

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

для проведення лабораторних занять
із навчальної дисципліни

«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИНИ ТА ГАЗУ»

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024

Методичні рекомендації для проведення лабораторних занять із навчальної дисципліни «Технічна механіка рідини та газу» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Т. О. Шевченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 47 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. Т. О. Шевченко

Рецензент

М. В. Дегтяр, кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очищення вод, протокол № 1 від 29.08.2023

ЗМІСТ

Вступ.....	4
<i>Лабораторна робота № 1</i> Дослідження режимів руху в круглій трубі..	5
<i>Лабораторна робота № 2</i> Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при рухові у напірному трубопроводі.....	11
<i>Лабораторна робота № 3</i> Визначення коефіцієнтів місцевих опорів при напірному русі рідини.....	18
<i>Лабораторна робота № 4</i> Визначення втрат опору при раптовому розширенні або звуженні трубопроводу.....	25
<i>Лабораторна робота № 5</i> Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі.....	32
<i>Лабораторна робота № 6</i> Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стискання й опору при витіканні рідини через насадку при сталому напорі.....	40
Список використаних джерел.....	46

ВСТУП

Важливою складовою при вивченні дисципліни «Технічна механіка рідини та газу» є експериментальні гідравлічні дослідження, які можуть бути реалізовані шляхом лабораторного практикуму. Особливо експериментальна складова важлива при вивченні гідродинаміки (розділ гідравліки, який вивчає рідину у русі). При вивченні курсу «Технічна механіка рідини і газу» дуже важливо мати особистий експериментальний досвід роботи з вивчення гідравлічних характеристик напірних трубопроводів, методів їх випробувань. Це і є метою створення цих методичних рекомендацій.

Мета лабораторних робіт з дисципліни «Технічна механіка рідини та газу» – надання можливості здобувачам практично закріпити знання теоретичного матеріалу, який викладається на лекційних заняттях та при самостійному вивченні; перевірити експериментально справедливість основних гідравлічних законів та закономірностей, а також набуття здобувачами практичних навичок роботи з лабораторними стендами, устаткуванням та вимірювальними приладами, які використовуються в інженерній практиці.

Виконання наведених лабораторних робіт з гідравліки дозволить здобувачам глибше зрозуміти фізичну сутність основних законів гідродинаміки, отримати реальні уявлення про види руху рідини в напірних трубопровідних системах, виявити вплив різних чинників на виникнення гідравлічних опорів, а отже й гідравлічних втрат напору (тиску) в різних інженерних гідравлічних системах (системи водопостачання, водовідведення, газопостачання, тепlopостачання тощо).

Для успішного проходження лабораторного практикуму кожен здобувач має підготуватися, а саме:

- необхідно знати основні положення рівноваги й руху рідин,
- вивчити схеми навчальних лабораторних установок та приладів, які використовуються в дослідках;
- знати мету й порядок проведення дослідів;
- ознайомитись з методикою обробки одержаних результатів.

Кожна лабораторна робота оформлюється згідно вимог, мають бути повністю заповнені журнали лабораторних робіт із необхідними розрахунками. Далі кожен здобувач має захистити лабораторні роботи. Захист лабораторних робіт може відбуватися усно у спілкуванні з викладачем, який проводив лабораторні роботи, або із використанням засобів дистанційного навчання *Moodle* на відповідному порталі шляхом складання тесту.

Кожна лабораторна робота складається з мети, короткого опису об'єкта дослідження та методики проведення експерименту.

В інженерній практиці існує багато факторів, які впливають на рух рідин та газів у трубопровідних системах, тому цей курс має значну лабораторну складову для врахування відмінностей та особливостей гідравлічних процесів. Співставлення теоретичних знань та практичного експериментального досвіду дозволить здобувачам більш повно засвоїти навчальний матеріал. Проведення дослідів також сприяє розвитку навичок обробки й викладення отриманих експериментальних даних.

Лабораторна робота № 1

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 приводять до перемішування рідини, називають **ламінарним**. Це рух без пульсації швидкості.

Рух рідини, при якому відбувається зміна місцевих швидкостей, що приводять 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 і гас, спирт, наявний турбулентний режим. У системах водопостачання, водовідведення (каналізація), у каналах і річках також наявний турбулентний режим руху.

На практиці як критерій режиму руху використовують число Рейнольдса, що має позначення **Re**. Число Рейнольдса – це безрозмірний комплекс величин V , l , ν , де V – середня швидкість руху потоку рідини; l – деякий геометричний розмір живого перетину потоку; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини.

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

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (1.1)$$

Безрозмірне число Re характеризує відношення сил інерції до сил тертя (в'язкості) при рухові рідини. Чим більше число Рейнольдса, тим більше 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:

$$Re = \frac{V_{н.кр.} d}{\nu}. \quad (1.2)$$

Верхнє критичне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{в.кр.} d}{\nu}. \quad (1.3)$$

За експериментами Рейнольдса нижнє критичне число $Re_{кр} = 2\,320$; верхнє критичне число Рейнольдса не можна визначити точно, тому що воно 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 (1.1) 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.

Зокрема, з рівняння (1.2) можна записати:

$$V_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d}. \quad (1.4)$$

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

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

При різних режимах руху наявні 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

$$h_{дл} = b\nu^{m=1}; \quad (1.5)$$

– при турбулентному режимі

$$h_{дл} = b\nu^{m=1,75 \div 2}, \quad (1.6)$$

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 і гідротехніка, теплотехніка тощо).

Склад 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

Схема лабораторної установки для визначення режиму руху рідини наведена на рисунку 1.1.

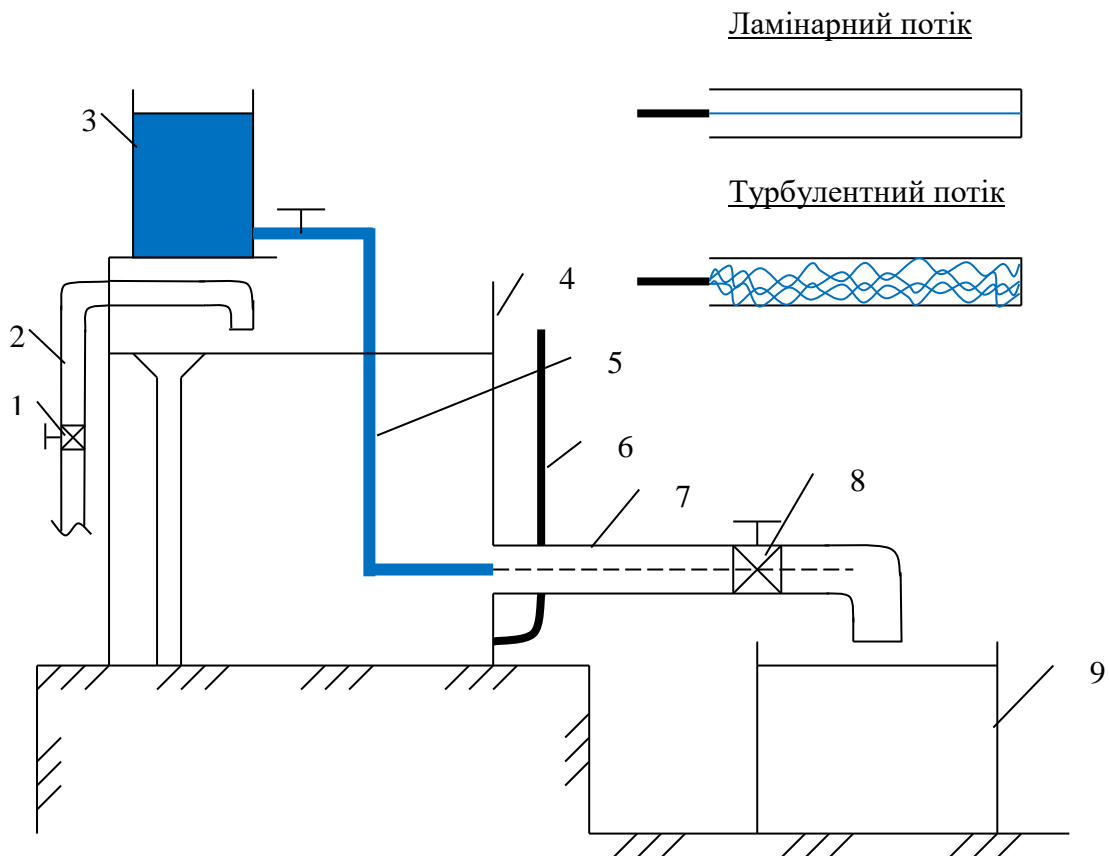


Рисунок 1.1 – Схема лабораторної установки для визначення режиму руху рідини:

*1 – кран; 2 – трубопровід; 3 – ємність з барвником; 4 – резервуар з водою;
5 – гумова трубка; 6 – п'єзометр; 7 – скляна труба; 8 – кран;
9 – приймальний резервуар*

З металевого резервуару (4) виведена скляна труба (7), швидкість руху води регулюється краном (8). Резервуар обладнаний зливним пристроєм для підтримання сталого напору. Зайва вода стікає через переливну трубу (10). Рівень води у резервуарі контролюється за допомогою п'єзометра (6). У верхній частині резервуару (4) закріплена ємність (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), унаслідок 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 ємність (9), увімкнувши секундомір. Коли вода підніметься до потрібного рівня, секундомір вимикають, таким чином фіксуючи об'єм ємності W і час наповнення цього об'єму T . Одночасно з вимірюванням витрати води термометром фіксують температуру води t °C.

5. Повільно відкривають кран (8) і спостерігають за поведінкою підфарбованого струмочку до тих пір, коли струмочок почне коливатися, набуде хвилястості 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 в необхідні графи журналу лабораторних робіт.

Обробка експериментальних даних

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

$$Q = \frac{W}{T} \quad (1.7)$$

2. За витратою води Q і площею її перетину ω визначають середню швидкість:

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (1.8)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (1.9)$$

де d – діаметр скляної трубки.

3. Знаючи температуру води t °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 (1.1) для кожного експерименту обчислюють число Рейнольдса Re .

5. Порівнюють число за формулою (1.1) з критичним числом $Re_{кр} = 2320$ і уточнюють, чи відповідає режим руху, який спостерігається візуально в експерименті.

6. За формулою (1.4) встановлюють критичну швидкість, порівнюють її із середніми швидкостями для кожного експерименту і уточнюють режим руху.

Журнал лабораторної роботи № 1 наведений в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Журнал лабораторної роботи № 1

№ з/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 – поступовий, непоступовий			
6	Візуально спостережуваний режим руху			
7	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с			
8	Площа перерізу труби $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²			
9	Середня швидкість $V = \frac{Q}{\omega}$, см/с			
10	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$, см ² /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 $V_{кр}$			

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
15	Режим руху, що відповідає отриманим співвідношенням: Re і $Re_{кр}$, V і $V_{кр}$			

«_____» _____ 20__ 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 руслу.
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 напору за довжиною по відношенню до швидкості при ламінарному і турбулентному режимі?
9. Навіщо треба знати режим руху?

Лабораторна робота № 2
Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при русі у напірному
трубопроводі

Загальні відомості

Вирішення багатьох завдань гідравліки зводиться до знаходження залежності зміни швидкості потоку за довжиною. Для цього використовують два рівняння гідродинаміки:

1) рівняння нерозривності потоку

$$U_1\omega_1 = U_2\omega_2 = \dots = U_n\omega_n = \text{const} = Q; \quad (2.1)$$

2) рівняння Д. Бернуллі

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{w1-2}. \quad (2.2)$$

Однак ці два рівняння мають три невідомих – швидкість, тиск і 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 до швидкісного напору:

$$\Sigma h_m = \Sigma \xi \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (2.3)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору.

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

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

$$h_w = \Sigma h_l + \Sigma h_m. \quad (2.4)$$

Втрати енергії за довжиною обумовлюють гідравлічним опором за довжиною потоку внаслідок роботи сил тертя. Втрати енергії за довжиною розподіляються рівномірно на ділянках прямолінійного і рівномірного руху і в незначній мірі нерівномірно на ділянках нерівномірного руху. Ці втрати енергії

в чистому вигляді виникають на прямих трубах постійного перетину, тобто при рівномірному русі рідини, зростають пропорційно до довжини труби.

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

$$h_l = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \right). \quad (2.5)$$

Для горизонтальної труби постійного перетину вираз (2.5) буде таким:

$$h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}. \quad (2.6)$$

Втрати за довжиною можна визначити за загальною формулою (2.6), тобто:

$$h_l = \zeta_l \frac{V^2}{2g}, \quad (2.7)$$

де ζ_l – коефіцієнт витрати руху рідини за довжиною труби, що виглядає так:

$$\zeta_l = \lambda \frac{l}{d}. \quad (2.8)$$

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

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (2.9)$$

де λ – 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 λ , від вибору величини якого залежить точність гідравлічних розрахунків.

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ 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 (2.9) і рівняння рівномірного руху:

$$h_l = \frac{\tau_0 l}{\rho g R}, \quad (2.10)$$

де τ_0 – дотичне напруження на стінці труби.

$$\lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{\tau_0 l}{\rho g R}. \quad (2.11)$$

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

$$\lambda = \frac{4\tau_0}{\rho V^2}. \quad (2.12)$$

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

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

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

Склад роботи

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

Опис експериментальної установки

Робота з визначення коефіцієнта гідравлічного тертя на трубі постійного перерізу (рис. 2.1), встановленій горизонтально.

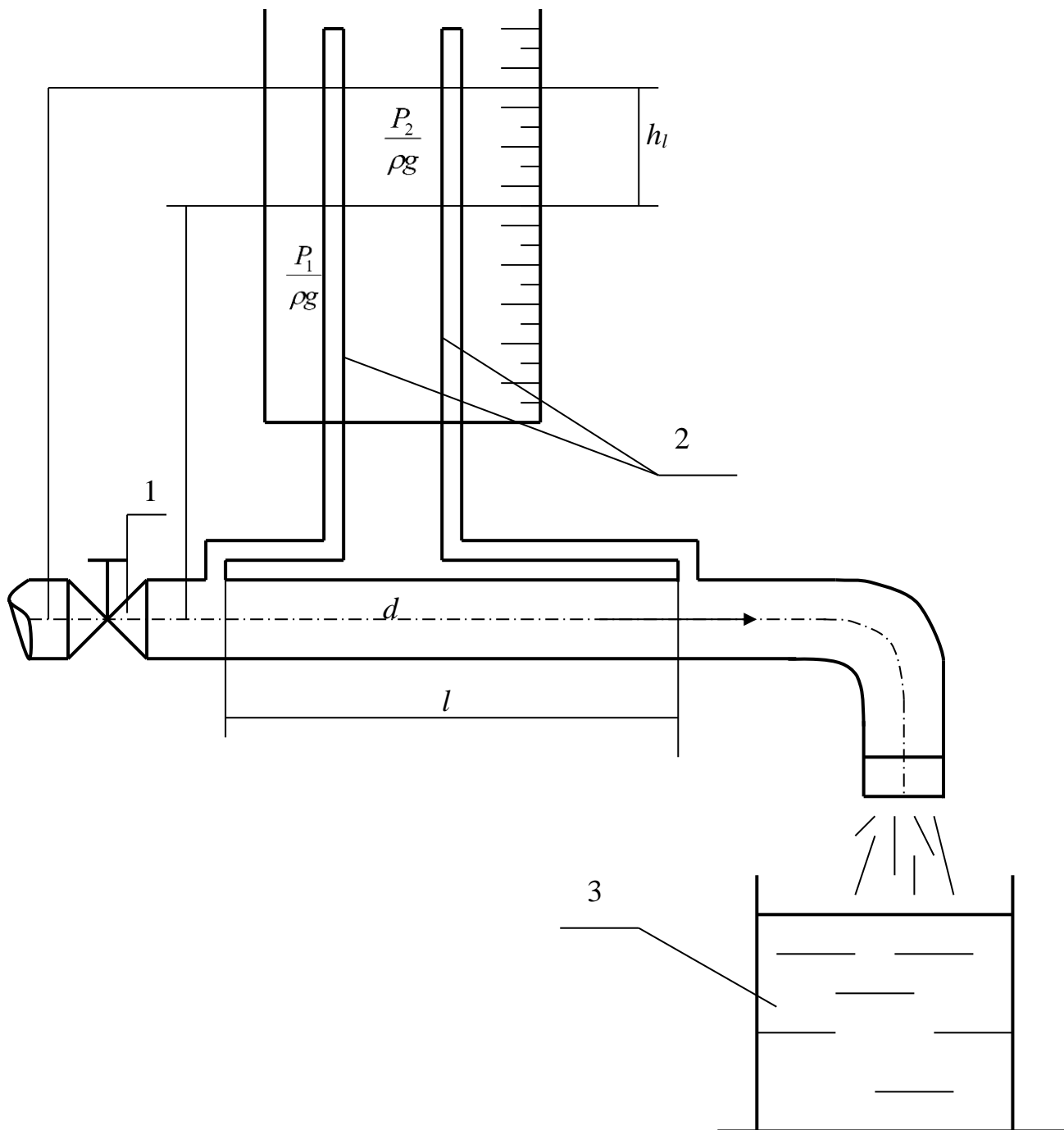


Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки для лабораторної роботи № 2:

1 – вентиль; 2 – п'єзометри; 3 – мірний резервуар

На трубопроводі є два п'єзометри, 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 °С 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 самі 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 ω визначаємо середню швидкість руху води:

$$v = \frac{Q}{\omega}.$$

4. Визначаємо кінематичний коефіцієнт в'язкості ν за температурою води.

5. Маючи значення швидкості та кінематичного коефіцієнта в'язкості ν , обчислюємо Re :

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

6. За різницею показів п'єзометрів визначаємо витрати опору за довжиною трубопроводу за формулою (2.6)

7. Використовуючи формулу Вейсбаха – Дарсі (2.9), обчислюємо експериментальні значення коефіцієнта гідравлічного тертя:

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

8. Залежно від значення числа Рейнольдса визначають коефіцієнт гідравлічного тертя λ за однією або декількома емпіричним формулами, які

наведені в розділі «Загальні відомості», і порівнюють коефіцієнти гідравлічного тертя $\lambda_{\text{екс}}$ та $\lambda_{\text{теор}}$.

Всі результати обчислень записують до журналу (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Журнал лабораторної роботи № 2

№ з/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 T, с						
3	Температура води t °C						
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 ³ /с						
9	Площа перерізу труби $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²						
10	Середня швидкість $V = \frac{Q}{\omega}$, см/с						
11	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$, см ² /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 $\lambda_{\text{екс}} = \frac{2gdh_l}{lV^2}$						

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
15	<p>Коефіцієнт гідравлічного тертя за емпіричними формулами:</p> <p>1. $\lambda_1 = \frac{64}{Re}$</p> <p>2. $\lambda_2 = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$</p> <p>3. $\lambda_3 = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg Re - 1,51)^2}$</p>			
16	Висновки:			

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Які ви знаєте втрати напору та 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 гідравлічно гладкі й гідравлічно шорсткі труби? Чому це поняття умовне?
6. Які фактори впливають на коефіцієнт гідравлічного тертя при ламінарному і турбулентному рухові у гідравлічно гладких трубах, у перехідній зоні опору та гідравлічно шорстких трубах?
7. Який фізичний зміст коефіцієнта гідравлічного тертя?
8. За якими факторами можна визначити коефіцієнт гідравлічного тертя?

Лабораторна робота № 3 **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, в 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 (рис. 3.1), засувки, крани), необхідність встановлення яких викликана умовами споруди і експлуатації трубопроводів.

Місцеві опори викликають зміни швидкості руху рідини або за значенням (розширення і звуження), або за напрямом (коліна). У всіх випадках наявний 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):

$$h_l = \xi \frac{V^2}{2g}. \quad (3.1)$$

Це формула Ю. Вейсбаха, де ξ – коефіцієнт місцевого опору. Величина його залежить від виду місцевого опору, числа Рейнольдса і частково 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 ξ_m знайти можна теоретично (раптове розширення або звуження трубопроводу). У більшості випадків ξ_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 і пропорційний швидкості в першому ступені. Коефіцієнт опору в цьому випадку зворотно пропорційний числу Рейнольдса:

$$\xi_m = \frac{A}{\text{Re}}, \quad (3.2)$$

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

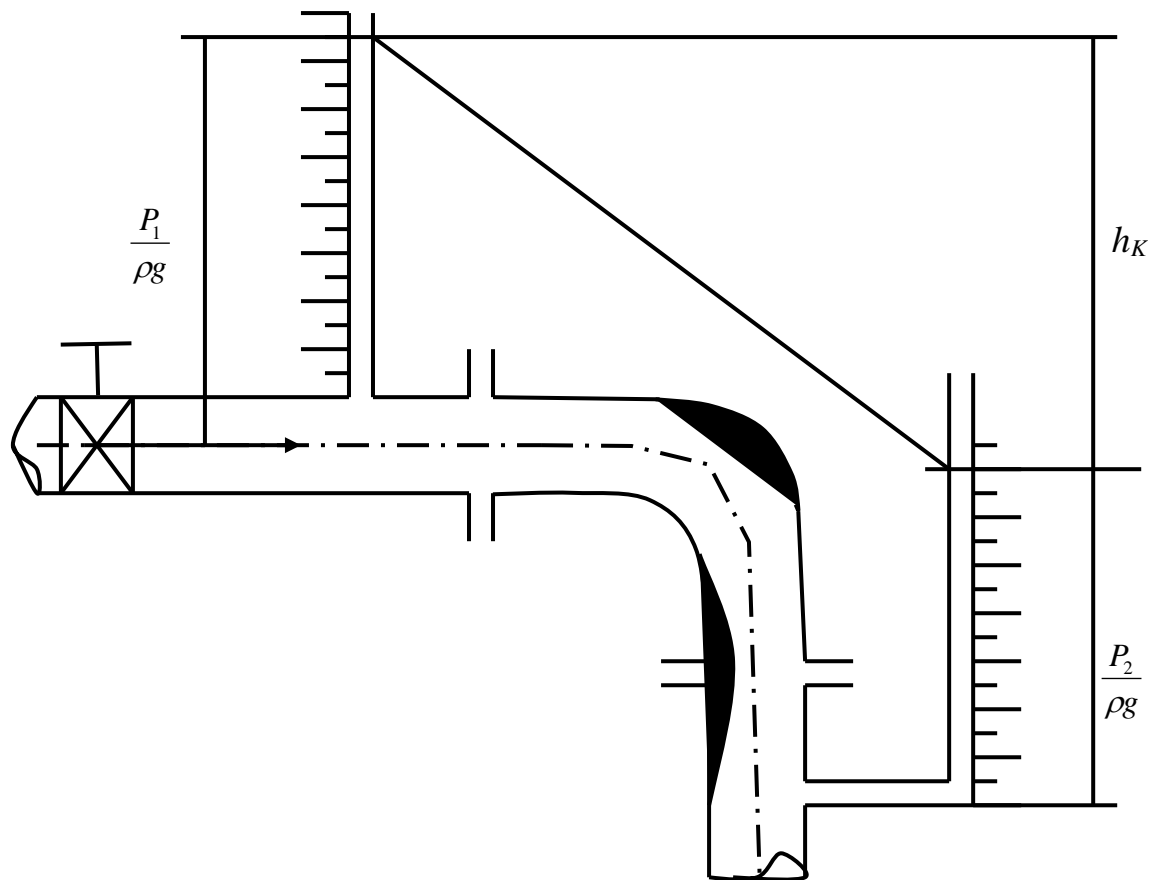


Рисунок 3.1 – Експериментальна установка для визначення місцевих опорів у коліні

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 ξ_m зростають. Це явище пояснюється виникненням вихроутворень у 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 ξ_m не залежить від значень Re , якщо $Re \geq 3\,000$, але при плавних переходах $Re > 1\,000$.

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

$$\xi_m = \frac{A}{Re} + \xi_{m.кв.}, \quad (3.3)$$

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

Склад роботи

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів місцевих опорів: поворот труби на кут 90° .
2. Порівняння отриманих експериментальних значень ξ_m з довідковими.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 3.2) складається з трубопроводу, який підводить воду до установки, регулюючого крана і повороту. Краном установлюють рівень води в п'езометрах 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 (6) відкритий.
2. Відкриттям вентиля (2) виганяють повітря з трубопроводу та п'езометрів і встановлюють потрібну витрату води.
3. Після того як рух у трубі буде сталим, що підтвердиться сталим рівнем води в п'езометрах, 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 ω знаходимо середню швидкість руху води

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

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:

$$E = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (3.4)$$

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

$$h_M = E_1 - E_2. \quad (3.5)$$

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

$$h_M = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}\right). \quad (3.6)$$

6. За формулою (3.1) обчислюємо експериментальні значення коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\xi_M = \frac{2gh_M}{V^2}. \quad (3.7)$$

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

Всі результати вимірювань вносимо до журналу лабораторної роботи № 3 (табл. 3.1).

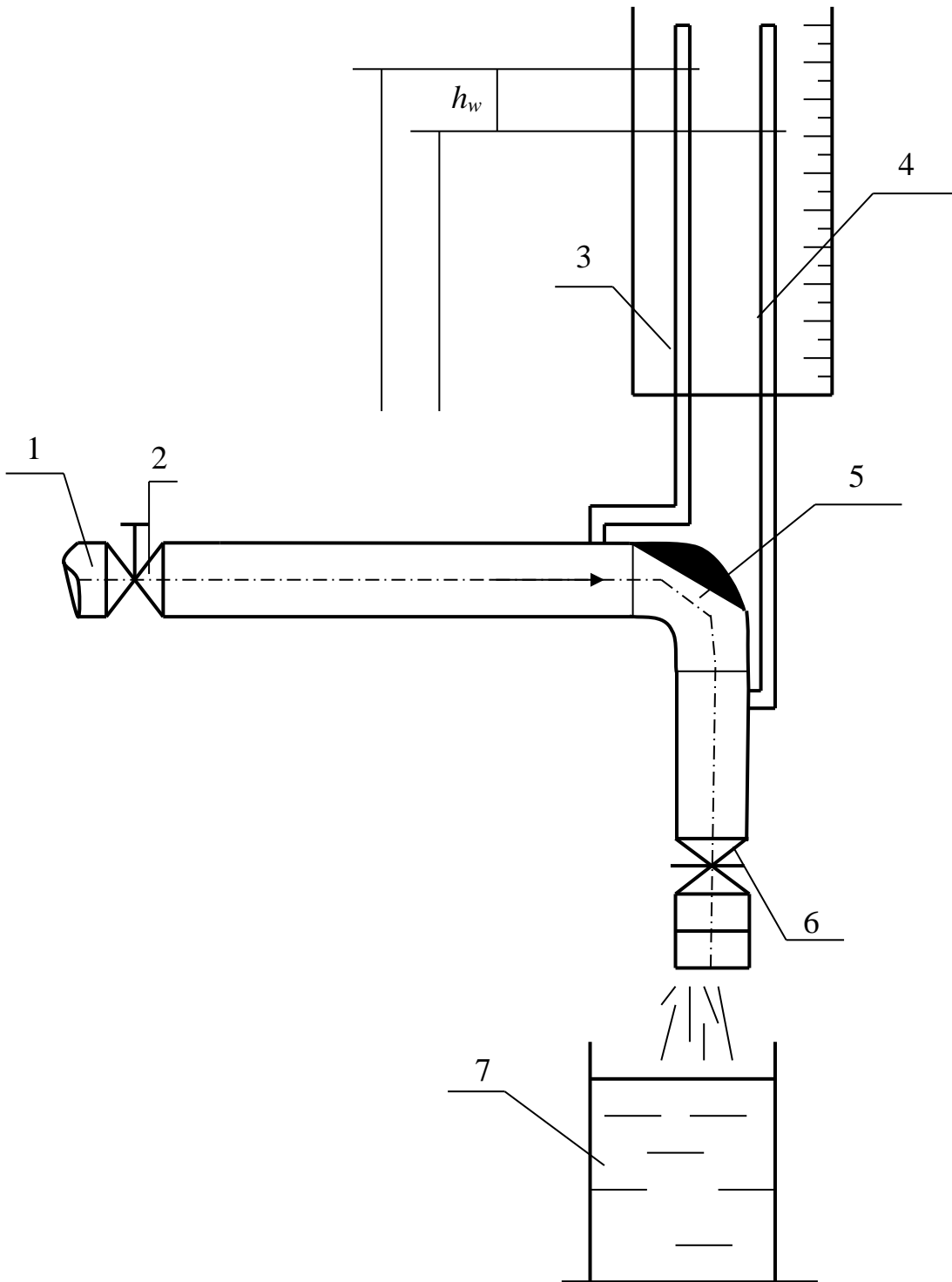


Рисунок 3.2 – Схема установки для експериментального визначення коефіцієнтів місцевого опору:
 1 – трубопровід; 2 – вентиль; 3, 4 – п'езометри; 5 – коліно (поворот);
 6 – вентиль; 7 – приймальний резервуар

Таблиця 3.1 – Журнал лабораторної роботи № 3

№ з/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 T, 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 ³ /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 ²						
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 $E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g}$; $E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}$, см						
11	Величина місцевих втрат напору $h_M = E_1 - E_2$, см						

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5
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:			

«_____» _____ 20__ р.

(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 № 4
Визначення втрат опору при раптовому розширенні
або звуженні трубопроводу

Загальні відомості

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

Місцеві опори спричиняють змінювання 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

$$h_m = \alpha_0 \cdot \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}, \quad (4.1)$$

де α_0 – коефіцієнт, що відображає відношення дійсної кількості руху маси до кількості руху, який відповідає середній швидкості.

$$\alpha_0 = \frac{\int \omega V_i^2 d\omega}{\omega V^2} \quad (4.2)$$

де V_1 – швидкість у трубі до розширення;

V_2 – швидкість у трубі після розширення.

Значення коефіцієнта α_0 приймають рівним 1,035.

Якими ж є 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 (рис. 4.1).

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:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (4.3)$$

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

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (4.4)$$

Звідси втрати напору при раптовому розширенні :

$$h_w = \frac{\alpha(V_1^2 - V_2^2)}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (4.5)$$

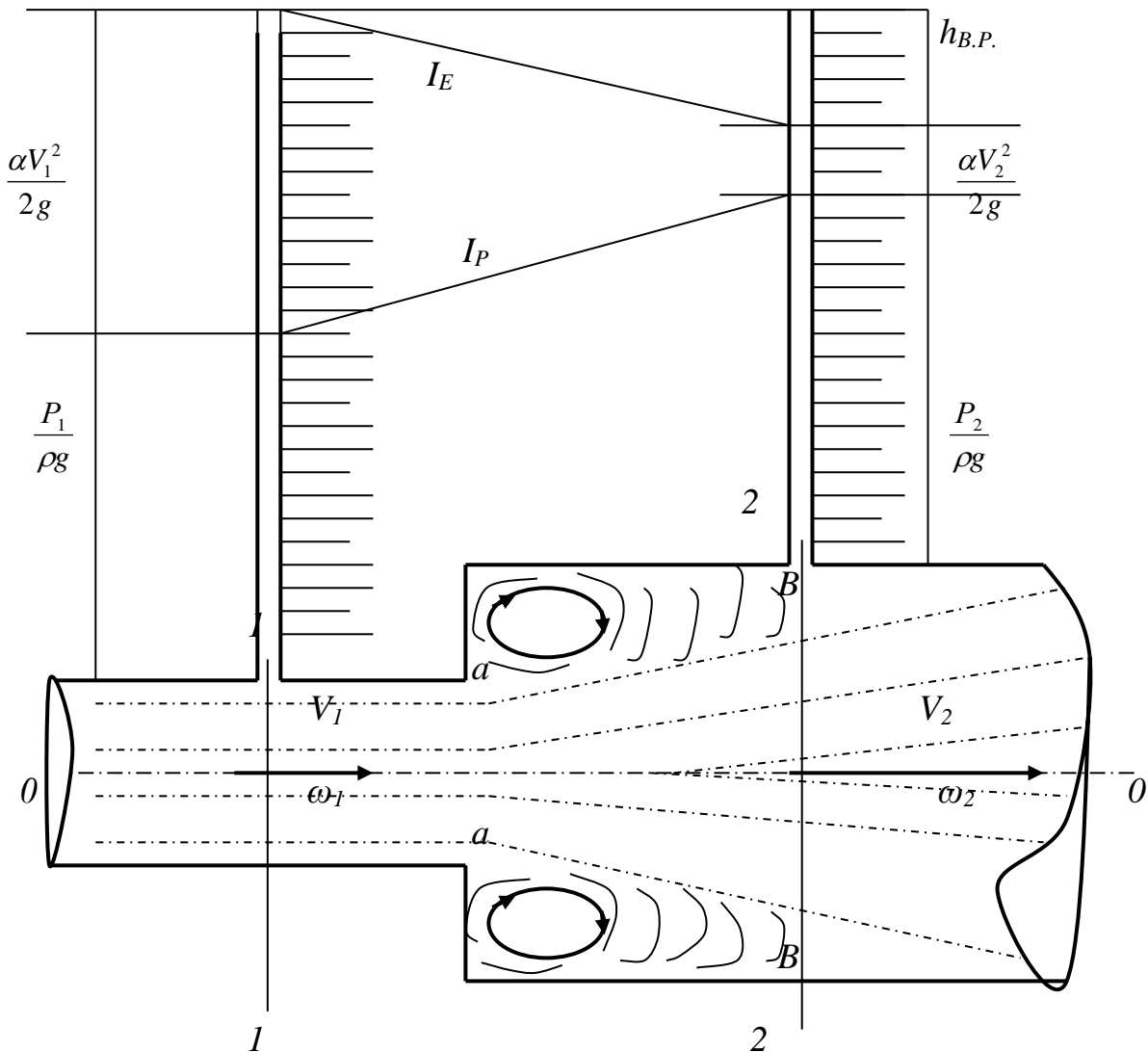


Рисунок 4.1 – Схема розподілу потоку у разі раптового розширення трубопроводу

Склад роботи

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

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 4.2) складається з двох послідовно з'єднаних труб – (5), (7) різного діаметра. На трубопроводі є місцеві опори – раптове розширення і раптове звуження. На кожному місцевому опорі встановлено по два п'єзометри – 1-2, 3-4. П'єзометри виведені на п'єзометричний щит, нуль кожного співпадає з площиною порівняння 0-0, яка розміщується на осі нижньої частини труби. Для регулювання витрати води на трубопроводі встановлено вентилі (6) і (8).

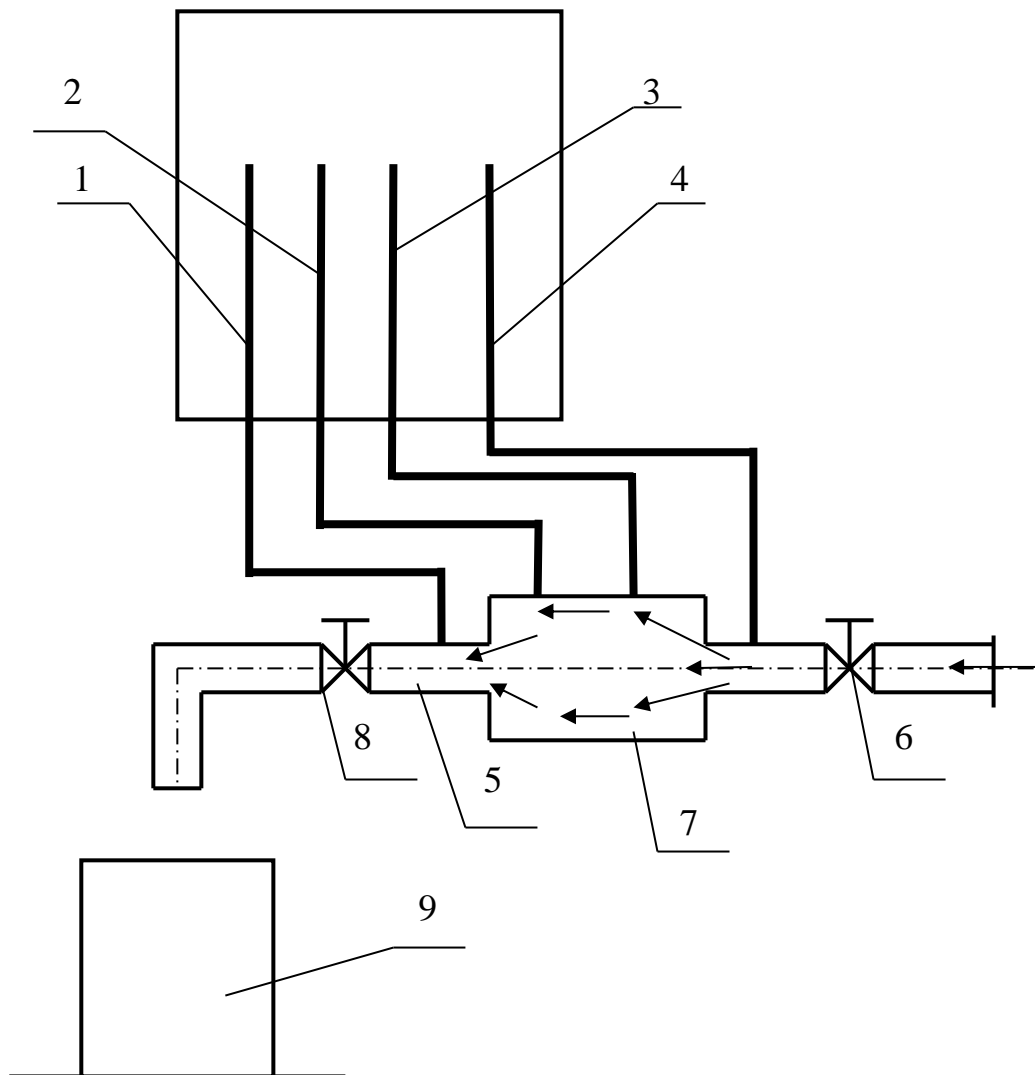


Рисунок 4.2 – Схема лабораторної установки:
1-4 – п'єзометри; 5, 7 – трубопроводи різного діаметру; 6, 8 – вентилі;
9 – накопичувальний бак

Порядок проведення роботи

1. До початку виконання лабораторної роботи установку розміщують в робочому положенні. При цьому вентиль (6) повинен бути закритий, а вентиль (8) відкритий.

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

3. Після того як рух в 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. По об'єму води W та за часом T визначаємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T} \quad (4.6)$$

2. За витратою Q та площиною живого перерізу ω визначаємо середню швидкість руху води

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{\omega_2}, \quad (4.7)$$

де

$$\omega_{1,2} = \frac{\pi \cdot d_{1,2}^2}{4}. \quad (4.8)$$

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

$$h_v = \alpha_0 \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}. \quad (4.9)$$

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

$$h_w = \alpha_0 \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma}. \quad (4.10)$$

5. Зіставляючи отримані значення, визначаємо у процентах похибку:

$$\Delta = \frac{h_v - h_w}{h_w} \cdot 100\%. \quad (4.11)$$

Отримані при вимірюванні параметри вносимо до Журналу лабораторної роботи № 4 (табл. 4.1–4.2).

Таблиця 4.1 – Журнал лабораторної роботи № 4 (частина 1)
Раптове розширення

№ з/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 T, с						
3	Діаметр труби: – до опору d_1 , мм; – за опором d_2 , мм	20 80		20 80		20 80	
4	Номери перерізу (п'єзометрів)	1	2	1	2	1	2
5	Питома потенційна енергія (показання п'єзометрів), см						
6	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /сек						
7	Площа живих перерізів трубопроводу $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$, см ²						
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						

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
12	Величина місцевих втрат напору за теоретичною формулою: $h_v = \frac{\alpha_0(V_1 - V_2)^2}{2g} \cdot 10, \alpha_0 = 1,035$			
13	Визначаємо похибку в процентах $\Delta = \frac{h_v - h_m}{h_m} \cdot 100\%$			
14	Висновки:			

Таблиця 4.2 – Журнал лабораторної роботи № 4 (частина 2)
Раптове звуження

№ з/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 T, с						
3	Діаметр труби: – до опору d_1 , мм; – за опором d_2 , мм	80 20		80 20		80 20	
4	Номери перерізу (п'єзометрів)	1	2	1	2	1	2
5	Питома потенційна енергія (показання п'єзометрів), см						
6	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /сек						
7	Площа живих перерізів трубопроводу $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$, см ²						
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						

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
10	Повна питома енергія у перерізах $E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g};$ $E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}, \text{ см}$			
11	Величина місцевих втрат напору $h_M = E_1 - E_2$, см			
12	Величина місцевих втрат напору за теоретичною формулою: $h_v = \xi \cdot \frac{V_2^2}{2g} = 0,475 \cdot \frac{V_2^2}{2g} \cdot 10$			
13	Визначаємо похибку в процентах $\Delta = \frac{h_v - h_w}{h_w} \cdot 100\%$			
14	Висновки:			

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Назвіть причину 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 ξ можна визначати теоретично?
6. Запишіть і розшифруйте формулу Вейсбаха для визначення втрат напору в місцевих опорах. До якого перерізу належить швидкість V до опору, в самому опорі або поза ним?

Лабораторна робота № 5
Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні
рідини через отвір при сталому напорі

Загальні відомості

У гідротехніці та інших областях народного господарства зазвичай 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 областях техніки зустрічаються завдання, при яких рідина витікає через різні за формою і розмірами отворів.

Зважаючи на велике практичне завдання, витікання рідини через отвір вивчали видатні вчені: широко відомі експерименти учнів Галілея – Кастеллі й Торічеллі (1643 р.), які вивчали швидкість витікання рідини через отвір. Д. Бернуллі вирішував завдання щодо встановлення швидкості витікання рідини через отвір і вивів своє рівняння.

Після цього інженери й науковці виконали багато робіт щодо витікання рідини через отвір. Складність процесу витікання через отвір пояснюється тим, що теорії витікання з отвору ще не існує, 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 створу), утворюється стиснутий переріз (рис. 5.1). Площа стиснутого перерізу струменя ω_c менша, ніж площа отвору ω . Стискання струменя характеризується коефіцієнтом стискання E , є відношення площі стиснутого перерізу ω_c до площі отвору ω .

$$E = \frac{\omega_c}{\omega} \quad (5.1)$$

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 (рис. 5.2). Це явище виникає під дією сил поверхневого натягу на струмінь, що витікає.

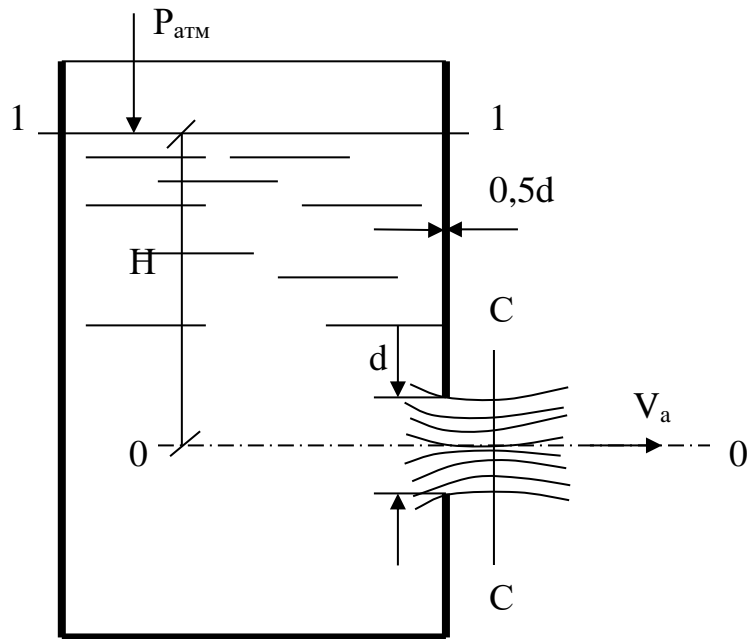


Рисунок 5.1 – Схема витікання струменя через тонку стінку

Якщо використати рівняння Бернуллі й написати його для двох перерізів, один з яких (1-1) співпадає з вільною поверхнею рідини в резервуарі, а другий (С-С) – зі стиснутим перерізом, за площину порівняння вибираємо площину (0-0), що проходить через центр ваги отвору (рис. 5.2), тоді при витіканні в атмосферу через малий отвір у тонкій стінці отримуємо такі розрахункові формули:

$$V = \varphi \sqrt{2gH} , \quad (5.2)$$

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} , \quad (5.3)$$

де V – середня швидкість у сталому перерізі струменя;

g – прискорення сили ваги;

H – напір над центром ваги отвору;

Q – витрата;

ω – площа отвору;

μ – коефіцієнт витрати, що дорівнює добутку коефіцієнта стискання і коефіцієнта швидкості:

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi , \quad (5.4)$$

φ – коефіцієнт швидкості, що визначається за формулою

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} , \quad (5.5)$$

ξ – коефіцієнт опору.

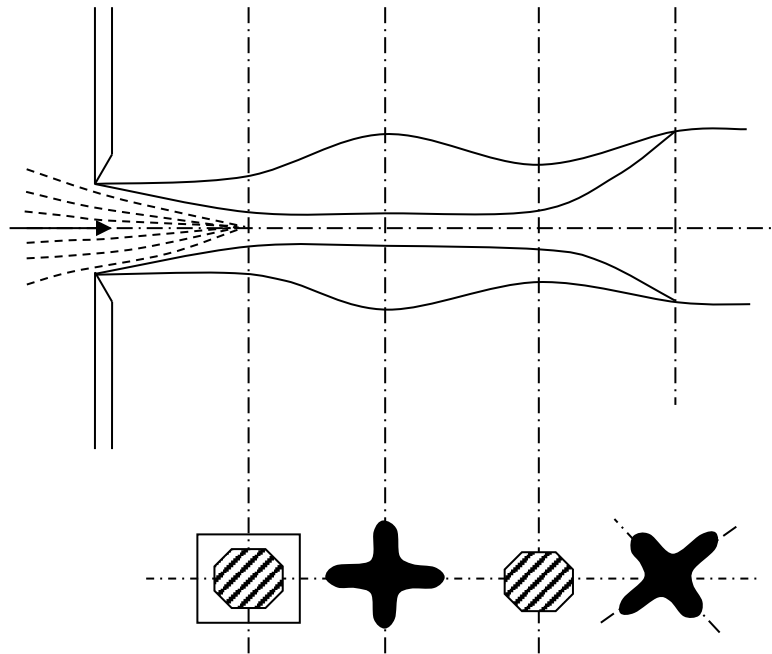


Рисунок 5.2 – Схема зміни форми поперечного перерізу струменя за довжиною

Фізичний зміст коефіцієнта витрати та його числове значення можна знайти за формулою

$$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}, \quad (5.6)$$

а коефіцієнт витрати можна визначити як співвідношення дійсної витрати до теоретичної.

Аналогічно може бути встановлений фізичний зміст коефіцієнта швидкості:

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}}, \quad (5.7)$$

де φ – характеризує зменшення дійсної швидкості V витікання в'язкої рідини у порівнянні з теоретичною $V_{теор}$ невіязкої рідини, яка визначається за формулою Торічеллі:

$$V_{теор} = \sqrt{2gH}. \quad (5.8)$$

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

$$x = V \cdot t, \quad (5.9)$$

$$y = \frac{gt^2}{2}, \quad (5.10)$$

де x і y – координати довільної точки струменя відносно початку координат, який співпадає з центром ваги стислого перерізу (рис. 5.1);

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

Виключаючи з рівнянь (5.9) і (5.10) час t , отримаємо:

$$V = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y}}. \quad (5.11)$$

Підставляючи значення V з рівняння (5.11) у рівняння (5.7), маємо:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}. \quad (5.12)$$

Визначивши таким чином φ , можна з рівняння (5.5) знайти коефіцієнт опору ξ :

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (5.13)$$

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

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

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

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

Склад роботи

1. Визначити експериментальним шляхом коефіцієнти витрати, швидкості, стискання та опору при витіканні з отвору в тонкій стінці й порівняти ці коефіцієнти з довідковими.

2. Спостереження явища інверсії струменя, що витікає з отворів різної форми.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 5.3) 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 співпадає зі стислим перерізом струменя.

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

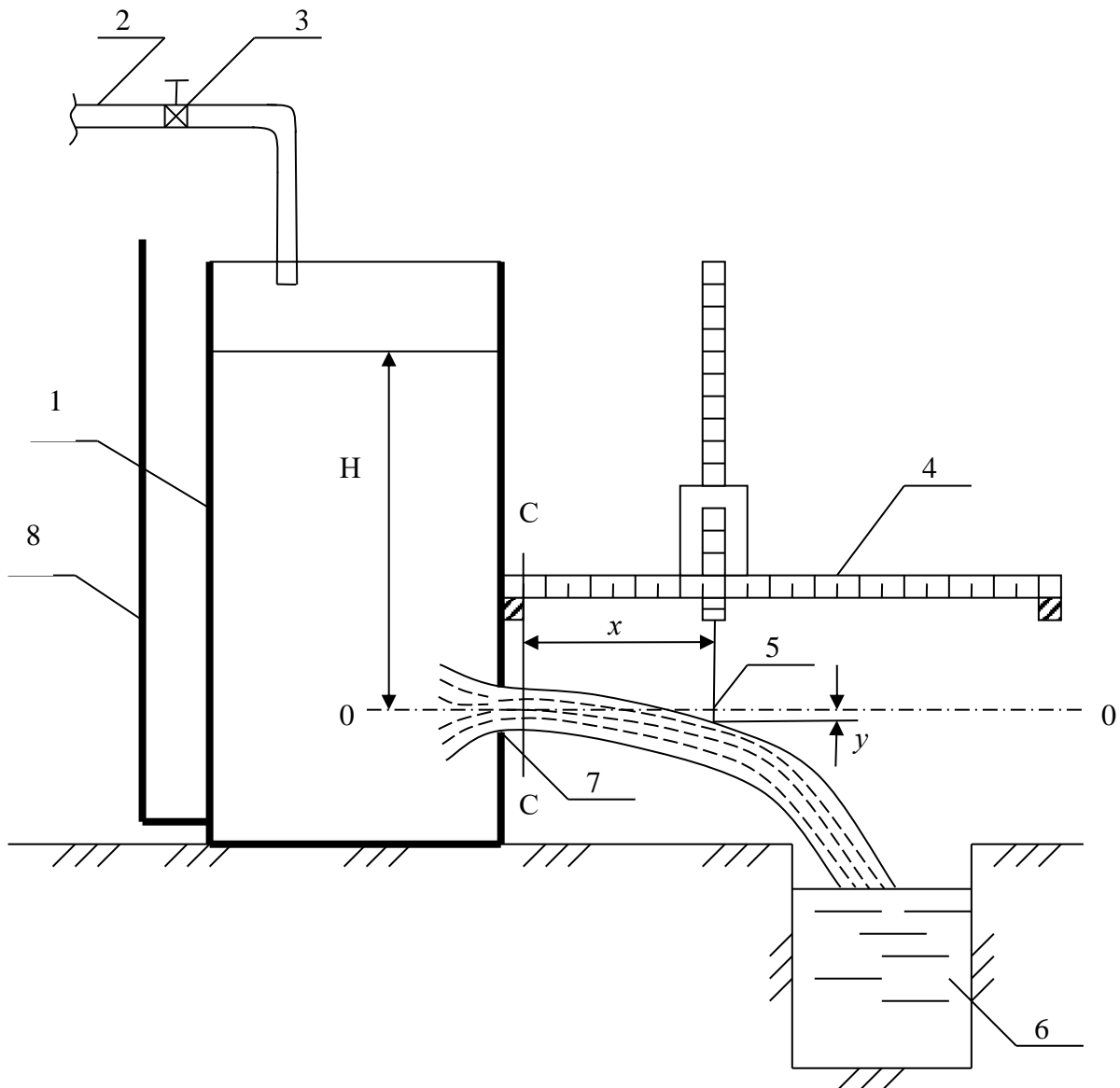


Рисунок 5.3 – Схема експериментальної установки для лабораторної роботи № 4:

1 – резервуар; 2 – трубопровід подачі води; 3 – вентиль;
4 – горизонтальна рейка зі шкалою; 5 – мірна голка;
6 – вимірний резервуар; 7 – отвір; 8 – п'єзометр

Порядок проведення роботи

1. Вимірюємо діаметр d , а для некруглих отворів – розміри поперечного перерізу і приєднуємо отвір до торцевої стінки патрубку.

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 стисненому 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 почергово отвори, спостерігаємо явище інверсії струменя при витіканні з отвору різної форми.

Обробка експериментальних даних

1. Визначення площини перерізу отвору:

а) круглого $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$; (5.14)

б) не круглого $\omega = a \cdot b$, (5.15)

де b – ширина прямокутного отвору;

a – висота прямокутного отвору;

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

$$\omega_c = \frac{\pi ab}{4}. \quad (5.16)$$

3. Знаходимо коефіцієнт стискання струменя за формулою (5.4):

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

4. За отриманими замірами обчислюємо витрату:

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

5. За формулою (5.3) обчислюємо коефіцієнт витрати отвору μ :

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

6. Визначаємо коефіцієнт швидкості рідини з отвору з урахуванням співвідношення (5.4), як

$$\varphi = \frac{\mu}{E}, \quad (5.17)$$

і за рівнянням (5.1), співставляємо отримані значення.

7. Обчислюємо коефіцієнт опору отвору ξ за формулою (5.13):

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

8. За рівнянням (5.2) знаходимо дійсну середню швидкість у стисненому перерізі, а за рівнянням (5.8) – швидкість без урахування опору – теоретичну швидкість у цьому ж перерізі.

9. За співвідношенням швидкостей за формулою (5.7) знову обчислюємо коефіцієнт швидкості φ і співставляємо його значення з коефіцієнтом швидкості, який знаходимо за формулами (5.7) та (5.12).

10. Обчислюємо експериментальним шляхом коефіцієнти μ , φ , E та ξ і співставляємо їх із довідковими.

Результати вимірювань та відповідні розрахунки вносимо до журналу лабораторної роботи № 5 (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Журнал лабораторної роботи № 5

№ з/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
1	2	3
1	Діаметр круглого отвору d , мм	
2	Площа перерізу круглого отвору $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²	
3	Розміри прямокутного (квадратного) отвору: – висота отвору a , мм; – ширина отвору b , мм	
4	Площа перерізу прямокутного (квадратного) отвору $\omega = a \cdot b$, см ²	
5	Напір, під яким відбувається витікання H_0 , м	
6	Об'єм води, що надходить до мірного 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 стиснутому перерізі отвору $\omega_c = \frac{\pi ab}{4}$, см ²	
10	Коефіцієнт стискання струменя, що витікає з отвору $E = \frac{\omega_c}{\omega}$	
11	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /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	

Продовження таблиці 5.1

1	2	3
14	Коефіцієнт швидкості отвору: – із співвідношення $\varphi = \frac{\mu}{E}$; – із 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 стиснутому 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:	

«_____» _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Який гідравлічний зміст має назва «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 μ , φ , E і ξ при витіканні з отвору в тонкій стінці?
5. Який фізичний зміст коефіцієнтів μ і φ ?
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 φ ?
9. Напишіть формулу пропускну здатності отвору.

Лабораторна робота № 6
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 насадки). Насадки діляться на три типи: циліндричні, конічні й коноїдальні (рис. 6.1).

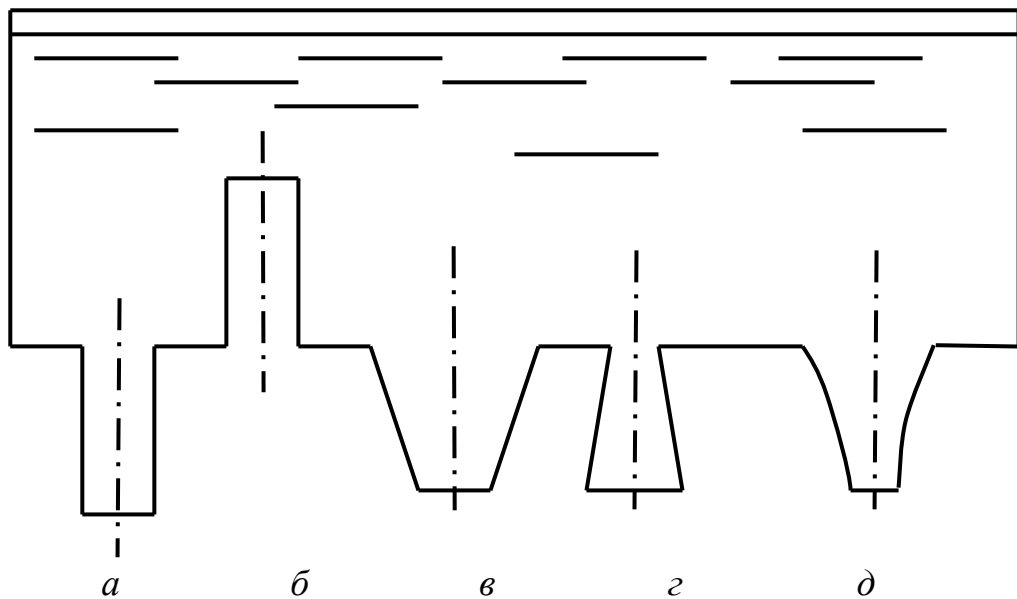


Рисунок 6.1 – Типи насадків:

*a – зовнішня циліндрична насадка; б – внутрішня циліндрична насадка;
в – насадка конічно збіжна; г – насадка конічно розбіжна;
д – коноїдальна насадка*

В інженерній практиці зустрічаються різноманітні типи насадків: зовнішня циліндрична насадка, або Вентурі (рис. 6.1, а), яка становить пряму циліндричну трубку $(3,5-7)d$ завдовжки, приставлену із зовнішнього боку стінки без закруглення вхідної кромки.

Внутрішня циліндрична насадка, або насадка Борда (рис. 6.1, б). Якщо до отвору зсередини резервуару підімкнути коротку трубку не менше $(3,5-4)d$ завдовжки, то такий насадок теж збільшує пропускну здатність. За даними дослідів, для внутрішнього циліндричного насадка $\varphi = \mu = 0,71$.

Конічно збіжний насадок (конфузорний насадок) (рис. 6.1, в). У таких насадках рідина при виході також стискається, але менше.

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

Конічно розхідні насадки (дифузорні насадки) (рис. 6.1, 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 φ і μ змінюються в межах 0,45 – 0,5, що свідчить про відносно невеликі швидкості на виході.

Коноїдальні насадки (рис. 6.1, д). При таких насадках завдяки плавним умовам входу в насадок 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 (рис. 6.2) можна одержати розрахункові формули швидкості й витрати, для яких так само, як і при витіканні з отвору застосовуємо формули (5.2) та (5.3) з лабораторної роботи № 5,

де H – напір над центром ваги насадка;

ω – площа вихідного перерізу насадка;

μ – коефіцієнт витрати насадка;

φ – коефіцієнт швидкості насадка.

Якщо насадок визначається для вихідного отвору, коли $E = 1$, то за формулою (5.4) коефіцієнт витрати насадка дорівнює коефіцієнту швидкості:

$$\mu = E \cdot \varphi = 1 \cdot \varphi = \varphi. \quad (6.1)$$

Якщо в перерізі С–С швидкість більша, ніж на вихідному перерізі насадка ($V_c > V$), то за рівнянням Д. Бернуллі тиск у стиснутому перерізі буде менший від атмосферного ($P < P_{атм}$), тобто в стиснутому перерізі утворюється вакуум. Якщо до насадка в стиснутому перерізі підімкнути вакуум, то висота піднятої рідини $h_{вак} = 0,75H$ (рис. 6.2).

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

Якщо трубка вакуумметра буде коротшою, ніж $h_{вак}$, то насадок почне «підсмоктувати» рідину з вакуумметра. На цьому явищі заснована дія водострумних насосів.

При напорах, більших за граничні (для води $H_{пред} \approx 13$ м), у 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 призначення.

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

Склад роботи

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів витрати, швидкості, стискання та опору при витіканні рідини через насадок і порівняння цих коефіцієнтів із довідковими.

2. Вимірювання величини вакууму в зовнішньому циліндричному насадку, спостереження за зривом вакууму.

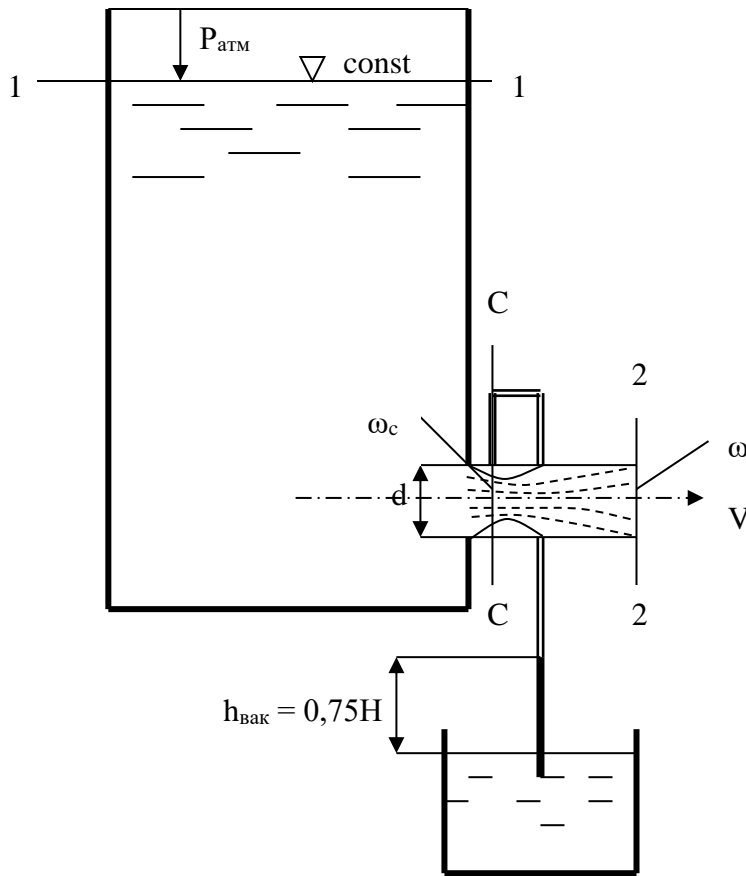


Рисунок 6.2 – Схема витікання рідини через насадок

Опис експериментальної установки

Дослідна установка (рис. 6.3) складається з напірного резервуара (7) і вимірного резервуару (4). Надходження води у напірний резервуар регулюється за допомогою крана (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'езометром (6).

Порядок виконання роботи

1. Вимірюємо діаметри вхідного d_1 і вихідного d_2 отворів насадків.
2. Відкриванням крана (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 (3) і таким чином з'єднують зону пониженого тиску з атмосферою, що приводить до зриву вакууму. Для відновлення вакууму надівають гумову трубку на штуцер і на деякий час перекривають вихідний отвір насадка.

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

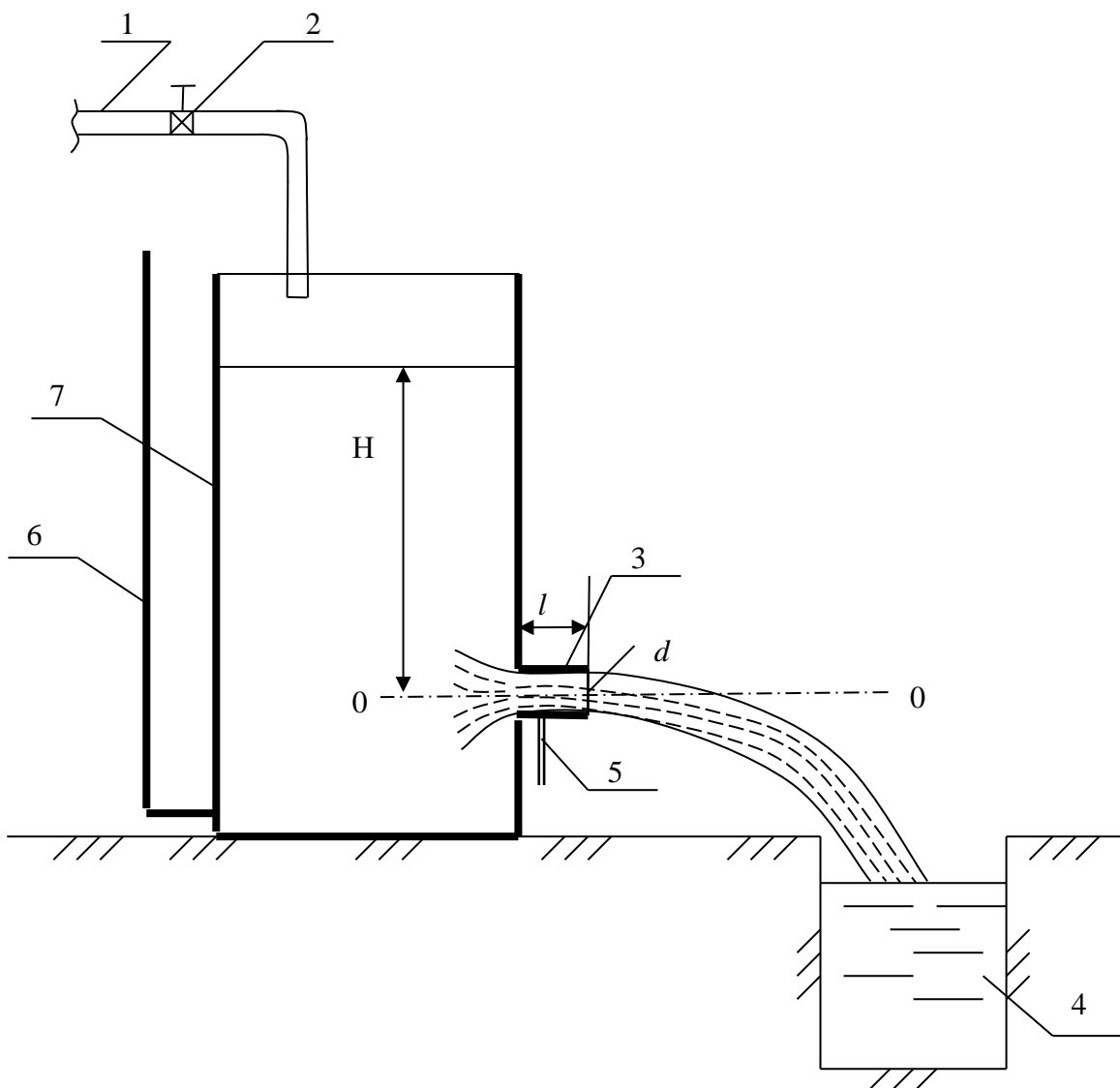


Рисунок 6.3 – Схема експериментальної установки для лабораторної роботи № 6:

1 – труба; 2 – вентиль; 3 – насадок; 4 – вимірний резервуар; 5 – штуцер для приєднання вакуумметра; 6 – п'єзометр; 7 – напірний резервуар

Обчислення дослідних даних

1. Визначаємо площину перерізу насадка на вході ω_1 та на виході ω_2 :

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ і } \omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}, \quad (6.2)$$

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:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}. \quad (6.3)$$

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

$$P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}. \quad (6.4)$$

5. Отримані з дослідів значення φ , μ , ξ та $h_{\text{вак}}/H$ співставляємо з довідковими.

Усі результати вимірювань і обчислення записуємо до лабораторного журналу (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Журнал лабораторної роботи № 6

№ з/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
1	2	3
1	Довжина насадка l , см	
2	Діаметр насадка: – на вході d_1 , мм; – на виході d_2 , мм	
3	Площа перерізу насадка: – на вході $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$, см ² ; – на виході $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$, см ²	
4	Напір, під яким відбувається витікання H_0 , м	
5	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час W , л	
6	Тривалість витікання T , с	
7	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с	
8	Коефіцієнт витрати насадка $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	

Продовження таблиці 6.1

1	2	3
9	Середня швидкість у швидкісному перерізі насадка $V = \frac{Q}{\omega_2}$, см/с	
10	Коефіцієнт швидкості насадка $\mu = \frac{V}{\sqrt{2gH}}$	
11	Значення вакууму на вході в насадок $h_{\text{вак}}$, см	
12	Відношення $h_{\text{вак}} / H$	
13	Вакуумметричний тиск на вході в насадок $P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}$	
14	Висновки:	

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Який отвір називають малим?
2. У яких умовах струмінь буде перебувати в умовах неповного стискання, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого при витіканні з насадка?
3. Які числові значення мають коефіцієнти μ , φ , E і ζ при витіканні з насадків різної форми?
4. Який фізичний зміст коефіцієнтів μ та φ ?
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 φ при витікання рідини через насадки?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : Вища школа, 2002. – 358 с.
2. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу / І. І. Науменко. – Рівне : Видавництво РДТУ, 2000. – 528 с.
3. Науменко І. І. Гідравліка. Підручник / І. І. Науменко. – Рівне : НУВГП, 2005. – 475 с.
4. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / В. В. Луценко. – Електрон. текст. дані. – Рівне : НУВГП, 2008. – 127 с. – Режим доступу: <http://ep3.nuwm.edu.ua/5602/>, вільний (дата звернення 12.04.2024). – Назва з екрана.
5. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу в тестах і задачах [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / В. В. Луценко. – Електрон. текст. дані. – Рівне : НУВГП, 2015. – 194 с. – Режим доступу: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4033/>, вільний (дата звернення 10.05.2024). – Назва з екрана.
6. Hydraulics. Hydraulics machines / E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński, A. Dashchenko S. Sosnowski. – Lublin : Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.
7. Іванчук Я. В. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи. Частина 1. Основні закони, рівняння і визначення : навч. посіб. / Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 183 с. – Режим доступу: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Ivanchuk_P1_2019_183.pdf, вільний (дата звернення 12.06.2024). – Назва з екрана.
8. Гідравліка : навч. посіб. / Е. І. Альтман, І. Л. Бошкова. – Одеса : ФОП Бондаренко М.О., 2020. – 210 с.
9. Константинов Ю. М. Задачник з гідравліки : навч. посіб. / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : КНУБА, 2008. – 92 с.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
для проведення лабораторних занять
із навчальної дисципліни

«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИНИ ТА ГАЗУ»

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології)

Укладач **ШЕВЧЕНКО** Тамара Олександрівна

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *Т. О. Шевченко*

План 2023, поз. 465М

Підп. до друку 20.06.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,7.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

№ ДК 5328 від 11.04.2017.