

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**  
з навчальної дисципліни

# *Технічна механіка рідин і газу*

*(для студентів 2 - 4 курсів денної і заочної форм навчання напряму підготовки  
6.060103 «Гідротехніка (водні ресурси) » та слухачів другої вищої освіти  
спеціальності 7.092601, 7.06010108 "Водопостачання та водовідведення")*

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Технічна механіка рідин і газу» (для студентів 2- 4 курсів денної і заочної форм навчання напрямів підготовки 6.060103 «Гідротехніка (водні ресурси) »та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.092601, 7.06010108 "Водопостачання та водовідведення") / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: М. М. Яковенко, Т. О. Шевченко, В. М. Бєляєва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 62 с.

Укладачі: М. М. Яковенко,

Т. А. Шевченко,

В. М. Бєляєва.

Рецензент: д. т. н. проф. С. С. Душкін

Рекомендовано кафедрою ВВ і ОВ,

протокол № 1 від 30.08 2009р.

## Зміст

Вступ.....	4
<i>Лабораторна робота № 1. Визначення динамічного коефіцієнта в'язкості рідини капілярним віскозиметром.....</i>	<i>5</i>
<i>Лабораторна робота № 2. Визначення кінематичного коефіцієнта в'язкості рідини віскозиметром типу ВПЖ.....</i>	<i>7</i>
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження режимів руху в круглій трубі.....</i>	<i>9</i>
<i>Лабораторна робота № 4. Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при русі у напірному трубопроводі.....</i>	<i>15</i>
<i>Лабораторна робота № 5. Визначення коефіцієнтів місцевих опорів при напірному русі рідини.....</i>	<i>22</i>
<i>Лабораторна робота № 6. Визначення втрат опору при раптовому розширенні або звуженні трубопроводу.....</i>	<i>28</i>
<i>Лабораторна робота № 7. Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі.....</i>	<i>35</i>
<i>Лабораторна робота № 8. Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стискання й опору при витіканні рідини через насадок при сталому напорі...</i>	<i>44</i>
<i>Лабораторна робота № 9. Побудова п'єзометричної і напірної лінії при напірному русі рідини в трубі змінного перерізу.....</i>	<i>50</i>
Список джерел.....	61

## ВСТУП

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, розрахунково-графічного завдання та контрольних робіт з навчальної дисципліни «Технічна механіка рідин і газу» призначені для студентів 2- 4 курсів денної і заочної форм навчання напрямів підготовки 6.060103 «Гідротехніка» (Водні ресурси та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.092601, 7.06010108 "Водопостачання та водовідведення". Їхнє основне завдання – допомогти студентам, які вивчають «Технічна механіка рідин і газу», набути навички застосування теорії у розв’язанні конкретних задач, засвоїти методику гідравлічних розрахунків.

При вивченні дисципліни «Технічна механіка рідин і газу» особливе значення мають лабораторні роботи. Методичні вказівки складено на основі обладнання лабораторії «Інженерної гідравліки та насосів» кафедри водопостачання, водовідведення та очищення вод Харківської національної академії міського господарства.

Опис кожної лабораторної роботи виконано за схемою:

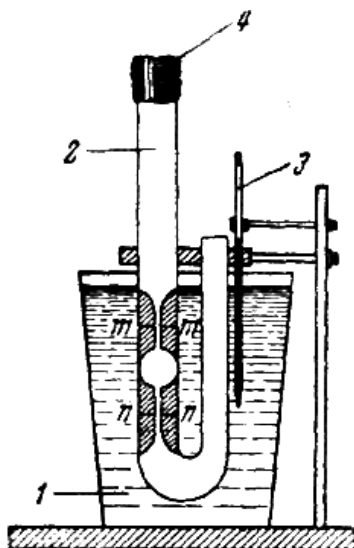
- загальні відомості з теми, яку ілюструю або підтверджує лабораторна робота;
- склад лабораторної роботи;
- опис лабораторної установки;
- порядок виконання роботи;
- обробка експериментальних даних;
- форма журналу, до якого записують результати вимірів;
- контрольні запитання.

# Лабораторна робота № 1

## *Визначення динамічного коефіцієнта в'язкості рідини капілярним віскозиметром*

### *Прилади*

1) штатив із стаканом, 2) капілярний віскозиметр, 3) секундомір, 4) пікнометр, 5) піпетка, 6) термометр, 7) ваги з важками, 8) досліджувана рідина.



Прилад для визначення в'язкості при різних температурах.

**Опис установки.** Схема установки представлена на рис 1.1.

### *Проведення досліду*

1. У стакані (1) встановлюється по схилу віскозиметр (2).

2. У широке (праве) коліно віскозиметра наливається піпеткою досліджувана рідина в певному об'ємі, постійному при всіх подальших вимірюваннях.

3. У стакан (1) наливається вода (при кімнатній температурі) і термометром (3) вимірюється її температура.

4. За допомогою гумової трубки (4) рідина з правого коліна віскозиметра обережно відсисається в ліве коліно вище влучні  $m - m$ . Потім опускається гумова трубка і визначається за секундоміром час  $t_1$  проходження меніска від мітки  $m - m$  до мітки  $n - n$ . Слід провести не менше п'яти спостережень.

5. Аналогічним чином визначається час  $t_0$  опускання меніска для води.

6. Визначається щільність з досліджуваної рідини при температурі, відповідній досвіду. Для цієї мети наливають рідину в пікнометр і тримають останній протягом 10 - 15 хвилин в стакані, де встановлений віскозиметр, після чого за допомогою піпетки і фільтрувального паперу доводять в ньому рівень рідини до мітки пікнометра. Потім, ретельно витерши пікнометр, визначають вагу  $G_{ж}$  рідини, що знаходиться в ньому. Аналогічним чином визначають вагу  $G_0$  води в пікнометрі.

7. Всі вказані вимірювання повторюються при різних температурах.

### **Обробка експериментальних даних**

1. Дійсна щільність рідини визначаються за формулою

$$\rho = \frac{G_{ж}}{G_0}(\rho_0 - \rho_v) + \rho_v,$$

де  $\rho_0$  - є щільність води при заданій температурі (береться за таблицями);

$\rho_v$  - щільність повітря, яку можна прийняти рівною 0,0012 грам сек<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>.

2. Обчислюється динамічний коефіцієнт в'язкості рідини за формулою

$$\mu = \mu_0 \frac{\rho}{\rho_v} \frac{t_1}{t_0},$$

де  $\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості води, узятий з таблиці 1.

### **Лабораторний журнал №1.**

№ спостереження	Температура $t$ °C	Час опускання меніска, сек.		Дійсна щільність рідини, $\rho$	Динамічний коефіцієнт в'язкості, $\mu$	Помилка спостережень, $\delta$
		Температура досліджуваної рідини $t_1$	Води, $t_0$			

### **Контрольні запитання**

1. Що таке в'язкість рідини?
2. Суть коефіцієнта динамічної в'язкості.
3. Яка залежність динамічної в'язкості від температури?
4. Розмірність динамічної в'язкості в системі СІ.

## **Лабораторна робота № 2**

### ***Визначення кінематичного коефіцієнта в'язкості рідини віскозиметром типу ВПЖ***

#### ***Прилади***

1) віскозиметр капілярний скляний типу ВПЖ, 2) секундомір, 3) сухий лід або сніг, 4) досліджувана рідина.

Опис установки. Віскозиметр скляний капілярний типу ВПЖ призначений для визначення кінематичної в'язкості рідини.

#### ***Технічні характеристики***

Діаметр капіляра – 2.00 мм

Кінематична в'язкість рідини визначається по формулі:

$$\nu = \frac{g}{9,807} TK$$

де: К – постійна віскозиметра      0,9048 мм<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$\nu$  – кінематична в'язкість рідини в мм<sup>2</sup>/с;

Т – час закінчення рідини в секундах;

g – прискорення вільного падіння в місці вимірювання в м/с<sup>2</sup>.

#### ***Пристрій і принцип роботи***

Віскозиметр капілярний скляний типу ВПЖ (див. рис) є U – образну трубку, в коліно (1) якої упаяний капіляр (6). Вимірювання в'язкості за допомогою віскозиметра засноване на визначенні часу закінчення через капіляр певного об'єму рідини з вимірювального резервуару

#### ***Проведення дослідів***

##### **Підготовка віскозиметра до роботи**

Перед визначенням в'язкості рідини віскозиметр має бути ретельно промитий і висушений. Віскозиметр спочатку необхідно промити бензином, потім петролейним ефіром. Після розчинника промити водою і залити не менше ніж на 5 – 6 годин хромовою сумішшю. Після цього віскозиметр промивають дистильованою водою, і сушать. Для швидшої сушки віскозиметр можна промити спиртом ректифікатом або ацетоном.

### ***Порядок роботи***

Для вимірювання часу проходження рідини на відвідну трубку (3) надягають гумовий шланг. Далі, затиснувши пальцем коліно (2) і перевернувши віскозиметр, опускають коліно (1) в посудину з рідиною та засмоктують її (за допомогою груші, водоструминного насоса або іншим способом) до відмітки М-2, стежачи за тим, щоб у рідині не утворювалося бульбашок повітря.

У той момент, коли рівень досягне відмітки М-2, віскозиметр виймають з посудини і швидко перевертають в нормальне положення. Знімають із зовнішнього боку кінця коліна (1) надлишок рідини і надягають на нього гумову трубку.

Віскозиметр встановлюють в термостат так, щоб розширення (5) було нижче за рівень рідини в термостаті. Після витримки в термостаті не менше 15 хвилин при заданій температурі засмоктують рідину в коліно (1) приблизно до однієї третини висоти розширення (5). Повідомляють коліно (1) з атмосферою та визначають завершення опускання меніска рідини від відмітки М-1 до відмітки М-2.

В'язкість обчислюють за формулою, приведеною в розділі «технічні характеристики» по середньому часу закінчення рідини.

Всі спостереження слід повторювати по 3 - 4 рази.

### ***Обробка експериментальних даних***

1. Обчислюється кінематичний коефіцієнт в'язкості по формулі
2. Отримані результати зображуються графічно у вигляді кривої зміни кінематичного коефіцієнта в'язкості залежно від температури.

### ***Лабораторний журнал № 2***

№ спостереження	Темпера Т <sub>0</sub> С	Час зниження меніску, сек.	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu$	Помилка Спостережень $\delta$
1				
2				
3				
4				
5				
6				



### ***Контрольні запитання***

1. Що таке в'язкість рідини?
2. Суть коефіцієнта кінематичної в'язкості.
3. Яка залежність кінематичної в'язкості від температури?
4. Розмірність кінематичної в'язкості в системі СІ.
5. Який зв'язок динамічної і кінематичної в'язкості?

### **Лабораторна робота № 3**

#### ***Дослідження режимів руху в круглій трубі***

##### ***Загальні відомості***

При протіканні рідини в трубах і каналах мають місце два різних режими руху: ламінарний і турбулентний.

Рух рідини, при якому відсутні зміни місцевих швидкостей, що призводять до перемішування рідини, називають **ламінарним**. Це рух без пульсації швидкості.

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

Ламінарний режим переважно спостерігається, коли рухається рідина підвищеної в'язкості (нафта, бітум, мазут), а також при рухові через тонкі (капілярні) трубки, наприклад, при рухові води у порах ґрунту.

В інженерній практиці при рухові води або інших рідин, які мають таку ж в'язкість, як гас, спирт, має місце турбулентний режим. У системах водопостачання, водовідведення (каналізація), у каналах і річках також має місце турбулентний режим руху.

На практиці як критерій режиму руху використовують число Рейнольдса, що має позначення **Re**. Число Рейнольдса – це безрозмірний комплекс наступних величин:  $V$ ,  $l$ ,  $\nu$ ,

де  $V$  – середня швидкість руху потоку рідини;

$l$  – деякий геометричний розмір живого перетину потоку;

$\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини.

При напірному русі в круглій трубі число Рейнольдса виражається через діаметр труби за формулою:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

Безрозмірне число  $Re$  характеризує відношення сил інерції до сил тертя (в'язкості) при русі рідини. Чим більше число Рейнольдса, тим більший вплив сил інерції, ніж сил в'язкості.

За двома критичними швидкостями ( $V_{н.кр.}$ ,  $V_{в.кр.}$ ) є два критичних значення числа Рейнольдса

Нижнє критичне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{н.кр.} d}{\nu}$$

Верхнє критичне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{в.кр.} d}{\nu}$$

За експериментами Рейнольдса нижнє критичне число  $Re_{кр} = 2320$ ; верхнє критичне число Рейнольдса не може бути визначено точно, тому що залежить від умов входу до труби, стану внутрішньої поверхні стінки труби.

У практичних гідравлічних розрахунках користуються нижнім критичним числом Рейнольдса.

Визначивши для розглянутого руху число Рейнольдса за виразом і порівнявши отримане значення з  $Re_{кр}$ , можна визначити режим руху.

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

Якщо  $Re > Re_{кр}$ , то режим руху рідини турбулентний.

Режим руху можна виявити за значеннями критичних швидкостей (нижня критична швидкість, яку далі позначатимемо просто  $V_{кр}$ ), порівнюючи її з середньою швидкістю для розглянутого руху.

Так, з рівнянь можна записати

$$V_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d}$$

Тоді: якщо  $V < V_{кр}$  - режим руху ламінарний;

якщо  $V > V_{кр}$  - режим руху турбулентний.

При різних режимах руху мають місце різні залежності між витратами опору і середніми швидкостями руху. При ламінарному режимі витрати опору пропорційні першому ступеню швидкості, при турбулентному-швидкість знаходиться в деякому ступені  $m > 1$ . Якщо позначити витрату опору на прямій ділянці потоку через  $h_{дл}$ , то можна записати:

➤ при ламінарному режимі

$$h_{дл} = bv^{m=1};$$

➤ при турбулентному режимі

$$h_{дл} = bv^{m=1,75 \div 2},$$

де  $b$  — коефіцієнт пропорційності, що залежить від розмірів труби і властивостей рідини.

Вплив режиму руху рідини, а також залежність втрат опору за довжиною від швидкості руху рідини має велике значення у багатьох галузях інженерної практики (гідравліка та гідротехніка, теплотехніка і т.п.).

### ***Хід роботи***

1. Візуальне спостереження ламінарного і турбулентного режимів руху в горизонтальній трубі.

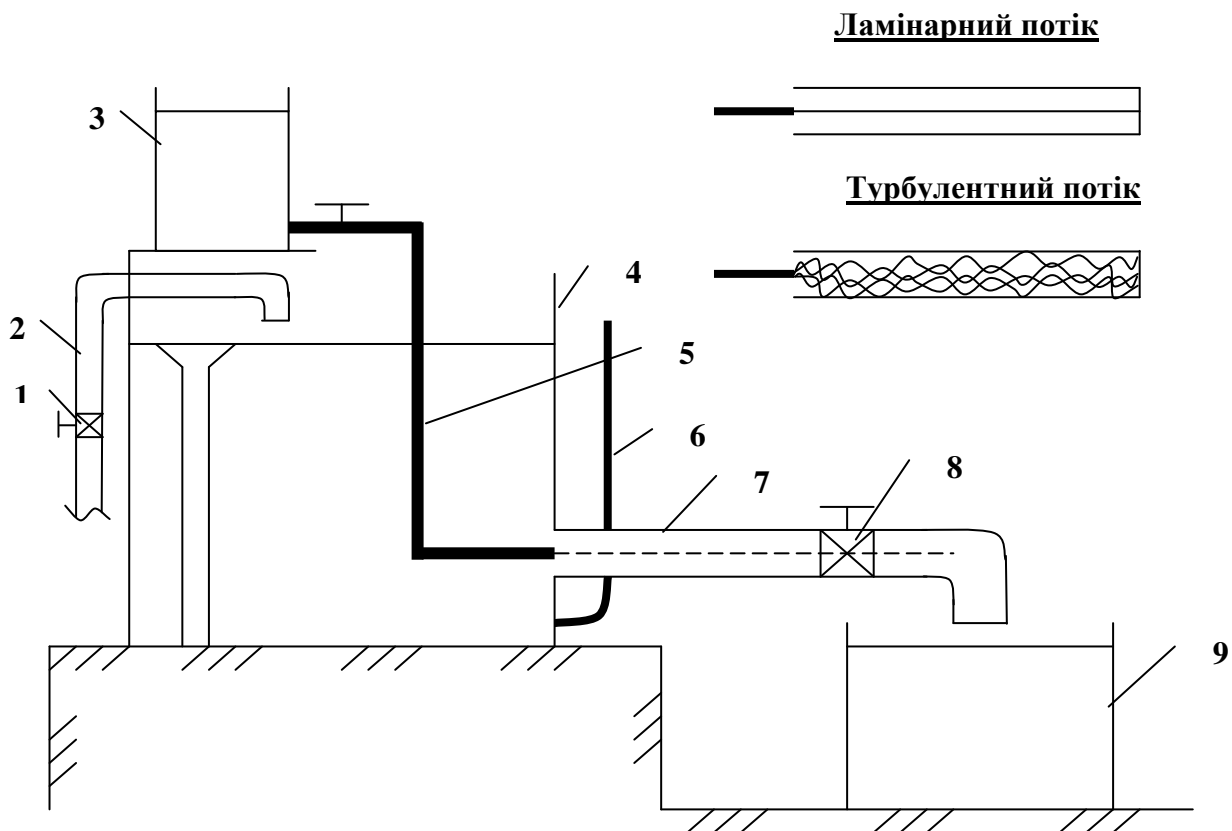
2. Визначення за експериментальними даними значень чисел Рейнольдса при ламінарному і турбулентному режимах руху і порівняння їх з критичними значеннями числа Рейнольдса для підтвердження візуального режиму руху.

3. Визначення критичної швидкості й порівняння її з середньою швидкістю за ламінарним і турбулентним режимами руху для підтвердження візуального режиму руху.

### ***Опис експериментальної установки***

З металевого резервуару (4) виведена скляна труба (7), швидкість руху води регулюється краном (8). Резервуар обладнаний зливним пристроєм для підтримання сталого напору. Стікає зайва вода через переливну трубу (10). Рівень води у резервуарі контролюється за допомогою п'єзометра (6). У верхній

частині резервуару (4) закріплена ємкість (3) з підфарбованою рідиною, витрати якої регулюється краном. Підфарбована рідина по гумовій трубці (5) вводиться до потоку води, що рухається скляною трубкою. Наповнення напірного резервуару (4) водою здійснюється по трубопроводу (2) після відкриття крану (1). Вимірювання витрати води під час експерименту проводиться об'ємним способом за допомогою мірного баку (9).



### ***Порядок виконання роботи***

1. Відкривають вентиль (1) на трубопроводі (2) і заповнюють резервуар (4) водою. При цьому рівень води в резервуарі (4) підтримується весь час постійним, тобто безперервно повинен працювати злив.

2. Відкривають кран (8). Вода починає надходити з резервуара (4) у трубку (7), внаслідок чого у скляній трубці (6) встановлюється середня швидкість руху води.

3. Краном регулюють надходження підфарбованої рідини в скляну трубку (7) так, щоб вона витікала у вигляді тонкого струмочка. Очевидно, що стрімчастий рух фарби буде свідчити про ламінарний режим руху в трубці (7).

4. Об'ємним способом визначають витрату води у трубці (7). Для цього заповнюють ємкість (9), при цьому вмикають секундомір. Коли вода підніметься до потрібного рівня, секундомір вимикають. Таким чином фіксують об'єм ємкості (9)  $W$  і час наповнення цього об'єму  $T$ . Одночасно з виміром витрати води термометром фіксують температуру води  $t^{\circ}\text{C}$ .

5. Повільно відкривають кран (8), і спостерігають за поведінкою підфарбованого струмочку до тих пір, поки він не почне коливатися, набуде хвилястого характеру з місцевими розривами. Опис поведінки струмочка відповідає тому станові потоку, при якому відбувається зміна ламінарного режиму на турбулентний.

6. Подальше відкриття крану (8) призводить до різкої зміни характеру руху: струмочок фарби повністю розмивається, вода у скляній трубці (7) стає рівномірно блідо підфарбованою — маємо турбулентний режим руху.

Експериментальні дані щодо визначення витрати води, її температури, діаметру труби і візуально спостережених режимів руху рідини в скляній трубці заносять у необхідні графи журналу лабораторних робіт.

### ***Обробка експериментальних даних***

1. За заміряним об'ємом води  $W$  і часом  $T$  його наповнення розраховують для кожного експерименту витрати води:

$$Q = \frac{W}{T}$$

2. За витратою води  $Q$  і площею її перетину  $\omega$  визначають середню швидкість:

$$V = \frac{Q}{\omega},$$
$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

де  $d$  – діаметр скляної трубки.

3. Знаючи температуру води  $t^{\circ}\text{C}$ , знаходять кінематичний коефіцієнт в'язкості за довідником або за формулою:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}, \text{ см}^2/\text{с}$$

4. За формулою для кожного експерименту обчислюють число Рейнольдса  $Re$ .

5. Порівнюють число за формулою з критичним числом  $Re_{кр} = 2320$  і уточнюють, чи відповідає режим руху, який спостерігається візуально в експерименті.

6. За формулою встановлюють критичну швидкість, порівнюють її із середніми швидкостями для кожного експерименту уточнюють режим руху.

*Лабораторний журнал № 3*

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик		
		1-й експеримент	2-й експеримент	3-й експеримент
1	2	3	4	5
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час $W$ , л			
2	Тривалість витікання $T$ , с			
3	Температура води $t$ °C			
4	Діаметр труби $d$ , мм			
5	Вхід до труби – плавний, неплавний			
6	Візуально спостережуваний режим руху			
7	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с			
8	Площа перерізу труби $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , см <sup>2</sup>			
9	Середня швидкість $V = \frac{Q}{\omega}$ , см/с			
10	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = f(t$ °C), см <sup>2</sup> /с			
11	Число Рейнольдса за експериментом $Re = \frac{Vd}{\nu}$			
12	Співвідношення між $Re$ і $Re_{кр}$			
13	Критична швидкість $V_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d}$ , см/с			
14	Співвідношення між $V$ і $V_{кр}$			
15	Режим руху, що відповідає отриманим співвідношенням: $Re$ і $Re_{кр}$ , $V$ і $V_{кр}$			

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_\_\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

### ***Контрольні запитання***

1. Що називають ламінарним і турбулентним режимом руху?
2. Від яких факторів залежить режим руху рідини?
3. Напишіть аналогічний вираз числа Рейнольдса для різних лінійних характеристик русла.
4. Який фізичний зміст числа Рейнольдса?
5. Що таке критичне число Рейнольдса і яке його значення для трубопроводів?
6. Як визначити режим руху?
7. Що таке критична швидкість?
8. Як залежать втрати опору за довжиною по відношенню до швидкості при ламінарному і турбулентному режимах?
9. Навіщо треба знати режим руху?

### **Лабораторна робота № 4**

#### ***Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при русі у напірному трубопроводі***

#### ***Загальні відомості***

Розв'язання багатьох задач з гідравліки зводиться до знаходження залежності зміни швидкості потоку за довжиною. Для цього використовують два рівняння гідродинаміки:

- 1) рівняння нерозривності потоку

$$U_1 \omega_1 = U_2 \omega_2 = \dots = U_n \omega_n = \text{const} = Q;$$

- 2) рівняння Д. Бернуллі

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

Але ці два рівняння мають три невідомих: швидкість, тиск та втрати опору, тому для їх вирішення необхідно мати третє рівняння, за яким знаходять невідомі величини. Таким рівнянням є залежність витрат опору від середньої швидкості.

Відомо, що кількісне визначення витрат енергії і вивчення методів їх розрахунків являє собою одне з головних завдань гідравліки. Як свідчать експерименти, в багатьох випадках втрати опору пропорційні квадрату середньої швидкості руху рідини, тому в гідравліці прийнято виражати витрати енергії пропорційно швидкісному напору:

$$\Sigma h_m = \Sigma \xi \cdot \frac{V^2}{2g},$$

де  $\xi$ -коефіцієнт місцевого опору.

Такий запис втрати опору зручний тим, що містить у собі швидкісний напір за рівнянням Д. Бернуллі. Коефіцієнт опору  $\xi$ , таким чином, є співвідношенням втраченого напору до швидкісного.

Існує дві різновидності втрати енергії: втрати енергії за довжиною і місцеві втрати. Отже, загальний вираз втрати опору за рівнянням Д. Бернуллі, такий:

$$h_w = \Sigma h_l + \Sigma h_m.$$

Втрати енергії за довжиною обумовлюються гідравлічним опором за довжиною потоку внаслідок роботи сил тертя. Втрати енергії за довжиною розподіляються рівномірно на ділянках прямолінійного та рівномірного руху в незначною мірою нерівномірно на ділянках нерівномірного руху. Ці втрати енергії в чистому вигляді виникають на прямих трубах постійного перетину, тобто при рівномірному русі рідини, зростають пропорційно довжині труби.

У загальному вираженні втрати опору за довжиною можна отримати з рівняння Д. Бернуллі:

$$h_l = \left( Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \right)$$

Для горизонтальної труби постійного перетину формула матиме вигляд

$$h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$$

Втрати за довжиною можна визначити за загальною формулою, тобто:

$$h_l = \zeta_l \frac{V^2}{2g},$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт витрати руху рідини за довжиною труби, що має вигляд



$$\zeta_l = \lambda \frac{l}{d}$$

У результаті маємо формулу Вейсбаха–Дарсі для визначення втрати опору за довжиною, коли рідина рухається трубою:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g},$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;

$l$  – довжина ділянки труби;

$d$  – діаметр труби;

$V$  – середня швидкість;

$g$  – прискорення сили тяжіння.

Формула Вейсбаха-Дарсі дійсна як для ламінарного, так і турбулентного режиму руху. Різними будуть формули розрахунку коефіцієнта гідравлічного тертя  $\lambda$ , від вибору величини якого залежить точність гідравлічних розрахунків.

Коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  є одним з найважливіших коефіцієнтів при визначенні втрат опору. Тому вивчення фізичних факторів, що впливають на його величину, визначення методів його обчислення було предметом широких теоретичних та експериментальних досліджень багатьох інженерів і вчених.

У разі рівномірного руху рідини в трубі прирівнюють праві частини рівняння (1.9) і рівняння рівномірного руху:

$$h_l = \frac{\tau_0 l}{\rho g R},$$

де  $\tau_0$  – дотичне напруження на стінці труби.

$$\lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{\tau_0 l}{\rho g R}$$

Відомо, що для круглої труби  $d = 2R$ , тоді одержимо

$$\lambda = \frac{4\tau_0}{\rho V^2}$$

Таким чином коефіцієнт гідравлічного тертя це величина, пропорційна відношенню напруження тертя на стінці труби до динамічного тиску, обчисленого за середньою швидкістю потоку.

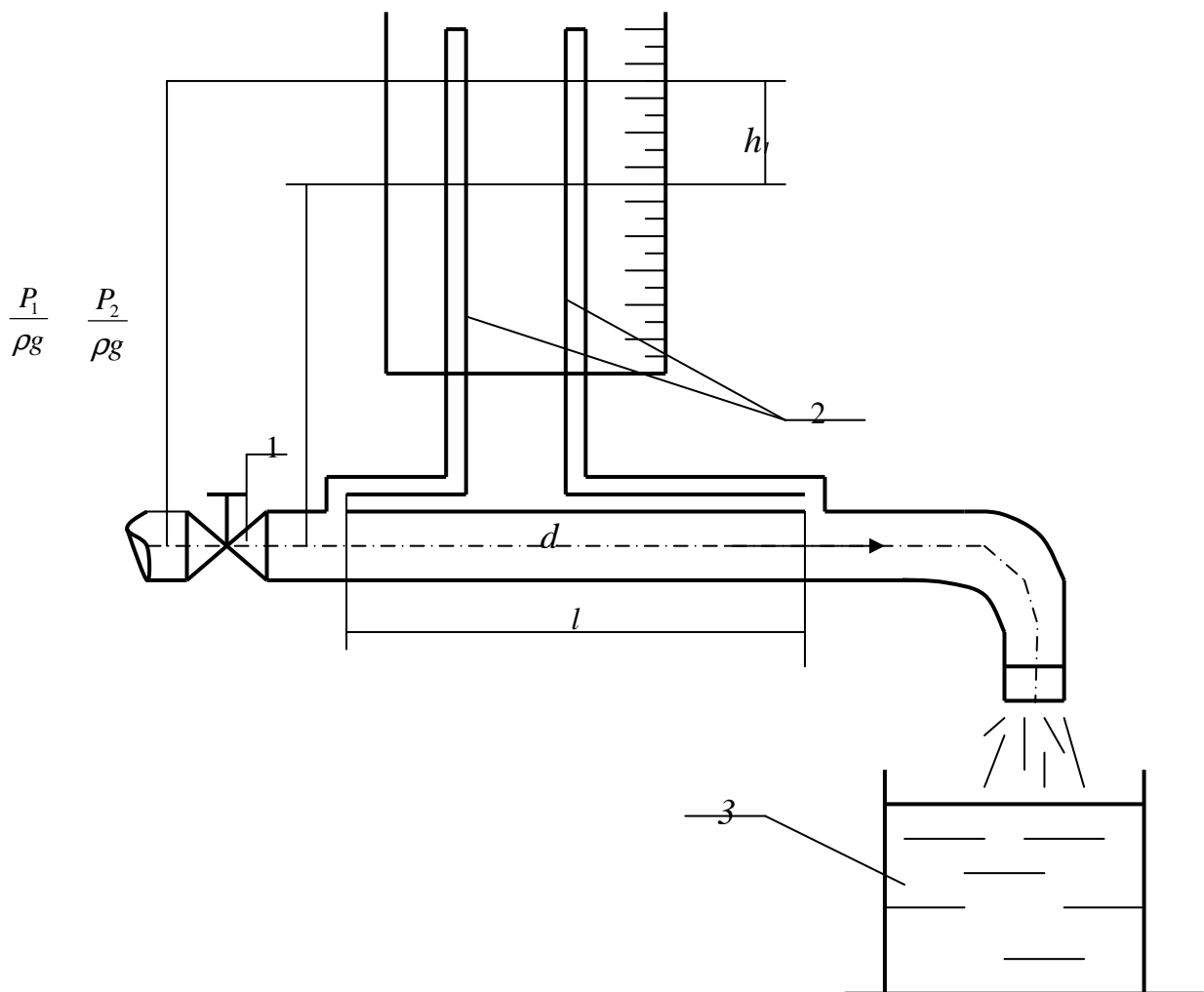
Сучасні формули для обчислення коефіцієнта  $\lambda$  передбачають його залежність від двох безрозмірних параметрів: відносної еквівалентної шорсткості стінок і числа Рейнольдса.

Для вивчення чинників, що впливають на величину коефіцієнта  $\lambda$ , і теоретичних розробок проблеми руху рідини в трубах велике значення мають роботи Прандля, Кармана, Нікурадзе та ін.

### *Хід роботи*

1. Експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного тертя  $\lambda$  для напірного трубопроводу постійного перерізу.
2. Порівняння отриманих значень  $\lambda$  з обчисленими за емпіричними формулами, наведеними вище.

### *Опис експериментальної установки*



Робота з визначення коефіцієнта гідравлічного тертя на трубі постійного перерізу, встановленій горизонтально.

На трубопроводі є два п'єзометри (2), встановлені на відстані  $l$ . Для регулювання витрати води по трубопроводу на його початку встановлено вентиль 1. Вимірювання витрати води під час експериментів проводимо об'ємним способом за допомогою мірного резервуара (3).

### ***Порядок виконання роботи***

1. Вимірюють діаметр трубопроводу і його довжину (відстань між п'єзометрами).

2. За допомогою вентиля (1) у трубопроводі встановлюють деяку постійну витрату води.

3. Використовуючи мірний резервуар, вимірюють об'єм води  $W$ , який надходить у резервуар (3) за час  $T$ .

4. Вимірюють температуру води  $t$   $^{\circ}\text{C}$  за допомогою термометра.

5. Записують показання обох п'єзометрів, які встановлені на трубопроводі. Якщо рівень води у п'єзометрах коливається, необхідно фіксувати середній рівень води.

6. При проведенні наступних експериментів за допомогою вентиля 1 змінюють витрату (у більший або менший бік) і виконують ті ж вимірювання.

Результати вимірювань записуємо у відповідні графи журналу лабораторних робіт.

### ***Обробка експериментальних даних***

1. За об'ємом води  $W$  і часом  $T$  визначаємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}$$

2. За виміряним діаметром труби  $d$  знаходимо площу живого перерізу:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

3. За витратою  $Q$  і площиною живого перерізу  $\omega$  визначаємо середню швидкість руху води:

$$V = \frac{Q}{\omega}$$

4. Визначаємо кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu$  за температурою води.

5. Маючи значення швидкості та кінематичного коефіцієнта в'язкості  $\nu$ , обчислюємо  $Re$ :

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

6. За різницею показів п'єзометрів визначаємо витрати опору за довжиною трубопроводу за формулою.

7. Використовуючи формулу Вейсбаха – Дарсі, обчислюємо спериментальні значення коефіцієнта гідравлічного тертя:

$$\lambda_{екс} = \frac{2gdh_l}{lV^2}$$

8. Залежно від значення числа Рейнольдса визначають коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  за однією або декількома емпіричним формулами, які наведені в розділі «Загальні відомості», і порівнюють коефіцієнти гідравлічного тертя  $\lambda_{екс}$  та  $\lambda_{теор}$ .

Усі результати обчислень записують до журналу.

#### Лабораторний журнал № 4

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик					
		1-й експеримент		2-й експеримент		3-й експеримент	
1	2	3		4		5	
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час, л						
2	Тривалість витікання Т, с						
3	Температура води $t$ °С						
4	Діаметр труби d, мм						
5	Довжина труби l, см						
6	Номер перерізу	1	2	1	2	1	2
7	Показання п'єзометрів $\frac{P}{\rho g}$ , см						
8	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с						
9	Площа перерізу труби $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , см <sup>2</sup>						
10	Середня швидкість $V = \frac{Q}{\omega}$ , см/с						
11	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$ , см <sup>2</sup> /с						

12	Число Рейнольдса за експериментом $Re = \frac{Vd}{\nu}$			
13	Втрати напору за довжиною $h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$ , см			
14	Коефіцієнт гідравлічного тертя за експериментом $\lambda_{екс} = \frac{2gdh_l}{lV^2}$			
15.	Коефіцієнт гідравлічного тертя за емпіричними формулами: 1. 2. 3.			
16.	Висновки:			

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

### ***Контрольні запитання***

1. Які ви знаєте втрати напору, які методи їх визначення?
2. Поясніть причину виникнення втрат напору?
3. Як прийнято визначати втрату напору методом обчислення?
4. Напишіть формули для визначення місцевих втрат напору і втрат напору за довжиною?
5. Що таке гідравлічногладкі й гідравлічношорсткі труби? Чому це поняття умовне?
6. Які фактори впливають на коефіцієнт гідравлічного тертя при ламінарному і турбулентному русі у гідравлічногладких трубах, у перехідній зоні опору та гідравлічношорстких трубах?
7. Який фізичний зміст коефіцієнта гідравлічного тертя?
8. За якими факторами можна визначити коефіцієнт гідравлічного тертя?

## Лабораторна робота № 5

### *Визначення коефіцієнтів місцевих опорів при напірному русі рідини* *Загальні відомості*

Місцеві втрати енергії обумовлюються місцевими гідравлічними опорами, тобто опорами, що виникають у місцях з різкою зміною величини і напрямку швидкості, на ділянках з різкою зміною конфігурації потоку. Як правило, цих місцях виникають вихроутворення.

Отже, місцеві втрати енергії виникають тільки в окремих місцях потоку і мають місцевий характер. На таких ділянках робота сил тертя значно більше, ніж на прямолінійних ділянках з рівномірним рухом.

До місцевих опорів на трубах відносять різні фасонні частини й арматуру (розширення, звуження, вентилі, повороти /коліна/, засувки, крани), необхідність встановлення яких викликана умовами споруди й експлуатації трубопроводів.

Місцеві опори викликають зміни швидкості руху рідини або за значенням (розширення та звуження), або за напрямком (коліна). У всіх випадках має місце перерозподіл швидкостей.

На подолання місцевих опорів витрачається частина енергії потоку, яку називають місцевою втратою опору. У практичних розрахунках її прийнято виражати в частках питомої кінетичної енергії (швидкісного напору):

$$h_l = \xi \frac{V^2}{2g}$$

Це формула Ю. Вейсбаха, де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору. Величина його залежить від виду місцевого опору, числа Рейнольдса і повною мірою від шорсткості стінки, а для різних запірних пристроїв (засувки, крани) – від ступеня їх відкриття.

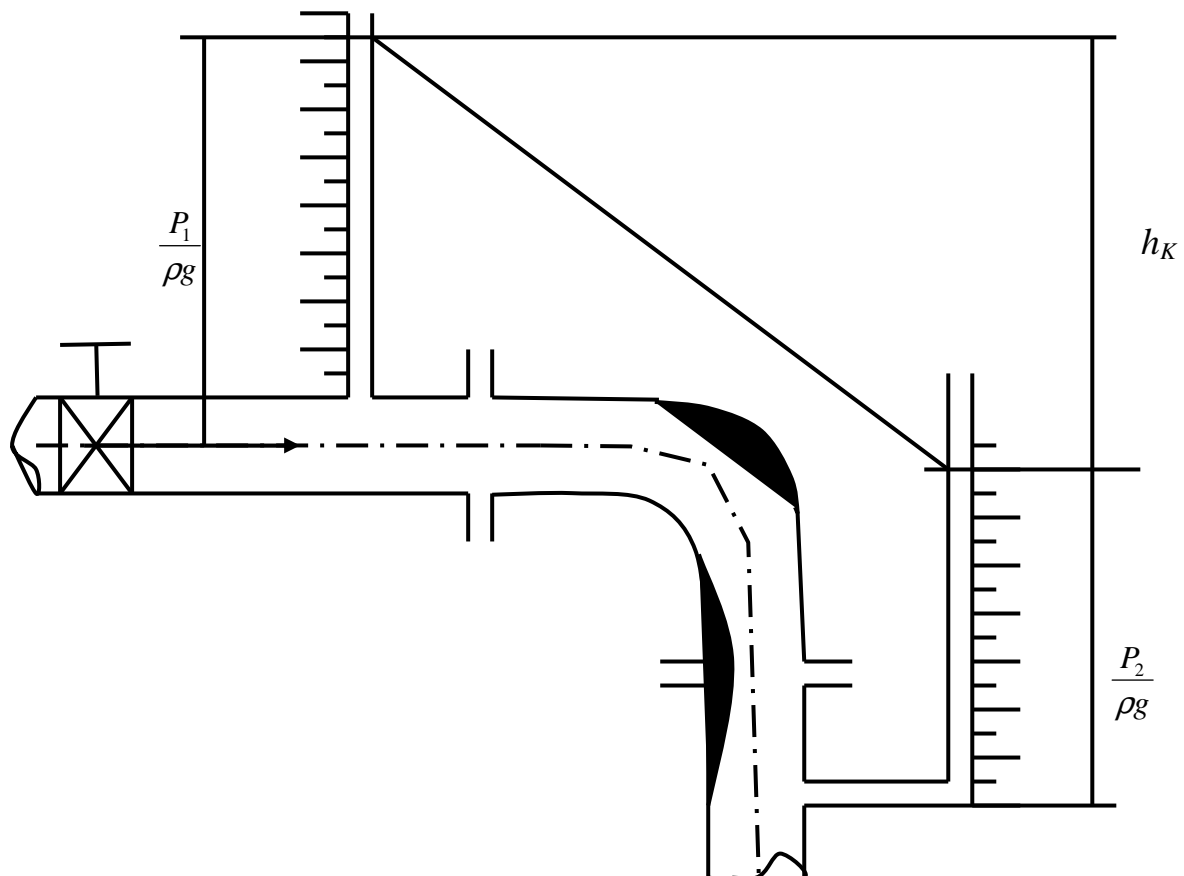
Зважаючи на велику складність явищ, що відбуваються в рідині, яка протікає через місцевий опір, тільки в деяких випадках  $\xi_m$  знайти можна теоретично (раптове розширення або звуження трубопроводу). У більшості випадків  $\xi_m$  визначають експериментальним шляхом і виражають емпіричними

формулами, графіками і таблицями. Значення цих коефіцієнтів для різних місцевих опорів наводяться у довідниках з гідравліки. Довідники подають коефіцієнти місцевих опорів для турбулентного режиму руху з великими числами Рейнольдса, де в'язкість рідини себе не виявляє, але при ламінарному або близькому до нього рухові коефіцієнт місцевих опорів залежить від числа Рейнольдса.

При малих значеннях ефект опору, викликаний діями сил в'язкості та пропорційний швидкості в першому ступені. Коефіцієнт опору в цьому випадку зворотно пропорційний числу Рейнольдса:

$$\xi_m = \frac{A}{Re},$$

де  $A$  – стала, що залежить від виду місцевого опору й ступеня стиснення потоку (довідники з гідравліки).



*Експериментальна установка для визначення місцевих опорів*

Ця залежність була отримана теоретично, коли виводили формулу коефіцієнта гідравлічного тертя для ламінарного режиму в круглій циліндричній трубі.

Але експериментальні дослідження показали, що зі зростанням числа Рейнольдса, яке ще відповідає ламінарному режимові, значення  $\xi_m$  зростають. Це явище пояснюється виникненням вихроутворень в місцевих опорах.

При великих числах Рейнольдса формуються відривні течії, які і є причиною місцевих опорів при великих числах Рейнольдса. Це зона квадратичного опору, де  $\xi_m = \text{const}$  для конкретного місцевого опору. У першому наближенні можна сказати, що при різних переходах в місцевих опорах  $\xi_m$  не залежить від значень  $Re$ , якщо  $Re \geq 3000$ , але при плавних переходах  $Re > 1000$ .

Коефіцієнт опору при невеликих числах Рейнольдса можна приблизно визначити за формулою А.Д. Альдшуля:

$$\xi_m = \frac{A}{Re} + \xi_{m,кв.},$$

де  $\xi_{m,кв.}$  – коефіцієнт місцевого опору для квадратичної зони.

### ***Хід роботи***

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів місцевих опорів: поворот труби на кут  $90^\circ$ .
2. Порівняння отриманих експериментальних значень  $\xi_m$  з довідковими.

### ***Опис експериментальної установки***

Експериментальна установка складається з трубопроводу (1), який підводить воду до установки, регулюючого крана (2) і повороту (5). Краном (2) установлюють рівень води в п'єзометрах (3) і (4) на висоті, зручній для відліку. Для регулювання витрати води на трубопроводі встановлено вентиль. Для визначення витрати води під час проведення експерименту є мірний резервуар.

### ***Порядок проведення роботи***

1. До початку виконання лабораторної роботи приводять установку в робоче положення. При цьому вентиль (2) повинен бути закритий, а другий вентиль відкритий.
2. Відкриттям вентиля (2) виганяють повітря з трубопроводу та п'єзометрів і встановлюють потрібну витрату води.



3. Після того, як рух у трубі буде сталим, що підтвердиться сталим рівнем води в п'єзометрах, визначають об'ємним способом витрату води. Для цього секундоміром визначають час  $T$  заповнення об'єму  $W$ .

4. Необхідно провести не менше трьох експериментів, які відрізняються один від одного витратою води.

### ***Обробка експериментальних даних***

1. За об'ємом води  $W$  і часом  $T$  визначаємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}$$

2. За витратою  $Q$  і площиною живого перерізу  $\omega$  знаходимо середню швидкість руху води:

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

$$\text{де } \omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

3. Визначаємо питому кінетичну енергію (швидкісний напір) в перерізі:

$$h_v = \frac{\alpha V^2}{2g}$$

4. За встановленими значеннями питомої потенціальної енергії (показання п'єзометрів) і питомої кінетичної енергії (швидкісний напір  $\frac{\alpha V^2}{2g}$ ) знаходимо повну енергію в перерізах перед місцевими опорами і після них:

$$E = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

5. За різницею значень повних питомих енергій знаходимо втрати напору місцевих опорів:

$$h_M = E_1 - E_2$$

Коли діаметр трубопроводу до опору й за ним однаковий, втрати напору визначаємо так:

$$h_M = \left( Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left( Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right)$$

6. За формулою (2.1) обчислюємо експериментальні значення коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\xi_m = \frac{2gh_M}{V^2}$$

7. Отримані дані коефіцієнтів місцевих опорів порівнюємо з довідковими даними.

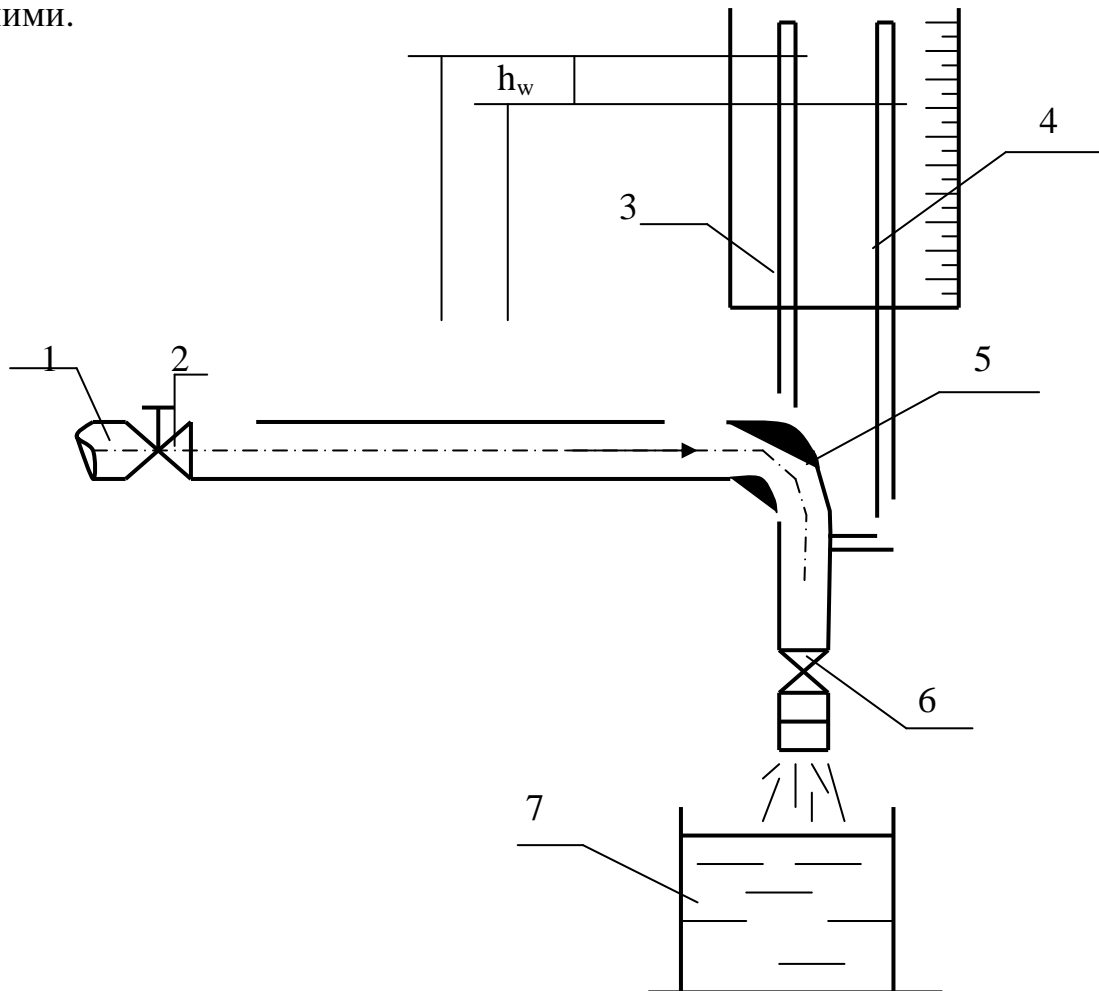


Схема установки для експериментального визначення коефіцієнтів місцевого опору

*Лабораторний журнал № 5*

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик					
		1-й експеримент		1-й експеримент		1-й експеримент	
1	2	3		4		5	
1	Об'єм води, що надходить до резервуару за певний час, л						
2	Тривалість витікання T, с						
3	Діаметр труби: - до опору $d_1$ , мм - за опором $d_2$ , мм						
4	Номери перерізу (п'єзометрів)						
5	Питома потенціальна енергія (показання п'єзометрів), см						
6	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с						
7	Площа живих перерізів трубопроводу $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ ; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ , см <sup>2</sup>						
8	Середня швидкість $V_1 = \frac{Q}{\omega_1}$ ; $V_2 = \frac{Q}{\omega_2}$ , см/с						
9	Питома кінетична енергія (швидкісний напір) у перерізах $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$ ; $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$ , см						
10	Повна питома енергія в перерізах, см $E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g}$ ; $E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}$						
11	Величина місцевих втрат напору $h_M = E_1 - E_2$ , см						
12	Коефіцієнт місцевого напору за результатами експерименту $\xi_M = \frac{2gh_M}{V^2}$						
13	Коефіцієнт місцевого опору за емпіричними формулами і за довідниками						
14	Висновки						

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р.

і

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

### ***Контрольні запитання***

1. Які опори є місцевими?
2. Які причини виникнення місцевих втрат напору, за якою формулою можна знайти їх значення?
3. Від чого залежить коефіцієнт місцевих опорів, як вони визначаються?
4. Для яких місцевих опорів коефіцієнт може визначатися теоретично?
5. Як визначити місцеві втрати напору, якщо середні швидкості до опору і за ним різні за значенням?
6. Як визначити втрати напору при раптовому розширенні труби?

### **Лабораторна робота № 6**

#### ***Визначення втрат опору при раптовому розширенні або звуженні трубопроводу***

#### ***Загальні відомості***

Окрім втрат енергії на подолання опору тертя, відбуваються місцеві втрати енергії при проходженні потоку рідини через кран, сітку, звуження або розширення труби, клапан, коліно і т.п.

Місцеві опори викликають зміну швидкості руху рідини за значенням (раптове звуження або розширення). У цих випадках відбувається перерозподіл швидкостей. Місцеві втрати напору визначають як частину швидкісного напору. Втрати енергії рідини при раптовому розширенні або звуженні дорівнюють швидкісному напору, що відповідає втраченій швидкості, і можуть бути обчислені за формулою

$$h_m = \alpha_0 \cdot \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g},$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт, що відображає відношення дійсної кількості руху маси до кількості руху, який відповідає середній швидкості.

$$\alpha_0 = \frac{\int \omega V_i^2 d\omega}{\omega V^2},$$

де  $V_1$  – швидкість у трубі до розширення;

$V_2$  – швидкість у трубі після розширення.

Значення коефіцієнта  $\alpha_0$  дорівнює 1,035. Які ж дійсні витрати при раптовому розширенні? Потік, що виходить з труби, яка має менший діаметр, не відразу заповнює трубу з більшим діаметром – виникає поверхня поділу й вихор на ній.

На певній відстані від розширення потік захоплює весь переріз більшого діаметру. У кільцевому просторі між струменем і стінками труби рідина перебуває у вихровому рухові. У цій зоні виникають значні втрати напору. Коли переріз 2-2 вибрати там, де потік уже стабілізується, то, припускаючи, що  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ , згідно з рівнянням Бернуллі можна записати:

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

Вибираємо за площину порівняння таку що, яка проходить по осі труби 0-0. Тоді  $Z_1 = Z_2$  і, рівняння Бернуллі переписуємо так:

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

Звідси втрати напору при раптовому розширенні:

$$h_w = \frac{\alpha(V_1^2 - V_2^2)}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

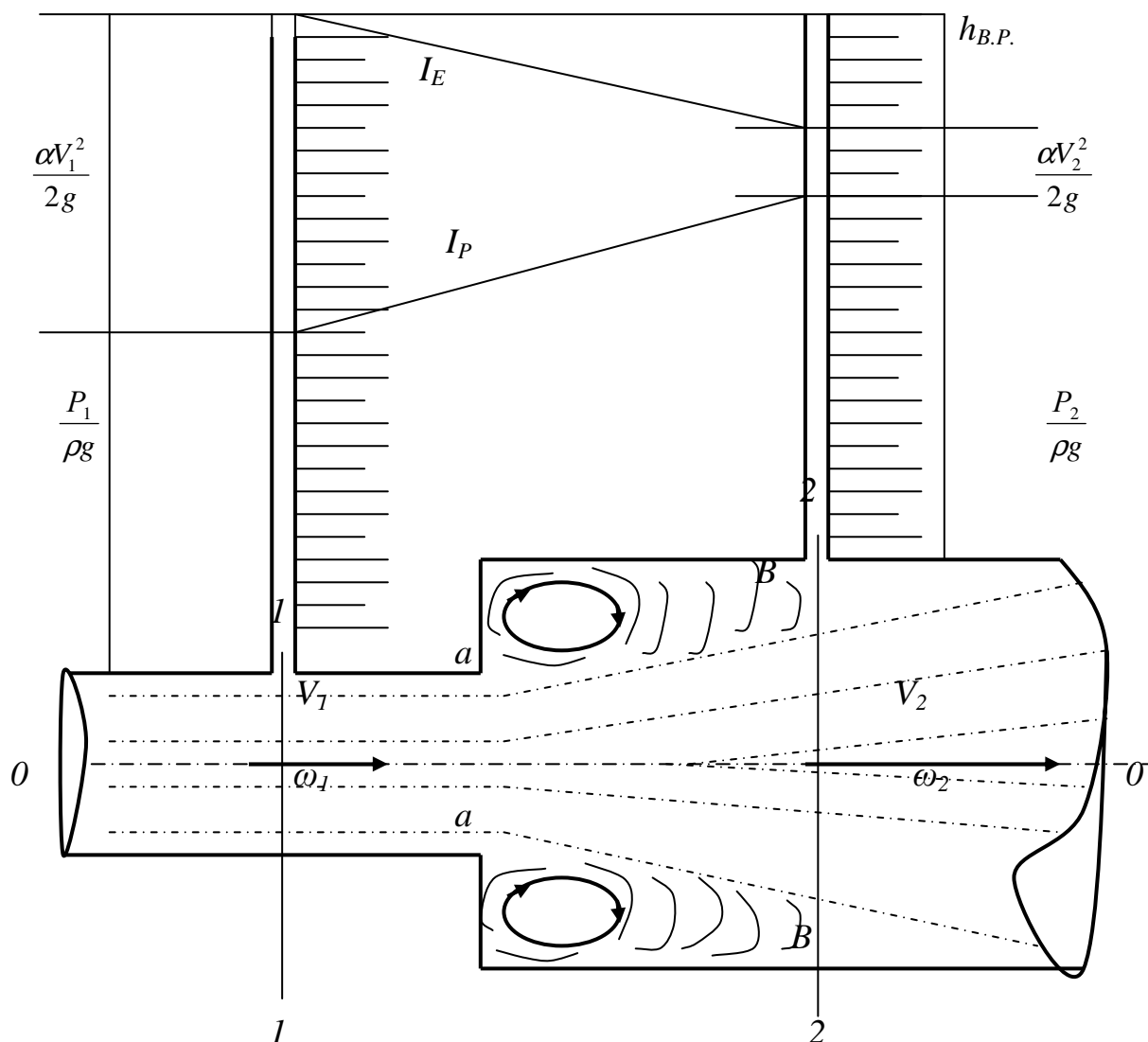


Схема визначення місцевих втрат напору при раптовому розширенні трубопроводу  
**Хід роботи**

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів місцевих опорів: раптове розширення, раптове звуження.
2. Порівняння отриманих експериментальних значень  $\xi$  з довідковими.

### **Опис експериментальної установки**

Експериментальна установка складається з двох послідовно з'єднаних труб різного діаметра (5), (7). На трубопроводі є місцеві опори: раптове розширення, раптове звуження. На кожному місцевому опорі встановлено по два п'єзометри (1)-(2), (3)-(4). П'єзометри виведені на п'єзометричний щит, нуль кожного збігається з площиною порівняння 0-0, яка знаходиться на осі

нижньої частини труби. Для регулювання витрати води на трубопроводі встановлено вентилі (6) і (8).

### ***Порядок проведення роботи***

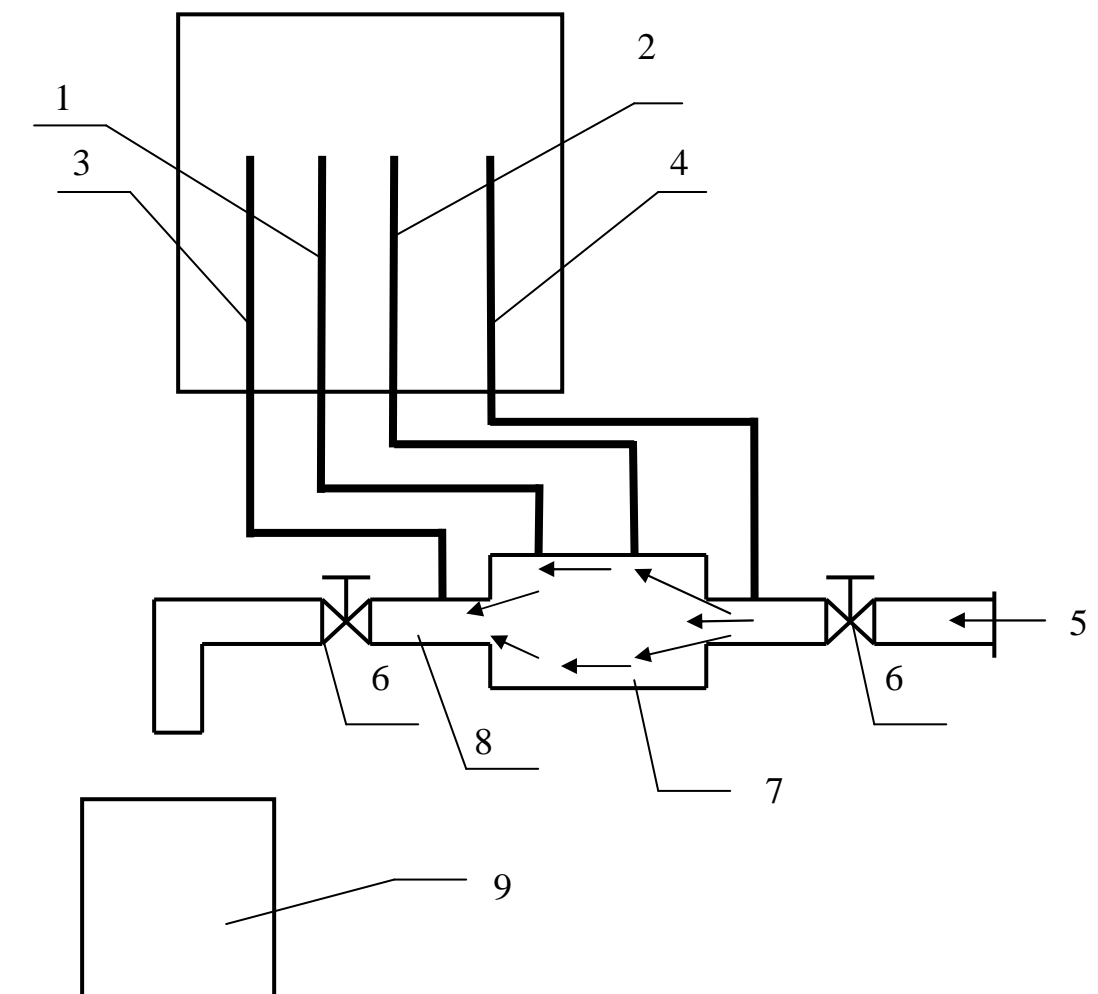
1. До початку виконання лабораторної роботи приводять установку в робоче положення. При цьому вентиль (6) повинен бути закритим, а вентиль (8) відкритим.

2. Відкриваючи вентиль (6), видаляють повітря з трубопроводу і п'єзометрів і встановлюють потрібну витрату води.

3. Після того як рух у трубі буде сталим, що підтверджується сталим рівнем води у п'єзометрах, визначають об'ємним способом витрату води. Для цього секундоміром визначають час  $T$  заповнення об'єму  $W$ .

4. Для кожного місцевого опору знімають покази п'єзометрів.

5. Необхідно провести не менше трьох експериментів, які відрізняються один від одного витратою води.



### Обробка експериментальних даних

1. За об'ємом води  $W$  і часом  $T$  визначаємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}$$

2. За витратою  $Q$  і площиною живого перерізу  $\omega$  визначаємо середню швидкість руху води

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{\omega_2},$$

$$\text{де } \omega_{1,2} = \frac{\pi \cdot d_{1,2}^2}{4}$$

3. Визначаємо питому кінетичну енергію (швидкісний напір) в перерізах:

$$h_v = \frac{\alpha_0 (V_1^2 - V_2^2)}{2g}$$

4. За формулою, отриманою з рівняння Бернуллі, маємо дійсні витрати:

$$h_w = \frac{\alpha_0 (V_1^2 - V_2^2)}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

5. Зіставляючи отримані значення, визначаємо у процентах похибку:

$$\Delta = \frac{h_v - h_w}{h_w} \cdot 100\%$$

### Журнал лабораторної роботи № 6 - Різтове розширення

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик					
		1-й експеримент		2-й експеримент		3-й експеримент	
1	2	3		4		5	
1	Об'єм води, що надходить до резервуару за певний час, л						
2	Тривалість витікання Т, с.						
3	Діаметр труби: - до опору $d_1$ , мм - за опором $d_2$ , мм						
4	Номери перерізу (п'єзометрів)	1	2	1	2	1	2
5	Питома потенціальна енергія (показання п'єзометрів), см						



6	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с						
7	Площа живих перерізів трубопроводу $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ ; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ , см <sup>2</sup>						
8	Середня швидкість $V_1 = \frac{Q}{\omega_1}$ ; $V_2 = \frac{Q}{\omega_2}$ , см/с						
9	Питома кінетична енергія (швидкісний напір) у перерізах $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$ ;  $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$ , см						
10	Повна питома енергія у перерізах $E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g}$ ;  $E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}$ , см						
11	Величина місцевих втрат напору $h_M = E_1 - E_2$ , см						
12	Величина місцевих втрат напору за теоретичною формулою: $h_v = \frac{\alpha_0 (V_1^2 - V_2^2)}{2g}$						
13	Визначаємо похибку в процентах $\Delta = \frac{h_v - h_w}{h_w} \cdot 100\%$						
14	Висновки:						

*Журнал лабораторної роботи № 6 - Раптове звуження*

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик					
		1-й експеримент		2-й експеримент		3-й експеримент	
1	2	3		4		5	
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час, л						
2	Тривалість витікання Т, с						
3	Діаметр труби: - до опору $d_1$ , мм - за опором $d_2$ , мм						
4	Номери перерізу (п'єзометрів)	1	2	1	2	1	2
5	Питома потенціальна енергія (показання п'єзометрів), см						
6	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с						
7	Площа живих перерізів трубопроводу $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ ; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ , см <sup>2</sup>						
8	Середня швидкість $V_1 = \frac{Q}{\omega_1}$ ; $V_2 = \frac{Q}{\omega_2}$ , см/с						
9	Питома кінетична енергія (швидкісний напір) у перерізах $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$ ; $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$ , см						
10	Повна питома енергія у перерізах $E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g}$ ; $E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}$ , см						
11	Величина місцевих втрат напору $h_M = E_1 - E_2$ , см						
12	Величина місцевих втрат напору за теоретичною формулою: $h_v = \frac{\alpha_0 (V_1^2 - V_2^2)}{2g}$						
13	Визначаємо похибку в процентах $\Delta = \frac{h_v - h_w}{h_w} \cdot 100\%$						
14	Висновки:						

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

### ***Контрольні запитання***

1. Яка причина виникнення місцевих втрат напору.
2. З чим пов'язані втрати напору внаслідок раптового розширення потоку?  
Накресліть відповідну схему.
3. Запишіть і розшифруйте формулу Борда для витрати напору внаслідок раптового розширення потоку.
4. Накресліть схему, що характеризує раптове звуження потоку. Поясніть, з чим пов'язана втрата напору в цьому разі?
5. Для яких місцевих опорів коефіцієнт  $\xi$  можна визначати теоретично?
6. Запишіть і розшифруйте формулу Вейсбаха для визначення втрат напору в місцевих опорах. До якого перерізу належить швидкість  $V$  до опору, у самому опорі або поза ним?

### **Лабораторна робота № 7**

#### ***Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі***

#### ***Загальні відомості***

У гідротехніці й інших галузях народного господарства часто вирішують питання, пов'язані з витіканням рідини з отворів.

Витікання рідини може відбуватися в атмосферу (не підтоплені отвори) або під рівень води (затоплені отвори) при сталому або змінному напорі.

У різних галузях техніки зустрічаються завдання, при яких рідина витікає через різні за формою і розмірами отворів.

Зважаючи на велике практичне завдання, витіканням рідини через отвір займалися великі вчені. Широко відомі експерименти учнів Галілея-Кастеллі й Торічеллі (1643 р.), які вивчали швидкість витікання рідини через отвір. Д. Бернуллі розв'язував задачі про встановлення швидкості витікання рідини через отвір, вивів своє рівняння.

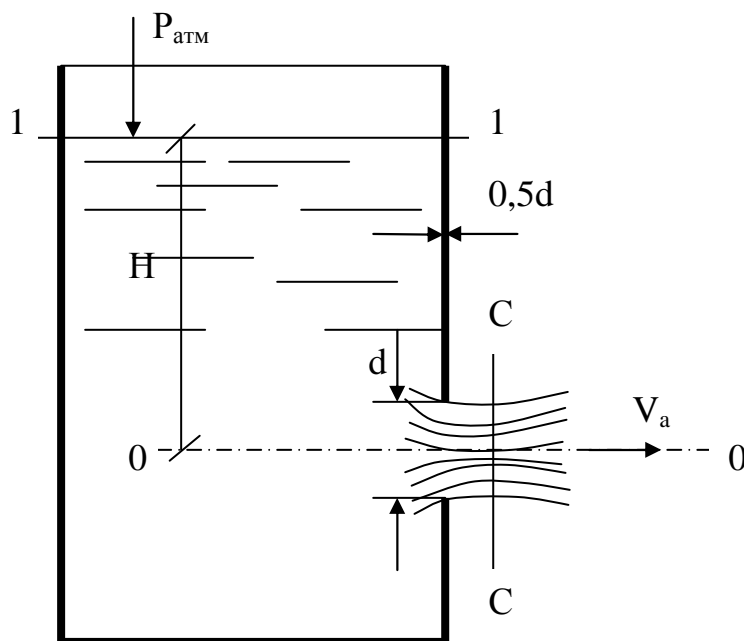
З того часу інженери й науковці написали багато робіт щодо витікання рідини через отвір. Складність картини витікання через отвір пояснюється тим,

що ще немає теорії витікання з отвору, а в розрахункові формули витікання рідини вводять експериментальні коефіцієнти.

При витіканні струменя з отвору на відстані від внутрішньої стінки резервуара, яка дорівнює приблизно  $0,5 d$  (де  $d$ —діаметр отвору), утворюється “стислий переріз”. Площа стислого перерізу струменя  $\omega_c$  менше площі отвору  $\omega$ . Стискання струменя характеризується коефіцієнтом стискання  $E$ , є відношення площі стислого перерізу  $\omega_c$  до площі отвору  $\omega$ .

$$E = \frac{\omega_c}{\omega}$$

При витіканні струменя в атмосферу з малого отвору в тонкій стінці відбувається зміна форми струменя за довжиною (особливо це спостерігається при витіканні з квадратних, прямокутних і трикутних отворів). Таке явище називають інверсією струменя. Це явище виникає під дією сил поверхневого натягу на струмінь, що витікає.



*Схема витікання струменя через тонку стінку*

Якщо використати рівняння Бернуллі й написати його для двох перерізів, один з яких (1-1) збігається з вільною поверхнею рідини в резервуарі, а другий (С-С) — зі стислим перерізом, за площину порівняння вибираємо площину (0-

0), що проходить через центр ваги отвору, то при витіканні в атмосферу через малий отвір у тонкій стінці отримуємо розрахункові формули:

$$V = \varphi \sqrt{2gH},$$

$$\text{і} \quad Q = \mu \omega \sqrt{2gH},$$

де  $V$ -середня швидкість у сталому перерізі струменя;

$g$ -прискорення сили ваги;

$H$  - напір над центром ваги отвору;

$Q$ -витрата;

$\omega$ -площа отвору;

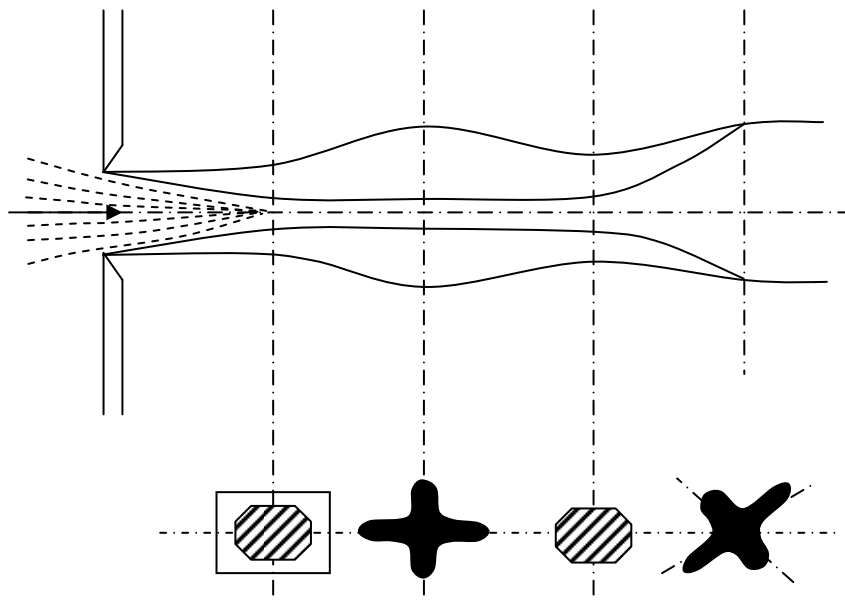
$\mu$ -коефіцієнт витрати, що дорівнює добутку коефіцієнта стискання і коефіцієнта швидкості:

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

де  $\varphi$  – коефіцієнт швидкості, що визначається за формулою

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}},$$

де  $\xi$  – коефіцієнт опору.



*Схема зміни форми поперечного перерізу струменя за довжиною*

Фізичний зміст коефіцієнта витрати іа його числове значення можуть бути розраховані за формулою  $\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}$  або коефіцієнт витрати можна визначити як співвідношення дійсної витрати до теоретичної.

Аналогічно може бути встановлений фізичний зміст коефіцієнта швидкості:

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}},$$

де  $\varphi$  – характеризує зменшення дійсної швидкості  $V$  витікання в'язкої рідини порівняно з теоретичною  $V_{\text{теор}}$  нев'язкої рідини, яка визначається за формулою Торічеллі:

$$V_{\text{теор}} = \sqrt{2gH}$$

Числове значення коефіцієнта швидкості можна визначити, враховуючи, що при витіканні рідини з отвору струмінь набуває форми параболи. Виходячи із закону вільного падіння, будемо мати:

$$x = V \cdot t,$$

$$y = \frac{gt^2}{2}$$

Тут  $x$  і  $y$  – координати довільної точки струменя відносно початку координат, який співпадає з центром ваги стислого перерізу;

$t$  – час руху частини рідини від стислого перерізу до потрібного перерізу.

Виключаючи з рівнянь (7.9) і (7.10) час  $t$ , отримаємо:

$$V = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y}}$$

Підставляючи значення  $V$  з рівняння (7.11) у рівняння (7.7), маємо:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}$$

Визначивши таким чином  $\varphi$ , можна з рівняння (7.5) знайти коефіцієнт опору  $\xi$ :

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$$

На основі багатьох експериментів для круглих, квадратних отворів у тонкій стінці при абсолютному стисканні й при числах Рейнольдса  $> 10^5$  коефіцієнти витікання мають такі значення:

$$E = 0,63 \div 0,64; \xi = 0,06; \varphi = 0,97; \mu = 0,62.$$

При  $Re < 10^5$  зростає нерівномірність розподілу швидкостей у початковому перерізі струменя і збільшуються втрати напору. Збільшення коефіцієнта кінетичної енергії  $\alpha$  і коефіцієнта опору  $\xi$  призводить до зменшення коефіцієнта швидкості  $\varphi$ .

Експерименти підтвердили, що при  $Re > 10^5$  значення  $Re$  на коефіцієнт витікання не впливають (квадратична зона опору).

### ***Хід роботи***

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів витрати, швидкості, стискання й опору при витіканні з отвору в тонкій стінці й порівняти ці коефіцієнти з довідковими.
2. Спостереження за явищем інверсії струменя, що витікає з отворів різної форми.

### ***Опис експериментальної установки***

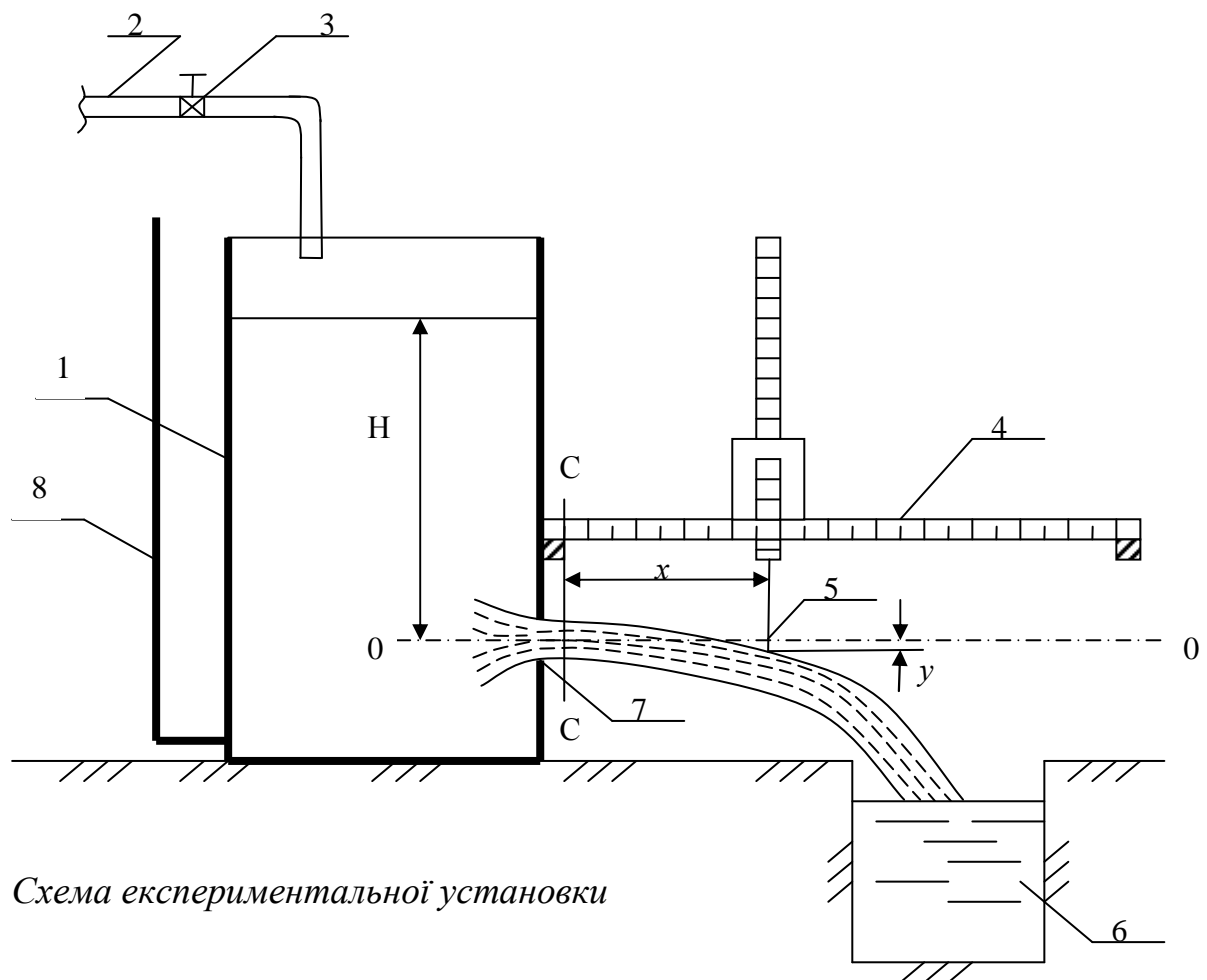
Експериментальна установка складається з напірного резервуара (6). Надходження води в напірний резервуар регулюється за допомогою вентиля (3). Для підтримки сталого напору резервуар обладнаний переливним пристроєм. До напірного резервуара приєднаний патрубок, на який встановлюють отвори (7) різної форми й типів. Вода з отвору (7) витікає у вимірний резервуар (6).

Для вимірювання координат осі струменя, що витікає з отвору, застосовують спеціальний пристрій (координатник), що складається з горизонтальної рейки зі шкалою 4 і мірною голкою (5), яка вільно пересувається по горизонтальній рейці. Нуль шкали горизонтальної рейки збігається зі стислим перерізом струменя.

Напір, при якому відбувається витікання, фіксується п'єзометром (8).

### ***Порядок проведення роботи***

1. Вимірюємо діаметр  $d$ , а для некруглих отворів — розміри поперечного перерізу і приєднуємо отвір до торцевої стінки патрубка.
2. Відкриваємо кран (3) на трубі (2) і наповнюємо водою напірний резервуар (1). На весь час проведення експерименту перелив повинен працювати, тобто напір  $H$  має бути сталим і фіксуватися п'єзометром (8).
3. Визначаємо об'єм води  $W$  за часом  $T$ , що фіксується секундоміром.
4. За допомогою штангенциркуля або спеціального пристрою вимірюємо розміри поперечного перерізу струменя в стислому перерізі по горизонталі  $b$  й по вертикалі  $a$ .
5. За допомогою координатника 4 і вимірної голки 9 знаходимо координати  $x$  і  $y$  якої-небудь точки осі струменя, що витікає з отвору.
6. Змінюючи по чергові отвори, спостерігаємо явище інверсії струменя при витіканні з отвору різної форми.



*Схема експериментальної установки*



### **Обробка експериментальних даних**

1. Визначення площини перерізу отвору:

а) круглого  $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ ;

б) не круглого  $\omega = a \cdot b$ ,

де  $b$ -ширина прямокутного отвору;

$a$ -висота прямокутного отвору;

2. За виконаними замірами обчислюємо площу струменя в стислому перерізі за формулою

$$\omega_c = \frac{\pi ab}{4}$$

3. Знаходимо коефіцієнт стискання струменя за формулою

$$E = \frac{\omega_c}{\omega}.$$

4. За отриманими замірами обчислюємо витрату

$$Q = \frac{W}{T}$$

5. За формулою обчислюємо коефіцієнт витрати отвору  $\mu$ :

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}.$$

6. Визначаємо коефіцієнт швидкості рідини з отвору із співвідношенням

$$\varphi = \frac{\mu}{E}$$

і за рівнянням, співставляємо їх.

7. Обчислюємо коефіцієнт опору отвору  $\xi$  за формулою:

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$$

8. За рівнянням знаходимо дійсну середню швидкість у стиснутому перерізі, а за рівнянням-швидкість без урахування опору-теоретичну швидкість у цьому ж перерізі.

9. За співвідношенням швидкостей за формулою знову обчислюємо коефіцієнт швидкості  $\varphi$  і зіставляємо його значення з коефіцієнтом швидкості, який знаходимо за формулами.

10. Обчислюємо експериментальним шляхом коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $E$  та  $\xi$  і зіставляємо їх з довідковими.

*Журнал лабораторної роботи № 7*

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
1	Діаметр круглого отвору $d$ , мм	
2	Площа перерізу круглого отвору $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , см <sup>2</sup>	
3	Розміри прямокутного (квадратного) отвору: - висота отвору $a$ , мм - ширина отвору $b$ , мм	
4	Площа перерізу прямокутного (квадратного) отвору $\omega = a \cdot b$ , см <sup>2</sup>	
5	Напір, під яким відбувається витікання $H_0$ , м	
6	Об'єм води, що надходить до резервуару за певний час $W$ , л	
7	Тривалість витікання $T$ , с	
8	Розміри струменя у стислому перерізі при витіканні з отвору: ➤ по вертикалі $a$ , мм ➤ по горизонталі $b$ , мм	
9	Площа струменя в стислому перерізі отвору $\omega_c = \frac{\pi ab}{4}$ , см <sup>2</sup>	
10	Коефіцієнт стискання струменя, що витікає з отвору $E = \frac{\omega_c}{\omega}$	
11	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с	
12	Коефіцієнт витрати з отвору $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	
13	Координати точки на осі струменя, що витікає з отвору: ➤ абсциса – $x$ , см ➤ ордината – $y$ , см	
14	Коефіцієнт швидкості отвору: ➤ з співвідношення $\varphi = \frac{\mu}{E}$ ➤ з рівняння $\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}$	

15	Швидкість у стислому перерізі отвору з урахуванням опору $V = \varphi\sqrt{2gH}$ , см/с	
16	Швидкість у стислому перерізі отвору без урахування опору (теоретична) $V_{теор} = \sqrt{2gH}$ , см/с	
17	Коефіцієнт швидкості отвору за співвідношенням швидкостей $\varphi = \frac{V}{V_{теор}}$	
18	Коефіцієнт опору $\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$	
19	Висновки:	

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

### ***Контрольні запитання***

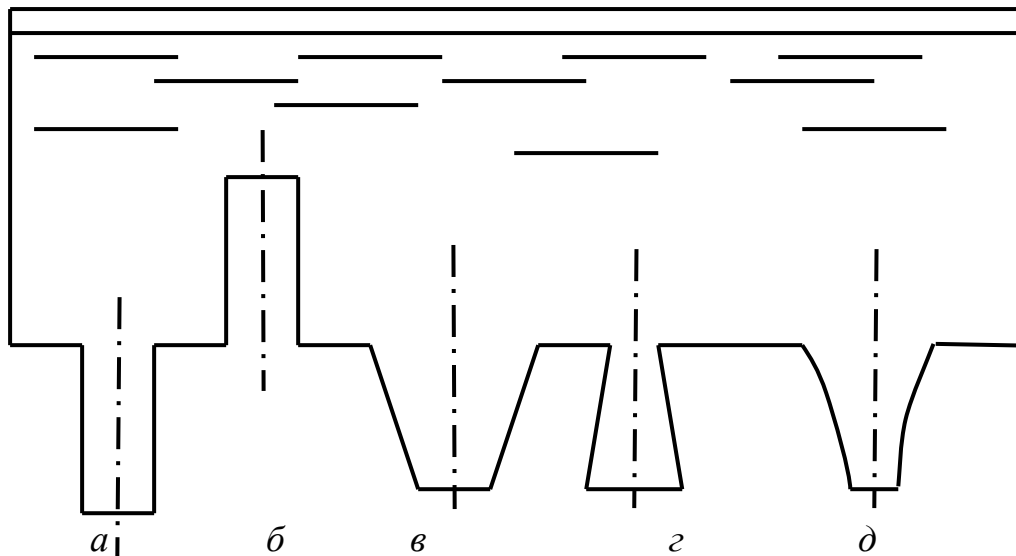
1. Який гідравлічний зміст має назву “тонка стінка”?
2. Який отвір називають малим?
3. В яких умовах отвір буде знаходитися в умовах неповного стискання, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого?
4. Які числові значення мають коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $E$  і  $\xi$  при витіканні з отвору в тонкій стінці?
5. Який фізичний зміст коефіцієнтів  $\mu$  і  $\varphi$ ?
6. Що таке коефіцієнт стискання струменя?
7. Який зв'язок існує між коефіцієнтом швидкості й коефіцієнтом опору?
8. Як визначається коефіцієнт витрати через коефіцієнти  $E$  та  $\varphi$ ?
9. Напишіть формулу пропускну здатності отвору.

## Лабораторна робота № 8

### *Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стискання й опору при витіканні рідини через насадок при сталому напорі*

#### *Загальні відомості*

Насадком називається коротка труба довжиною від 3 до  $8d$  ( $d$ -внутрішній діаметр насадка). Насадки діляться на три типи: циліндричні, конічні й коноїдальні.



*Типи насадків*

В інженерній практиці зустрічаються різноманітні типи насадків: зовнішній циліндричний насадок, або Вентурі (а), яка являє собою пряму циліндричну трубку довжиною  $(3,5 - 7)d$ , приставлену із зовнішнього боку стінки без закруглення вхідної кромки.

Внутрішній циліндричний насадок, або насадок Борда (б). Якщо до отвору з середини резервуару підключити коротку трубку довжиною не менше  $(3,5 - 4)d$ , то така насадка теж збільшує пропускну здатність. За даними дослідів, для внутрішнього циліндричного насадка  $\varphi = \mu = 0,71$ .

Конічно збіжний насадка (конфузорний насадок) (в). У таких насадках рідина при виході також стискається, але менше.

Коефіцієнти  $\varphi$  і  $\mu$  цих насадків залежать від кута конусного  $\theta$ . Найвигіднішим кутом є кут  $\theta = 13^{\circ}24'$ , при якому  $\varphi = 0,97$ ,  $\mu = 0,95$ ,  $E = 0,98$ .

Конічно розхідні насадки (дифузорні насадки) (г). У насадках цього типу в зоні стискання струменя виникає значно більше розрідження, ніж у циліндричних насадках, що сприяє збільшенню швидкості в стиснутому перерізі внаслідок підсмоктування. Найвигіднішим вважається кут  $\theta = 8^\circ$ . Коефіцієнти  $\varphi$  і  $\mu$  змінюються в межах 0,45-0,5, що свідчить про відносно невеликі швидкості на виході.

Коноїдальні насадки (д). При таких насадках завдяки плавним умовам входу в насадку зменшують втрати енергії при виході, що сприяє збільшенню пропускної здатності насадок.

Дослідами підтверджено, що  $\varphi = \mu = 0,96 - 0,99$ .

При витіканні рідини через будь-які насадки, як і при витіканні через отвір, при використанні рівняння Д. Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 можна одержати розрахункові формули швидкості й витрати, які так само, як і при витіканні з отвору застосовуємо формули з лабораторної роботи № 7, де:

$H$ -напір над центром ваги насадка;

$\Omega$ -площа вихідного перерізу насадка;

$\mu$ -коефіцієнт витрати насадка;

$\varphi$ -коефіцієнт швидкості насадка.

Якщо насадок визначається для вихідного отвору, коли  $E = 1$ , то за формулою коефіцієнт витрати насадка дорівнює коефіцієнту швидкості:

$$\mu = E \cdot \varphi = 1 \cdot \varphi = \varphi$$

Якщо в перерізі С-С швидкість більша, ніж на вихідному перерізі насадка ( $V_c > V$ ), то за рівнянням Д. Бернуллі тиск у стислом перерізі буде менший від атмосферного ( $P < P_{атм}$ ), тобто в стиснутому перерізі утворюється вакуум. Якщо до насадка в стиснутому перерізі підключити вакуум, то висота піднятої рідини  $h_{вак} = 0,75H$ .

Утворення вакууму сприяє додатковому підсмоктуванню рідини з напірного резервуара. Пропускна здатність насадка (витрата) більше пропускної здатності отвору того ж розміру при однаковому напорі.

Якщо трубка вакуумметра буде коротшою, ніж  $h_{\text{вак}}$ , то насадок почне “підсмоктувати” рідину з вакуумметра. На цьому явищі заснована дія водоструминних насосів.

При напорах, більших за граничні (для води  $H_{\text{пред}} \approx 13$  м), циліндричних насадках відбувається зрив вакууму. При цьому струмінь відривається від внутрішньої поверхні насадка, і витікання проходить з малого отвору в тонкій стінці. У такому випадку насадок не виправдовує свого значення.

На практиці приймають вакуумметричну висоту не більшу ніж 8 м, тоді  $H_{\text{пред}} \leq 10,7$  м.

### *Хід роботи*

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів витрати, швидкості, стискання та опору при витіканні рідини через насадок і порівняння цих коефіцієнтів з довідковими.
2. Вимірювання величини вакууму в зовнішньому циліндричному насадку, спостереження за зривом вакууму.

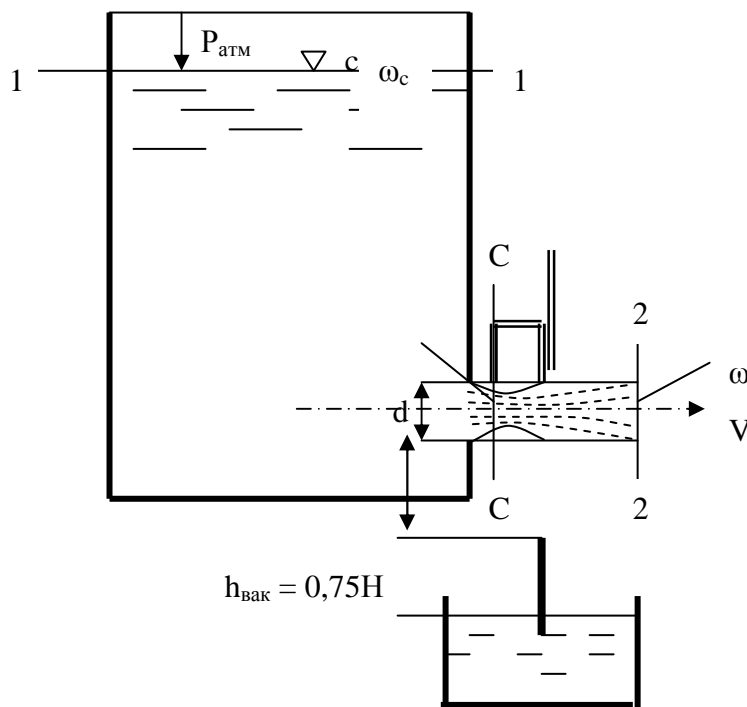


Схема витікання рідини через насадок

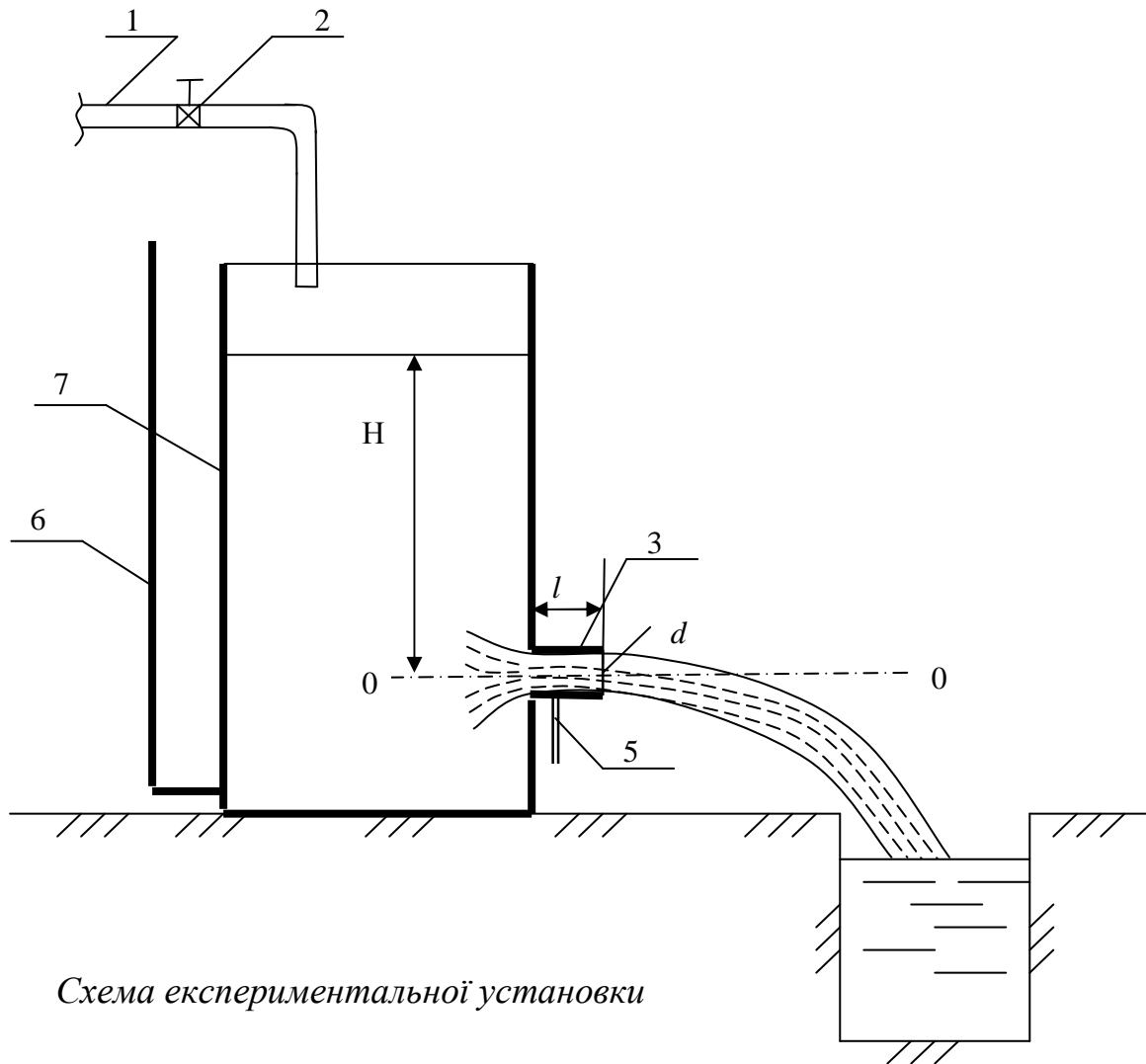
### ***Опис експериментальної установки***

Дослідна установка складається з напірного резервуара (7) і вимірного резервуара (4). Надходження води у напірний резервуар регулюється за допомогою крану (2). Для дотримання сталого напору резервуар обладнано переливними пристроями. До резервуару приєднаний циліндричний насадок у торцевій стінці. Вода з насадка (3) витікає у вимірний резервуар (4). Вакуум насадка вимірюється за допомогою вакуумметра. Напір, при якому здійснюється витікання рідини з насадка, фіксується п'єзометром (6).

### ***Порядок виконання роботи***

1. Вимірюємо діаметри вхідного  $d_1$  і вихідного  $d_2$  отворів насадків.
2. Відкриванням крану 2 на трубі 1 наповнюємо напірний резервуар (7). На весь час проведення досліду перелив повинен працювати, тобто напір  $H$  має бути сталим.
3. Визначаємо об'єм води  $W$  за певний час  $T$ , що фіксується секундоміром.
4. Напір  $H$ , при якому проходить витікання, визначаємо за п'єзометром (6), нуль якого співпадає з віссю насадка.
5. За допомогою вакуумметра вимірюємо вакуум.
6. Для спостереження явища «зриву вакууму» знімають гумову трубку зі штуцера насадка (1) таким чином з'єднують зону пониженого тиску з атмосферою, що призводить до зриву вакууму. Для відновлення вакууму надівають гумову трубку на штуцер і на деякий час перекривають вихідний отвір насадка.

При проведенні дослідів слід звертати увагу на форму, характер, дальність струменя, який витікає з насадка, а також при зриві вакууму.



*Схема експериментальної установки*

### **Обчислення дослідних даних**

1. Визначаємо площину перерізу насадка на вході  $\omega_1$  та на виході  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ і } \omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4},$$

де  $d_1$  – діаметр насадка на вході;

$d_2$  – діаметр насадка на виході.

2. За даними вимірів обчислюємо витрату насадка за формулою

$$Q = \frac{W}{T}$$

3. За рівнянням знаходимо коефіцієнт витрати насадка:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$$

4. Визначаємо відношення  $h_{\text{вак}} / H$  і обчислюємо величину вакууму на вході в насадок:

$$P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}$$



5. Отримані з дослідів значення  $\varphi$ ,  $\mu$ ,  $\xi$  та  $h_{\text{вак}} / H$  зіставляємо з довідковими.

Усі результати вимірювань і обчислення записуємо до лабораторного журналу.

*Журнал лабораторної роботи № 8*

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	Довжина насадки $l$ , см	
<b>2</b>	Діаметр насадки на вході $d_1$ , мм на виході $d_2$ , мм	
<b>3</b>	Площа перерізу насадка: на вході $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ , см <sup>2</sup> на виході $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ , см <sup>2</sup>	
<b>4</b>	Напір, під яким відбувається витікання $H_0$ , м	
<b>5</b>	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час $W$ , л	
<b>6</b>	Тривалість витікання $T$ , с	
<b>7</b>	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с	
<b>8</b>	Коефіцієнт витрати насадка $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	
<b>9</b>	Середня швидкість у швидкісному перерізі насадка $V = \frac{Q}{\omega_2}$ , см/с	
<b>10</b>	Коефіцієнт швидкості насадка $\mu = \frac{V}{\sqrt{2gH}}$	
<b>11</b>	Значення вакууму на вході в насадок $h_{\text{вак}}$ , см	
<b>12</b>	Відношення $h_{\text{вак}} / H$	
<b>13</b>	Вакуумметричний тиск на вході в насадок $P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}$	
<b>14</b>	Висновки:	

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

**Контрольні запитання**

1. Який отвір називають малим?
2. В яких умовах струмінь буде знаходитися в умовах неповного стискання, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого при витіканні з насадка?
3. Які числові значення мають коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $E$  і  $\xi$  при витіканні з насадків різної форми?
4. Який фізичний зміст коефіцієнтів  $\mu$  та  $\varphi$ ?
5. Що таке коефіцієнт стискання струменя?
6. Який зв'язок існує між коефіцієнтом швидкості й коефіцієнтом опору?
7. Як визначають коефіцієнт витрати через коефіцієнти  $E$  та  $\varphi$  при витіканні рідини через насадки?

## Лабораторна робота № 9

### *Побудова п'єзометричної і напірної лінії при напірному русі рідини в трубі змінного перерізу*

#### *Загальні відомості*

П'єзометрична і напірна лінії є графіком зміни за довжиною потоку відповідно п'єзометричного і гідравлічного напору, які входять до рівняння Д. Бернуллі. Рівняння Д. Бернуллі для потоку в'язкої рідини при сталому плавно змінному русі має вигляд:

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

Це рівняння широко застосовують при дослідженні різних теоретичних питань гідравліки і вирішенні практичних завдань, пов'язаних з рухом рідини. Так, за допомогою рівняння Д. Бернуллі визначають висоту всмоктування насоса, розраховують всмоктуючу лінію. За його допомогою розраховують водомірні пристрої (водоміри Вентурі, діафрагми, сопла та деякі водопідйомні установки, наприклад смектори).

При використанні рівняння Д. Бернуллі для вирішення практичних завдань необхідно врахувати наступні умови:

1. рух рідини повинен бути сталим, тому що рівняння виведено з умов, що енергія середнього руху не змінюється за часом.

2. рівняння Д. Бернуллі може використовуватися тільки для тих живих перерізів потоку 1-1, 3-3, 5-5, 7-7 та 9-9, поблизу яких здійснюються умови плавної зміни руху. Немає можливості використовувати рівняння Д. Бернуллі для перерізів 2-2; 4-4; 6-6; 8-8, тому що в цих перерізах рух різко змінюється, що призводить до виникнення сил енергії, які не враховані рівнянням.

3. при плавній зміні руху для будь-якої точки живого перерізу потоку двочлен  $(Z + \frac{P}{\gamma})$  є величиною постійною, тоді його можна віднести до будь-якої точки живого перерізу.

Для кращого розуміння рівняння Д. Бернуллі, а також для його практичного використання розглянемо гідравлічний, геометричний і фізичний (енергетичний) зміст додатків, що містяться у рівнянні.

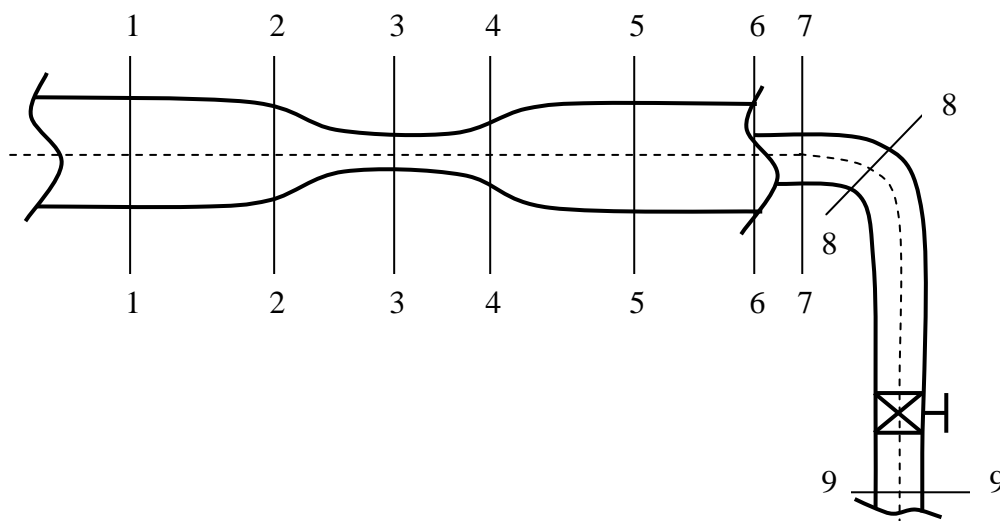
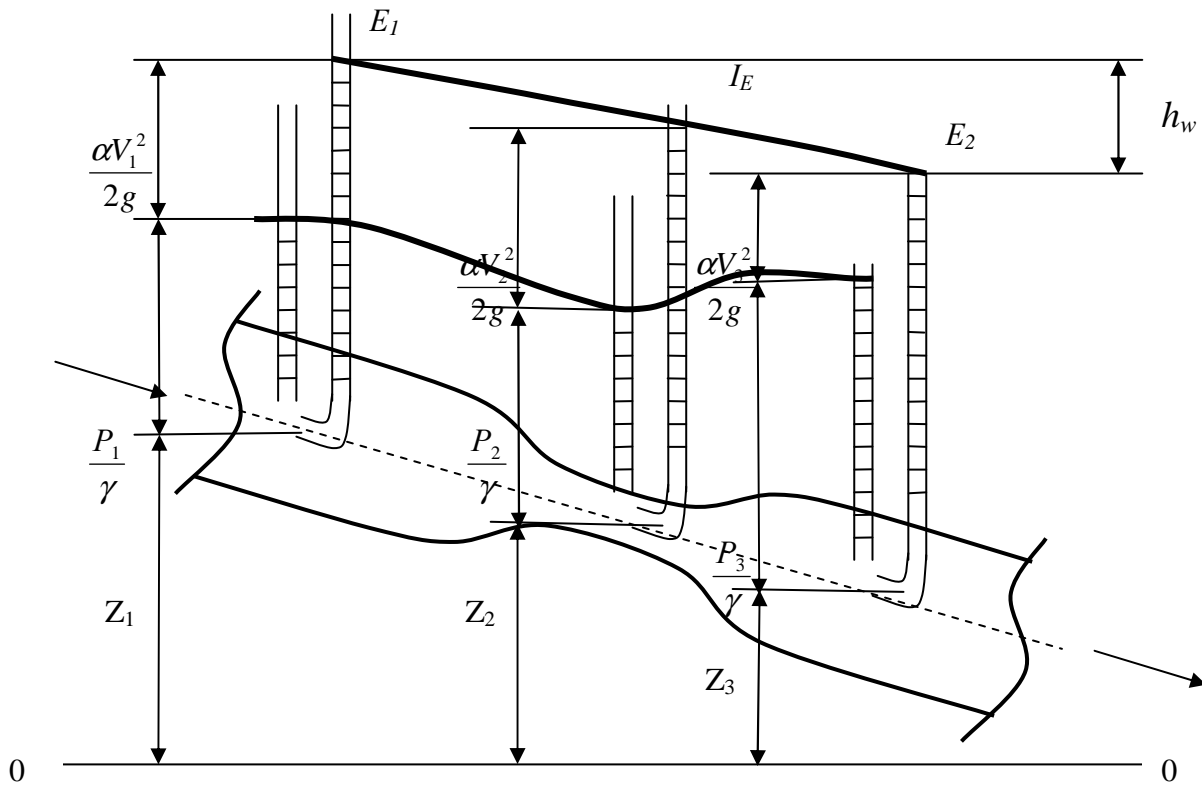


Схема трубопроводу змінного діаметра

### ***Гідравлічний зміст додатків рівняння Д.Бернуллі***

Перший додаток  $Z$  має лінійну розмірність і характеризує висоту розташування вільно вибраної точки живого перерізу потоку над горизонтальною площиною порівняння 0-0.



Розмірність другого члена  $\frac{P}{\gamma}$  теж лінійна, у цьому неважко переконатися:

$$\left[ \frac{P}{\gamma} \right] = \left[ \frac{P}{\rho g} \right] = \left[ \frac{H \cdot m^3 \cdot c^2}{m^2 \cdot \kappa z \cdot m} \right] = \left[ \frac{\kappa z \cdot m \cdot m^3 \cdot c^2}{m^2 \cdot \kappa z \cdot m} \right] = [m]$$

Цей член показує висоту стовпчика, який у певній точці живого перерізу потоку викликає тиск, що дорівнює дійсному тиску  $P$ .

Член  $\frac{P}{\gamma}$  прийнято називати п'єзометричною висотою, що визначається показаннями п'єзометра.

Член  $\frac{\alpha V^2}{2g}$  теж має лінійну розмірність:

$$\left[ \frac{\alpha V^2}{2g} \right] = \left[ \frac{m^2 \cdot c^2}{m \cdot c^2} \right] = [m],$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт кінетичної енергії (безрозмірний), або, як його іноді називають, коефіцієнт Коріоліса, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей по живому перерізу потоку; коефіцієнт  $\alpha$  завжди більше одиниці. У багатьох випадках (наприклад, при розрахунках труб, каналів) для спрощення приймають  $\alpha = 1$ .

$V$  – середня швидкість потоку в живому перерізі.

Величина  $\frac{\alpha V^2}{2g}$  являє собою висоту, з якої частина рідини падає у безповітряному просторі, і в кінці шляху отримує швидкість  $V$ . У гідравліці висоту  $h_v = \frac{\alpha V^2}{2g}$  називають *швидкісною висотою* або *швидкісним напором*.

Швидкісний напір можна пояснити так: у будь-яку точку занурені дві трубки. Одна з них пряма є п'єзометром, а друга трубка загнута та відкрита з обох боків. Ця трубка встановлена так, щоб швидкість у трубці занурювання її була спрямована по осі нижньої відігнутої частини трубки, яка направлена проти течії рідини. Рівень у вертикальній частині загнутої трубки буде вище рівня в п'єзометрі на величину  $\frac{\alpha V^2}{2g}$ .

Власне кажучи, цією трубкою вимірюється не  $\frac{V^2}{2g}$ , а  $\frac{U^2}{2g}$ , де  $U$  – середня швидкість, визначена за достатній відрізок часу.

Прилад, який з'єднує обидві трубки, називається *гідрометричною трубкою*. Вперше така трубка була запропонована Піто ще в 1732 р., тому вона й отримала назву *трубка Піто*.

Так, вимірявши за допомогою трубки Піто значення  $h_v$ , можна обчислити швидкість у певній точці:

$$U = \sqrt{2gh_v}$$

Практично цю формулу використовують у такому вигляді:

$$U = \varphi \sqrt{2gh_v},$$

де  $\varphi$  – поправочний коефіцієнт, який визначають для кожної трубки Піто шляхом тарування.

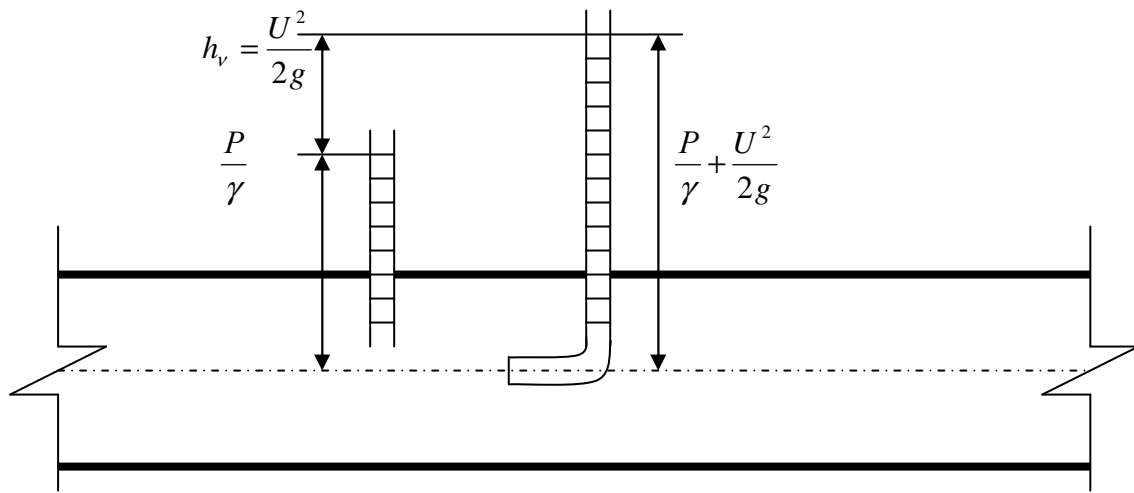


Схема влаштування трубки Піто

### Геометричний зміст рівняння Д.Бернуллі

У рівняння Бернуллі входять наступні лінійні величини:

$Z$ -геометрична висота положення (геометричний нахил або відмітка точки від площини порівняння  $0_1 - 0_1$ );

$p$ -гидродинамічний тиск, що відповідає гідростатичному тиску  $p$ ;

$Z + \frac{P}{\gamma} = H$  - гідростатичний або гідростатичний напір;

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

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H_0$$

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

Зміну гідростатичної лінії на одиницю довжини називають *гідростатичним ухилом*. Відмітки гідростатичної лінії за довжиною можуть зменшуватися або збільшуватися. Гідростатичний ухил вважається позитивним, якщо за течією рідини гідростатична 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 *гідравлічним ухилом*.

Геометричний зміст рівняння Д. Бернуллі легко пояснити при вивченні руху рідини в трубі, зображеній на схемі. Тут вибрано три перерізи 1-1, 2-2, 3-3, центри тяжіння яких розташовані від площини порівняння 0-0 на відстані  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ . Відкладаємо вертикально вгору від центру тяжіння перерізу 1-1 п'єзометричну висоту  $\frac{P_1}{\gamma}$ , а потім швидкісну висоту  $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$ . Виконуємо те саме для перерізів 2-2, 3-3. Крива Е-Е, що з'єднує кінці трьох вертикальних перерізів, називається *помірною лінією*, а сума трьох висот  $Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H_0$  – *гідродинамічним, або повним, напором*.

Для нев'язкої рідини гідродинамічний напір за потоком зменшується на  $h_w$ , яка витрачається на подолання опору руху.

Зміна питомої енергії, віднесена до довжини, на якій виникла ця зміна, називається *середнім гідравлічним нахилом*:

$$I_E = \frac{E_1 - E_2}{l_{1-2}} = \frac{h_{w1-2}}{l_{1-2}}$$

У диференціальній формі гідравлічний ухил визначають так:

$$I_E = -\frac{dE}{dl} = -\frac{dH_0}{dl},$$

де  $I_E$  – середній гідравлічний ухил;

$l$  – відстань між перерізами;

$h_w$  – втрата напору (енергії) між перерізами;

$E$  та  $H_0$  – повна питома енергія і повний гідродинамічний напір.

У рівняння знак «-» означає, що повна енергія і повний напір уздовж течії зменшується.

Криву Р-Р, що з'єднує кінці суми двох вертикальних відрізків  $(Z + \frac{P}{\gamma})$ , називають *п'єзометричною лінією*.

Зміну питомої потенціальної енергії або п'єзометричного напору, віднесеного до одиниці довжини, називають *середнім п'єзометричним ухилом*:

$$I_p = \frac{(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma}) - (Z_2 + \frac{P_2}{\gamma})}{l_{1-2}}$$

У диференціальній формі п'єзометричний ухил визначають так:

$$I_p = \frac{dE_p}{dl} = \frac{dH_p}{dl},$$

де  $I_p$  – середній п'єзометричний ухил;

$l$  – відстань між перерізами;

$E_p = H_p = Z + \frac{P}{\gamma}$  - питома потенціальна енергія або потенціальний напір.

П'єзометрична лінія може знижуватися (при збільшенні швидкості вздовж потоку) або збільшуватися (при зменшенні швидкості); п'єзометричний ухил може бути додатним (переріз 1-2 та 2-2), або від'ємним (переріз 2-2 і 3-3).

### **Фізичний (енергетичний) зміст рівняння Д. Бернуллі**

Кожний із членів рівняння Д. Бернуллі має свій фізичний зміст, а саме:

$Z$  – питома потенційна енергія положення (енергія рідини віднесена до одиниці маси, називається *питомою енергією*);

$p/\gamma$ -питома потенційна енергія тиску,

$\alpha V^2/2g$ -питома кінетична енергія.

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.

Сума двох членів ( $Z + \frac{P}{\gamma}$ ) є потенціальною питомою енергією рідини в перерізі потоку.

Сума всіх трьох членів рівняння Д. Бернуллі є повна питома енергія рідини у вибраному перерізі:

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} = E$$

Тоді рівняння (7.1) може бути записане для двох перерізів у такому вигляді:

$$E_1 - E_2 = h_w$$



З енергетичної точки зору криву Е-Е називають *лінією повної питомої енергії*, а криву Р-Р – *лінією питомої потенціальної енергії*.

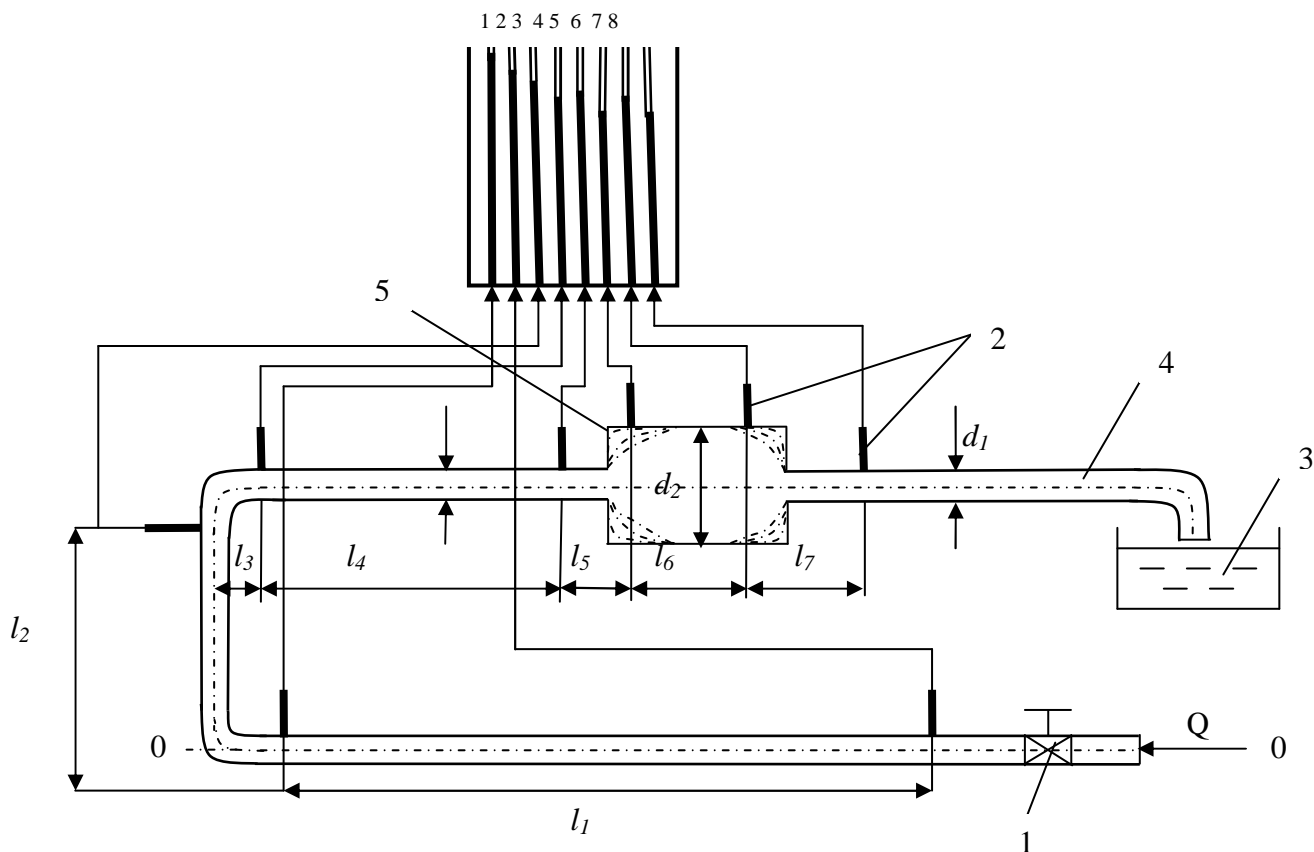
Таким чином, рівняння Д. Бернуллі з точки зору фізики є математичним вираженням збереження механічної енергії відповідно до рідини.

### ***Хід роботи***

Побудова п'єзометричної та напірної лінії при напірному русі рідини в трубопроводі змінного перерізу.

### ***Опис експериментальної установки***

Експериментальна установка складається з трубопроводу змінного перерізу, ділянки трубопроводу (4) діаметром  $d_1 = 20$  мм, а ділянка трубопроводу (5) діаметром  $d_2 = 40$  мм. Вентиль 1 призначений для подачі води до трубопроводу та регулювання витрати. На характерних ділянках трубопроводу вмонтовані штуцери (2), до яких підключені п'єзометри на спеціальному п'єзометричному щитку. Нуль відліку суміщений з площиною порівняння 0-0, яка суміщена з віссю трубопроводу. Для вимірювання витрати є вимірний бак (3).



*Схема експериментальної установки*

### ***Порядок виконання роботи***

1. Відкриваємо вентиль (1) і до трубопроводу подається вода, яка витісняє повітря з трубопроводу й п'єзометрів. Для повного виведення повітря за допомогою вентиля (1) пропускаємо таку витрату, при якій вода витісняє повітря через п'єзометри до переливних трубок. Відсутність повітря підтверджується відсутністю бульбашок повітря в п'єзометрі.

2. За допомогою вентиля 1 встановлюють таку витрату, при якій рівні у п'єзометрах знаходяться у площині п'єзометричного щита і зручні для зняття відліків. Після 2, 3-хвилинного очікування, коли рух у трубі встановився, починають знімати показання п'єзометрів і вимірювати витрату.

3. Витрату вимірюємо за об'ємним способом. Для цього за допомогою секундоміра визначаємо час  $T$  заповнення певного об'єму. Значення об'єму  $W$  і часу  $T$  записуємо до лабораторного журналу.

4. Знімаємо показання п'єзометрів. При цьому слід враховувати те, що рівні води в п'єзометрах коливаються і інколи значно. Це підтверджує присутність турбулентного руху, при якому має місце пульсація швидкостей та тиску. Тому, щоб уникнути грубих помилок при знятті показань п'єзометрів, необхідно фіксувати середнє положення рівнів води п'єзометрів, або брати декілька відліків. Показання п'єзометрів заносимо до журналу лабораторних робіт.

### ***Обробка експеримента***

#### ***льних даних***

1. За даними вимірів обчислюємо витрату за формулою  $Q = \frac{W}{T}$

2. За витратою для кожного перерізу визначаємо середні швидкості:

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

де  $V$  – середня швидкість;

$Q$  – витрата, однакова для всіх перерізів;

$\omega$  – площа вибраного перерізу за виразом:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4},$$

де  $d$  – діаметр у певному перерізі.

3. Визначаємо швидкісні напори (питома кінетична енергія) для кожного перерізу:  $h_v = \frac{\alpha V^2}{2g}$

4. За показами п'єзометрів і значеннями швидкісних напорів знаходимо повний напір (повну питому енергію) у перерізі:  $E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}$

5. Визначаємо втрати повної питомої енергії (напору) між суміжними перерізами:  $h_w = E_i - E_{(i+1)}$

6. Визначаємо середній гідравлічний ухил між суміжними перерізами:

$$I_E = \frac{h_w}{l}, \text{ де } l - \text{відстань між перерізами.}$$

7. Визначаємо середній п'єзометричний ухил між суміжними перерізами:

$$I_p = \frac{(Z + \frac{P}{\gamma})_i - (Z + \frac{P}{\gamma})_{(i-1)}}{l}$$

Всі дані обчислень записуємо до журналу.

8. За показаннями п'єзометрів  $(Z + \frac{P}{\gamma})$  на схемі трубопроводу, наведену в журналі, на міліметровому папері наносимо в певному масштабі п'єзометричну лінію.

9. За встановленими значеннями повної питомої енергії таким же чином наносимо напірну лінію (лінію повної питомої енергії). Для більшої наочності ці лінії зображують різними кольорами.

### Журнал лабораторної роботи № 9

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик									
1	2	3									
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час $W$ , л										
2	Тривалість витікання $T$ , с										
3	Номери перерізів (п'єзометрів)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Відстань між перерізами $l$ , см										
5	Діаметр труби в перерізах $d$ , мм										
6	Площа живих перерізів										

	$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ см}^2$											
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Продовження журналу 9

7	Потенціальна питома енергія (показання п'єзометрів) $(Z + \frac{P}{\gamma}), \text{ см}$											
8	Витрата $Q = \frac{W}{T}, \text{ см}^3/\text{с}$											
9	Середня швидкість у перерізах $V = \frac{Q}{\omega}, \text{ см/с}$											
10	Кінетична питома енергія (швидкісний напір), визначається за середньою швидкістю $h_v = \frac{\alpha V^2}{2g}, \text{ см}$											
11	Повна питома енергія (повний напір) у перерізі: $E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}.$											
12	Втрати повної питомої енергії (напору) між суміжними перерізами $h_w = E_i - E_{(i+1)}, \text{ см}$											
13	Гідравлічний ухил між суміжними перерізами $I_E = \frac{h_w}{l}$											
14	П'єзометричний ухил між суміжними перерізами $I_p = \frac{(Z + \frac{P}{\gamma})_i - (Z + \frac{P}{\gamma})_{(i-1)}}{l}$											
15	Висновки											

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

**Контрольні запитання**

1. Дайте визначення усталеного, неусталеного, плавно змінного й різко змінного, рівномірного або безнапірного, розривного і нерозривного руху?
2. Що таке середня швидкість і витрата рідини?

3. Запишіть рівняння Д. Бернуллі для потоку в'язкої рідини, поясніть геометричний і фізичний зміст додатків цього рівняння?
4. Що таке п'єзометрична і напірна лінія?
5. Що називають гідравлічним ухилом. Напишіть вираз для визначення гідравлічного ухилу.
6. Дайте визначення п'єзометричного ухилу. Напишіть вираз для визначення п'єзометричного ухилу.
7. При якому рухові гідравлічний і п'єзометричний ухили будуть однаковими?
8. Що враховує коефіцієнт  $\alpha$ , який належить рівнянню Д. Бернуллі?
9. Поясніть, чому п'єзометричний ухил може бути додатний і від'ємний, а гідравлічний ухил-тільки додатний?

### **Список джерел**

1. Альтшуль А.Д., Шивотовский П.С., Иванов П.П. Гидравлика и аэродинамика – М., Стройиздат, 1987. – 414 с.
2. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. Общий курс – К.: Вища школа, 1989. – 214 с.
3. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика – М., Стройиздат, 1987. – 440 с.
4. Науменко І.І. Гідравліка. Підручник. – Рівне: НУВГП, 2005. – 475 с.
5. Константинов Ю.М. Гидравлика – К., Вища школа, 1988. – 398 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. – Х.: ХДАМГ, 2002. – 114 с.
10. Тітов Ю.П., Яковенко М.М. Інженерна гідравліка. Навчально-методичний посібник до практичних занять. – Х.: ХНАМГ, 2005. – 91 с.

## Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
«Технічна механіка рідин і газу» (для студентів 2- 4 курсів денної і заочної форм  
навчання напрямів підготовки 6.060103 «Гідротехніка (водні ресурси) » та слухачів  
другої вищої освіти спеціальності 7.092601, 7.06010108 "Водопостачання та  
водовідведення")

Укладачі **ЯКОВЕНКО** Микола Михайлович  
**ШЕВЧЕНКО** Тамара Олександрівна  
**БЄЛЯЄВА** Валентина Михайлівна

Відповідальній за випуск: *С. С. Душкін*

Редактор: *С. В. Тимошук*

Комп'ютерне верстання: *К. А. Алексанян*

План 2010, поз. 111 М

---

Підп. до друку 20. 12. 2010	Формат 60 x 84/16
Друк на різнографі.	Ум. друк. арк. 2,8
Заст. №	Тираж 50 пр.

---

Видавець і виготовлювачі:

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 №4064 від 12.05.2011 р.