



**Міністерство освіти і науки України**

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електропостачання та  
енергетичного менеджменту**

**ГІДРАВЛІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА**

**Методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт  
з дисципліни**

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної та заочної форм навчання  
спеціальності  
163 Біомедична інженерія**

**Харків  
2023**

Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій

Кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту

## **ГІДРАВЛІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА**

Методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт з дисципліни  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної та заочної форм навчання  
спеціальності  
163 Біомедична інженерія

Затверджено  
рішенням науково-методичної ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та  
комп'ютерних технологій  
Протокол № 3  
від 22 лютого 2023 року

Харків  
2023

УДК 615.478.6

М-80

Схвалено на засіданні кафедри  
електропостачання та енергетичного менеджменту  
Протокол №7 від 8.02.2023 р.

**Рецензенти:**

**Н. Г. Косуліна**, д-р техн. наук, проф. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

**М. С. Сорокін**, канд. техн. наук, доцент кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

М-80 Гідравліка та гемодинаміка: метод. вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / Держ. біотехнологічний ун-т ; авт.-уклад.: О. М. Мороз, А. І. Середа / - Електрон. дані. – Харків : 2023. – 32 с.

Методичні вказівки розроблені у відповідності до програми навчальної дисципліни «Гідравліка та гемодинаміка» складеній відповідно до програми навчальної дисципліни. Видання містить теоретичну частину, алгоритм виконання лабораторної роботи та контрольні запитання. Виконання лабораторних робіт допоможе майбутнім фахівцям оволодіти основами експериментальних досліджень та аналізу результатів.

Видання призначено для здобувачів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

**УДК 615.478.6**

**Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник**, д-р техн. наук, професор

© Мороз О.М.,  
Середа А.І., 2023.  
© ДБТУ, 2023

## *Передмова*

Вказівки містять опис та методику проведення лабораторних робіт, які ілюструють закони рівноваги та руху рідин. У вказівках описано 5 лабораторних робіт. Опис кожної роботи складається з 5 основних частин:

- 1) Загальні відомості по темі лабораторної роботи;
- 2) Мета лабораторної роботи;
- 3) Опис установки;
- 4) Порядок виконання роботи;
- 5) Контрольні питання.

Методику та порядок проведення лабораторної роботи описано з розрахунком на виконання студентом повного об'єму роботи самостійно.

## *Порядок виконання та оформлення робіт*

При проведенні лабораторних робіт студент повинен мати журнал для запису та обробки даних лабораторних спостережень. Перед початком лабораторної роботи необхідно усвідомити її зміст, послідовність спостережень та вимірювань. Загальні відомості по темі приведені у вказівках коротко, з розрахунком на те, що дана тема студентом розглянута і усвідомлена на лекції. Якщо теоретичний матеріал теми не засвоєний, то рекомендується перед лабораторною роботою ознайомитися з ним докладніше за відповідним розділом дисципліни.

По кожній лабораторній роботі складається звіт, в якому приведені: схема установки, розрахункові формули, дані вимірювань та розрахунків, зведені в таблицю, графіки отриманих результатів, побудовані з використанням програми Excel, а також аналіз отриманих даних. При розрахунках необхідно слідкувати за розмірністю величин, які підставляються в формулу, так як помилки частіше всього виникають внаслідок невідповідності розмірності величин у формулах.

Робота № 1  
Вимірювання тиску  
Загальні відомості

Гідростатичним тиском називається межа відношення сили  $P$  до площі  $\omega$

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P}{\omega}. \quad (1.1)$$

Гідростатичний тиск може бути атмосферним, надмірним (манометричним) та абсолютним. Тиск навколишнього середовища називається *атмосферним* ( $p_{at}$ ). Тиск, що перевищує атмосферний, називається *надмірним або манометричним* ( $p_m$ ). Тиск, що вимірюється відносно "0" лінії ( $p = 0$ ), називається *абсолютним* ( $p_{abs}$ ) (див. рис.1.1).

У випадку, коли  $p_{abs} > p_{at}$

$$p_{abs} = p_{at} + p_m, \quad (1.2)$$

а якщо  $p_{abs} < p_{at}$ , то утворюється вакуум

$$p_{вак} = p_{at} - p_{abs}. \quad (1.3)$$

Таким чином *вакуум* – це недостача абсолютного тиску до атмосферного, і максимальне значення вакууму (повний вакуум) буде в тому випадку, коли  $p_{abs} = 0$ .

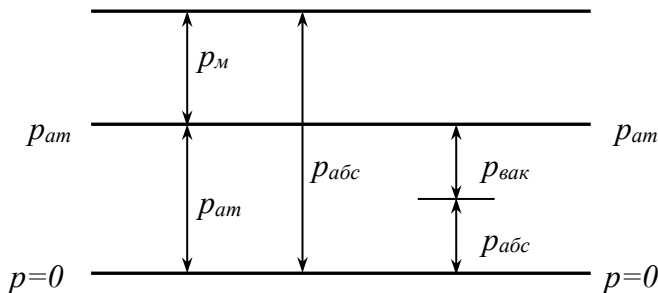


Рисунок 1.1 – Графічне зображення тиску

Для вимірювання тиску застосовуються манометри, вакуумметри та мановакуумметри. За типом вимірюваного тиску ці прилади поділяються на дві групи:

– манометри абсолютного тиску (“0” шкали відповідає повному вакууму). Манометри абсолютного тиску, призначені для вимірювання атмосферного тиску, називаються *барометрами*;

– прилади надмірного тиску (“0” шкали відповідає атмосферному тиску). Манометри надмірного тиску вимірюють тиск, більший від атмосферного, вакуумметри – менший атмосферного, а мановакуумметри використовують у випадках якщо вимірюваний тиск може бути як більшим, так і меншим атмосферного.

За принципом дії прилади для вимірювання тиску діляться на такі групи:

- рідинні – з використанням законів гідравліки;
- механічні - з пружинним чутливим елементом, з використанням закону Гука;
- електричні - перетворюють переміщення чутливого елемента в електричний сигнал.

Тиск може вимірюватися в наступних одиницях: Паскалях (Па), метрах водяного стовпа (м. в. ст.), міліметрах ртутного стовпа (мм. рт. ст.), кгс/см<sup>2</sup>, барах, атмосферах, psi (*pound-force per square inch* – фунт-сила на квадратний дюйм). Ці величини зв’язані співвідношенням:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 736 \text{ мм.рт.ст.} = 10 \text{ м.в.ст.} = 98100 \text{ Па} = 1,02 \text{ бар} = 14,223 \text{ psi.}$$

Необхідно розрізняти технічну атмосферу та фізичну атмосферу, які мають різні позначення, відповідно *ат* і *атм*, а також мають різні значення тиску, так  $1 \text{ ат} = 736 \text{ мм. рт. ст.}$ , а  $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$

Найпростішим приладом для вимірювання надмірного та вакуумметричного тиску є п’єзометр – прозора трубка з внутрішнім діаметром 10...15мм, яка одним кінцем під’єднана до точки вимірювання тиску і відкрита з другого кінця ( рис.1.2). Під дією надмірного тиску в посудині (рис.1.2,а) рідина підіймається по п’єзометру на висоту *h*.

Абсолютний тиск в т. С

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ат}} + \rho gh \tag{1.4}$$

а надмірний ( манометричний )

$$p_m = p_{абс} - p_{атм} = \rho g h \quad (1.5)$$

де:  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>).

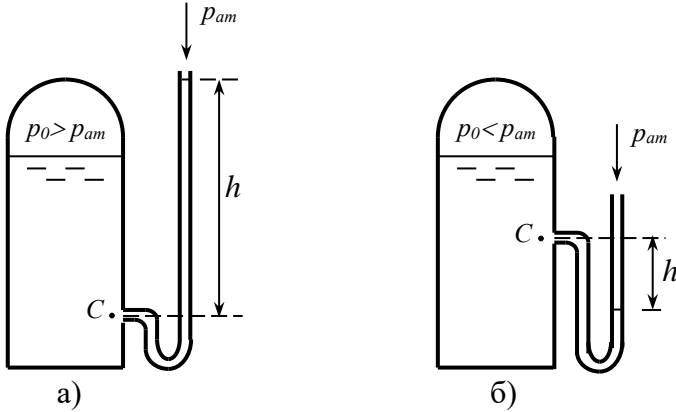


Рисунок 1.2 – Вимірювання тиску п’езометрами

Отже, за виміряним по шкалі з лінійним градуюванням значенню  $h$ , можна визначити надмірний тиск в точці під’єднання п’езометра.

Якщо тиск в закритій посудині менший від атмосферного, то показання п’езометра  $h$  відповідає вакууму  $p_{вак}$  (рис. 1.2,б).

Рідинні мановакуумметри можуть являти собою U-подібну трубку, один кінець якої приєднаний до місця вимірювання збиткового або вакуумметричного тиску, а другий – відкритий в атмосфері (рис. 1.3).

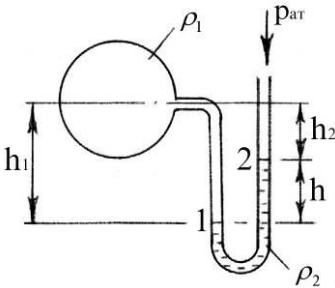


Рисунок 1.3 – Вимірювання тиску

Трубка заповнена робочою рідиною (вода, спирт, ртуть та ін.) яка має малу в’язкість та малий коефіцієнт теплового розширення. Показ приладу залежить від тиску в точках 1 та 2. Якщо тиск в т.1 більший від атмосферного, то рівень у правому коліні буде вищий, ніж у лівому.

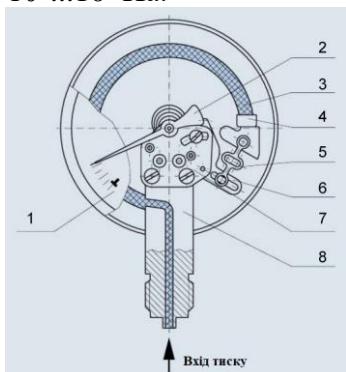
З рівняння рівноваги:

$$p + \rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2 + p_{am} \quad (1.6)$$

одержимо: 
$$p - p_{am} = \rho_2 g h_2 - \rho_1 g h_1 \quad (1.7)$$

Прилад вимірює надмірний тиск, якщо  $p - p_{am} > 0$  або вакуум, якщо  $p - p_{am} < 0$ .

Механічні прилади. Принцип їх дії заснований на законі Гука, тобто деформація їх пружинного елемента (пружини (рис. 1.4), сільфона, мембрани) пропорційна тиску. Ці прилади невеликі, універсальні, прості, мають великий діапазон вимірювання тиску:  $10^2 \dots 10^9$  Па.



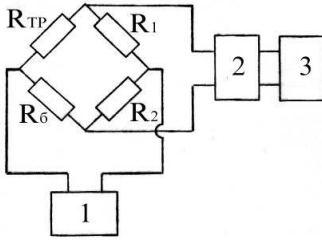
- 1 – циферблат;
- 2 – стрілка;
- 3 – трубка Бурдона;
- 4 – заглушка;
- 5 – тяга;
- 6 – квадрант;
- 7 – механізм;
- 8 – шток зі штуцером.

Рисунок 1.4 – Пружинний манометр

Але пружні властивості деформуючого елемента з часом змінюються, тому для забезпечення необхідної точності потрібно періодично перевіряти прилади і визначати поправку.

Електричні прилади. В них використовується здатність деяких матеріалів змінювати свої електричні властивості при зміні тиску. Деформація чутливого елемента (датчика) перетворюється в електричний сигнал, який реєструється спеціальними приладами. Датчики мають малі розміри, масу і можуть вимарювати швидкозмінні параметри. При вимірюванні тиску за допомогою тензорезистора  $R_{mp}$  він включається в мостову схему (рис 1.5).





1 - блок живлення; 2 - підсилювач; 3 - осцилограф.  
Рисунок 1.5 – Мостова схема для вимірювання тиску

Опір  $R_\delta$  служить для врівноваження моста. Коли тиск відсутній - повинна виконуватись умова  $(R_{mp}/R_\delta) = (R_1/R_2)$ . В цьому випадку на виході моста напруга дорівнює 0. При дії тиску на датчик його опір змінюється, виникає розбаланс моста і на виході з'являється напруга пропорційна тиску.

*Мета роботи:* вимірювання тиску за допомогою різних приладів та перерахунок одних одиниць вимірювання в інші.

#### Опис установки

Лабораторна установка складається з 2-х стендів. На 1-му стенді, призначеному для вимірювання манометричного тиску встановлені п'єзометр, ртутний та пружинний манометри. Тиск, що вимірюється цими приладами, створюється за допомогою напірного бака. На 2-му стенді (рис. 1.6) можна проводити вимірювання як надмірного тиску, так і вакууму. Він складається з металевого резервуару 1, пружинного мановакуумметра 2, крана 3 і відкритої рухомої скляної посудини 4, з'єднаної з резервуаром гумовою трубкою.

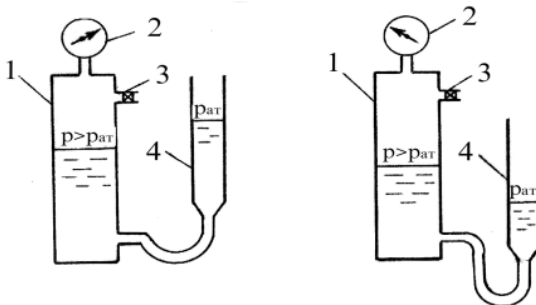


Рисунок 1.6 – Схема установки для вимірювання тиску

### Порядок виконання роботи

Відкривають кран, який з'єднує 1-й стенд з напірним баком лабораторії. При цьому прилади реєструють тиск. Показання приладів записують в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця вимірюваних тисків

Прилади	Показ приладів	Тиск				
		кгс/см <sup>2</sup>	Па	psi	м.в.ст.	мм.рт.ст.
П'єзометр, см.в.ст.						
Ртутний манометр, мм.рт.ст.						
Пружинний манометр, кгс/см <sup>2</sup>						

Прилади виміряють тиск у різних одиницях, тому для порівняння їх показань необхідно виконати перерахунок в інші одиниці вимірювання тиску (Па, psi, м.в.ст., мм.рт.ст., кгс/см<sup>2</sup>, ат).

Вимірювання манометричного тиску на 2-му стенді проводиться в наступній послідовності. При відкритому крані 3 рухому посуду 4 встановлюють в нижньому положенні. Потім закривають кран 3, а посуду 4 підіймають вертикально вгору і закріплюють. Тоді тиск в замкнутому об'ємі резервуару підвищиться, що і буде зафіксовано мановакууметром 2.

Для створення вакууму відкривають кран 3, і посудину 4 встановлюють в верхньому положенні. Потім кран 3 закривають, а посудину опускають вертикально вниз і закріплюють. Тиск в резервуарі 1 стане меншим ніж атмосферний, тобто виникає вакуум, що і буде зафіксовано мановакууметром 2. Результати вимірювань записують в таблицю 1.2. Визначення абсолютних тисків проводиться за формулами 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.2 – Таблиця вимірювання тисків

$p_{абс} > p_{ат}$		$p_{абс} < p_{ат}$	
Надм. тиск	Абс. тиск	Вакуум	Абс. тиск

*Контрольні питання*

- 1) Які є одиниці вимірювання тиску, та яке їх співвідношення?
- 2) Що таке вакуум?
- 3) Яке максимальне значення вакууму?
- 4) Які причини виникнення похибок різних приладів при вимірюванні тиску?
- 5) Що таке абсолютний та манометричний тиск?
- 6) Який тиск більший 200 мм.рт.ст. чи 20 кПа і у скільки разів?
- 7) Який абсолютний та манометричний тиск буде діяти на дно відкритої посудини, заповненої водою ( $h_e = 0,5$  м) та бензином ( $h_b = 0,6$  м,  $\rho_b = 750$  кг/м<sup>3</sup>)?
- 8) Яке значення вакууму буде на дні закритого резервуару, частково заповненого водою ( $h_e = 1,5$  м), та абсолютним тиском на вільній поверхні води  $p_{абс} = 0,7$  ат?

Робота № 2  
Дослідне демонстрування рівняння  
Бернуллі та побудова ліній питомої енергії  
*Загальні відомості*

Рівняння Бернуллі для двох перерізів потоку при сталому рівномірному або русі в'язкої рідини, що плавно змінюється, має вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w \quad (2.1)$$

Члени цього рівняння мають геометричне та енергетичне інтерпретування.

При геометричному інтерпретуванні вони являють собою висоти, які мають лінійну розмірність:

$z$  – висота розміщення центру ваги вибраного перерізу над площиною порівняння, м ;

$p/\rho g$  – п'єзометрична висота , м;

$\alpha V^2/2g$  – швидкісна висота або швидкісний напір, м (де  $\alpha$  - коефіцієнт Коріоліса, який характеризує нерівномірність розподілу місцевих швидкостей  $u$  по живому перерізу потоку,  $\alpha = 1,05 \dots 1,1$  ) ;

$V$  – середня швидкість в живому перерізі, м/с ;

$Q$  – витрата, м<sup>3</sup>/с ;

$\omega$  – площа живого перерізу, м<sup>2</sup> ;

$h_w$  – втрата напору на тертя при русі рідини між перерізами, м.

Суму  $z + \frac{p}{\rho g} = H_n$  називають *n'єзометричним напором*,

а суму  $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H$  – *гідродинамічним напором*.

При енергетичному інтерпретуванні члени рівняння Бернуллі виражають:

$z$  – питому потенціальну енергію положення;

$\frac{p}{\rho g}$  – питому потенціальну енергію тиску;

$\frac{\alpha V^2}{2g}$  – питому кінетичну енергію;

$h_w$  – втрату енергії на подолання опору при русі рідини між перерізами.

Вираз  $z + \frac{p}{\rho g} = E_n$  виражає повну питому потенціальну енергію, а

$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} = E$  – повну питому енергію в перерізі.

Таким чином рівняння Бернуллі виражає закон збереження енергії в потоці рідини. У в'язкій рідині повна питома енергія безперервно зменшується по течії, тому що частина її втрачається на подолання опору. Потенціальна питома енергія може як збільшуватися, так і зменшуватися завдяки зміні кінетичної енергії.

Члени рівняння Бернуллі можна зобразити графічно. Якщо в кожному перерізі відкласти вгору від площини порівняння послідовно  $z$ ,  $p/\rho g$ ,  $\alpha V^2/2g$ , то можна побудувати лінії п'єзометричного та повного напорів. Перша з них з'єднує точки, які лежать на висоті

$z + \frac{p}{\rho g} = H_n$ , а друга – точки на висоті  $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H$ .

Втрату питомої енергії (втрату напору)  $h_w$  на ділянці довжиною  $L$  можна визначити як різницю значень  $E$  або  $H$  на початку та в кінці ділянки. Втрату напору на одиницю довжини називають *гідрравлічним похилом*.

$$I = h_w/L. \quad (2.2)$$

При графічному зображенні гідрравлічний похил рівняється похилу лінії повної питомої енергії. Він завжди позитивний, тому що завжди  $H_1 > H_2$ .

Похил п'єзометричної лінії може бути і від'ємним, тому що п'єзометричний похил

$$I_n = (H_{n1} - H_{n2})/L \quad (2.3)$$

а значення  $H_n$  у 2-му перерізі може бути більше, ніж у 1-му, якщо в цьому перерізі зменшилась швидкість, а відповідно, зменшилась і питома кінетична енергія.

### Мета роботи

Експериментальне дослідження рівняння Бернуллі, характеру зміни енергії потоку по довжині та перехід енергії із потенціальної в кінетичну і навпаки.

### Опис установки

Установка являє собою горизонтальний напірний трубопровід в центральній частині якого встановлена трубка змінного перерізу (рис. 2.1). В певних перерізах цієї трубки встановлені п'єзометри, які закріплені на одному стенді. Подача води в трубопровід здійснюється із напірного баку лабораторії, витрата регулюється вентилем, який встановлений в кінці трубопроводу. Витрата води визначається об'ємним способом за допомогою мірної посудини, час наповнення якої заміряють секундоміром.

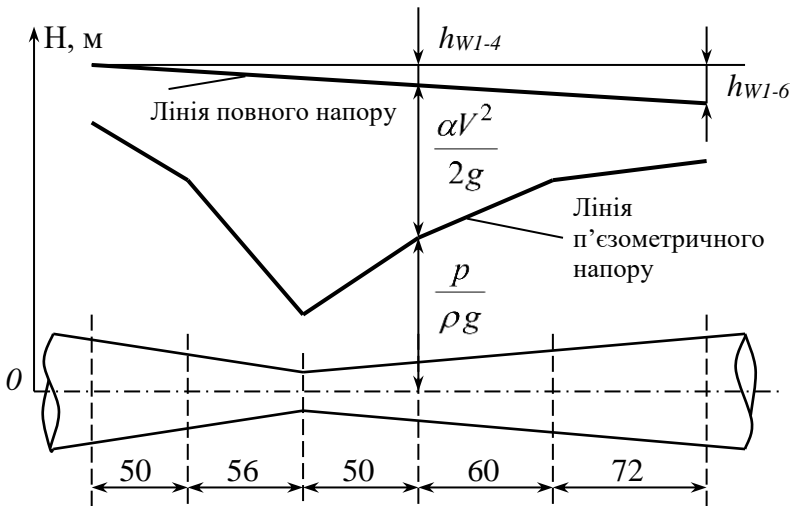


Рисунок 2.1 – Схем труби змінного перерізу

### Порядок виконання роботи

Відкривають вентиль і встановлюють необхідну витрату. За-міряють секундоміром час  $T$  – час наповнення мірної посудини об’ємом  $W$ . Результати дослідів та розрахунків записуються в таблицю 2.1. Так як напірний трубопровід горизонтальний, то площину порівняння доцільно (для спрощення розрахунків) про-вести через вісь труби. В цьому випадку  $z = 0$  і  $z + \frac{p}{\rho g} = H_n$  від-

повідає показам п’езометрів.

Об’єм води в мірній посудині  $W$  (см<sup>3</sup>) =  
 Час наповнення  $T$  (с) =  
 Витрата  $Q$  (см<sup>3</sup>/с) =

Таблиця 2.1 – Результати експериментального дослідження рів-няння Бернуллі

Показники	Перерізи					
	1	2	3	4	5	6
1.Площа перерізу - $\omega$ , см <sup>2</sup>	12,6	10	3,75	4,8	7,8	12,6
2.Показання п’езометрів - $p/\rho g$ , см						
3.Середня швидкість - $V$ , см/с						
4.Швидкісний напір - $\alpha V^2/2g$ , см						
5.Гідродинамічний напір - $z+p/\rho g + \alpha V^2/2g$ , см						

При обчислюванні результатів дослідів проводяться розраху-нки таких величин:

- витрата  $Q = W/T$
- середня швидкість в перерізі  $V_i = Q/\omega_i$
- швидкісний напір в перерізі -  $\alpha V_i^2/2g$  (при  $\alpha = 1,1$ ).

За даними таблиці будують у відповідному масштабі лінії п’езометричного та повного напорів (див. рис. 2.1).

П’езометричний похил між перерізами 1-3 і 3-6 розрахову-ється за формулою (2.3), а гідравлічний похил між перерізами 1-6 за формулою (2.2).

За результатами досліджень необхідно побудувати лінії п'єзометричного та повного напорів в програмі Excel.

### *Контрольні питання*

- 1) Які умови застосування рівняння Бернуллі?
- 2) Які члени рівняння Бернуллі відповідають питомій потенціальній енергії?
- 3) Які члени рівняння Бернуллі відповідають питомій кінетичній енергії?
- 4) Як визначити середню швидкість в будь-якому перерізі потоку за побудованими в масштабі лініями п'єзометричного та повного напорів?
- 5) При якій умові лінії повного та п'єзометричного напору будуть паралельні?

### Робота № 3

#### Визначення гідравлічного коефіцієнту тертя

##### *Загальні відомості*

При русі рідини в трубах та каналах частина напору втрачається на подолання опору по довжині, обумовленого тертям рідини об стінки трубопроводу або русла, а також тертям шарів рідини.

Втрата напору по довжині при сталому русі визначається за формулою Дарсі-Вейсбаха

$$h_o = \lambda \frac{L V^2}{d 2g} , \quad (3.1)$$

де:  $\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі);

$L$  - довжина ділянки, м;

$d$  - внутрішній діаметр напірної труби, м;

$V$  - середня швидкість руху рідини в живому перерізі, м/с;

$g$  - прискорення вільного падіння.

Безрозмірний коефіцієнт  $\lambda$  залежить від ряду характеристик потоку. При різних режимах руху вплив різних факторів виявляється по-різному .



При ламінарному режимі  $\lambda$  залежить тільки від числа Рейнольдса. Так для круглих труб

$$\lambda = 64/Re \quad (3.2)$$

При турбулентному режимі існують три зони опору. В зоні *гідралічно гладких стінок* (товщина пристінного ламінарного шару рідини  $\delta$  більша висоти виступів шорсткості стінок  $\Delta$ ,  $\delta > \Delta$ ). Відповідно  $\lambda = f(Re)$  і визначається за формулою Блазіуса

$$\lambda = 0,3164/Re^{0,25} \quad (3.3)$$

В зоні *гідралічно шорстких стінок* ( $\delta < \Delta$ ) головний вплив на опір потоку чинить відносна шорсткість стінок, а від числа Рейнольдса коефіцієнт  $\lambda$  практично не залежить, тобто  $\lambda = f(\Delta/d)$  і визначається за формулою Шіфрінсона

$$\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25} \quad (3.4)$$

Тільки в цій зоні  $\lambda$  не залежить від швидкості і значення  $h_w$  пропорційне квадрату швидкості. Тому зону гідралічно шорстких стінок називають ще *квадратичною*.

В *перехідній зоні* коефіцієнт  $\lambda$  залежить від обох характеристик:  $\lambda = f(Re, \Delta/d)$

За формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11(\Delta/d + 68/Re)^{0,25} \quad (3.5)$$

можна визначити коефіцієнт  $\lambda$  в будь-якій зоні турбулентного режиму.

В технічних трубопроводах за  $\Delta$  приймають еквівалентну шорсткість  $\Delta_e$  (див. Д.2).

Втрата напору по довжині для двох перерізів прямолінійної ділянки труби постійного діаметру визначається за різницею показань п'єзометрів.

$$h_d = p_1/\rho g - p_2/\rho g \quad (3.6)$$

При відомій довжині ділянки  $L$  та внутрішньому діаметрі труби  $d$  з формули Дарсі-Вейсбаха можна розрахувати значення  $\lambda$ , якщо дослідним шляхом визначити  $h_d$  і  $V$ .

*Мета роботи*

Експериментальне вивчення втрат напору по довжині при рівномірному русі, порівняння дослідних даних з довідниковими та побудова ліній п'єзометричного напору.

*Опис установки*

Установка являє собою два ділянки сталевого трубопроводу які мають довжини  $L_1 = 402$  см,  $L_2 = 306$  см і відповідно діаметрами  $d_1 = 5$  см,  $d_2 = 4$  см. На початку та в кінці ділянок встановлені п'єзометри. Витрата регулюється вентилем (рис. 3.1).

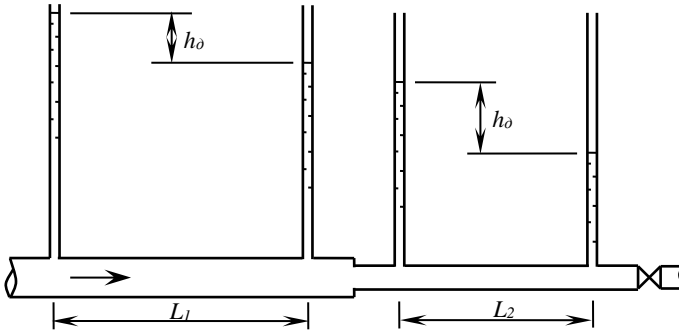


Рисунок 3.1 – Схема лабораторної установки

*Порядок виконання роботи*

Витрата, при сталому режимі руху рідини, визначається об'ємним способом, при цьому записують показання п'єзометрів.

При переході до наступного досліді за допомогою вентиля міняють витрату води в трубопроводі і чекають певний час для того, щоб рух води став сталим.

Обчислюють:

- площі живих перерізів труб  $\omega = \pi d^2/4;$
- витрату  $Q = WT;$
- середню швидкість руху рідини в трубах  $V = Q/\omega$
- втрату напору по довжині  $h_0 = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$
- коефіцієнт Дарсі  $\lambda = h_0 \frac{d}{L} \frac{2g}{V^2}.$

Кінематична в'язкість рідини  $\nu$  визначається в залежності від температури води за Д.1.

Розраховують число Рейнольдса  $Re = Vd/\nu$ .

Якщо  $Re < Re_{кр}$ , то режим руху води *ламінарий* і коефіцієнт Дарсі обчислюють за формулою 3.2. Якщо  $Re > Re_{кр}$ , то режим руху *турбулентний* і коефіцієнт Дарсі обчислюють за формулою 3.5. Попередньо визнається за Д.2. значення еквівалентної шорсткості  $\Delta_e$  в залежності від виду труби та її стану.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень

Показники	Досліди					
	Ділянка 1			Ділянка 2		
	1	2	3	1	2	3
1. Еквівалентна шорсткість - $\Delta_e$ , мм						
2. Внутрішній діаметр труби - $d$ , см						
3. Площа перерізу - $\omega$ , см <sup>2</sup>						
4. Відстань між п'єзометрами - $L$ , см						
5. Об'єм мірної посудини - $W$ , см <sup>3</sup>						
6. Час наповнення посудини - $T$ , с						
7. Витрата води - $Q$ , см <sup>3</sup> /с						
8. Середня швидкість руху води - $V$ , см/с						
9. Показання 1-го п'єзометру - $p_1/\rho g$ , см						
10. Показання 2-го п'єзометру - $p_2/\rho g$ , см						
11. Втрата напору по довжині - $h_d$ , см						
12. Коефіцієнт Дарсі з досліду - $\lambda_d$						
13. Швидкісний напір - $\alpha V^2/2g$ , см						
14. Температура води - $t$ , °C						
15. Кінематична в'язкість - $\nu$ , см <sup>2</sup> /с						
16. Число Рейнольда - $Re$						
17. Режим руху						
18. Розрахунковий коефіцієнт Дарсі - $\lambda_p$						
19. Повний напір за показаннями 1-го п'єзометру - $(p_1/\rho g + \alpha V^2/2g)$ , см						
20. Повний напір за показаннями 2-го п'єзометру - $(p_2/\rho g + \alpha V^2/2g)$ , см						

Результати вимірювань та розрахунків заносяться в таблицю 3.1. Лінії п'езометричного та повного напорів будують за показаннями п'езометрів (9 та 10 рядок таблиці) та розрахунків (19 і 20 рядки).

Для побудови ліній п'езометричного напору в програмі Excel дані необхідно записати в таблицю подібну таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних досліджень

№ п'езометра	1 ділянка			2 ділянка		
	1 дослід	2 дослід	3 дослід	1 дослід	2 дослід	3 дослід
1	63	59,7	55,4	63,3	59,5	54,2
2	62	58,6	53,5	61,6	56,6	49

Приклад графіків, побудованих в Excel, за даними таблиці 3.2 приведені на рисунку 3.2.

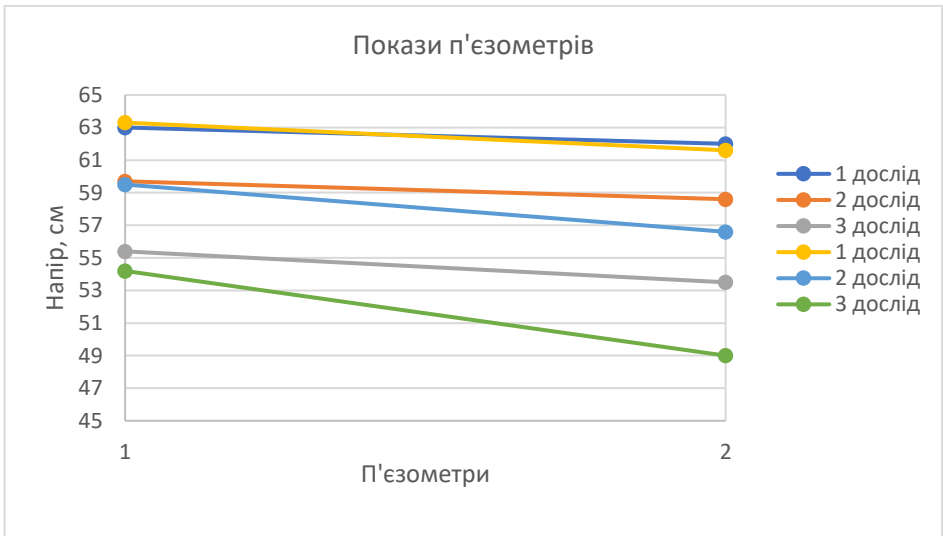


Рисунок 3.2 – Лінії п'езометричних напорів

### Контрольні питання

- 1) Від яких параметрів залежить коефіцієнт Дарсі?
- 2) Як дослідним шляхом знайти значення  $\lambda$ ?

- 3) Як температура води впливає на втрату напору по довжині?
- 4) Від чого залежить еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби?
- 5) В якій трубі більшого чи меншого діаметру при одній і тій же середній швидкості руху рідини будуть більші втрати напору на одиницю довжини?

#### Робота № 4

#### Визначення коефіцієнтів місцевих опорів

##### *Загальні відомості*

На ділянці між двома перерізами частина питомої енергії (напору) потоку рідини витрачається на подолання опору. Ця втрата напору в загальному виді може бути одержана з рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини при повільно змінному русі:

$$h_w = \left( z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right). \quad (4.1)$$

Опори, що виникають при русі рідини, можна розділити на два види: опір по довжині потоку та місцеві опори.

Місцеві опори обумовлені різними конструктивними елементами та місцевими перешкодами в потоці (коліно, хрестовина, звуження або розширення, кран, засувка і т.п.).

Відповідно до видів гідравлічних опорів втрату напору розподіляють на втрату напору по довжині  $h_d$  та на місцеві втрати напору  $h_m$ . Місцеві втрати напору визначаються за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \zeta_m \frac{V^2}{2g} \quad (4.2)$$

де  $\zeta_m$  – коефіцієнт опору даного місцевого опору.

Частіше коефіцієнт  $\zeta_m$  визначають дослідним шляхом, хоча в деяких випадках коефіцієнт місцевого опору можна визначити аналітично. Значення коефіцієнтів для типових опорів приводяться в довідниковій літературі.

Якщо опір розміщено на горизонтальній ділянці труби постійного діаметру, то для знаходження місцевих втрат напору достатньо визначити різницю показань двох п'езометрів, одного перед місцевим опором, а другого - за ним.

$$h_w = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \quad (4.3)$$

Якщо діаметр трубопроводу змінюється, то в формулу (4.2) підставляють один із швидкісних напорів: в перерізі до місцевого опору  $V_1^2/2g$  або в перерізі після нього  $V_2^2/2g$ . При цьому необхідно вказати до якого швидкісного напору відноситься коефіцієнт місцевого опору. Наприклад, при раптовому розширенні труби місцеві втрати напору аналітично можна визначити так:

$$h_{p.p.} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g} = \zeta_{p.p.1} \frac{V_1^2}{2g} \quad (4.4)$$

$$h_{p.p.} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} = \zeta_{p.p.2} \frac{V_2^2}{2g} \quad (4.5)$$

а при раптовому звуженні

$$h_{p.з.} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \frac{V_2^2}{2g} \quad (4.6)$$

де  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – відповідно площі живих перерізів до та після місцевого опору.

### *Мета роботи*

Визначення дослідним шляхом коефіцієнтів опору раптового звуження, раптового розширення, вентиля та повороту і порівняння дослідних даних з довідниковими.

### Опис установки

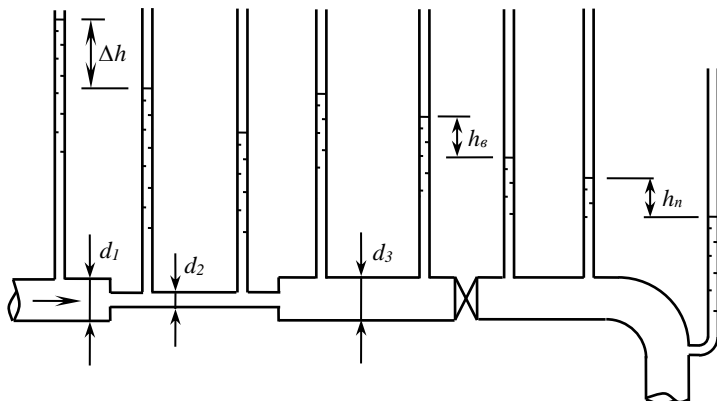


Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки

Установка являє собою трубопровід з раптовим звуженням ( $d_2 = 20$  мм), розширенням ( $d_1 = d_3 = 40$  мм), вентиля та поворотом (рис. 4.1). Перед та за місцевим опором встановлені п'єзометри. Витрата рідини регулюється вентиляем.

### Порядок виконання роботи

За допомогою крана встановлюють витрату води, яка визначається об'ємним способом:  $Q = W/T$ .

Записуються покази п'єзометрів.

Розраховуються:

- площі живих перерізів:  $\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ ;  $\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ ;

- середні швидкості в перерізах:  $V_1 = \frac{Q}{\omega_1}$ ;  $V_2 = \frac{Q}{\omega_2}$ ;

- втрати напору:

для крана та повороту -  $h_m = h_1 - h_2$

для раптового звуження та розширення -

$$h_w = \left( h_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left( h_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right)$$

де індекс "1" відноситься до перерізу перед місцевим опором, а "2" - за місцевим опором. Коефіцієнт місцевого опору

$$\zeta_m = 2gh_w/V^2$$

Результати вимірювань та розрахунків заносяться в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних досліджень

Характеристики	Раптове звужен.	Раптове розш.	Вентиль	Поворот (чавунний косинець)
1. Об'єм мірної посудини - $W$ , см <sup>3</sup>				
2. Час наповнення - $T$ , с				
3. Витрата - $Q$ , см <sup>3</sup> /с				
4. Показання п'єзометра до місцевого опору - $h_1$ , см				
5. Показання п'єзометра після місц. опору - $h_2$ , см				
6. Середня швидкість до місцевого опору - $V_1$ , см/с				
7. Середня швидкість після місцевого опору - $V_2$ , см/с				
8. Втрата напору - $h_w$ , см				
9. Коефіцієнт місцевого опору з досліду - $\zeta_{дос.}$				
10. Коефіцієнт місцевого опору з довідника - $\zeta_{дов.}$				
11. Швидкісний напір до місцевого опору - $\alpha V_1^2/2g$ , см				
12. Швидкісний напір до місцевого опору - $\alpha V_2^2/2g$ , см				
13. Повний напір до місцевого опору - $H_1$ , см				
14. Повний напір після місцевого опору - $H_2$ , см				



Емпіричні коефіцієнти місцевих опорів порівнюються з довідниковими значеннями (Д. 3). Для раптового розширення та звуження коефіцієнти опору визначається аналітично.

*Чавунний косинець* – це місцевий опір, чавунне відведення на різьбленні з кутом відведення  $90^\circ$ . Також існують кути відведення  $30^\circ$  та  $45^\circ$ .

Чисельні значення *коефіцієнтів опору чавунного відведення* на різьбленні  $\zeta$  в залежності від діаметра  $d$  приведені нижче:

$d$ , дюйм	1/2	1	$1\frac{1}{2}$	2
$\zeta$	2,19	1,98	1,6	1,07

Повний напір визначається як сума показань п'езометра та швидкісного напору

$$H = h + \alpha V^2/2g$$

За результатами вимірювань та розрахунків побудувати лінії п'езометричного (дані 4 і 5 рядків) та повного напорів (дані 13 і 14 рядків) в програмі Excel.

#### Контрольні питання

- 1) За якою формулою розраховують втрату напору в місцевих опорах?
- 2) Від яких факторів залежать значення коефіцієнтів місцевих опорів?
- 3) Чи показує різниця показань п'езометрів втрату напору, якщо відбувається розширення або звуження труби?
- 4) Чому при визначенні втрат напору на вентилі та повороті не потрібно знати швидкість руху рідини?
- 5) Внаслідок чого напір в трубі більшого діаметру більший ніж в трубі меншого діаметру на раптовому розширенні?
- 6) Від чого залежить швидкісний напір?

## Робота № 5

Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості і стиснення при витіканні рідини через отвори та насадки при постійному напорі

### Загальні відомості

Витрата рідини при її витіканні через малі отвори та насадки при постійному напорі визначається за формулою:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0} \quad (5.1)$$

де:  $\mu$  – коефіцієнт витрати;  
 $\omega$  – площа вихідного отвору;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $H_0$  – діючий напір.

Коефіцієнт витрати  $\mu$  об'єднує коефіцієнти швидкості  $\varphi$  та стиснення  $\varepsilon$ :

$$\mu = \varphi \varepsilon \quad (5.2)$$

Коефіцієнт стиснення  $\varepsilon$  являє собою відношення площі стисненого перерізу струменю  $\omega_c$  до площі отвору  $\omega$ :

$$\varepsilon = \omega_c / \omega \quad (5.3)$$

На виході струменю із резервуару, через отвір в стінці, лінії течії криволінійні і живий переріз менший ніж переріз отвору. При віддаленні від стінки поступово зменшується живий переріз струменю та кривизна ліній течії. На деякій відстані (близько 0,5 діаметру отвору) живий переріз стає найменшим (його називають *стисненим*), а лінії течії майже паралельні, потім струмінь розширюється.

Якщо до отвору під'єднати насадку (трубку довжиною  $3 \dots 5d$ ), то стиснений переріз буде всередині насадки, а на виході із насадки стиснення потоку немає і коефіцієнт стиснення  $\varepsilon = 1$ , а коефіцієнт витрати насадки  $\mu = \varphi$ .

Діючий напір визначається за формулою

$$H_0 = H + \frac{(p_0 - p)}{\rho g} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} \quad (5.4)$$

де:  $H$  – напір над центром отвору, м;

$\alpha_0 V_0^2 / 2g$  – швидкісний напір від швидкості  $V_0$ , м;

$p_0$  – тиск на вільній поверхні в резервуарі, Па;

$p$  – тиск на виході з отвору, Па.

При малих швидкостях руху вільної поверхні рідини в резервуарах - швидкісним напором нехтують. Якщо резервуар відкритий і витікання рідини здійснюється в атмосферу, то  $p_0 = p = p_{atm}$ , а  $H_0 = H$ .

Отвір вважають малим, якщо його вертикальний розмір не перевищує  $0,1H_0$ .

Зовнішня циліндрична насадка являє собою відрізок прямої циліндричної труби діаметром  $d$  і довжиною  $l = (3...5)d$ , приєднану під прямим кутом до отвору з зовнішньої сторони резервуару (рис. 5.1). Вказана довжина оптимальна, тому що при її зменшенні струмінь рідини не встигає заповнити весь переріз до виходу з насадки, а при збільшенні – необхідно врахувати втрату напору по довжині. В середині насадки внаслідок стиснення струменю виникає зона зниженого тиску. Вакуумметрична висота, яка характеризує зниження тиску в насадці, може досягати значення  $h_{вак} = 0,74H_0$ . Для забезпечення надійної роботи насадки (без зривання вакууму) напір не повинен перевищувати граничне значення  $H_{зр} \approx 11m$ . За рахунок утворення вакууму в насадці пропускна здатність насадки більша, ніж отвору в тонкій стінці, приблизно на 32%.

Не циліндричні насадки можуть бути збіжними та розбіжними. В кінечно-збіжних насадках (рис. 5.1) найбільша пропускна здатність забезпечується, якщо кут конусності  $\theta = 13,4^\circ$ . Для кінечно-розбіжних насадків оптимальний кут  $\theta = 5...7^\circ$ .

При витіканні рідини через некруглі отвори в тонкій стінці відбувається *інверсія* струменю – зміна форми струменю по його довжині. Обумовлюється це явище дією поверхневого натягу та різними умовами стиснення по периметру отвору.

### Мета роботи

Експериментальне дослідження процесу витікання рідини через малі отвори та насадки при постійному напорі і порівняння дослідних даних з довідниковими.

### Опис установки

Установка являє собою напірний бак з отвором, який перекривається диском з різними видами отворів та насадок. Розміри отворів та насадок показано на рис.5.1.

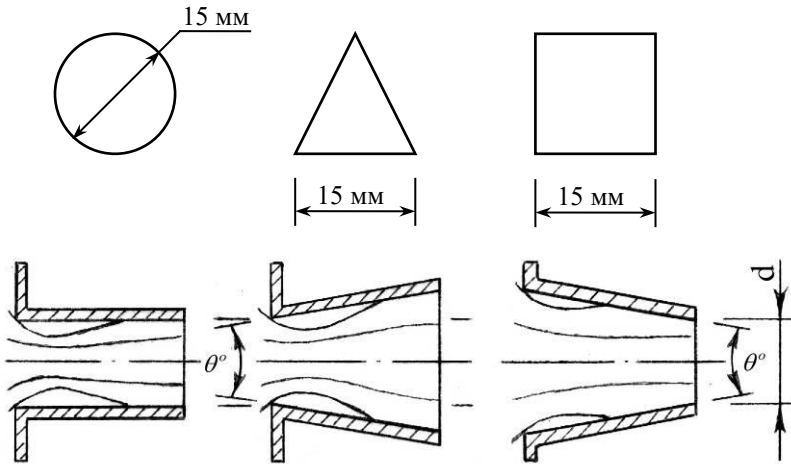


Рисунок 5.1 – Розміри отворів та насадок

Напір над центром отвору визначається по лінійці, яка встановлена на прозорій стінці резервуара.

### Порядок виконання роботи

Відкривають вентиль і наповнюють напірний бак водою. Постійний напір забезпечується за допомогою переливної стінки. Відкручують болт, який прижимає диск, і виставляють необхідний отвір або насадку перед отвором напірного баку, після чого болт закручують. Підставивши мірний бак, визначають час його наповнення.

Для круглого отвору заміряють розміри струменю в стисненому перерізі.

Для циліндричної насадки заміряють вакуум, який виникає в стисненому перерізі. Для цього п'єзометр, під'єднаний до насадки в стисненому перерізі, опускають в посудину з водою і заміряють висоту стовпа рідини, що піднялася в п'єзометрі, внаслідок різниці атмосферного тиску на вільній поверхні рідини в посудині та зниженого тиску в насадці.

При витіканні рідини з квадратного та трикутного отвору спостерігають інверсію струменю. Доцільно намалювати форму живого перерізу струменю на фоні отвору.

При обчислюванні результатів дослідів проводять розрахунки таких параметрів:

- витрата, що витікає через отвір:  $Q = WT$
- площа круглого отвору:  $\omega = \pi d^2/4$
- коефіцієнт стисненого перерізу струменю:  $\varepsilon = \omega_c/\omega$
- коефіцієнт витрати:  $\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}$
- коефіцієнт швидкості:  $\varphi = \mu/\varepsilon$

Для дослідів, що проводилися з насадками, вираховують за тими ж формулами  $\mu$  ( $\varphi = \mu$ ).

Необхідно звернути увагу на співвідношення коефіцієнтів для отворів та насадок. Результати дослідів і розрахунків записують в таблицю 5.1. Довідникові значення  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varphi$  вибираються з Д.4.

### *Контрольні питання*

- 1) Які числові значення коефіцієнтів витрати, швидкості та стиснення приймаються при розрахунках витікання води з малих отворів та насадок?
- 2) Чому при одному і тому ж напорі та діаметрі отвору через зовнішню циліндричну насадку будуть більші витрати ніж через отвір?
- 3) Чому при витіканні рідини через насадку утворюється вакуум?
- 4) Як збільшаться витрати рідини через отвір, якщо напір збільшиться в 2 рази?

5) Як зміниться витрата рідини через малий отвір в тонкій стінці при  $H=1\text{ м}$ , якщо на вільній поверхні рідини створити манометричний тиск  $p_m=0,1\text{ ат}$ ?

6) Як зміниться витрата рідини через малий отвір в тонкій стінці при  $H=3\text{ м}$ , якщо на вільній поверхні рідини створити вакуум  $p_{\text{вак}}=0,1\text{ ат}$ ?

Таблиця 5.1 – Результати експериментальних даних

Показники	Отвори			Насадки		
						
1. Площа перерізу вихідного отвору - $\omega, \text{см}^2$						
2. Об'єм мірної посудини - $W, \text{см}^3$						
3. Час наповнення - $T, \text{с}$						
4. Витрата - $Q, \text{см}^3/\text{с}$						
5. Напір - $H, \text{см}$						
6. Площа стисненого перерізу - $\omega, \text{см}^2$		-	-	-	-	-
7. Коефіцієнт стиснення з дослідів - $\varepsilon$		-	-	1	1	1
8. Коефіцієнт витрати з дослідів - $\mu$						
10. Довідн. значення $\varepsilon$						
11. Довідн. значення $\mu$						
12. Довідн. значення $\varphi$						
13. Форма поперечного перерізу струменю				-	-	-

ДОДАТКИ

Д.1 – Кінематична в'язкість води  $\nu = f(t)$

$t, ^\circ\text{C}$	0	6	10	14	18	20	30	40	50
$\nu \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	1,79	1,47	1,31	1,18	1,06	1,01	0,8	0,65	0,55

Д.2 – Еквівалентна шорсткість  $\Delta_e$  для труб

Труби	Стан труб	$\Delta_e$ , мм
Безшовні сталеві	Нові та чисті	0,01...0,02
	Після декількох років експлуатації	0,15...0,3
Сталеві зварні	Нові та чисті	0,03...0,1
	Помірно заіржавлені	0,3....0,7
	Сильно заіржавлені	2....4
Чавунні	Нові без покриття	0,2.....0,5
	Уживані	0,5.....1,5
Поліетиленові	Нові та чисті	0,003

Д.3 – Коефіцієнт опору місцевих опорів

Вид опору	$\zeta_m$	Вид опору	$\zeta_m$
Пробковий кран	0,4	Вихід із труби в бак	1
Вентиль	6,0	Трійник	0,3
Шаровий клапан	45	Діафрагма при $\omega/\omega_1 = 0,64$	1
Різкий поворот труби на кут $90^\circ$	1,19	Діафрагма при $\omega/\omega_1 = 0,4$	7,0

Д.4 – Коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varphi$  для малого отвору та насадок

Отвір або насадка	$\mu$	$\varepsilon$	$\varphi$
Малий отвір в тонкій стінці	0,62	0,64	0,97
Зовнішня циліндрична насадка	0,82	1,00	0,82
Конічно збіжна насадка при $\theta=13^\circ$	0,95	0,98	0,97
Конічно розбіжна насадка при $\theta=6^\circ$	0,45	1,00	0,45

## Список використаних джерел

1. [«Гідравліка». Навчально-методичний комплекс \[Текст\] : навч. посіб. для студ. агроінж. вищ. навч. закл. напрям 6.100102 «Процеси, машини і обладнання АПВ»](#) / В.І. Дуганець, І.М. Бендера, [В.А. Дідур](#) [та ін.] // ред.: В. І. Дуганець, І. М. Бендера, В. А. Дідур, М-во освіти і науки України, Поділ. держ. аграр. – техн. ун-т, Тавр. держ. агротехнол. ун-т. – Кам’янець-Подільський: ФОП Сисин О В., 2013. – 572 с.
2. Палишкин Н.А. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение. – М.: Агропромиздат, 1990 – 351с.
3. Рогалевич Ю.П. Гідравліка. – К.: Вища школа, 1993. – 255 с.

## Зміст

Передмова.....	4
Порядок виконання та оформлення робіт .....	4
Робота № 1 Вимірювання тиску .....	5
Робота №2 Дослідне демонстрування рівняння Бернуллі та побудова ліній питомої енергії.....	12
Робота №3 Визначення гідравлічного коефіцієнту тертя .....	16
Робота №4 Визначення коефіцієнтів місцевих опорів.....	21
Робота №5 Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості і стиснення при витіканні рідини через отвори та насадки при постійному напорі .....	26
Зміст .....	32



Навчальне видання

ГІДРАВЛІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА

Методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт

Автори-укладачі:

**МОРОЗ** Олександр Миколайович  
**СЕРЕДА** Анатолій Іванович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 1,86.

Наклад 40 пр.

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44