрішній циліндровий; 3 - що конічний сходиться; 4 - що конічний розходиться; 5 - коноїдальний.

До пристрою насадок вдаються у разі, коли потрібно збільшити пропускну спроможність отвору або для збільшення (зменшення) кінетичної енергії витікаючого струменя.

Зростання витрати рідини в порівнянні із звичайним отвором того ж діаметра в тонкій стінці пояснюється наявністю вакууму на початку насадки, що викликає збільшення напору в стислому перерізі. При цьому стиснення живого перерізу виникає безпосередньо після входу рідини у насадку в результаті криволінійного руху рідини на підході.

Вакуум на початку насадки утворюється таким чином.

За умовою нерозривності струменя швидкість виходу з насадки буде менше швидкості в стислому перерізі. Тому гідродинамічний тиск в стислому перерізі буде менше тиску на виході. Оскільки тиск на виході

рівний атмосферному тиску, в стислому перерізі воно менше, отже, утворюється вакуум.

Розрахункові залежності від витікання з насадок аналогічні залежностям для малого отвору.

$$V_2 = \varphi \sqrt{H2g} ; \quad (8.9)$$

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{H2g} . \quad (8.10)$$

Відмінність одержаних формул полягає у величинах коефіцієнтів швидкості і витрати. Середні значення коефіцієнтів для найбільш поширених насадок приведені в табл. 8.1.

**Таблиця 8.1. - Середні значення коефіцієнтів для найбільш поширених насадок**

| №№ | Тип насадки  | Коефіцієнти              |                                     |                    |
|----|--|--------------------------|-------------------------------------|--------------------|
|    |  | $\varphi$<br>(швидкості) | $\varepsilon$ (стиснення<br>струму) | $\mu$<br>(витрати) |
| 1  | Зовнішній<br>циліндричний при $l = 3-4d$           | 0,82                     | 1                                   | 0,82               |
|    | При $l = 20d$                                      | 0,73                     | 1                                   | 0,73               |
| 2  | Внутрішній<br>циліндричний при $l = 0,5d$          | 0,98                     | 0,52                                | 0,51               |
|    | При $l = 3-4d$                                     | 0,71                     | 1                                   | 0,71               |
| 3  | Конічний, що<br>сходиться при $\alpha = 5^\circ$   | 0,92                     | 1                                   | 0,92               |
| 4  | Конічний, що<br>розходиться при $\alpha = 5^\circ$ | 0,48                     | 1                                   | 0,48               |
| 5  | Коноїдальний                                       | 0,96                     | 1                                   | 0,96               |

На підставі даної таблиці можна зробити висновки про застосування насадок різного типу: зовнішній циліндровий насадок потрібно застосовувати тоді, коли метою є швидке спорожнення резервуару без необхідності великої швидкості витікання.

Насадки, що конічно сходяться, і коноїдальні насадки забезпечують отримання максимальної витрати при великій швидкості, отже, великого кінетичного струменя (пожежні брандспойти, фонтани, гідромонітори).

При використанні насадок, що конічно розходяться, кут конусності обмежений. Інакше струмінь не заповнює насадку і витікання відбувається як з отвору в тонкій стінці.

Втрати в насадках більші, ніж втрати напору при витіканні з малих отворів в тонкій стінці. Тому всі насадки мають менший коефіцієнт швидкості.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Класифікація отворів.
2. Явище інверсії.
3. Досконале і недосконале стиснення.
4. Вільні, підтоплені та затоплені отвори.
5. Коефіцієнт стиснення струменя.
6. Витікання рідини з малих отворів при постійному напорі.
7. Витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі.
8. Витікання рідини з отворів при змінному напорі.
9. Витікання рідини через насадки.
10. Класифікація насадків, галузі їх використання.

## ТЕМА 9. ВІЛЬНІ ГІДРАВЛІЧНІ СТРУМЕНІ

Потік рідини, необмежений жорсткими стінками, називається **вільним струменем**, який може бути незатопленим, якщо вона обмежена газовим середовищем (пожежні струмені, фонтанів, струмені дощувальних апаратів).

Затоплений вільний струмінь, який витікає в середовище тієї же щільності, що і сам струмінь (випуск відпрацьованих промстоків у безстічні системи водопостачання).

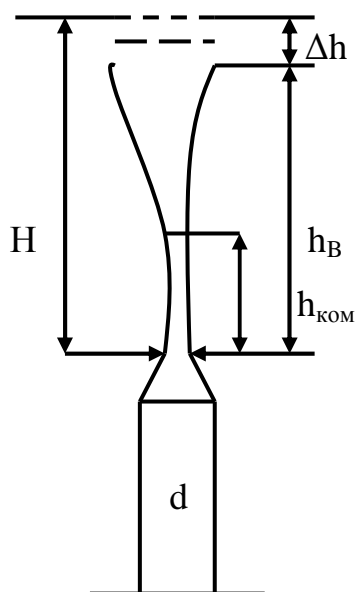
У незатопленому струмені три частини:

1. Компактна.
2. Роздроблена.
3. Розпорошена.

**Компактна** частина струменя має циліндрову або близьку до неї форму, суцільність потоку тут залишається.

У **роздробленій** частині відбувається розширення струмені і її розділення на окремі крупні частини.

В **розпорошеній** частині струмінь складається з окремих крапель.



**Рис. 9.1** – Схема розташування частин незатопленого струменя

Загальна висота вертикального струменя  $h_B$  завжди менше напору  $H$  на виході з насадка. Втрати напору визначаються по формулі

$$H - h_B = \Delta h; \quad (9.1)$$

$$\Delta h = k \cdot \frac{h_B V^2}{d 2g}, \quad (9.2)$$

де  $d$  - діаметр вихідної частини (сприску) насадка;

$K$  - коефіцієнт, визначений дослідним шляхом.

$$\frac{V^2}{2g} = \varphi^2 H; \quad (9.3)$$

$$H - h_B = k \varphi^2 \frac{h_B}{d} H. \quad (9.4)$$

Замінім  $k \frac{\varphi^2}{d} = K_1$

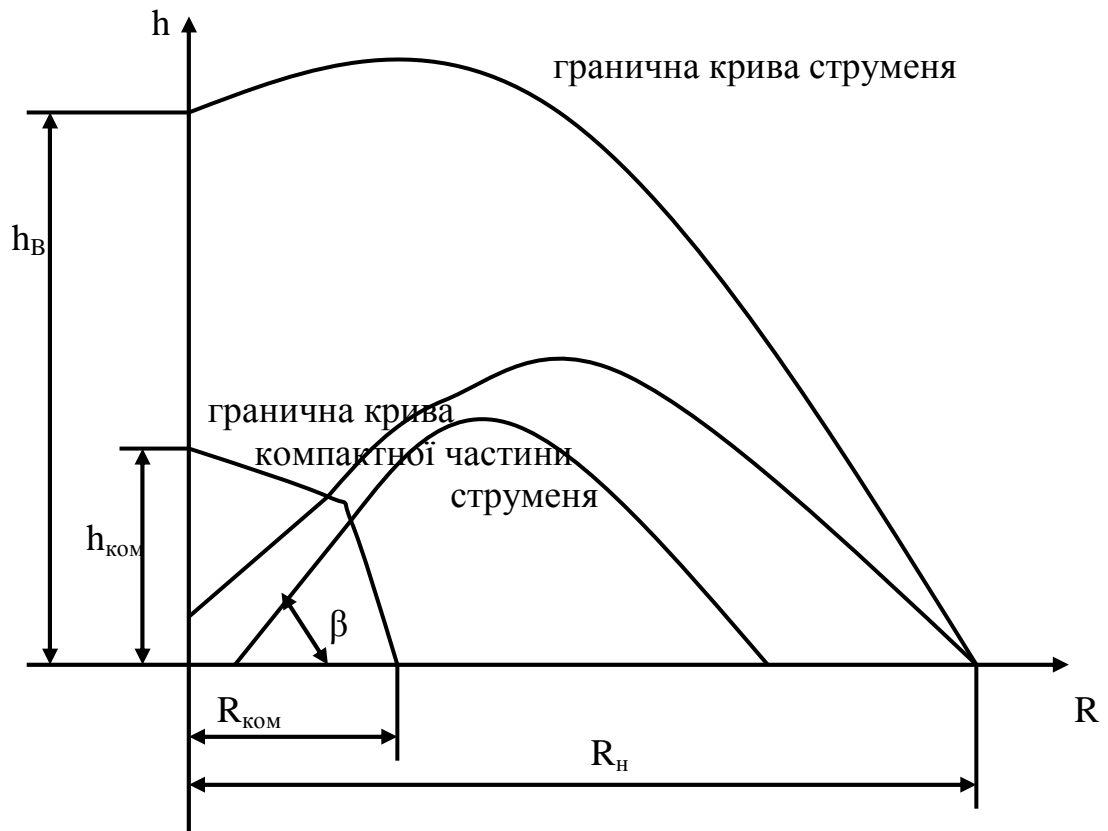
$$H - h_B = K_1 h_B H; \quad (9.5)$$

$$H = K_1 h_B H + h_B; \quad (9.6)$$

$$H = h_B (K_1 H + 1), \quad (9.7)$$

де  $h_B = \frac{H}{K_1 H + 1}$  - формула для визначення висоти вертикальної частини струменя.

Якщо насадок, з якого витікає струмінь, нахилити під різними кутами до горизонту, то крайні краплі струменя опишуть граничну криву, за межі якої вона не виходить.



**Рис. 9.2 – Гранична крива розповсюдження струменя**

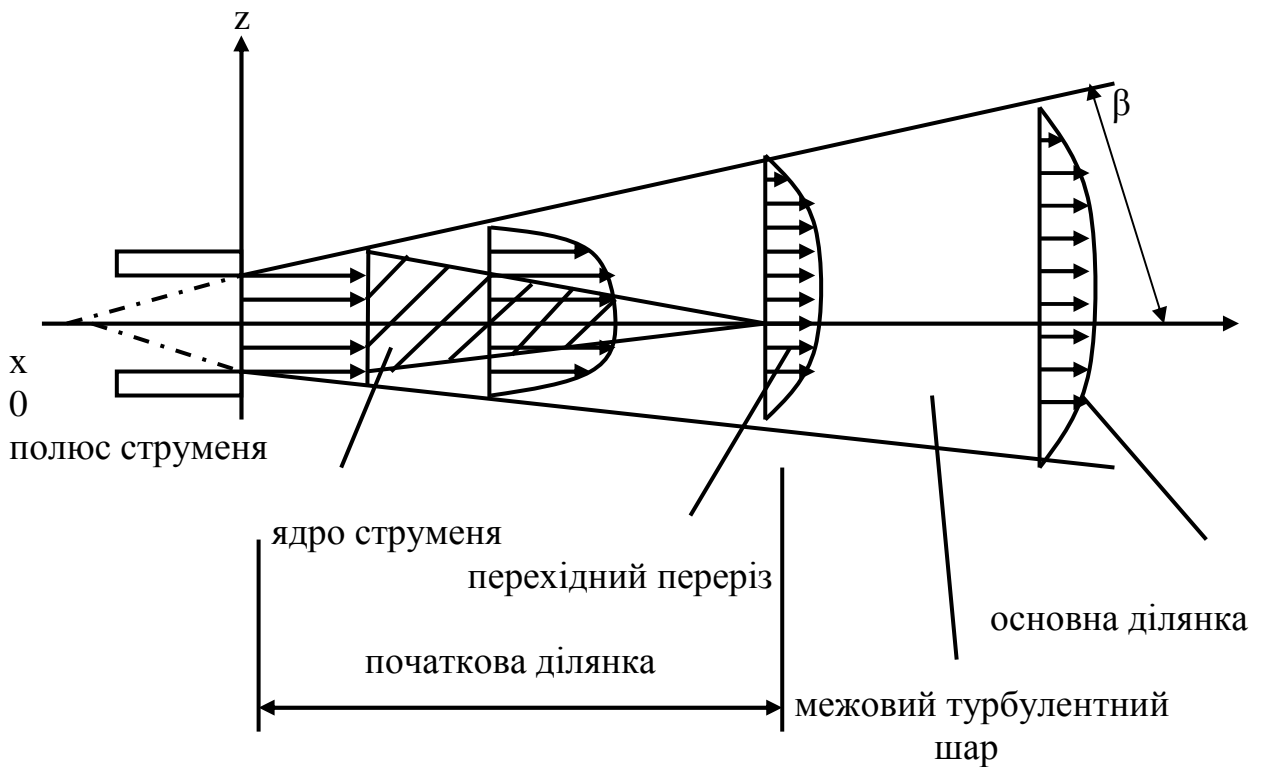
Радіус дії струменя, кривої, збільшується в порівнянні з її вертикальною висотою

$$R_H = K_2 h_B, \quad (9.8)$$

де  $K_2$  - коефіцієнт, який залежить від кута нахилу струменя до горизонту ( $\beta$ ).

При польоті струменя на нього діють сила тяжіння, опір повітря і сили усередині струменя, сумісна дія всіх цих сил приводить до розпаду струменя.

**Затоплений струмінь**, який рухається з насадка в рідке середовище тієї ж щільності, рухається в ній поступово розширюючись.



**Рис. 9.3 – Рух рідини в затопленому струмені**

Вважається, що в початковому перетині струменя епюра швидкостей прямокутна, а контури меж струменя прямолінійні. Пульсації швидкості і перемішування призводять до того, що між струменем і навколишньою рідиною відбувається обмін кількістю руху. Струмінь втрачає швидкість, розширюється і захоплює частину зовнішньої рідини. При виході з насадка і на деякій відстані від нього в центральній частині струменя існує ядро з постійними середніми швидкостями. Із збільшенням поперечного розміру струменя товщина ядра зменшується, а потім ядро зникає. Переріз, в якому це відбувається, називається *перехідним*. Цей переріз розділяє початкову і перехідну ділянки струменя. Якщо прийняти кут розширення меж струменя однаковим на початковій і основній ділянках струменя, то можна знайти точку перерізу зовнішніх кордонів струменя, тобто полюс струменя.

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Дайте визначення вільного струменя.
2. Частина, з яких складається незатоплений струмінь.
3. Визначення висоти вертикального струменя.
4. Гранична крива розповсюдження струменя.
5. Рух рідини в затопленому струмені.



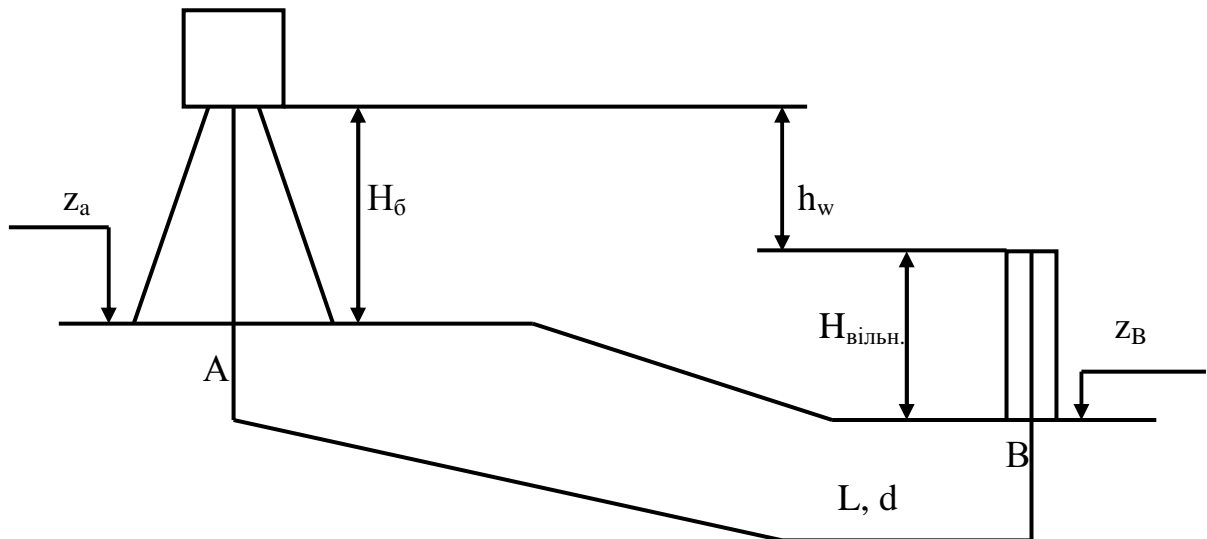
## КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Завданням на контрольну роботу передбачається виконання двох задач і складання відповідей на контрольні питання, номери яких вказані в посібнику.

Таблиця 1 - Варіанти контрольних запитань

| Номер розділу | Номера варіантів (остання цифра номера залікової книжки) |       |      |      |       |       |      |      |      |        |
|---------------|--|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|--------|
|               | 1  | 2     | 3    | 4    | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    | 0      |
| 1             | 7  | 5     | 3    | 6    | 4     | 2     | 1    | 7    | 4    | 1      |
| 2             | 1  | 3     | 2    | 4    | 2     | 3     | 1    | 4    | 1    | 3      |
| 3             | 2  | 1     | 4    | 3    | 1     | 2     | 4    | 3    | 1    | 2      |
| 4             | 1, 9   | 12, 5 | 2, 7 | 3, 8 | 4, 11 | 5, 10 | 6, 9 | 7, 3 | 8, 5 | 10, 12 |
| 5             | 1  | 2     | 2    | 1    | 1     | 2     | 2    | 1    | 1    | 2      |
| 6             | 1  | 3     | 5    | 2    | 4     | 1     | 4    | 5    | 2    | 3      |
| 7             | 1  | 11    | 10   | 9    | 8     | 7     | 4    | 3    | 2    | 5      |
| 8             | 10   | 9     | 8    | 7    | 6     | 5     | 4    | 3    | 2    | 1      |
| 9             | 1  | 3     | 5    | 4    | 2     | 3     | 1    | 4    | 5    | 2      |

### ЗАДАЧІ



**ЗАДАЧА 1.** Визначити витрату, що поступає по трубопроводу завдовжки  $l$ ,  $d$ , прокладеному від т. А до т. В.

Відмітки т. А і т. В задані, також задані висота водонапірної башти і вільний напір.

Місцеві опори складають 10 % від величини втрат по довжині.

Таблиця 2 - *Вихідні дані для задачі 1*

| Задані величини                       | Номера варіантів (остання цифра номера залікової книжки) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                       | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 0   |
| Довжина трубопроводу $l$ , м          | 250  | 120 | 135 | 248 | 365 | 290 | 450 | 660 | 275 | 565 |
| Діаметр, мм                           | 200  | 300 | 400 | 250 | 350 | 450 | 500 | 200 | 300 | 350 |
| Відмітка т.А, м                       | 52   | 145 | 258 | 126 | 145 | 255 | 162 | 35  | 86  | 92  |
| Відмітка т.В, м                       | 48   | 138 | 248 | 114 | 129 | 248 | 149 | 29  | 75  | 88  |
| Висота водонапірної башти $H_6$ , м   | 15   | 12  | 35  | 43  | 32  | 25  | 26  | 29  | 30  | 22  |
| Вільний напір $H_{\text{вільн.}}$ , м | 10   | 10  | 14  | 26  | 22  | 18  | 18  | 22  | 26  | 14  |

**ЗАДАЧА 2.** Визначити висоту водонапірної башти, яка повинна забезпечити подачу води з водонапірної башти в т. А до споживача води в т. В в кількості  $Q$  по трубопроводу завдовжки  $l$ , і діаметр  $d$ . За умови заданих  $z_a$ ,  $z_B$  і  $H_{CB}$ .

Таблиця 3 - *Вихідні дані для задачі 2*

| Задані величини              | Номера варіантів (остання цифра номера залікової книжки) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 0   |
| Довжина трубопроводу $l$ , м | 250  | 120 | 135 | 248 | 365 | 290 | 450 | 660 | 275 | 565 |
| Діаметр, мм                  | 200  | 300 | 400 | 250 | 350 | 450 | 500 | 200 | 300 | 350 |
| Відмітка т.А, м              | 52   | 145 | 258 | 126 | 145 | 255 | 162 | 35  | 86  | 92  |
| Відмітка т.В, м              | 48   | 138 | 248 | 114 | 129 | 248 | 149 | 29  | 75  | 88  |
| Витрата $Q$ , л/сек.         | 120  | 246 | 356 | 193 | 332 | 425 | 526 | 229 | 330 | 422 |
| Вільний напір $H_{CB}$ , м   | 10   | 10  | 14  | 26  | 22  | 18  | 18  | 22  | 26  | 14  |

Вирішити задачі треба трьома способами, які наведені в Додатку 1.

**Задача 1.** Визначити витрату води, яка поступає по трубопроводу завдовжки  $l$ ,  $d$ , прокладеному від т. А до т. В.

Відмітки т. А і т. В задані, також задані висота водонапірної башти і вільний напір.

Місцеві опори складають 10 % від величини втрат по довжині.

***РОЗВ'ЯЗАННЯ:***

1 спосіб:

$$Q = K \sqrt{i}.$$

$K$  беремо з таблиці залежно від діаметра.

$$h_w = 1,1 \cdot l \cdot i \rightarrow i = \frac{h_w}{1,1 \cdot l};$$

$$h_w = (z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}}).$$

2 спосіб:

Для визначення втрат напору в трубопроводі використовують формулу Дарсі

$$h_w = 1,1 \lambda \frac{l \cdot V^2}{d \cdot 2g};$$

згідно зі схемою втрати напору:

$$h_w = (z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}});$$

$$(z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}}) = 1,1 \lambda \frac{l \cdot V^2}{d \cdot 2g}.$$

У останньому рівнянні єдина невідома величина - швидкість, інші задані.

$\lambda$  - приймаємо в першому наближенні як функцію від діаметра.

Для шорсткої зони турбулентного руху при коефіцієнті шорсткості  $n = 0,012$  величини коефіцієнта  $\lambda$  залежить від діаметра трубопроводу.

**Таблиця** - Значення коефіцієнту тертя в першому наближенні залежно від діаметра трубопроводу

| d, мм | $\lambda$ | d, мм | $\lambda$ |
|-------|-----------|-------|-----------|
| 100   | 0,0383    | 500   | 0,0226    |
| 150   | 0,033     | 600   | 0,0212    |
| 200   | 0,0307    | 700   | 0,0202    |
| 250   | 0,0285    | 800   | 0,0193    |
| 300   | 0,0268    | 900   | 0,0186    |
| 350   | 0,0255    | 1000  | 0,0179    |
| 400   | 0,0244    | 1200  | 0,0169    |
| 450   | 0,0234    |       |           |

$$V = \sqrt{\frac{2gd[(z_a + H_{\sigma}) - (z_B + H_{\text{вільн.}})]}{1,1 \cdot \lambda \cdot l}}$$

Визначивши величину швидкості, знаходимо дійсну величину  $\lambda$ .

Якщо  $V \geq 1,2$  м/с, то  $\lambda$  одержуємо за формулою 4.8.

Якщо  $V < 1,2$  м/с, то  $\lambda$  шукаємо за формулою 4.9. Потім за формулою для швидкості уточнюємо значення швидкості і знаходимо витрату.

3 спосіб:

Із заданих умов

$$h_w = (z_a + H_{\sigma}) - (z_B + H_{\text{вільн.}});$$

$$i = \frac{h_w}{1,1 \cdot l} = \frac{(z_a + H_{\sigma}) - (z_B + H_{\text{вільн.}})}{1,1 \cdot l},$$

визначаємо значення ухилу за цією формулою. Знаючи діаметр і обчисливши значення  $1000i$  за розрахунковими таблицями Шевельова, визначаємо величину витрати в л/с.

**Задача 2.** Визначити висоту водонапірної башти, яка повинна забезпечити подачу води з водонапірної башти в т. А до споживача води в т. В в кількості  $Q$  по трубопроводу завдовжки  $l$ , і діаметр  $d$ . За умови заданих  $z_a$ ,  $z_B$  і  $H_{\text{вільн.}}$ .

### **РОЗВ'ЯЗАННЯ:**

*1 спосіб:*

На підставі схеми:

$$H_0 = (z_B + H_{\text{вільн.}} + h_w) - z_a;$$

$$h_w = 1,1 \frac{Q^2}{K^2} \cdot l,$$

де  $K^2$  беремо з таблиці залежно від діаметра.

*2 спосіб:*

Оскільки витрата і діаметр задані, то

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2};$$

$$h_w = 1,1 \cdot l \cdot i.$$

При  $V \geq 1,2$  м/с значення ухилу знаходимо за формулою 4.10, а якщо  $V < 1,2$  м/с, то значення ухилу знаходимо за формулою 4.11. Потім підставляємо втрати напору в формулу для визначення висоти башти і знаходимо висоту водонапірної башти.

*3 спосіб:*

За таблицями Шевельова по заданому діаметру і витраті, визначаємо значення 1000  $i$ , потім знаходимо втрати напору  $h_w = 1,1 \cdot l \cdot i$  і підставляємо у формулу для визначення висоти башти.

**Задача 3.** Визначити діаметр трубопроводу, по якому поступає вода в кількості  $Q$  з резервуару, що знаходиться в т. А до споживача води в т. В. Відомі  $z_a, z_B, H_0, H_{\text{вільн.}}, l$ .

### **РОЗВ'ЯЗАННЯ:**

*1 спосіб:*

$$h_w = (z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}});$$
$$i = \frac{h_w}{1,1 \cdot l} = \frac{(z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}})}{1,1 \cdot l};$$
$$Q = K \sqrt{i};$$
$$K^2 = \frac{Q^2}{i}.$$

По одержаній величині  $K^2$  з таблиці визначаємо діаметр по найближчому більшому значенню  $K^2$ .

*2 спосіб:*

$$h_w = (z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}});$$
$$h_w = 1,1 \lambda \frac{l \cdot V^2}{d \cdot 2g};$$
$$(z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}}) = 1,1 \lambda \frac{l \cdot V^2}{d \cdot 2g};$$
$$2 g [(z_a + H_0) - (z_B + H_{\text{вільн.}})] / 1,1 l = \lambda \frac{V^2}{d};$$
$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = 1,273 \frac{Q}{d^2}.$$

Використовуємо метод підбору: по прийнятому значенню діаметра визначаємо значення швидкості і  $\lambda$ . Після чого будуємо криву  $\lambda \frac{V^2}{d} = f(d)$ .

$$A = \frac{2g[(z_a + H_{\sigma}) - (z_B + H_{\text{вільн.}})]}{1,1l} = \text{const} .$$

Найближчий більший діаметр буде шуканим.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Альтшуль А.Д., Шивотовский П.С., Иванов П.П. Гидравлика и аэродинамика – М., 1987 – 414 с.
2. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. Общий курс – К., 1989 – 214 с.
3. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика – М., 1987 – 440 с.
4. Константинов Ю.М. Гидравлика – К., 1988 – 398 с.
5. Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н. и др. Сборник задач по гидравлике – К.: Высшая школа, 1979 – 290 с.
6. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Уч. пособие для ВУЗов. В 2-х кн. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 351 с.
7. Левицький Б.Ф., Ленін Н.П. Гідравліка. Загальний курс. – Львів: Світ, 1994 – 264 с.
8. Гідравліка і нагнітачі: Навч. посібник / О.М. Грабовський, О.М. Щабієв. – К.: НМКВО, 1992 – 312 с.
9. Тітов Ю.П., Яковенко М.М. Технічна механіка рідин та газів. Посібник до практичних занять. – Харків: ХДАМГ, 2002 – 114 с.
10. Тітов Ю.П., Яковенко М.М. Інженерна гідравліка. Навчально-методичний посібник до практичних занять. – Харків: ХНАМГ, 2005 – 91 с.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 3  |
| 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ КУРСУ «ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА».....   | 4  |
| 1.1. Рівняння Бернуллі для потоку рідини, його енергетичний та геометричний зміст.....                    | 7  |
| 1.2. Трубка Піто і витратомір Вентурі.....  | 9  |
| 2. РЕЖИМИ РУХУ РІДИНИ.....  | 12 |
| 3. ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ І ВТРАТИ НАПОРУ ПРИ РУСІ РІДИНИ.....   | 14 |
| 4. РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ.....  | 17 |
| 4.1. Класифікація трубопроводів і завдання їх гідравлічного розрахунку.....                               | 17 |
| 4.2. Основні розрахункові формули при русі рідини в напірних трубопроводах.....                           | 19 |
| 4.3. Основні типи задач по розрахунку простого трубопроводу...  | 21 |
| 4.4. Питомий опір. Опір ділянки трубопроводу.....   | 22 |
| 4.5. Розрахунок самопливного трубопроводу, всмоктуючого трубопроводу насосу і сифонного трубопроводу..... | 22 |
| 4.6. Трубопровід з послідовно сполучених ділянок труб різних діаметрів і довжин.....                      | 26 |
| 4.7. Паралельне з'єднання трубопроводів.....  | 27 |
| 4.8. Вузлова, шляхова, транзитна і розрахункова витрати.....  | 29 |
| 4.9. Розрахунок дірчастих трубопроводів.....  | 30 |
| 4.10. Поняття про економічний розрахунок трубопроводу.....  | 31 |
| 5. ЗАМКНУТІ (КІЛЬЦЕВІ) І РОЗІМКНЕНІ (ТУПИКОВІ) ВОДОПРОВІДНІ МЕРЕЖІ.....                                   | 34 |
| 5.1. Розрахунок розімкненої мережі водопроводу.....   | 34 |
| 5.2. Схема розрахунку кільцевої мережі.....   | 35 |
| 6. ЗАДАЧА ПРО ДВА І ТРИ РЕЗЕРВУАРИ.....   | 37 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 7.   | ГІДРАВЛІЧНИЙ УДАР В ТРУБАХ.....  | 41 |
| 7.1. | Теорія гідравлічного удару Жуковського.....  | 42 |
| 7.2. | Заходи по локалізації явища гідравлічного удару у водопровідних трубах і на насосних станціях..... | 45 |
| 7.3. | Поняття про гідравлічний таран.....  | 46 |
| 8.   | ВИТІКАННЯ РІДИНИ З ОТВОРІВ І НАСАДКІВ  |    |
|      | КЛАСИФІКАЦІЯ ОТВОРІВ І НАСАДКІВ.....   | 49 |
| 8.1. | Витікання рідини з малих отворів при постійному напорі.  | 51 |
| 8.2. | Витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі.....                   | 53 |
| 8.3. | Витікання рідини з отворів при змінному напорі.....  | 54 |
| 8.4. | Витікання рідини через насадки.....  | 56 |
| 9.   | ВІЛЬНІ ГІДРАВЛІЧНІ СТРУМЕНІ.....   | 60 |
|      | КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ.....   | 65 |
|      | ДОДАТОК 1.....   | 68 |
|      | СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....   | 73 |

## Навчальне видання

**Коваленко** Олександр Миколайович,  
**Шевченко** Тамара Олександрівна

**Інженерна гідравліка. Розділ 1. «Рух рідини в закритих руслах».** Конспект лекцій (для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання, екстернів і іноземних студентів напряму підготовки 6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)»).

Редактор *М. З. Аляб'єв*

Коректор *З. І. Зайцева*

План 2007, поз. 2 Л

---

|                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| Підп. до друку 15.05.2007 р. | Формат 60x84 1/16  |
| Друк на ризографі.           | Ум. друк. арк. 3,2 |
| Зам. №                       | Тираж 80 пр.       |

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 731 від 19.12.2001