МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра теплотехніки і теплових двигунів

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

„*ГІДРОГАЗОДИНАМІКА*”

Харків – 2014

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри теплотехніки та теплових двигунів 24 березня 2014 р., протокол № 14.

У методичних вказівках наведено загальні положення до виконання лабораторних робіт, правила техніки безпеки, стисле викладення сутності питань, основні розрахункові формули, описи лабораторних установок, порядок виконання робіт та контрольні питання.

Рекомендуються для студентів напряму 6.050601 «Теплоенергетика» денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доценти С.В. Комар,
Г.В. Біловол

Рецензент

доц. С.В. Угольніков

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

„*ГІДРОГАЗОДИНАМІКА*”

Відповідальний за випуск Комар С.В.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 14.04.14 р.

Формат паперу 60х84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,5. Тираж 25. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ЗМІСТ

Загальні положення до виконання лабораторних робіт ….. 4
Правила техніки безпеки для студентів, які виконують лабораторні роботи …….. 5
Лабораторна робота 1. Тиск та прилади для його вимірювання ……. 6
Лабораторна робота 2. Рівняння Бернуллі. Побудова повного і п’єзометричного напорів …… 18
Лабораторна робота 3. Тарування витратоміра …… 25
Лабораторна робота 4. Визначення середньовитратної швидкості повітря в циліндричній трубі при різних опорах на виході …… 31
Лабораторна робота 5. Визначення режимів руху рідини в циліндричній трубі ……..……. 37
Лабораторна робота 6. Визначення коефіцієнта втрат на тертя по довжині трубопроводу …….. 42
Лабораторна робота 7. Визначення коефіцієнтів місцевих втрат при звуженні каналу та при встановленні вентиля ……. 48
Лабораторна робота 8. Визначення коефіцієнта витрати при витіканні рідини через отвори та насадки ……. 55
Список літератури …… 61

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Методичні вказівки призначені для поглиблення і закріплення теоретичних знань студентів, одержання ними навичок проведення досліджень і аналізу результатів експерименту.

До початку виконання лабораторних робіт кожен студент зобов'язаний ознайомитися з основними правилами безпеки та пройти інструктаж з техніки безпеки на кафедрі ТТД.

Тематика лабораторних робіт на кожне заняття оголошується студентам заздалегідь. До початку виконання лабораторної роботи вони повинні ознайомитися з основними теоретичними положеннями, змістом і методикою виконання роботи, вивчити лабораторний стенд, а також обладнання вимірювальних приладів, що використовуються при виконанні роботи.

Для перевірки своєї підготовленості до виконання роботи і контрольного опитування студент може скористатися питаннями для самоконтролю, які наведені в кінці опису кожної роботи.

Перед початком роботи викладач проводить перевірку підготовленості студентів до виконання лабораторної роботи, що передбачена робочим планом на заняття, ознайомлює їх з робочими місцями, обладнанням, вимірювальною і пусковою апаратурою, а також з порядком виконання роботи.

Після проведення лабораторної роботи студенти оформлюють звіт, який має містити: мету роботи, схему лабораторної установки з вимірювальними приладами, результати вимірювань, необхідні обчислення, а також висновки по роботі.

Усі обчислення слід виконувати у системі СІ. Точність обчислень повинна бути не нижче точності вимірювань та класу точності вимірювальних приладів, що використовуються.

Лабораторна робота вважається виконаною і захищеною за наявності оцінки за опитування по матеріалу даної роботи і відмітки про захист з підписом викладача.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ДЛЯ СТУДЕНТІВ, ЯКІ ВИКОНУЮТЬ ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

1 До виконання лабораторної роботи допускаються тільки ті студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки.

2 Студенти виконують тільки ту роботу, яка призначена керівником.

3 Робота повинна виконуватися лише з тими приладами, які призначені для неї. Використовувати інші прилади без дозволу керівника занять заборонено.

4 У випадку пошкодження приладу або якої-небудь деталі установки, студент повинен негайно повідомити керівника занять.

5 При роботі з електричними приладами перед початком роботи необхідно переконатися у надійності їх закріплення та приєднання до мережі.

6 Без дозволу керівника заняття забороняється вмикання рубильника, електромоторів і електричних схем.

7 Обережно користуватися приладами зі ртутним наповненням, а також тими, що працюють під тиском.

Недотримання встановлених правил може стати причиною позбавлення студента права продовжувати виконання роботи.

Лабораторна робота 1
ТИСК ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ

Мета роботи

1 Ознайомлення із загальними положеннями, одиницями та приладами для вимірювання тиску.

2 Вимірювання надлишкового тиску за допомогою п'єзометра, U-подібного манометра і пружинного манометра.

Загальні положення

Нормальне напруження, що виникає в рідині за рахунок сил прикладених до неї, має назву «гідростатичний тиск» або «напруження гідростатичного тиску».

Розрізняють тиск середній

$$P_{сер} = \frac{\Delta P}{\Delta S} \qquad (1.1)$$

і тиск у даній точці у випадку $\Delta S \to 0$

$$P = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}, \qquad (1.2)$$

де ΔP – сила гідростатичного тиску;

ΔS – площа, на яку діє сила.

У міжнародній системі одиниць СІ тиск вимірюється в паскалях

$$1\text{Па} = 1\ \text{Н/м}^2.$$

На підставі того, що ця одиниця дуже мала, в практиці частіше використовують кратні одиниці:

$$1\text{кПа} = 10^3\ \text{Па}; \qquad 1\text{МПа} = 10^6\ \text{Па}.$$

Іноді при розрахунках використовують позасистемну

одиницю «бар» що являє собою тиск, який дорівнює 10^5 Па, а також одиниці системи МКГСС, в якій тиск вимірюється в кілограм-секундах на квадратний метр (кгс/м^2) або кілограм-секундах на квадратний сантиметр (кгс/см^2) (останню ще називають «технічною атмосферою» (ат)).

Гідростатичний тиск може вимірюватися також висотою стовпа рідини (ртуті, води, спирту).Між тиском, що виражений у паскалях, і тиском, що виражений висотою стовпа рідини, існує залежність

$$P = \rho g h, \qquad (1.3)$$

де ρ – питома маса рідини, кг/м^3;

g– прискорення вільного падіння, м/с^2;

h – висота стовпа рідини,м.

Співвідношення між різними одиницями тиску наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Одиниця тиску	Па, Н/м^2	Бар	мм вод.ст	мм рт.ст.	кгс/см^2, атм.	кгс/м^2
Па, Н/м^2	1	$1\cdot10^{-5}$	0,102	$7,5\cdot10^{-3}$	$1,02\cdot10^{-5}$	0,102
бар	$1\cdot10^{5}$	1	$1,02\cdot10^{4}$	750	1,02	$1,02\cdot10^{4}$
мм вод.ст	9,81	$9,81\cdot10^{-5}$	1	$7,36\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-4}$	1
мм рт.ст.	133,3	$1,33\cdot10^{-3}$	$13,6\cdot$	1	$1,36\cdot10^{-3}$	13,6
кгс/см^2 атм.	$9,81\cdot10^{4}$	0,981	$1\cdot10^{4}$	736	1	$1\cdot10^{4}$
кгс/м^2	9,81	$9,8\cdot10^{-5}$	1	$7,36\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-4}$	1

У залежності від вибору початку відліку гідростатичний тиск поділяється на надлишковий і абсолютний.

Надлишковий – це тиск , що перевищує атмосферний. Ще

його називають манометричний або робочий тиск. Якщо тиск менше від атмосферного, то існує розрідження (вакуум).

Абсолютний – це тиск, відлік якого проводиться від нуля. Якщо відомі атмосферний тиск $P_а$ і надлишковий $P_{над}$ або вакуум $P_{вак}$, то абсолютний тиск можна визначити за формулами:

$$P_{абс} = P_а + P_{над} \qquad P_{абс} = P_а - P_{вак}. \tag{1.4}$$

Для визначення тиску рідини користуються різноманітними приладами, тип і конструкція яких залежать від величини тиску, що вимірюється, а також точністю, яка повинна бути забезпечена.

Точність вимірювання тиску манометрами і вакуумметрами залежить від:

а) правильного вибору приладу (робоча границя вимірювання повинна бути не менше 3/4 від верхньої границі вимірювання при постійному тиску і не менше 2/3 – при змінному тиску вимірюваного середовища);

б) місця установлення (прилади слід розміщувати на прямих ділянках трубопроводу);

в) умов експлуатації.

Прилади для вимірювання тиску

У залежності від роду вимірюваного тиску прилади для вимірювання можна розділити:

– на манометри надлишкового тиску, що призначені для вимірювання манометричного тиску;

– барометри, що призначені для вимірювання атмосферного тиску;

– вакуумметри, що призначені для вимірювання вакууму;

– мановакуумметри, що призначені для вимірювання як манометричного тиску, так і вакууму;

– диференціальні манометри, що призначені для вимірювання різниці тисків.

За принципом дії і типом робочого органа всі прилади для

вимірювання тиску розділяють на рідинні, деформаційні (механічні манометри), електричні, теплові, радіоізотопні та ін. Найбільш розповсюдженими серед них є прилади перших двох груп. Крім того, прилади для вимірювання тиску бувають показуючі, інтегруючі, самописні і, нарешті, вони можуть бути встановлені безпосередньо в місці заміру або на відстані від нього (дистанційні прилади).

Рідинні прилади

У рідинних приладах тиск або різниця тисків, що вимірюються, урівноважуються тиском стовпа рідини, висота якого є мірою тиску.

Рідинні прилади конструктивно прості та мають достатньо високу точність, у зв'язку з чим вони широко використовуються в лабораторній практиці і наукових дослідженнях, а деякі з них і у виробничих умовах. Робоча рідина цих приладів не повинна змішуватися з рідиною, тиск якої вимірюється.

До недоліків рідинних приладів слід віднести їх інерційність і великі розміри при вимірюванні високих тисків (більше 0,1 МПа).

На рисунку 1.1 наведені схеми підключення рідинного приладу з видимим рівнем, що являє собою U-подібну трубку, обидва коліна якої мають однакову площу перерізу і заповнені до половини своєї висоти робочою рідиною.

Вимірювання рівнів у трубках проводиться по осьовій лінії трубки: при увігнутому меніску робочої рідини у трубці – по нижній його частині, при опуклому меніску – по верхній його частині.

Загальна висота стовпа рідини h буде дорівнювати сумі вимірів, що проводяться по шкалі вище і нижче нульової позначки

$$h = h_1 + h_2. \qquad (1.5)$$

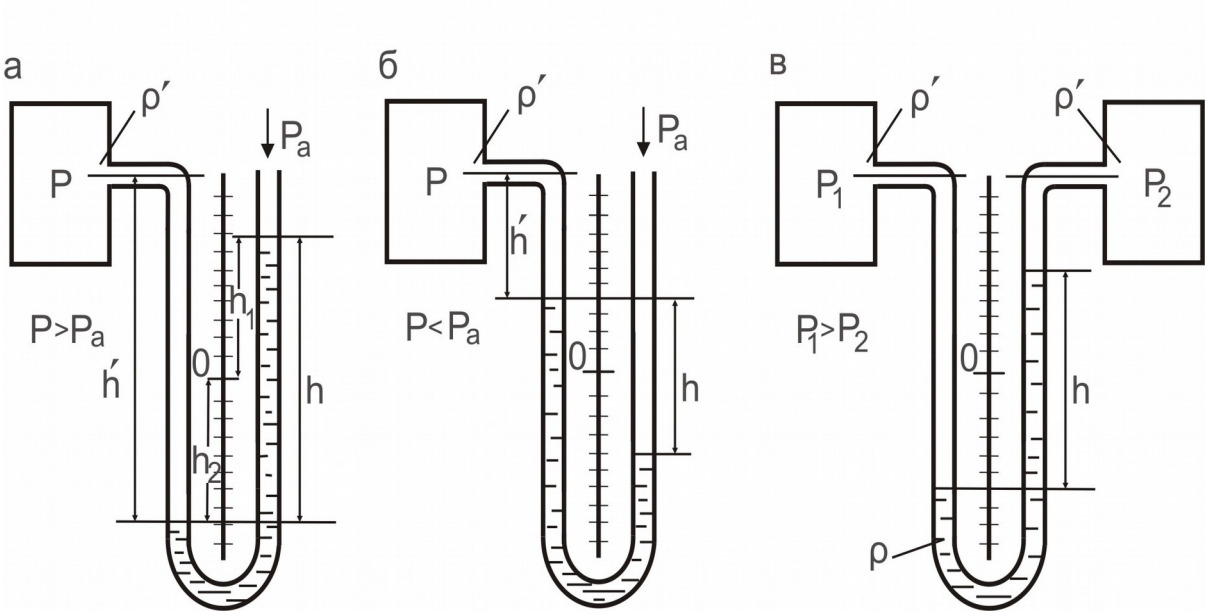

Рисунок1.1

Значення тисків, що вимірюються цими приладами, підраховують за формулами:

манометричний тиск (рисунок 1.1, а)

$$P_м = P - P_а = \rho gh - \rho' gh;' \qquad (1.6)$$

вакуум (рисунок 1.1, б)

$$P_в = P_а - P = \rho gh - \rho' gh;' \qquad (1.7)$$

різниця тисків (рисунок 1.1, в)

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (\rho - \rho')gh, \qquad (1.8)$$

де ρ – питома маса робочої рідини;

ρ′ – питома маса рідини, тиск якої вимірюється;

h – загальна висота стовпа рідини в трубках.

У випадку, коли ρ′ значно менше від ρ (наприклад при вимірюванні тиску повітря приладом з водяним наповненням), другим членом у цих рівняннях можна знехтувати у зв'язку з його малим значенням і підраховувати $P_м$, $P_в$, ΔP як ρgh.

Для вимірювання дуже малих тисків (близько 100 Па) використовуються мікроманометри. Це рідинні прилади з видимим рівнем, що мають нахилену трубку (рисунок 1.2).

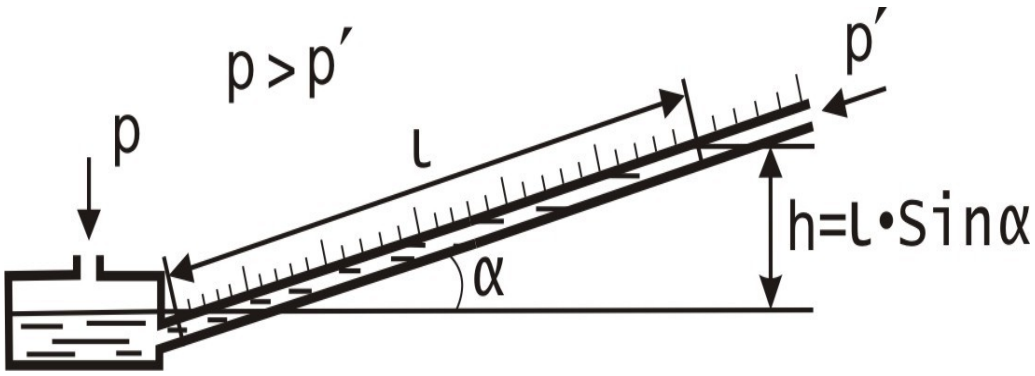

Рисунок 1.2

Мікроманометр складається з широкої металевої посудини і з'єднаної з нею одним кінцем скляної вимірювальної трубки з міліметровою шкалою. Трубка прикріплена під кутом α до горизонталі. Використання нахиленої скляної трубки дає змогу зменшивши кут α, збільшити довжину ℓ рідини у трубці, що підвищує точність вимірювання. Дійсна ж висота стовпа робочої рідини h визначається за формулою

$$h = \ell \cdot Sin\ \alpha\ , \qquad (1.9)$$

де ℓ – довжина рідини у трубці за шкалою приладу.

Мінімальний кут нахилу трубки α_{min} приймається рівним $8\text{-}10^0$. Це пов'язано з тим, що при менших кутах точність вимірювання різко знижується.

Надлишковий тиск, виміряний за допомогою мікроманометра, визначається за формулою

$$P_{над} = \ell \cdot \rho \cdot g \cdot Sin\,\alpha\ . \qquad (1.10)$$

Робочою рідиною для мікроманометрів служить спирт або дистильована вода.

Для вимірювання надлишкового тиску краплинних рідин використовують п’єзометри (рисунок 1.3).

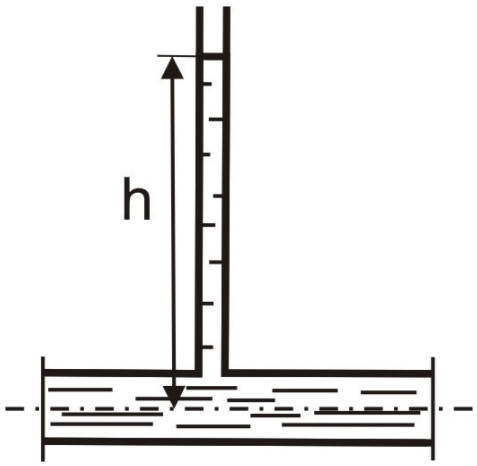

Рисунок 1.3

П’єзометр являє собою вертикальну скляну трубку діаметром 5-10 мм, що підключена одним кінцем до місця вимірювання тиску. Трубку заповнює та рідина, тиск якої вимірюється, а визначається він за висотою стовпа h

$$P = \rho g h. \qquad (1.11)$$

Перевагою п’єзометра є необхідність зняття тільки одного виміру, а недоліком – можливість помилки при знаходженні тиску внаслідок неможливості в деяких випадках точного визначення питомої маси рідини ρ.

Деформаційні прилади (механічні манометри)

До цієї групи належать прилади, у яких тиск або різниця тисків визначається за деформацією пружного чутливого елемента. Перевагами деформаційних приладів є компактність,

відсутність робочої рідини, менша ніж у рідинних приладів інерційність, можливість вимірювання високих тисків та інші. До недоліків належать: менша ніж у рідинних приладів точність вимірювання та залежність точності показу від залишкової деформації.

У залежності від елемента, який сприймає тиск (датчика), механічні манометри бувають трубчато-пружинні, мембранні, сильфонні, анероїдні. Чутливими елементами цих манометрів є відповідно: порожниста латунна трубка (рисунок 1.4, а) еліптичного або овального перерізу, зігнута в дугу і запаяна з одного кінця; мембрана – гофрована, для більшої еластичності, тонка пластина (рисунок 1.4, б); сильфон – закрита з двох сторін тонкостінна циліндрична оболонка з гофрованою боковою поверхнею (рисунок 1.4, в); анероїд – пружна металева коробка (як правило, дві спаяні між собою мембрани).

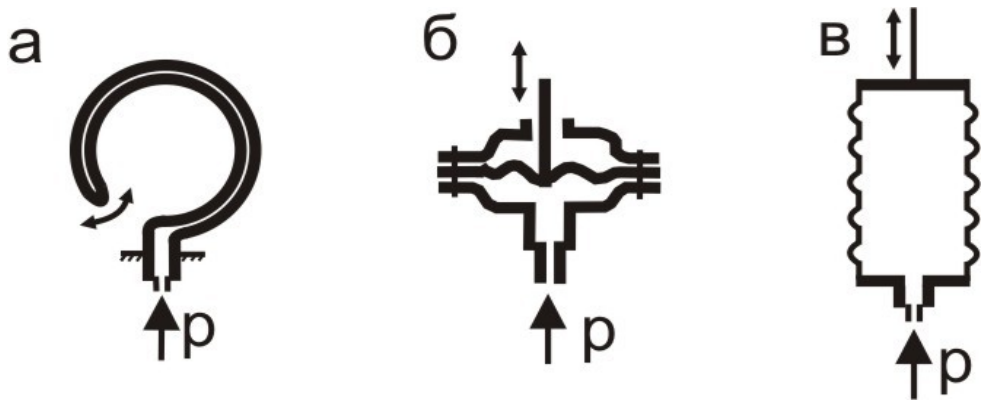

Рисунок 1.4

Абсолютний тиск $P_{абс}$ рідини (газу) підводиться через штуцер до чутливого елемента. Якщо $P_{абс} > P_а$, то під впливом різниці тисків $P_м = P_{абс} – P_а$ трубка буде розпрямлятися, мембрана прогинатися вверх, а сильфон – розширюватися. Якщо $P_{абс} < P_а$, то під впливом вакууму $P_в = P_а – P_{абс}$ трубка буде згинатися, мембрана вигинатися вниз, а сильфон – стискуватися. Що стосується анероїда, то цей чутливий елемент використовується для визначення тиску середовища (наприклад атмосферного в барометрах) і при його збільшенні стискується, а при зменшенні розширюється.

Переміщення запаяного вільного кінця трубки, вільної сторони сильфона, центра мембрани або анероїда, пропорційне значенню манометричного тиску або вакууму, за допомогою передавального механізму передається на стрілку приладу.

Прилади, що показані на рисунку 1.4 а, в, використовуються як манометри надлишкового тиску і вакуумметри, а з чутливими елементами у вигляді мембрани або сильфона, крім того, використовуються як дифманометри і манометри абсолютного тиску.

Схема лабораторної установки для вимірювання тиску наведена на рисунку 1.5.

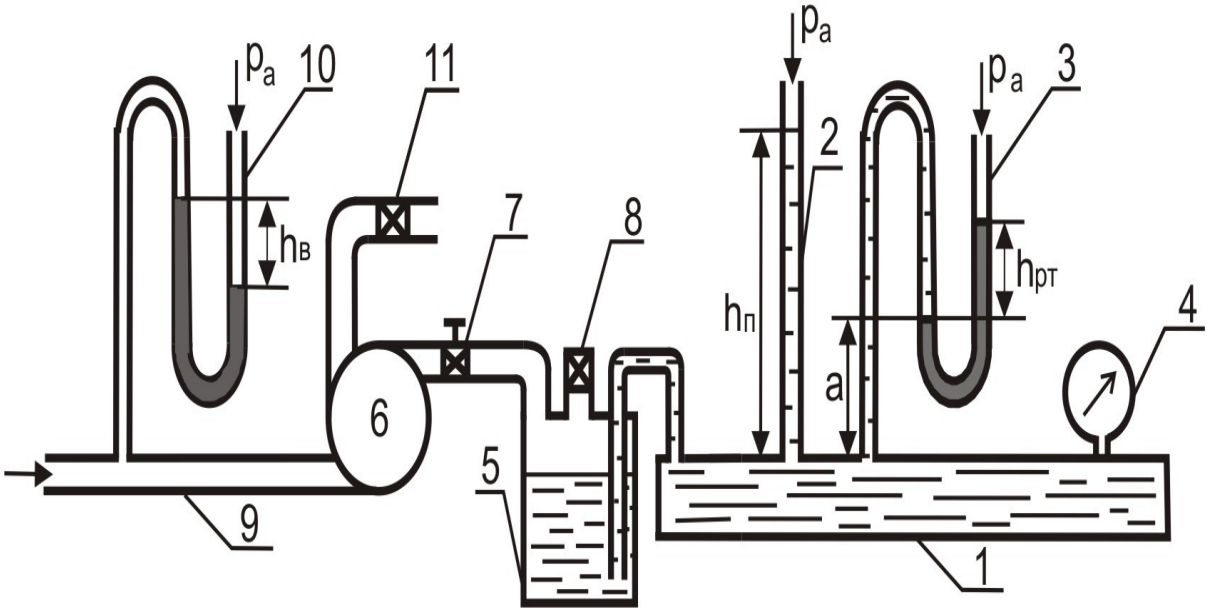

Рисунок 1.5

Наведена лабораторна установка складається з циліндричної посудини 1, до якої приєднані: п’єзометр 2, ртутний U-подібний манометр 3 і пружинний манометр 4.

Тиск усередині посудини 1 створюється завдяки тиску на вільну поверхню рідини в ємності 5 за допомогою насоса 6 через кран 7. Для зменшення величини тиску в системі служить кран 8.

Розрідження у всмоктувальній трубі 9 вимірюється U–подібним манометром 10 і регулюється краном 11 при закритому крані 7.

Порядок проведення досліду

1 Увімкнути насос 6 при відкритому крані 11 і закритому крані 7.

2 Відкриваючи кран 7 і прикриваючи кран 11, створити тиск у системі при закритому крані 8.

3 Записати в журнал спостережень вимірювання з точністю до 1 мм за п'єзометром, U-подібним ртутним і пружинним манометрами.

4 Змінити тиск у системі за рахунок випуску повітря краном 8 з напірної ємності 5 і знову провести відповідні вимірювання.

5 При закритому крані 7, регулюючи рух повітря краном 11, провести вимірювання розрідження у всмоктувальній трубі 9. Дані вимірювань занести до журналу.

Створюючи тиск насосом, необхідно стежити за тим, щоб рівень води в п'єзометрі не виходив за межі шкали, а в ртутному манометрі не відбувся перелив води в праве коліно.

Після закінчення дослідів відкрити кран 8 і відключити насос.

Обробка результатів досліду та оформлення звіту за роботу

На підставі спостережень визначити:

1) надлишковий тиск у п'єзометрі, н/м^2,

$$P_{над} = \rho_в g h_{п,}$$

де $\rho_в$ – питома маса (густина) води ($\rho_в$= 1000 кг/м^3);

2) надлишковий тиск U-подібного ртутного манометра, н/м^2,

$$P_{над} = \rho_{рт} g h_{рт} + \rho_в g a,$$

де $\rho_{рт}$ – питома маса ртуті ($\rho_{рт}$ = 13600 кг/м^3);

a – вертикальна відстань між точкою установлення манометра і рівнем ртуті в його лівому коліні;

3) за тарувальною кривою відрахувати дійсний надлишковий тиск у системі за показанням стрілки манометра, н/м$^{2;}$

4) розрідження (вакуум) у всмоктуючій трубі, н/м^2,

$$P_{вак} = \rho_в g h_в.$$

Результати обчислень занести в протокол (таблиця 1.2) і оформити звіт за роботу

Таблиця 1.2 - Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Дослід	
			1	2
1 Показання водяного п'єзометра	$h_п$	м		
2 Тиск за п'єзометром	$P_{над}$	Н/м^2		
3 Показання ртутного манометра	$h_{рт}/a$	м		
4 Тиск за ртутним манометром	$P_{над}$	Н/м^2		
5 Показання механічного манометра	n	Умовн. под.		
6 Тиск за механічним манометром	$P_{над}$	Н/м^2		
7 Показання вакууму водяним манометром	$h_в$	м		
8 Вакуумметричний тиск	$P_{вак}$	Н/м^2		

Контрольні питання

1 Які види тиску ви знаєте?

2 Що таке абсолютний тиск?

3 Що таке манометричний тиск?

4 Що таке вакуум?

5 Які співвідношення існують між одиницями тиску: кгс/м^2, кгс/см^2, мм вод.ст., мм рт.ст., і Па?

6 Наведіть класифікацію приладів для вимірювання тиску за призначенням (роду тиску, що вимірюється).

7 Наведіть класифікацію приладів для вимірювання тиску за принципом дії і типом робочого органа.

8 Перерахуйте переваги і недоліки рідинних приладів для вимірювання тиску.

9 Перерахуйте переваги і недоліки деформаційних приладів для вимірювання тиску.

Лабораторна робота 2
РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ. ПОБУДОВА ПОВНОГО І П'ЄЗОМЕТРИЧНОГО НАПОРІВ

Мета роботи

Ознайомлення з рівнянням Бернуллі, його геометричним та енергетичним розумінням, побудова п'єзометричної і напірної лінії для трубопроводу змінного перерізу.

Загальні положення

Рівняння Бернуллі – це основне рівняння гідродинаміки, яке являє собою частинний вираз загального закону збереження енергії.

Для нев'язкої нестисливої рідини це рівняння для двох перерізів потоку має вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}. \qquad (2.1)$$

При русі в'язкої рідини уздовж твердої стінки, наприклад у трубі, відбувається гальмування потоку внаслідок впливу в'язкості. У цьому випадку змінюється швидкість потоку у перерізі і зменшується питома енергія рідини, що рухається.

У цьому випадку рівняння Бернуллі в загальному виді буде мати вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \sum_{1-2} h_{втр} = z_n + \frac{p_n}{\rho g} + \alpha_n \cdot \frac{v_n^2}{2g} + \sum_{1-n} h_{втр} \quad . \quad (2.2)$$

Отже, для всіх перерізів потоку можна записати

$$z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g} + h_{втр} = \text{const}, \qquad (2.3)$$

де z – відстань від площини порівняння до центра ваги перерізу;

p – тиск в центрі ваги у цьому перерізі;

v– середня швидкість потоку у цьому перерізі;

ρ – питома маса рідини;

$h_{втр}$– питома енергія, що затрачена на подолання тисків від

початкового перерізу до того, що розглядається;

α – коефіцієнт, що враховує вплив нерівномірності розподілу швидкостей по перерізу на питому кінетичну енергію потоку (коефіцієнт Коріоліса).

Сума перших двох членів рівняння (2.3)

$z + \frac{p}{\rho g}$ – являє собою п'єзометричний напір;

$\alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$ – швидкісний напір;

$h_{втр}$ – втрата напору.

Сума перших трьох членів рівняння Бернуллі

$$z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$$

має назву повний напір.

Усі члени рівняння Бернуллі виражаються в одиницях довжини, тому кожний із них може мати назву «висота»:

z – геометрична висота, або висота положення;

$\frac{p}{\rho g}$ – п'єзометрична висота або висота гідродинамічного тиску;

$\frac{v^2}{2g}$ – висота, що відповідає швидкісному напору;

$h_{втр}$ – висота, що відповідає витратам напору.

Отже, геометричне розуміння рівняння Бернуллі може бути сформульоване так: при сталому русі рідини сума чотирьох висот (z, $\frac{p}{\rho g}$, $\frac{v^2}{2g}$, $h_{втр}$) залишається незмінною уздовж потоку.

Крім того, кожний із членів рівняння Бернуллі виражає питому енергію потоку, тобто енергію, що припадає на одиницю ваги рідини, що рухається: z – питома енергія положення; $\frac{p}{\rho g}$ – питома енергія гідродинамічного тиску; $\frac{v^2}{2g}$ – питома кінетична

енергія; $h_{втр}$ – втрати питомої енергії. Тоді енергетичне розуміння рівняння Бернуллі можна сформулювати таким чином: при сталому русі рідини сума чотирьох питомих енергій (z, $\frac{p}{\rho g}$, $\frac{v^2}{2g}$, $h_{втр}$) залишається незмінною уздовж потоку.

Якщо в якому-небудь перерізі потоку рідини (рисунок 2.1) установити трубки п'єзометричну 1 і швидкісну 2 (трубку Піто), то у швидкісній трубці спостерігатимемо допоміжний тиск від впливу швидкості рідини, що рухається. Висота підйому рідини у швидкісній трубці більше висоти підйому рідини в п'єзометричній трубці на швидкісний напір $\frac{v^2}{2g}$. Різниця висот буде дорівнювати

$$\left(\frac{p}{\rho g}+\frac{v^2}{2g}\right)-\frac{p_1}{\rho g}=h=\frac{v^2}{2g}, \tag{2.4}$$

звідки можна визначити швидкість потоку, який дорівнюватиме

$$V=\sqrt{2gh}\,. \tag{2.5}$$

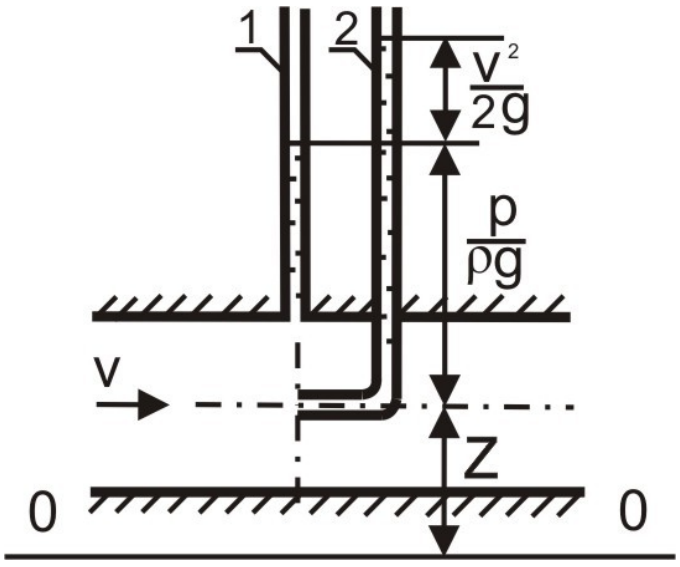

Рисунок 2.1

Графічно всі члени рівняння Бернуллі наведені на рисунку 2.2. Тут у чотирьох вибраних перерізах I-IV потоку S-S встановлені п’єзометричні і швидкісні трубки.

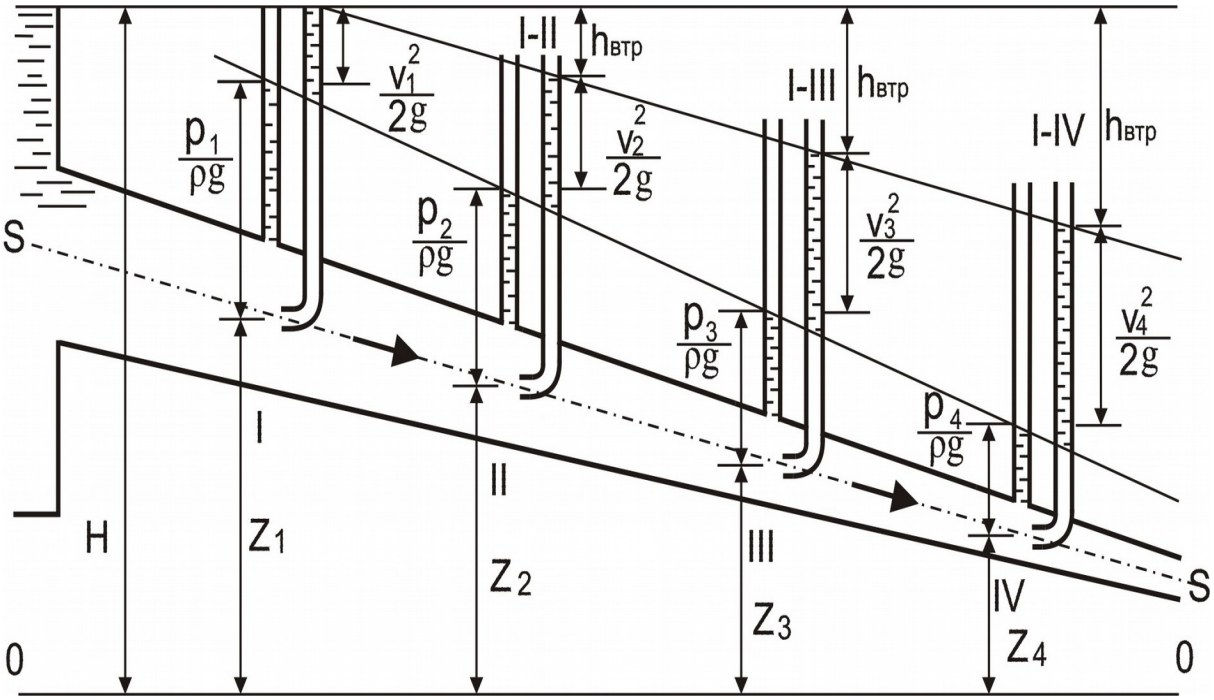

Рисунок 2.2

Якщо з’єднати рівні рідини в п’єзометрах, то отримаємо п’єзометричну лінію, або лінію потенціальної питомої енергії. Знаходиться вона на відстані $z+\frac{p}{\rho g}$ від площини порівняння О-О. Зниження цієї лінії на одиницю довжини має назву п’єзометричного нахилу.

З’єднуючи рівні рідини в швидкісних трубках отримаємо напірну лінію сумарної (потенціальної і кінетичної) питомої енергії. Падіння напірної лінії є гідравлічним нахилом і характеризує втрати напору на одиницю довжини.

З рисунка 2.2 видно, що при віддалені від початкового перерізу I втрати напору $h_{втр}$ зростають.

Опис дослідної установки

Дослідна установка (рисунок 2.3) являє собою трубопровід змінного перерізу, на характерних ділянках якого, тобто при переході від одного діаметра до другого, послідовно встановлені в п’яти контрольних перерізах п’єзометр і трубка Піто. Рух рідини (води) по трубопроводу здійснюється за рахунок напору, що створює напірний бак Б, рівень води в якому підтримується постійним за рахунок труби холостого зливу 3. Вода в напірний бак подається по трубці, яка має вентиль $В_1$. За допомогою вентилів $В_2$ і $В_3$ можна регулювати витрату води.

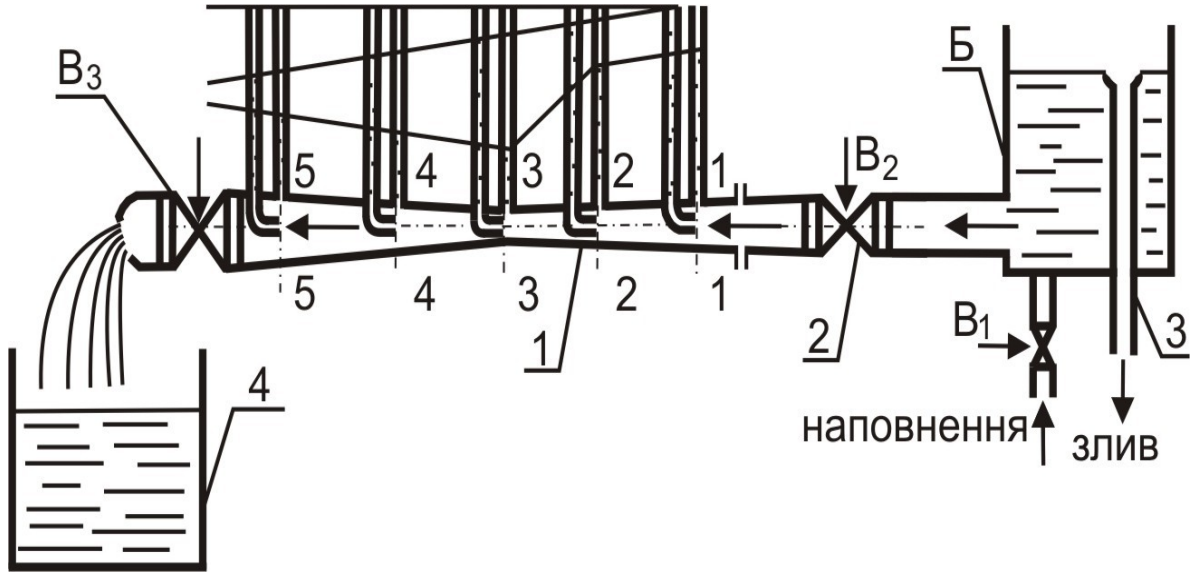

Рисунок 2.3

Порядок проведення досліду

1 Закрити вентиль $В_2$ і за допомогою вентиля $В_1$ наповнити напірний бак Б.

2 Видалити повітря з п’єзометрів і трубок Піто. Для цього відкрити вентилі $В_2$ і $В_3$, періодично змінюючи ступінь відкриття вентиля $В_2$, домогтися видалення повітря з вимірювальних приладів.

3 За допомогою вентиля $В_2$ встановити рекомендовану витрату рідини у трубі змінного перерізу.

4 Записати в протокол досліджень показання п’єзометрів і трубок Піто у всіх п’яти перерізах труби при заданій витраті.

Обробка результатів досліду, оформлення звіту за роботу

За результатами вимірювань рівнів рідини у п'єзометрах і трубках Піто побудувати п'єзометричну і напірну лінії. Для цього на осі абсцис у визначеному масштабі відкласти відстані між п'єзометрами, а по осі ординат – послідовно п'єзометричну висоту ($Z+\frac{p}{\rho g}$) і висоту повного напору ($H=Z+\frac{p}{\rho g}+\frac{v^2}{2g}$). З'єднуючи послідовно п'єзометричні висоти, одержимо п'єзометричну лінію, а висоти повного напору – лінію повного напору.

П'єзометрична лінія знижується при звуженні труби і підвищується при її розширенні, оскільки у першому випадку збільшується швидкість і зменшується тиск, а у другому – зменшується швидкість і збільшується тиск.

Лінія повного напору знижується у напрямку руху рідини, що зумовлено наявністю втрати напору (втрати енергії)

Відстань між п'єзометричною лінією і лінією повного напору являє собою місцеві швидкісні напори $\frac{v^2}{2g}$ (питомі кінетичні енергії).

Результати обчислень занести в протокол (таблиця 2.1) та оформити звіт за роботу.

Таблиця 2.1 - Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Дослід				
			1	2	3	4	5
Показання трубок повного напору	$z+\frac{p}{\rho g}+\frac{v^2}{2g}$	см					
Показання п'єзометрів	$z=\frac{p}{\rho g}$	см					

Контрольні питання

1 У чому полягає геометричне й енергетичне значення рівняння Бернуллі?

2 Чому кожний доданок рівняння Бернуллі називається питомою енергією?

3 Яка розмірність кожної складової рівняння Бернуллі?

4 Що таке повний гідродинамічний напір у перерізі?

5 На підставі аналізу рівняння Бернуллі виведіть взаємозв'язок між швидкістю і тиском.

6 Чим викликається нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу потоку і як вона враховується в рівнянні Бернуллі?

7 Яке фізичне значення коефіцієнта α в рівнянні Бернуллі для потоку реальної рідини?

8 Чи можна встановити за графіком повного і п'єзометричного напорів напрям руху потоку в трубопроводі?

Лабораторна робота 3
ТАРУВАННЯ ВИТРАТОМІРА

Мета роботи

Набуття навичок тарування витратомірів. Визначення сталої витратоміра C. Побудова графіка залежності витрати Q від перепаду тиску h витратоміра Вентурі.

Загальні положення

Вимірювання витрати рідини, газів і пари в промисловості здійснюється за допомогою звужувальних пристроїв, об’ємних витратомірів, механічних пристроїв з обертовими крильчатками, електромагнітними та ін.

Звужувальні витратомірні пристрої – це пристрої, принцип дії яких базується на зміні п’єзометричного напору при вимірюванні швидкості у відповідності до рівняння Бернуллі (діафрагми, сопла, трубки Вентурі).

На рисунку 3.1 зображена трубка Вентурі, яка складається з горизонтального трубопроводу діаметром D, на якому установлені дві конічні труби 1, які з’єднані між собою малими основами діаметром d. На початку конічного перерізу 1-1 і в середині циліндричної вставки 2-2 установлені п’єзометри 2.

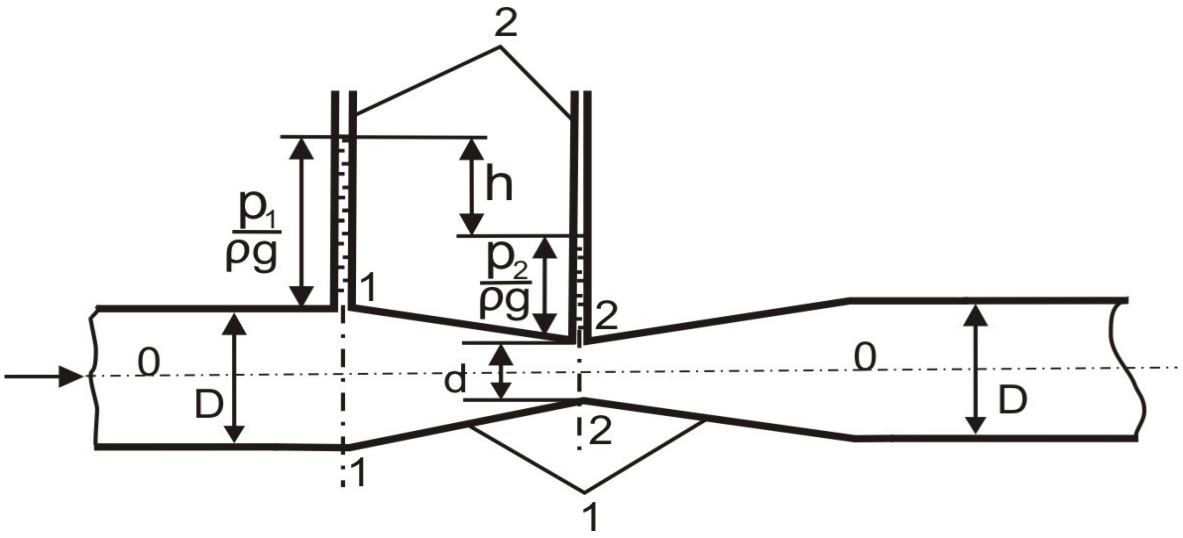

Рисунок 3.1

На підставі того, що від перерізу 1-1 до перерізу 2-2 відбувається зміна площі поперечного перерізу від S_1 до S_2 і наявний деякий місцевий опір, рівняння Бернуллі для цієї ділянки можна записати у такому вигляді:

$$\frac{p_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho g}+\frac{v_2^2}{2g}(1+\zeta), \tag{3.1}$$

де ζ – коефіцієнт втрат напору між перерізами 1-1 і 2-2.

Вважаючи, що верхні порожнини п’єзометрів сполучені з атмосферою, будемо мати п’єзометричний напір

$$\frac{p_1}{\rho g}-\frac{p_2}{\rho g}=h. \tag{3.2}$$

Тоді рівняння Бернуллі буде мати вигляд

$$h = \frac{v_2^2}{2g}(1+\zeta) - \frac{v_1^2}{2g}. \tag{3.3}$$

Користуючись законом суцільності (нерозривності) руху

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2,$$

замінимо у рівнянні (3.3) швидкість v_2 через v_1, тобто $v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2}$, і отримаємо

$$h = \frac{v_1^2}{2g}\left[(1+\zeta)\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1\right] \tag{3.4}$$

Звідки середня швидкість потоку в перерізі 1-1 буде

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g}{(1+\zeta)\cdot\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - 1}} \cdot \sqrt{h}, \tag{3.5}$$

а об'ємна витрата рідини визначиться за формулою

$$Q = v_1 S_1 = S_1 \sqrt{\frac{2g}{(1+\zeta)\cdot\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - 1}} \cdot \sqrt{h}, \tag{3.6}$$

або

$$Q = C\sqrt{h}, \tag{3.7}$$

де С – стала витратоміра, яка знаходиться експериментально при його тарируванні і дорівнює

$$C = S_1 \sqrt{\frac{2g}{(1+\zeta)\cdot\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - 1}}. \tag{3.8}$$

Слід відмітити, що С є величина постійна тільки в

автомодельній області, а в загальному випадку С залежить від числа Рейнольдса. Знаючи цю величину і спостерігаючи за показаннями п’єзометрів, можна легко визначити витрату рідини в трубопроводі за формулою (3.7).

На практиці, як правило, використовують тарувальний графік (рисунок 3.2), на якому показана залежність різниці рівнів п’єзометрів у широкому і найвужчому перерізі трубопроводу h від витрати рідини Q.

Опис дослідної установки

Дослідна установка (рисунок 3.3) являє собою трубопровід 1, який має звужувальний пристрій (витратомір Вентурі). На початку витратоміра (переріз 1-1) і посередині (переріз 2-2) встановлені п’єзометри 2. Напір рідини в установці створюється напірним баком Б, рівень води в якому підтримується постійним за рахунок труби «холостого» зливу. Витрата води регулюється вентилем 3. Для вимірювання витрати води використовується мірна посудина 4. Час наповнення мірної посудини визначається секундоміром.

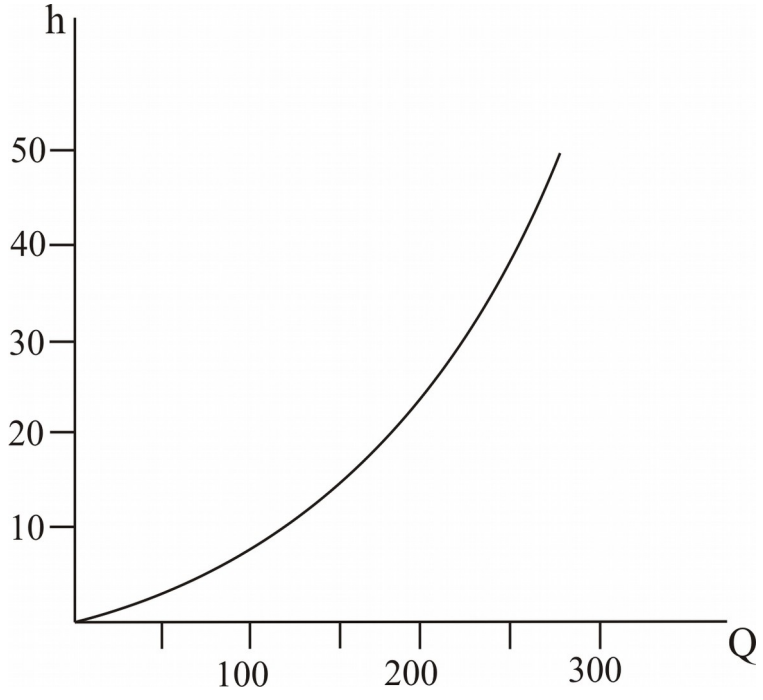

Рисунок 3.2

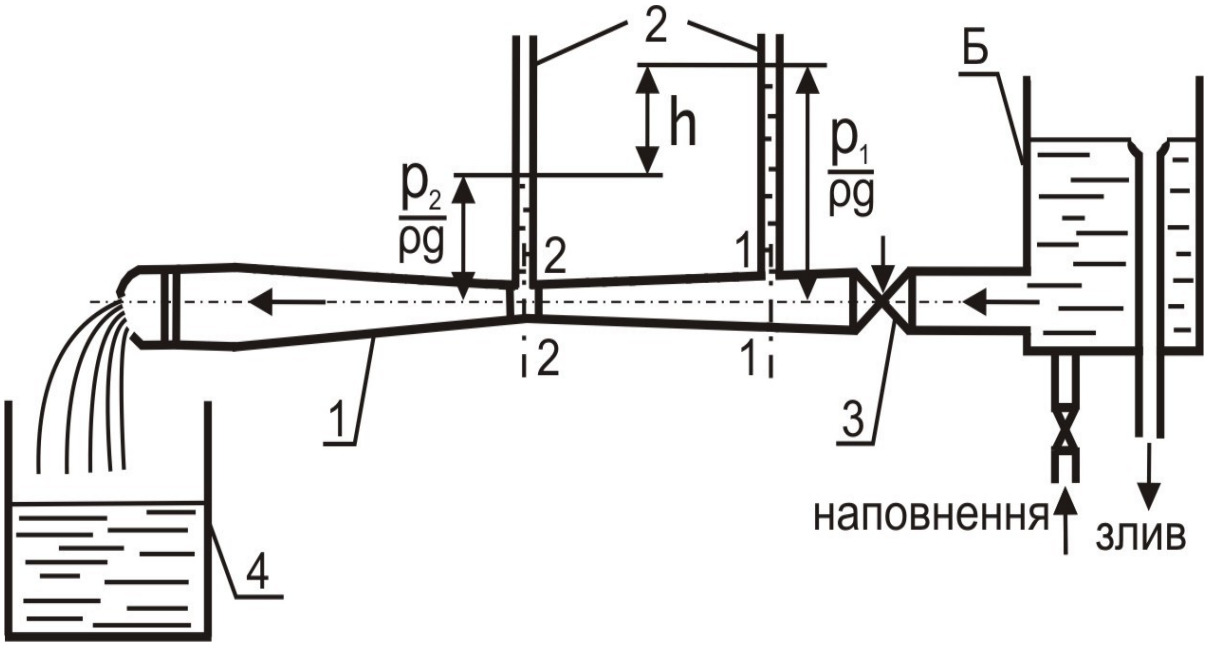

Рисунок 3.3

Порядок виконання роботи

1 Заповнити водою напірний бак Б.

2 Видалити з п’єзометрів повітря. Для цього відкрити вентиль 3 і, періодично змінюючи ступінь його відкриття, домогтися, щоб через п’єзометри не виділялися бульбашки повітря. Після заповнення п’єзометрів водою встановити послідовно декілька (4-5) різних витрат, знімаючи при цьому показання п’єзометрів у широкому і вузькому перерізах трубопроводу і визначаючи секундоміром час наповнення мірної посудини об’ємом W.

3 Показання п’єзометрів, об’єм мірної посудини та час її наповнення занести у відповідні графи протоколу випробувань.

Обробка результатів досліджень

а) визначити об′ємну витрату рідини за формулою

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

б) різницю рівнів п’єзометрів визначити за формулою

$$h = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g};$$

в) у кожному випадку визначити С – сталу витратоміра, користуючись рівнянням (3.7),

$$C_i = \frac{Q}{\sqrt{h}},$$

а потім її середнє значення для n-ї кількості дослідів

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n}.$$

Дослідні дані та результати обчислень занести до таблиці 3.1.

Оформити звіт за роботу.

Таблиця 3.1

Дослід	Дослідні дані				Дані розрахунків			
	W, $см^3$	T, с	$\frac{P_1}{\rho g}$, см	$\frac{P_2}{\rho g}$, см	Q, $см^3/с$	h, см	C_i, $см^{5/2}/с$	$\bar{C}$, $см^{5/2}/с$
1								
2								
3								
4								
5								

Контрольні питання

1 У чому полягає принцип роботи п’єзометричного водоміра?

2 Виведіть формулу для витратоміра Вентурі.

3 Від яких факторів залежить постійна витратоміра?

4 Де використовується крива зв'язку h=f(Q)?

5 Як вимірюється витрата об'ємним способом?

6 З якої причини у вузькій частині витратоміра Вентурі питома потенціальна енергія менша, ніж у широкій частині?

7 Чи враховуються втрати енергії при визначенні витрати п'єзометричним витратоміром? Якщо враховуються, то як?

Лабораторна робота 4
ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОВИТРАТНОЇ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯ ВЦИЛІНДРИЧНІЙ ТРУБІ ПРИ РІЗНИХ ОПОРАХ НА ВИХОДІ

Мета роботи

Закріплення і розширення знань студентів з визначення швидкостей повітря (газу) в перерізі трубопроводу та побудова їх епюр. Визначення середньої швидкості в цьому перерізі і витрати повітря через трубу при різних опорах на виході.

Методика визначення середньовитратної швидкості

При розв'язанні складних газодинамічних задач у межах одновимірної схеми замість реального поля швидкостей у поперечному перерізі будь-якого каналу розглядають деяку середню швидкість. Спосіб визначення поля швидкостей залежить від кінцевої мети розв'язаної задачі. Якщо ставиться

задача визначення витрати газу в каналі, то правильним є визначення поля швидкостей по витраті, тобто в цьому випадку вводять до розгляду середньовитратну швидкість.

Масова витрата газу в будь-якому перерізі каналу може бути знайдена шляхом інтегрування елементарної витрати dM = ρvdS за всією площею:

$$M = \int_S \rho v dS, \tag{4.1}$$

де ρ, v – відповідно густина і швидкість газу;

dS – елементарна площа каналу.

Якщо число Маха газового потоку $M \leq 0{,}3$ (а саме такий потік досліджується в цій роботі), стисливістю газу можна знехтувати. Тоді

$$M = \rho \int_S v\, dS. \tag{4.2}$$

З другого боку, при відомій середньовитратній швидкості витрату можна визначити за формулою

$$M = \rho\, v_{сер} S. \tag{4.3}$$

Таким чином, для визначення масової витрати газу необхідно знати середньовитратну швидкість. Це можна зробити експериментальним шляхом. Він полягає в тому, що знаходиться розподіл швидкостей вздовж радіуса труби v= *f(r)*. З цією метою в заданих точках простору, у яких необхідно визначити швидкість потоку, вимірюють повний $\Delta p_{П_i}$ і статичний Δp_{U_i} тиск. Різниця повного і статичного тиску в точці простору є динамічним тиском (швидкісним напором) $\Delta p_д$, який дорівнює

$$\Delta p_д = p_П - p_U = \rho \frac{v^2}{2}. \tag{4.4}$$

Звідки

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p_д}{\rho}} . \qquad (4.5)$$

Середню ж швидкість легко визначити, маючи n замірів уздовж радіуса. Явно, що вона буде дорівнювати

$$v_{сер} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_i \quad . \qquad (4.6)$$

Такий метод вимірювання швидкостей називається пневмометричним.

Вимірювання повного і статичного тиску в точці потоку можна провести роздільно приймачем повного тиску –напірною трубкою з отвором на лобовому її кінці встановлюваній назустріч руху потоку (трубкою Піто) і приймачем статичного тиску через отвори в стінці труби (рисунок 4.1, поз.5). Проте на практиці для скорочення часу проведення досліду вимірювання повного і статичного тиску в заданій точці простору проводиться одночасно спеціальним комбінованим приймачем, диференціальною трубкою Піто, яка ще називається трубкою Прандтля (рисунок 4.1, поз.3). Приєднавши відведення трубки Прандтля до диференціального рідинного манометра, отримаємо на манометрі безпосередньо значення динамічного тиску $\Delta p_д = p_п - p_U$ (рисунок 4.1, поз. 4).

Опис дослідної установки

Лабораторна установка (рисунок 4.1) складається з труби 1 з дросельною заслінкою 2, по якій нагнітач (на схемі не показаний) прокачує повітря в напрямі, показаному стрілками. В досліджуваному перерізі встановлена трубка Прандтля 3 для вимірювання динамічного тиску. Показання трубки Прандтля фіксуються диференціальним U–подібним манометром 4. У досліджуваному перерізі труби встановлений U–подібний

манометр 5 для вимірювання статичного тиску і ртутний термометр 6, за допомогою якого заміряється температура потоку.

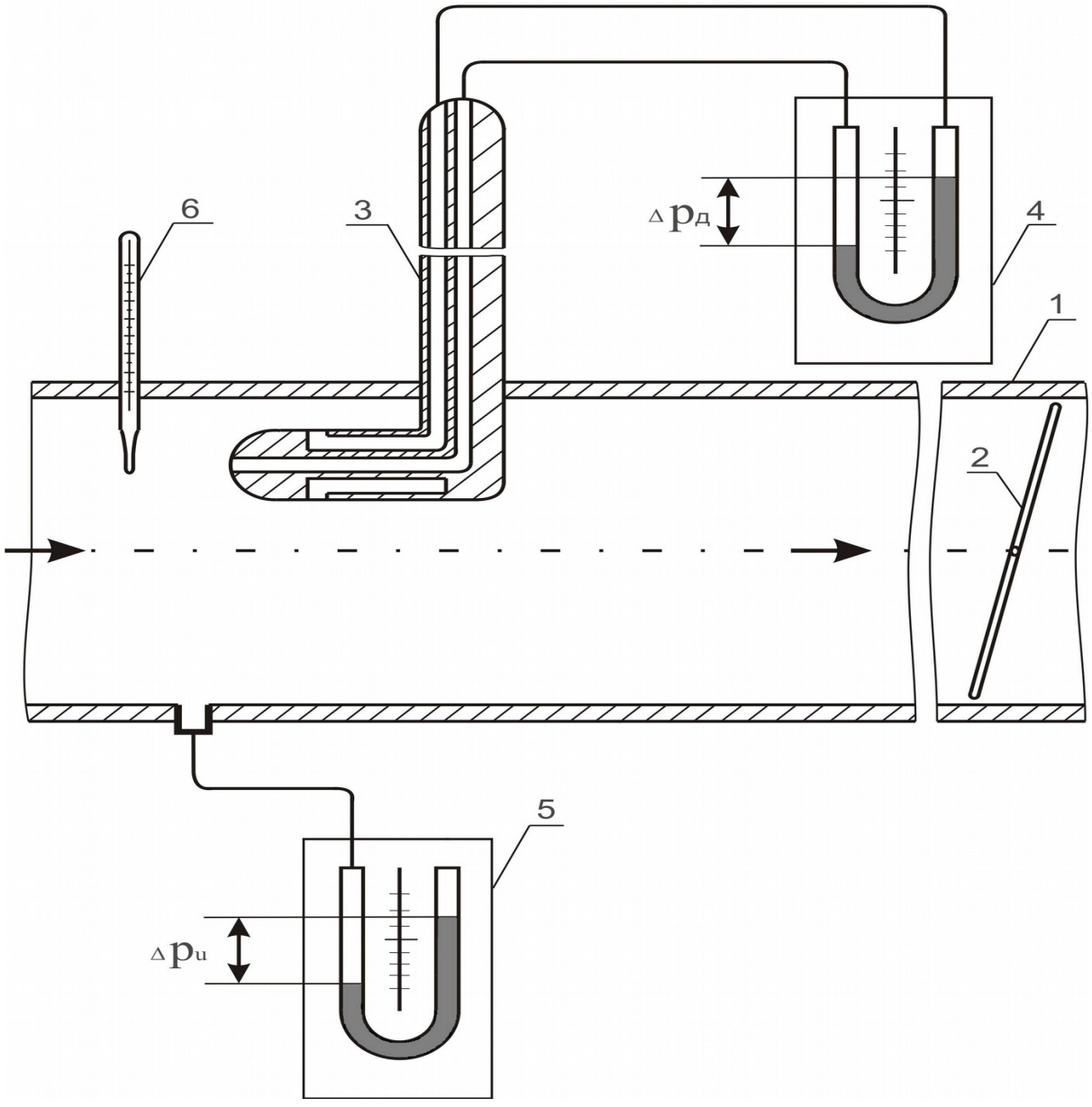

Рисунок 4.1 - Схема дослідної установки

Порядок проведення випробувань і обробка дослідних даних

В процесі проведення випробувань необхідно при кожному положенні заслінки в досліджуваному перерізі труби знайти швидкості у фіксованих точках, середньовитратну швидкість у цьому перерізі і масову витрату повітря в трубі.

Заслінка має три фіксовані положення:

1-ше положення – переріз труби відкрито повністю;
2-ге положення – переріз труби відкрито на 2/3;
3-тє положення – переріз труби відкрито на 1/3.

При кожному положенні заслінки виміряють: температуру *t,* надлишковий статичний тиск Δp_u у досліджуваному перерізі і динамічний тиск $\Delta p_{Д_i}$ уздовж перерізу труби, занурюючи трубку Прандтля з кроком 25 мм уздовж радіуса труби (радіус труби R = 100 мм).

Результати вимірювань записуються в таблицю 4.1.

Обробка дослідних даних ведеться в нижченаведеній послідовності. Для кожного положення заслінки визначають:

1) густину повітря в трубі, кг/м^3,

$$\rho = \frac{p}{RT}, \qquad (4.7)$$

де $p = (p_{AT} + 9{,}81 \cdot \Delta p_U)$ – абсолютний статичний тиск у перерізі, Па

$R = 287 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ – газова стала повітря

$T = t + 273{,}15$ – температура повітря, К.

2) швидкості уздовж радіуса досліджуваного перерізу, м/с,

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot \Delta p_{Д_i}}{\rho}} \quad , \qquad (4.8)$$

де $\Delta p_{д_i}$ – динамічний тиск в і-й точці, мм вод. ст.;

3) середньовитратну швидкість потоку (за формулою (4.6));

4) площу перерізу за формулою $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$;

4) масову витрату повітря через трубу (за формулою (4.3));

5) будують епюри швидкостей у перерізі за положеннями заслінки.

Результати всіх обчислень записують у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

Положення заслінки	Δp_u, мм вод.ст.	*t, ^0C*	$P_{ат}$, Па	Замір	r, мм	$\Delta p_{Д_i}$, мм вод.ст.	v_i м/с	$v_{сер}$ м/с	M, кг/с
1-ше				1 2 3 4 5 6 7 8 9	100 75 50 25 0 25 50 75 100				
2-ге									
3-тє									

Контрольні питання

1 Сформулюйте закон збереження маси потоку газу при однорідній течії.

2 Опишіть конструкцію трубки Прандтля.

3 Дайте визначення повного та статичного тиску.

4 Як вимірюється швидкісний напір?

5 Як виміряти динамічний тиск та швидкість потоку?

6 Дайте визначення середньовитратної швидкості.

Лабораторна робота 5
ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ТРУБІ

Мета роботи

Проведення візуального спостереження за характером руху рідини в скляній циліндричній трубі при різній її швидкості, визначення числа Рейнольдса і режиму течії.

Загальні положення

У природі існують два принципово різних режими руху рідини: ламінарний і турбулентний.

При ламінарному режимі рідина рухається шарувато, без перемішування її частинок, а також без пульсацій швидкості і тиску. у прямій трубі постійного перерізу усі лінії течії направлені паралельно осі труби. У загальному випадку ламінарного руху форма ліній течії визначається конфігурацією стінок, що обмежують потік.

При турбулентному режимі течія рідини супроводжується інтенсивним її перемішуванням, пульсаціями швидкостей і тисків. Рух окремих частинок є неупорядкованим, траєкторії їх мають різноманітний вид. Пояснюється це тим, що при турбулентному русі поряд з основним, поздовжнім переміщенням рідини, наявні поперечні переміщення й обертальний рух окремих частинок.

Існування двох режимів руху рідини було підтверджене експериментально у 1883 році англійським ученим О. Рейнольдсом.

Досліди Рейнольдса показали, що основним критерієм для визначення режиму руху служить безрозмірне число, яке названа його прізвищем і визначається за формулою

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot d}{\upsilon}, \qquad (5.1)$$

де V – швидкість руху рідини;
d – діаметр труби;
υ – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини.

Фізичний зміст числа Рейнольдса: це є величина, пропорційна відношенню сил інерції до сил тертя, що спричинюються в'язкістю.

Число Рейнольдса, при якому ламінарний режим руху рідини переходить у турбулентний, називають *критичним*.

$$\mathrm{Re}_{кр} = \frac{V_{кр} \cdot d}{\upsilon}. \qquad (5.2)$$

Швидкість, що відповідає критичному числу Рейнольдса, має назву *критична швидкість* і визначається за формулою

$$V_{кр} = \frac{\mathrm{Re}_{кр} \cdot d}{\upsilon}. \qquad 5.3)$$

На підставі досліджень $\mathrm{Re}_{кр} \approx 2300$. При $\mathrm{Re} < 2300$ рух рідини відбувається при ламінарному режимі, при $\mathrm{Re} > 2300$ – при турбулентному режимі.

Маючи швидкість руху рідини, її в'язкість і діаметр труби, можна розрахувати режим течії за формулою (5.1).

На практиці існують як ламінарний, так і турбулентний режими руху. Перший режим спостерігається в основному у тих випадках, коли по трубах протікають достатньо в'язкі рідини,

наприклад мастила. Другий наявний у водопроводах, а також у трубах, по яких протікають бензин, гас, спирти, кислоти та інші малов'язкі рідини.

Опис лабораторної установки

Установка для спостереження за режимами руху рідини (води) (рисунок 5.1) складається з відкритого напірного бака 1, до якого приєднана скляна трубка 2. вода в напірний бак подається по трубці 3, яка має вентиль 4. Для підтримання в напірному бакові постійного рівня рідини передбачена зливна трубка 5. Витрата рідини через скляну трубку 2 регулюється вентилем 6. Для визначення витрати рідини вимірюється час наповнення мірної ємності 7 до заданого рівня. У верхній частині бака міститься ємність 8 з водним розчином фарби, яка може по трубці 9 вводитися тонкою струминкою всередину потоку води у скляну трубку 2. Витрата підфарбованої рідини регулюється краном 10. Температура води вимірюється термометром 11.

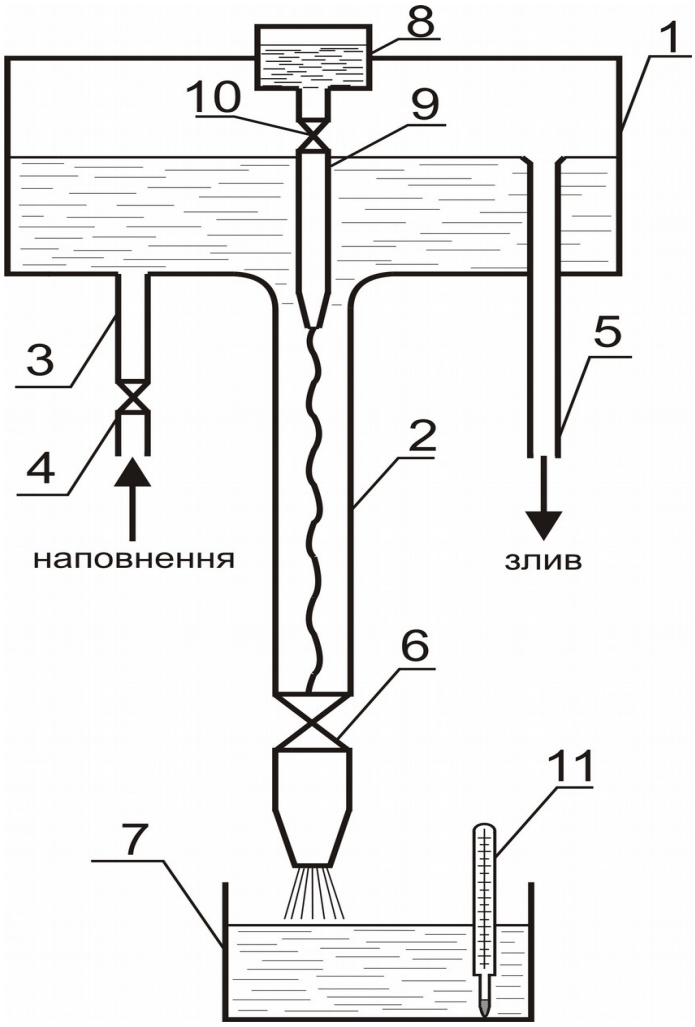

Рисунок 5.1

Порядок проведення досліду

1 Відкрити вентиль 4 і наповнити бак водою. При цьому треба слідкувати за тим, щоб рівень води в ньому був постійним.

2 Установити невелику швидкість руху води у трубці 2 вентилем 6.

3 Відкрити кран 10 і ввести тонкою струминкою через трубку 9 водний розчин фарби всередину потоку води у трубку 2.

4 Об’ємним способом визначити витрату води, користуючись мірною ємністю та секундоміром.

5 Термометром 11 виміряти температуру води.

6 Повільно відкриваючи вентиль 6 установити трохи більшу витрату води і повторити всі вимірювання. Провести 3-4 досліди при ламінарному режимі.

Продовжуючи збільшувати витрату води, провести ще два досліди: при перехідному режимі (струминка підфарбованої води буде мати коливальний характер), а потім при турбулентному (струминка підфарбованої рідини повністю розмита і вода в трубці 2 рівномірно забарвлена).

Обробка результатів дослідів і оформлення звіту за роботу:

а) визначити витрату води

$$Q = \frac{W}{t} \tag{5.4}$$

б) користуючись рівнянням об'ємної витрати знайти швидкість руху води

$$v = \frac{Q}{S}, \tag{5.5}$$

де S – площа перерізу трубки ($S = \frac{\pi d^2}{4}$, d – діаметр трубки);

в) визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості в залежності від температури;

г) знайти число Рейнольдса за формулою (5.1) і порівняти його з критичним. Зробити висновок про режими руху рідини.

Результати вимірювань і розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 5.1) і оформити звіт за роботу.

Таблиця 1 - Протокол випробувань

Величина	Позна-чення	Розмір-ність	Дослід				
			1	2	3	4	5
1 Мірний об'єм	W	$см^3$					
2 Час наповнення	t	с					
3 Об'ємна витрата	Q	$см^3/с$					
4 Площа перерізу	S	$см^2$					
5 Швидкість рідини	v	см/с					

6 Коеф. кінематичної вязкості	υ	$см^2/с$					
7 Число Рейнольдса	Re	-					
8 Режим руху		-					

Контрольні питання

1 Які існують режими руху рідини?

2 Яким критерієм визначається режим руху рідини?

3 Дайте коротку характеристику режимам руху рідини.

4 Що таке критичне число Рейнольдса і як воно визначається?

5 Від яких факторів залежить кінематичний коефіцієнт в'язкості?

6 Що таке критична швидкість руху рідини в трубопроводі?

7 Де в практиці існує ламінарний і турбулентний режими руху рідини?

Лабораторна робота 6
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТРАТ НА ТЕРТЯ ПО ДОВЖИНІ ТРУБОПРОВОДУ

Мета роботи

Експериментальне визначення коефіцієнта втрат на тертя по довжині λ (коефіцієнт Дарсі) при русі рідини в трубі та зіставлення отриманих результатів зі значеннями λ, вирахуваними за емпіричними формулами.

Основні розрахункові співвідношення

При русі рідини в трубопроводі виникають опори, на

подолання яких витрачається частина механічної енергії потоку. Відповідний перепад тиску Δp_ℓ як при ламінарному, так і при турбулентному русі може бути визначений за універсальною формулою Дарсі-Вейсбаха

$$\Delta p_\ell = \lambda \frac{\ell}{d} \rho_c \frac{v^2}{2}, \qquad (6.1)$$

де λ – коефіцієнт Дарсі;

ℓ – довжина ділянки, на якій визначається втрата тиску;

d – діаметр трубопроводу;

v – швидкість рідини;

ρ_c – густина рідини, що тече в трубопроводі.

Значення коефіцієнта λ при різних режимах руху рідини визначається такими емпіричними залежностями:

для ламінарного режиму (Re < 2300)

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}, \qquad (6.2)$$

тобто $\lambda = f(\mathrm{Re})$;

для турбулентного режиму:

а) в області гідравлічно гладких труб

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0.25}}. \qquad (6.3)$$

Формулу (6.3) називають формулою Блазіуса.

Тут, як і при ламінарному режимі, $\lambda = f(\mathrm{Re})$.

Межі зони гладкого тертя, за даними проф. А.А. Сабанєєва, орієнтовно визначаються інтервалом

$$2300 < \mathrm{Re} < 40 \frac{d}{\Delta},$$

де Δ – абсолютна шорсткість внутрішньої поверхні труби;

б) у перехідній області межа зони визначається інтервалом

$$40\frac{d}{\Delta} < \mathrm{Re} < 500\frac{d}{\Delta}, \tag{6.4}$$

а коефіцієнт опору визначається за формулою Альтшуля

$$\lambda = 0{,}1 \cdot \left(1{,}46\frac{\Delta}{\mathrm{d}} + \frac{100}{\mathrm{Re}}\right)^{0.25} \tag{6.5}$$

де $\lambda = f(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{d})$;

в) у зоні шорсткого тертя, де $\mathrm{Re} > 500\frac{d}{\Delta}$, коефіцієнт опору можна визначити за формулою Муріна

$$\lambda = \frac{1}{(2\lg\frac{\mathrm{d}}{\Delta} + 1{,}14)^2}, \tag{6.6}$$

де $\lambda = f(\frac{\Delta}{d})$.

Схема лабораторної установки наведена на рисунку 6.1

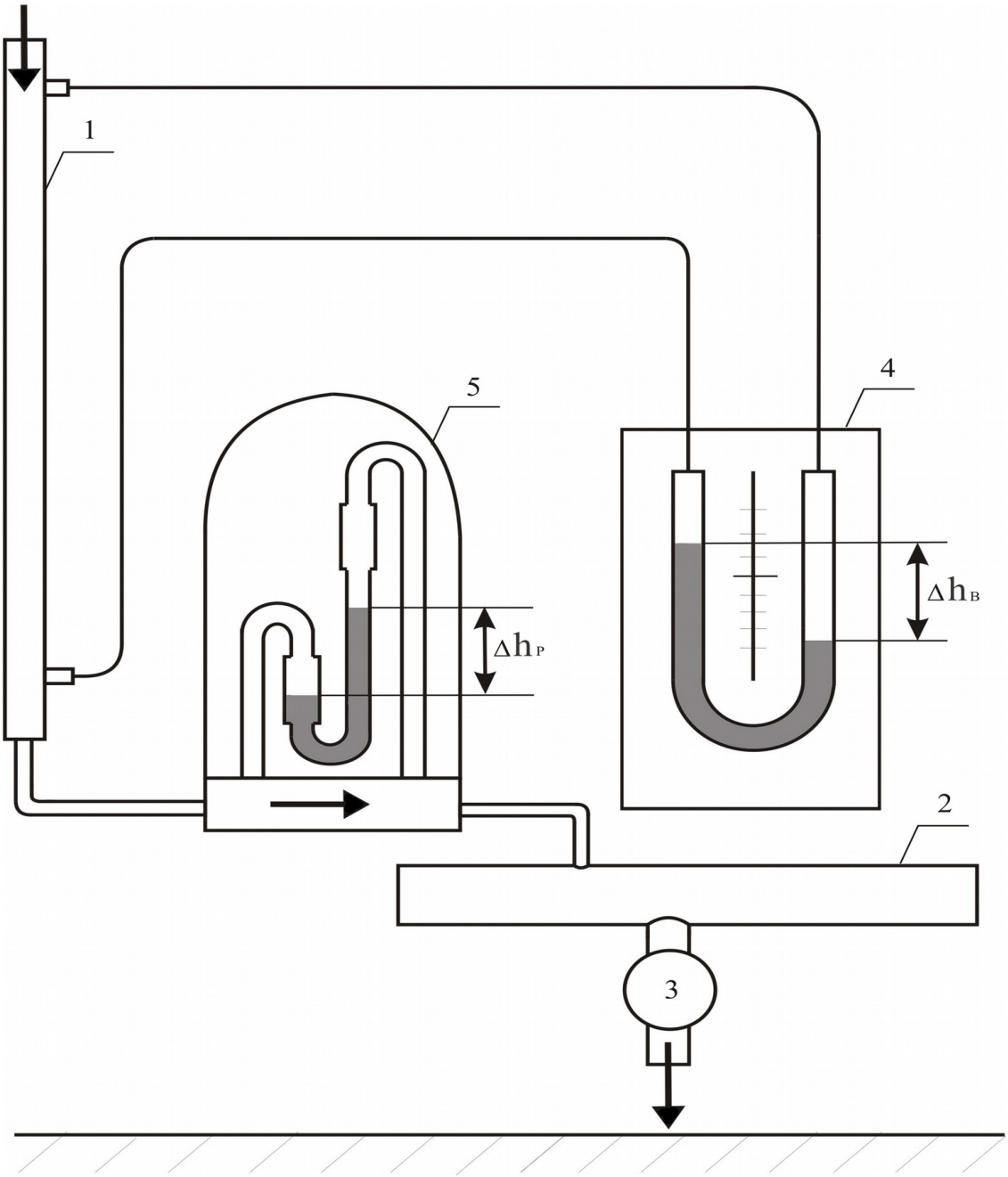

Рисунок 6.1

У лабораторній установці як робоче тіло використовується повітря.

Лабораторний стенд (рисунок 6.1) складається з трубки 1, вмонтованої в колектор 2. До колектора підключена повітродувка пилососа 3, яка відкачує з нього повітря. Падіння напору по довжині трубки вимірюється за допомогою скляної U - подібної трубки диференціального манометра 4 з водяним наповненням. Витрата повітря визначається за допомогою реометра 5, приладу, що складається з набору витратомірних шайб і диференціального

рідинного манометра.

Зміст роботи і порядок її виконання

1) вмикається повітродувка пилососа. Витримується інтервал часу 1–2 хв., протягом якого в трубках створюється сталий тиск повітря;

2) за реометром визначається витрата – Q;

3) за диференціальним манометром визначається перепад тиску на даній ділянці – Δp_ℓ;

4) вимірюється температура повітря і барометричний тиск;

5) змінюють швидкість обертання повітродувки за допомогою автотрансформатора, встановлюють нові витрати, і проводять виміри, аналогічні описаним вище.

Рекомендується починати з максимальної витрати, що відповідає граничним показанням реометра, і закінчувати витратою, що відповідає ламінарному руху повітря в досліджуваній трубці.

Обробка результатів спостережень і вимірювань

За формулою (6.1) визначають коефіцієнт Дарсі

$$\lambda = \frac{2\Delta P_\ell \cdot d}{\ell \cdot \rho_C \cdot v^2}. \qquad (6.7)$$

Для визначення Δp_ℓ при проведенні дослідів вимірюють перепад за дифманометром Δh_ℓ, який виражається в метрах стовпа рідини, що наповнює прилад. Величина Δp_ℓ пов'язана з цим перепадом таким співвідношенням:

$$\Delta p_\ell = \rho_м \cdot g \cdot \Delta h_\ell, \qquad (6.8)$$

де $\rho_м$ – густина рідини, залитої в прилад, кг/м^3.

Підставляючи (6.8) в (6.7), отримаємо розрахункову

формулу

$$\lambda = \frac{2g \cdot \Delta h_{\ell} \cdot d}{\ell \cdot v^2} \cdot \frac{\rho_м}{\rho_C} \qquad (6.9)$$

Густину повітря при відомій температурі і барометричному тиску підраховують за формулою

$$\rho_C = \frac{p}{RT}, \qquad (6.10)$$

де p – барометричний тиск, Н/м^2 (1 мм.рт.ст = 133,3 Н/м^2);

T – температура повітря, ^{0}К;

R= 287Дж/кгК – газова стала.

А середню швидкість течії повітря в трубці - за формулою

$$v = \frac{Q}{S}, \qquad (6.11)$$

де Q – виміряна реометром витрата повітря;

S – площа поперечного перерізу трубки $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$.

За відомою швидкістю течії повітря в трубці обчислюють число Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu},$$

яке необхідне для визначення розрахункового λ за формулою (6.2) або (6.3).

Результати всіх вимірів і розрахунків записати в таблицю 6.1. Оформити звіт за роботу.

t = _____ ^{0}C $p_{бар}$ = _____ мм рт. ст.

Таблиця 1

Q, $дм^3/хв$	V, м/с	υ, $м^2/с$	Δh_c, мм вод.ст.	$\rho_м$, $кг/м^3$	ρ_c, $кг/м^3$	Re	$\lambda_{дослід}$	$\lambda_{розрах.}$

Контрольні питання

1 Від яких параметрів залежить коефіцієнт Дарсі?

2 Які параметри повинні бути визначені дослідним шляхом для вирахування коефіцієнта Дарсі?

3 Які прилади необхідні для знаходження коефіцієнта втрат по довжині труб?

4 З якою метою в цій задачі визначається барометричний тиск?

5 Як визначається область гідравлічного опору?

6 Які величини повинні бути відомі при визначенні критерію Рейнольдса?

7 Чи завжди коефіцієнт Дарсі залежить від числа Рейнольдса і від відносної шорсткості?

8 Яким чином визначається середня швидкість у трубі при проведенні досліду?

9 Якою залежністю зв'язані величини Δp_ℓ і Δh_ℓ?

Лабораторна робота 7
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ВТРАТ ПРИ ЗВУЖЕННІ КАНАЛУ ТА ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ ВЕНТИЛЯ

Мета роботи

Експериментальне визначення коефіцієнтів місцевих втрат у різноманітних пристроях і елементах трубопроводу, що спричиняють деформацію потоку, та зіставлення отриманих значень з табличними.

Загальні положення та розрахункові співвідношення

Місцеві втрати напору – це втрати напору в місцевих опорах, що зосереджені на порівняно короткій ділянці, в межах якої потік різко деформується. Прикладами місцевих опорів є раптове розширення або звуження труби, діафрагма, встановлена в трубі, вентиль, різкий згин труби та ін. Причиною втрати напору є тертя, вихроутворення та різка зміна швидкості потоку за величиною або за напрямком.

Величина втрат напору на місцеві опори визначається за формулою Вейсбаха

$$h_м = \zeta \frac{v_{сер}^2}{2g}, \tag{7.1}$$

а втрата тиску за формулою

$$\Delta p_м = \zeta \cdot \frac{\rho v_{сер}^2}{2}, \tag{7.2}$$

де ζ – коефіцієнт місцевих втрат;

ρ – густина середовища;

$v_{сер}$ – середня швидкість потоку в перерізі труби, де є місцевий опір (якщо перед і за місцевим опором різні перерізи труби, то зазвичай береться середня швидкість у меншому перерізі).

Величина коефіцієнта місцевого опору залежить від його форми, числа Рейнольдса і, в деякій мірі, відносної шорсткості стінок. У тих випадках, коли суттєвими є втрати на тертя (дифузори, різкі згини та ін), вплив числа Рейнольдса зберігається до значення $Re \cong 10^5$.

Слід пам’ятати також про взаємний вплив місцевих опорів, який проявляється, наприклад, при турбулентному режимі течії, коли відстань між місцевими опорами менше 20…30 діаметрів трубопроводу. Якщо ж між місцевими опорами відстань більше наведеної, то взаємним впливом можна знехтувати і керуватися принципом накладення втрат (простим підсумовуванням втрат у

місцевих опорах).

Зважаючи на складність явищ, при русі рідини (газу) через місцеві опори, коефіцієнти місцевих опорів, як правило, визначають експериментальним шляхом, а їх значення наводять у довідниках.

Схема лабораторної установки подана на рисунку 7.1.

Лабораторна установка складається з труби 1 з місцевими опорами – раптовим звуженням каналу 2 і встановленим вентилем 3. Труба 1 вмонтована в колектор 4, до якого приєднана повітродувка 5, яка прокачує повітря через трубу з опорами.

Визначення падіння тиску при переході через звужуючий канал 2 проводиться U-подібним диференціальним манометром 6, а через вентиль – диференціальним манометром 7. Витрата повітря, що проходить через трубу з місцевими опорами, визначається за допомогою рідинного диференціального манометра 8, який вимірює перепад тиску на дросельній шайбі 9, встановленій на вхідній ділянці труби.

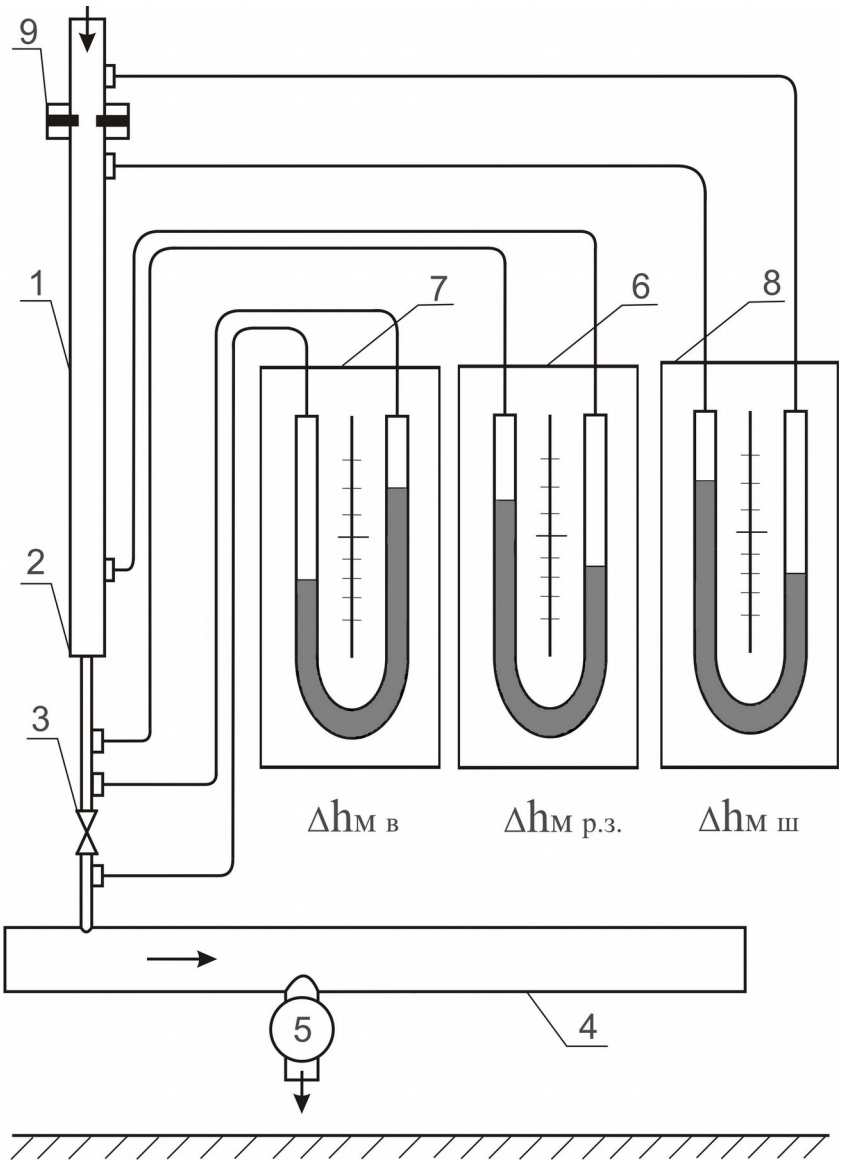

Рисунок 7.1

Порядок проведення досліду

Після перевірки робочого стану установки вмикається повітродувка, яка забезпечує рух повітря по трубі з місцевими опорами. Через 1-2 хвилини, коли встановиться стаціонарний режим руху повітря, визначити:

а) витрату повітря, користуючись диференціальним манометром, що підключений до дросельної шайби;

б) втрати напору в місцевих опорах (при звуженні каналу $\Delta h_{м\ р.з.}$ та на вентилі $\Delta h_{м\ в}$;

в) виміряти температуру повітря і барометричний тиск.

Змінюючи швидкість обертання повітродувки за допомогою автотрансформатора, встановити не менше п'яти нових витрат повітря, починаючи з максимальної, відповідно до показань диференціального манометра, і закінчивши витратою, що відповідає ламінарному руху повітря у трубці ($\Delta h_{м\ ш} \cong 4$ мм вод. ст.).

Коефіцієнт місцевих втрат може бути визначений із співвідношення

$$\zeta = \frac{2\Delta p_м}{\rho_C v^2}. \qquad (7.3)$$

Для випадку раптового звуження запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 (рисунок 7.2), вважаючи, що $z_1 = z_2$

$$p_1 + \rho_C \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho_C \frac{v_2^2}{2} + \Delta p_{м\ рз} \qquad (7.4)$$

або

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho_c}{2}\left(v_1^2 - v_2^2\right) + \Delta p_{м\ рз}. \qquad (7.5)$$

У цьому рівнянні

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{м\ рз} = \rho_м g \Delta h_{м\ рз}\ , \qquad (7.6)$$

де $\rho_м$ – питома маса рідини, якою заповнений дифманометр;

$\Delta h_{м\ рз}$ – перепад рідини у дифманометрі.

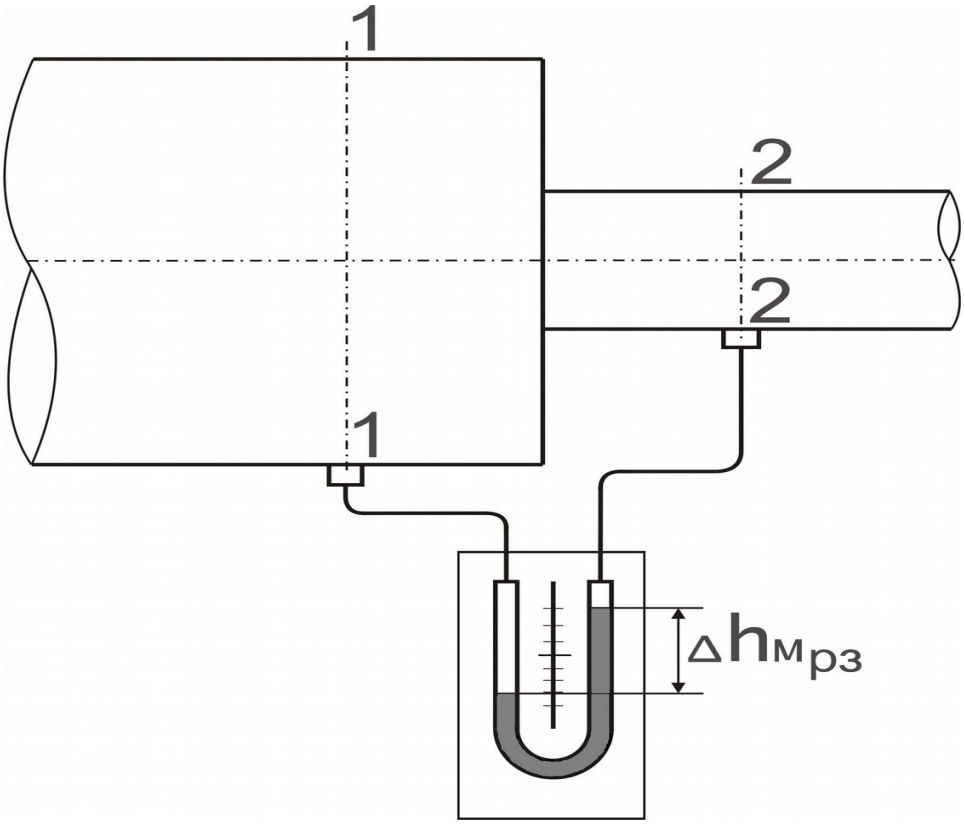

Рисунок 7.2

Після підстановки рівняння (7.6) у (7.5) і проведення перетворень отримаємо рівняння для визначення втрати тиску при раптовому звуженні труби, яке матиме вигляд

$$\Delta p_{м\,рз} = \rho_м g \Delta h_{м\,рз} - \rho_C \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}. \qquad (7.7)$$

А для вентиля, внаслідок того, що $v_1 = v_2$, втрата тиску буде визначатися рівнянням

$$\Delta p_{м\,в} = \rho_м g \Delta h_{м\,в}. \qquad (7.8)$$

Обробка результатів

1 За визначеною витратою повітря Q вираховується його швидкість

$$v = \frac{Q}{S},$$

де $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площа перерізу труби за опором

2 Знаючи температуру повітря і барометричний тиск, визначається питома маса середовища

$$\rho_c = \frac{p}{RT},$$

де R – газова стала, яка для повітря дорівнює 287 кДж/кг К.

3 Визначаються втрати тиску $\Delta p_{м\,рз}$ при раптовому звуженні каналу за формулою (7.7).

4 Визначаються втрати тиску $\Delta p_{м\,в}$ на вентелі за формулою (7.8).

5 За допомогою рівняння (7.3) визначаються коефіцієнти місцевих втрат ζ.

6 Для кожного досліду визначаються числа Рейнольда

$$Re = \frac{v_2 d_2}{\upsilon}$$

і будуються графіки залежності $\zeta_{рз}$ і $\zeta_{в}$ від Re.

7 Визначені дослідним шляхом коефіцієнти місцевих втрат $\zeta_{досл}$ порівнюються з табличними $\zeta_{табл}$ і вираховується відносна похибка обчислень $\zeta_{досл}$.

Результати вимірювань і розрахунків записуються в таблицю 7.1.

t = _____ ^{0}C $p_{бар}$ = _____ мм. рт. ст.

Таблиця 7.1

До-слід	$\Delta h_{м\,рз}$ мм	$\Delta h_{м\,в}$ мм	$\Delta h_{ш}$ мм	Q, $\frac{дм^3}{хв}$	v_1, м/с	v_2, м/с	ρ_c, $\frac{кг}{м^3}$	$\Delta p_{м\,рз}$, Па	$\Delta p_{м\,в}$, Па	$\zeta_{рз\,досл}$	$\zeta_{в\,досл}$	$\zeta_{рз\,табл}$	$\zeta_{в\,табл}$

Контрольні питання

1 Що являють собою місцеві опори?

2 Як вираховується середня швидкість потоку при визначенні ζ?

3 Як визначається втрата напору в місцевому опорі при раптовому звуженні труби?

4 Як визначається втрата напору в місцевому опорі при встановленні вентиля?

5 Яким рівнянням користуються при визначенні питомої маси середовища?

6 За яким рівнянням визначається втрата тиску при раптовому звуженні труби?

7 За яким рівнянням визначається втрата тиску при встановленні вентиля?

8 За якою залежністю вираховується коефіцієнт втрат ζ?

9 Від чого залежить коефіцієнт ζ при великих числах Re?

Лабораторна робота 8
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТИ ПРИ ВИТІКАННІ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ ТА НАСАДКИ

Мета роботи

Експериментальне визначення коефіцієнта витрати μ при

витіканні рідини через отвори та насадки і порівнянні отриманих даних з табличними.

Основні розрахункові співвідношення

Отвори та насадки, короткі труби $\ell \approx (4...5)d$ використовуються для пропускання певної кількості рідини і для створення струменів потрібних параметрів та якостей. Основною задачею гідравлічного розрахунку отворів (насадок) є визначення їх пропускної спроможності, тобто залежності витрати Q від діючого напору.

При витіканні рідини із малого отвору в тонкій стінці рідина в посудині рухається до отвору з усіх сторін, тому на виході існує викривлення траєкторій частинок, що призводить до стиснення струменя (рисунок 8.1).

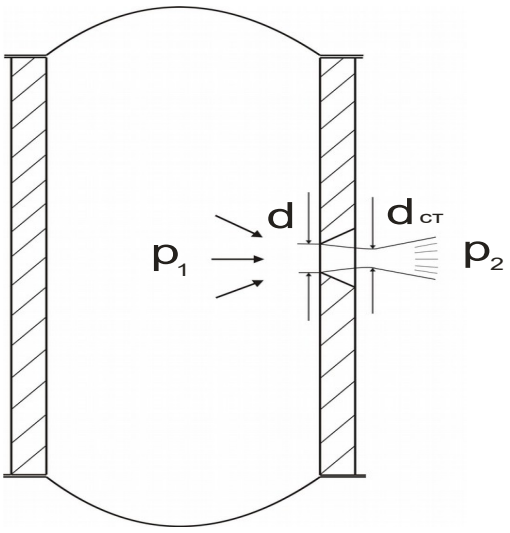

Рисунок 8.1

Максимальне стиснення спостерігається на відстані $\Delta\ell \approx \frac{d}{2}$ від кромки отвору. Відношення $\xi = \frac{S_{ст}}{S}$ називають коефіцієнтом стиснення, де S – площа отвору, $S_{ст}$ – найменша площа «живого» перерізу струменя.

Теоретична швидкість витікання рідини з отвору може бути визначена з рівняння

$$v_T = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_c}}, \tag{8.1}$$

де Δp – діючий перепад тисків;

ρ_c – густина рідини, що витікає.

Дійсна швидкість витікання менше теоретичної через опір при русі рідини. Відношення дійсної швидкості витікання до теоретичної називають коефіцієнтом швидкості

$$\varphi = \frac{v}{v_T}, \tag{8.2}$$

Згідно з рівнянням суцільності теоретична витрата дорівнює:

$$Q_T = v_T \cdot S, \tag{8.3}$$

а дійсна витрата $Q = v \cdot S_{ст}$.

Відношення дійсної витрати до теоретичної називається коефіцієнтом витрати

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} = \varphi \cdot \xi. \tag{8.4}$$

Таким чином, витрата рідини через отвір у тонкій стінці може бути визначена з виразу

$$Q = \mu \cdot S\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_c}}. \tag{8.5}$$

Витрата через насадок знаходиться за тими ж формулами.

Коефіцієнт витрати μ може бути визначений за відомими величинами Q, Δp, S із співвідношення

$$\mu = \frac{Q}{S\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_C}}}. \tag{8.6}$$

Схема лабораторної установки наведена на рисунку 8.2.

Лабораторна установка (рисунок 8.2) складається з циліндричної посудини 1 з двома торцевими кришками 2. У нижню кришку вкручений штуцер для підключення U-подібного манометра 3 з водяним наповненням та нагнітальний трубопровід з витратно-вимірною шайбою 4 для визначення витрати повітря. Конструкція верхньої кришки дає змогу встановити на ній будь-який тип досліджуваних насадок чи отворів.

U-подібний дифманометр 3 служить для визначення діючого перепаду тисків Δp. Повітря нагнітається в установку повітродувкою пилососа.

Порядок виконання роботи

1 Установлюють досліджуваний отвір (насадок).

2 Вмикають повітродувку. Витримують інтервал часу 1–2 хв., під час якого в системі створюється усталений рух повітря. Усталений рух характеризується стабільними показаннями дифманометра 3.

3 Знімають показання $\Delta h_ш$ за дифманометром 5 витратно-вимірної шайби.

4 Знімають показання Δh за дифманометром 3.

5 Вимірюють температуру повітря нагнітання та барометричний тиск;

6 Змінюючи швидкість повітродувки за допомогою автотрансформатора, встановлюють нові витрати та повторюють заміри аналогічно описаному вище.

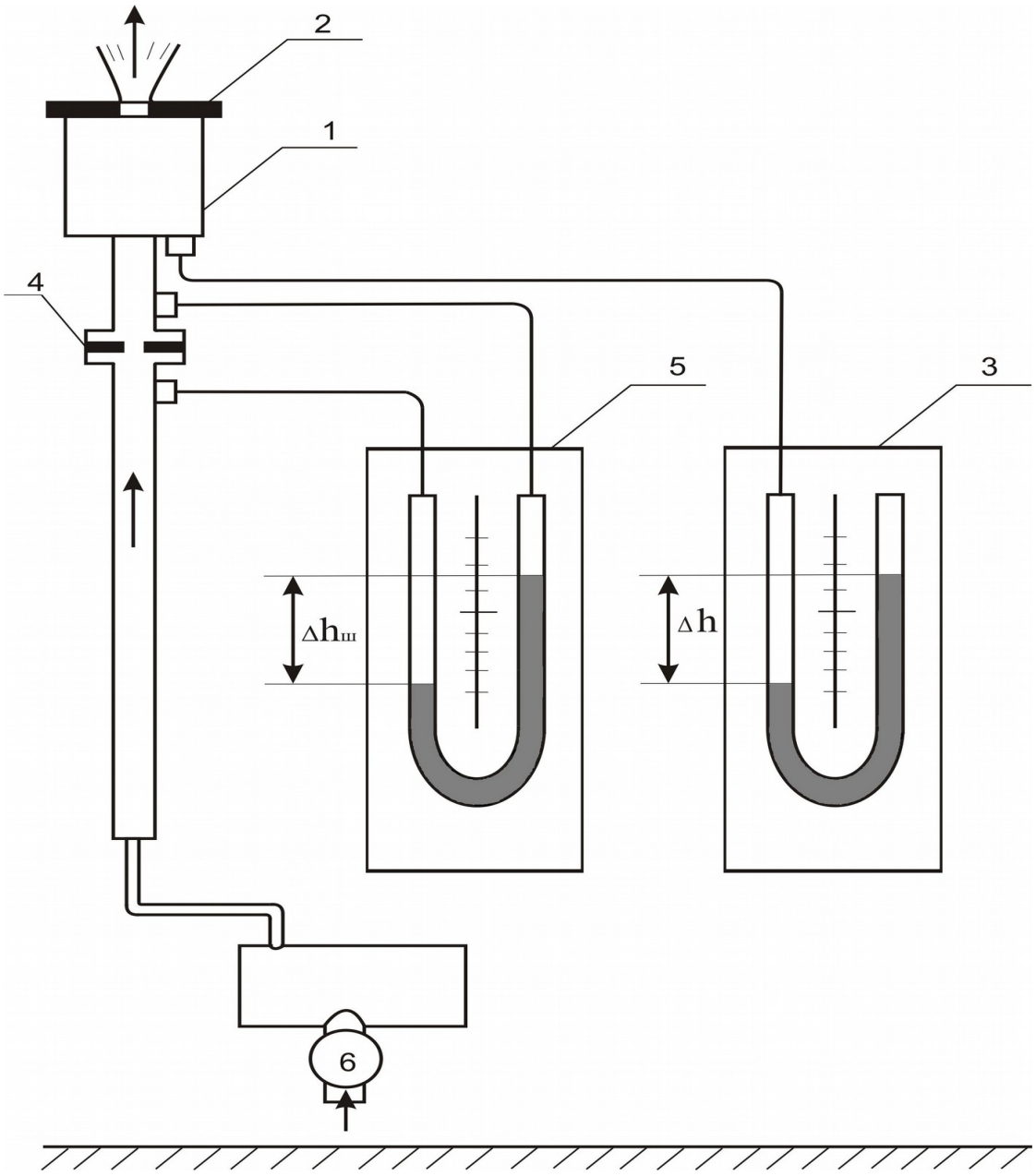

Рисунок 8.2

Обробка результатів спостережень

1 За виміряною температурою і барометричним тиском вираховують значення ρ_c

$$\rho_c = \frac{p}{RT}.$$

2 За виміряним перепадом $\Delta h_ш$ дифманометра мірної шайби, користуючись тарувальною кривою чи формулою, визначають витрату Q.

3 За відомим діаметром визначають площу живого перерізу (для конічного отвору, отвору, що звужується, та отвору, що розширюється, – площу вихідного перерізу).

4 Значення коефіцієнта витрати визначають за формулою (8.6) у вигляді:

$$\mu = \frac{Q}{S\sqrt{2g\Delta h\frac{\rho_м}{\rho_c}}},$$

де Q – витрата рідини через отвір;

S – площа перерізу досліджуваного отвору;

$\rho_м$ – густина рідини, яка наповнює манометр;

ρ_c – густина рідини, що витікає;

$g \cdot \Delta h \cdot \rho_м = \Delta p$ – діючий перепад тисків.

5 Для кожного досліду визначають число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{vd}{\upsilon}$, де $v = \frac{Q}{S}$, і будують залежність μ від Re;

6 Порівнюють дослідні значення $\mu_{досліду}$ з табличними $\mu_{табл}$ та здійснюють аналіз отриманих результатів.

Результати отриманих вимірювань та розрахунків записати до таблиці 8.1. Оформити звіт за роботу.

Таблиця 8.1

Тип отвору –	Q, дм^3/хв	Δh, мм	D, мм	ρ_c, кг/м^3	$\mu_{досліду}$	$\mu_{табл}$	V, м/с	Re

Контрольні питання

1 Від чого залежить коефіцієнт витрати при витіканні через отвори в тонкій стінці?

2 Від чого залежить коефіцієнт витрати при витіканні через

насадки?

3 Який вид має формула для визначення коефіцієнта витрати через отвір чи насадок?

4 Що називається насадком?

5 Як вирахувати коефіцієнт швидкості при витікання рідини через отвір у тонкій стінці?

6 Яким чином можливо виміряти вакуум у насадку?

7 Яким чином підтримується усталений рух у дослідах з насадком?

8 Як розраховується коефіцієнт витрати в насадку?

9 Як змінюється витрата, якщо до отвору у тонкій стінці приставити циліндричний насадок того ж діаметра?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: машиностроение, 1982. – 424 с.

2 Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика. Учеб. пособие для теплотехнических специальностей вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.

3 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.; Л.: Госєнергоиздат, 1960. – 464 с.

4 Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1976. – 502 с.

5 Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

6 Ярхо А.А., Счастний Е.Е., Лялюк В.М. Гидрогазодинамика. - Харьков: УкрГАЖТ, 2007. - 236 с.