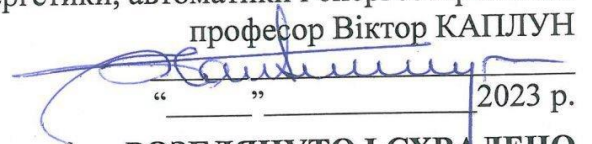
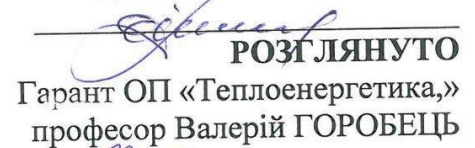


Кафедра теплоенергетики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
Директор ННІ  
енергетики, автоматики і енергозбереження  
професор Віктор КАПЛІУН

  
“ ” 2023 р.

**РОЗГЛЯНУТО І СХВАЛЕНО**  
на засіданні кафедри  
теплоенергетики  
Протокол № 5 від 14 червня 2023 р.  
В.о. завідувача кафедри  
доцент Євген АНТИПОВ

  
**РОЗГЛЯНУТО**  
Гарант ОП «Теплоенергетика,»  
професор Валерій ГОРОБЕЦЬ

## РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Гідрогазодинаміка  
(назва навчальної дисципліни)

Спеціальність 144 - Теплоенергетика  
(шифр і назва напрямку підготовки)

ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження  
Розробник: к.т.н., доц. Надія СПОДИНЮК

Київ 2023

## 1. Опис навчальної дисципліни

### Гідрогазодинаміка

(назва)

<b>Галузь знань, спеціальність, освітня програма, освітній ступінь</b>		
Освітній ступінь	Бакалавр	
Спеціальність	144 – Теплоенергетика	
Освітня програма	освітньо-професійна	
<b>Характеристика навчальної дисципліни</b>		
Вид	Вибіркова	
Загальна кількість годин	120	
Кількість кредитів ECTS	4,0	
Кількість змістових модулів	2,0	
Курсовий проект	120	
Форма контролю	<i>Екзамен</i>	
<b>Показники навчальної дисципліни для денної та заочної форм навчання</b>		
	денна форма навчання	заочна форма навчання
Рік підготовки (курс)	2-й	
Семестр	3-й	
Лекційні заняття	<i>30 год.</i>	
Практичні, семінарські заняття	-	
Лабораторні заняття	<i>30 год.</i>	
Самостійна робота	<i>60 год.</i>	
Індивідуальні завдання	-	
Кількість тижневих аудиторних годин для денної форми навчання	<i>2 год.</i>	

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

1. Мета і задачі дисципліни, її місце в учбовому процесі.

1.1. Мета навчальної дисципліни – здобуття майбутніми інженерами-енергетиками теоретичних знань і практичних навичок вирішення задач гідрогазодинаміки, вивчення основного рівняння гідростатики, розгляд різних умов руху рідини або газу.

1.2. Завдання дисципліни – підготовка студентів до практичних курсів з теплоенергетики і застосування знань про рух рідини або газу в трубному середовищі та на відкритому просторі.

1.3. Вимоги до знань та умінь, набутих у процесі вивчення дисципліни.

В результаті вивчення дисципліни студенти повинні **знати**:

- диференційні рівняння пограничного шару, рівняння руху в'язкої рідини, розподіл тиску на поверхні тіла, що обтікається потоком рідини або газу;
- подібність потоків при дії різних сил, загальні поняття і рівняння пограничного шару.

В результаті вивчення дисципліни студенти повинні **уміти**:

- вирішувати спеціальні задачі гідрогазодинаміки, в тому числі з розв'язку рівняння Бернуллі для різних умов руху рідини;
- виконувати моделювання обтікання тіл в'язкою і нев'язкою рідиною, визначати зону пограничного шару;
- проводити кінематичний аналіз руху рідини;
- досліджувати процеси обтікання тіл в аеродинамічній трубі;
- розраховувати параметри дифузорів та ежекторів як розпилювачів рідини або газу.

Набуття компетентностей:

**Загальні компетентності (ЗК):**

**ЗК1** Здатність реалізувати свої права і обов'язки як члена суспільства, усвідомлювати цінності громадянського (вільного демократичного) суспільства та необхідність його сталого розвитку, верховенства права, прав і свобод людини і громадянина в Україні.

**ЗК2** Здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії та закономірностей розвитку предметної області, її місця у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та ведення здорового способу життя.

**ЗК3** Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

**ЗК4** Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

**ЗК6** Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

**ЗК9** Здатність приймати обґрунтовані рішення.

### **Спеціальні (фахові) компетентності (ФК):**

**ФК1** Здатність застосовувати відповідні кількісні математичні методи, методи природничих та технічних наук і комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення інженерних завдань в теплоенергетичній галузі.

**ФК2** Здатність застосовувати і інтегрувати знання і розуміння інших інженерних дисциплін для вирішення професійних проблем.

**ФК7** Здатність враховувати ширший міждисциплінарний інженерний контекст у професійній діяльності в сфері теплоенергетики.

**ФК9** Здатність розробляти плани і проекти для забезпечення досягнення поставленої певної мети з урахуванням всіх аспектів вирішуваної проблеми, включаючи виробництво, експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію теплоенергетичного обладнання.

**ФК10** Здатність дотримуватися професійних і етичних стандартів високого рівня у діяльності в теплоенергетичній галузі.

**ФК11** Здатність забезпечувати якість в теплоенергетичній галузі.

### **3. Програма навчальної дисципліни**

**Змістовий модуль 1. Основні властивості рідини або газів. Умови витоку рідини.**

**Тема лекційного заняття 1. ПРЕДМЕТИ І ЗАДАЧІ ГІДРОГАЗОДИНАМІКИ.**

Поняття гідрогазодинаміки. Предмет і завдання гідрогазодинаміки. Механіка рідини і газу. Рідина в теорії гідродинаміки. Газодинаміка.

**Тема лекційного заняття 2. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН І ГАЗІВ.**

Густина. Питома вага. Стисливість. Температурне розширення. В'язкість. Поверхневий натяг. Розчинність газів в крапельних рідинах. Багатокомпонентні рідини. Ідеальна рідина, ідеальний газ. Неньютонівські рідини.

**Тема лекційного заняття 3. ГІДРОСТАТИКА.**

Сили, що діють в рідині. Властивості тиску в рідині в стані спокою. Рівняння Ейлера рівноваги рідини. Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля. Відносний спокій (рівновага) рідини.

**Тема лекційного заняття 4. ВИТІК РІДИНИ З ОТВОРІВ І НАСАДКІВ.**

Витікання рідини з отвору в тонкій стінці. Витік через незатоплений отвір. Витік рідини через малий отвір у вертикальній тонкій стінці при постійному напорі. Витікання рідини через затоплений отвір. Гідравлічний розрахунок насадків.

## **Змістовний модуль 2. Обтікання тіл потоком в'язкої та нев'язкої рідини.**

### **Тема лекційного заняття 5. ОБТІКАННЯ ТІЛ ІДЕАЛЬНОЮ РІДИНОЮ.**

Розподіл тисків на поверхні обтікаючих тіл. Теорема Жуковського про підймальну силу крила. Застосування методу комплексних змінних до висновку теореми Жуковського. Формули Чаплигіна для головного вектора і момента сил тиску потоку на крило.

### **Тема лекційного заняття 6. ДИНАМІКА В'ЯЗКОЇ РІДИНИ.**

Обтікання циліндра потоком в'язкої рідини. Аеродинамічні коефіцієнти. Обтікання твердого шару потоком в'язкої рідини. Характеристика аеродинаміки будинків.

### **Тема лекційного заняття 7. ПОДІБНІСТЬ ПОТОКІВ ПРИ ДІЇ РІЗНИХ СИЛ.**

Теорія розмірностей. Елементи теорії подібності і розмірності в моделюванні систем і процесів. Механічна подібність. Гідродинамічні критерії подібності. Методи аналогій.

### **Тема лекційного заняття 8. ПОГРАНИЧНИЙ ШАР.**

Аеродинамічний опір. Утворення пограничного шару. Ламінарний пограничний шар на плоскій пластині. Відривання пограничного шару. Доріжка завихрень за циліндром. Рух в початкових ділянках трубопроводів.

#### 4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин											
	денна форма						Заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	с.р.		л	п	лаб	інд	с.р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Змістовий модуль 1. Основні властивості рідини або газів. Умови витоку рідини</b>												
Тема 1. Предмети і задачі гідрогазодинаміки.	12	3		3		6						
Тема 2. Основні властивості рідин і газів.	12	3		3		6						
Тема 3. Гідростатика.	12	3		3		6						
Тема 4. Витік рідини з отворів і насадків.	12	3		3		6						
Разом за змістовим модулем 1	48	12		12		24						
<b>Змістовий модуль 2. Обтікання тіл потоком в'язкої та нев'язкої рідини</b>												
Тема 1. Обтікання тіл ідеальною рідиною.	16	4		4		8						
Тема 2. Динаміка в'язкої рідини.	16	4		4		8						
Тема 3. Подібність потоків при дії різних сил.	16	4		4		8						
Тема 4. Пограничний шар.	24	6		6		12						
Разом за змістовим модулем 2	72	18		18		36						
Усього годин	120	30		30		60						

## 5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		
2		
...		

## 6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин

## 7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Прилади для вимірювання тисків та швидкостей газу	3
2	Вимірювання тиску та витрати, визначення режиму течії рідини	3
3	Побудова напірної та п'єзометричної лінії трубопроводу. Вивчення рівняння Бернуллі	3
4	Визначення коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів	3
5	Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя	4
6	Тарування пневмометричної трубки в аеродинамічній трубі	4
7	Дослідження розподілення тиску по поверхні моделі будинку змінної висоти	4
8	Вимірювання полів швидкості і тиску потоку повітря у робочій ділянці розіткненої аеродинамічної труби дозвукових швидкостей	6
	Разом	30

## 8. Тестові питання

1. Закономірності руху газів при великих швидкостях вивчаються...

$$\frac{p_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + H_1 = \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \xi \frac{v_c^2}{2g},$$

2. Рівняння Бернуллі виду:  $\frac{p_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + H_1 = \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \xi \frac{v_c^2}{2g}$ , м записано для випадку....

3. Прилади, які використовуються для проведення досліджень явища обтікання споруд в аеродинамічній трубі:

- вольтметр;
- анемометр;
- мікроманометр;
- барометр.

4. Механіка рідини і газу включає ...

5. За формулою  $\beta_t = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t}$ ,  $\frac{1}{^\circ C}$  визначається ....

6. Трубка Піто-Прандтля служить для вимірювання:

- динамічного тиску;

- втрат тиску;
- барометричного тиску;
- абсолютного тиску;

7. Яке словосполучення пропущене в реченні: «Прилади, які використовуються для проведення досліджень явища обтікання споруд в аеродинамічній трубі – це...»?

## 9. Самостійна робота під керівництвом НПП

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Розрахунок затопленої вільної ізотермічної струмини круглого січення	15
2	Розрахунок вільної неізотермічної струмини	15
3	Розрахунок конективної струмини	15
4	Розрахунок турбулентної стумини в зносчому потоці	15
	Разом	60

## 10. Контрольні питання, комплекти тестів для визначення рівня засвоєння знань студентами

1. Що являє собою предмет «Гідрогазодинаміка»?
2. Що включає в себе механіка рідин і газів?
3. Які закони вивчаються гідрогазодинамікою?
4. Розкрийте загальну класифікацію динаміки.
5. Густина як фізична величина.
6. Що являє собою питома вага?
7. Розкрийте поняття стисливості рідини або газу.
8. Що являє собою температурне розширення?
9. Опишіть поняття в'язкості рідини. 10. Типи в'язкості та їх властивості. 11. Поверхневий натяг як фізичне явище.
12. Особливості розчинності газів в крапельних рідинах.
13. Властивості та приклади багатоконпонентних рідин.
14. Розкрийте поняття ідеальної рідини та ідеального газу.
15. Класифікація не ньютонівських рідин.
16. Основні характеристики ньютонівських рідин.
17. Опишіть масові і поверхневі сили, що діють на рідку частинку.
18. Основні властивості тиску в рідині в стані спокою.
19. Рівняння Ейлера рівноваги рідини
20. Розкрийте суть закону Паскаля.
21. Основні властивості рідини в стані спокою.
22. Опишіть основне рівняння гідростатики.
23. Опишіть процес витікання рідини з отвору в тонкій стінці.
24. Основні відмінності отворів з досконалим і недосконалим стисненням струменя.
25. Опишіть процес витікання рідини з отвору з неповним стисненням струменя.
26. Процес витікання рідини через незатоплений отвір.
27. Витікання рідини через малий отвір у вертикальній тонкій стінці при постійному напорі.
28. Опишіть процес витікання рідини через затоплений отвір.



29. Витікання рідини через циліндричні насадки.  
 30. Витікання рідини через конічні насадки. 31. Обтікання циліндра потоком нев'язкої рідини.  
 32. Розподіл тиску при обтіканні циліндру нев'язкою рідиною. 33. Розкрийте теорему Жуковського про підймальну силу крила.  
 34. Визначення об'єму рідини, що заключена між поверхнею обтікаючої контура С.  
 35. Застосування методу комплексних змінних до висновку теореми Жуковського.  
 36. Формули Чаплигіна для головного вектора і моменту сил тиску потоку накрило.  
 39. Опишіть процес утворення ліній дії підйальної сили з пластинкою.  
 38. Розподіл тиску при обтіканні циліндра в'язкою рідиною. Визначення аеродинамічних коефіцієнтів.  
 40. Розподіл аеродинамічного коефіцієнту при обтіканні будинку.  
 41. Обтікання диску потоком в'язкої рідини.  
 42. Обтікання твердого шару потоком в'язкої рідини при  $Re \leq 1$ .  
 43. Обтікання твердого шару потоком в'язкої рідини при  $Re \leq 5$ .  
 44. Дайте пояснення схемі обтікання будинку повітряним потоком (при різних швидкостях).  
 45. Властивості обтікання окремо стоячого будинку повітряним потоком. 46. Що вивчає теорія розмірностей?  
 47. Основне правило розмірностей.  
 48. Елементи теорії подібності і розмірності в моделюванні систем і процесів.  
 49. Опишіть загальні положення теорії подібності. 50. Опишіть основні властивості механічної подібності. 51. Особливості геометричної та кінематичної подібності. 52. Основні методи аналогій.  
 53. Опишіть особливості часткового моделювання по критерію Рейнольдса ( $Re$ ).  
 54. Опишіть особливості часткового моделювання по критерію Фруда ( $Fr$ ).  
 55. Опишіть процес утворення ламінарного пограничного шару на плоскій пластині.  
 56. Особливості утворення пограничного шару вздовж пластини.  
 57. Відривання пограничного шару.  
 58. Утворення доріжки завихрень за циліндром.  
 59. Опишіть рух рідини або газу в початкових ділянках трубопроводів. 60. Витікання рідини через малий отвір у вертикальній тонкій стінці при постійному напорі.

## 10. Методи навчання

Методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності студентів, які використовуються при вивченні дисципліни:

1. В аспекті передачі і сприйняття навчальної інформації:
  - словесні (лекція);
  - наочні (ілюстрація, демонстрація).
2. В аспекті логічності та мислення:
  - пояснювально-ілюстративні (презентація);
  - репродуктивні (короткі тестові завдання).
3. В аспекті керування навчанням:
  - навчальна робота під керівництвом викладача;
  - самостійна робота під керівництвом викладача.
4. В аспекті діяльності в колективі:
  - методи стимулювання (додаткові бали за реферати, статті, тези).

5. В аспекті самостійної діяльності:

- навчальний модуль: структурно-логічні схеми; вибіркові тести.

## 11. Форми контролю

Основними формами організації навчання під час вивчення дисципліни «Гідрогазодинаміка» є лекції, з використанням мультимедійних засобів навчання, лабораторні заняття, доповідей на щорічні студентські конференції, консультації, самостійна робота студентів.

Відповідно до вище зазначених форм організації навчання формами контролю засвоєння програми є: самоконтроль, здача модульних тестів на elearn та здача іспиту за період вивчення дисципліни.

## 12. Розподіл балів, які отримують студенти

Оцінювання знань студента відбувається за 100-бальною шкалою і переводиться в національні оцінки згідно з табл. 1 «Положення про екзамени та заліки у НУБіП України» (наказ про уведення в дію від 27.12.2019 р. № 1371).

Рейтинг здобувача вищої освіти, бали	Оцінка національна за результати складання	
	екзаменів	заліків
90 – 100	Відмінно	Зараховано
74 – 89	Добре	
60 – 73	Задовільно	
0 – 59	Незадовільно	Не зараховано

Для визначення рейтингу студента (слухача) із засвоєння дисципліни  $R_{\text{дис}}$  (до 100 балів) одержаний рейтинг з підсумкової атестації  $R_{\text{па}}$  (іспит, до 30 балів) додається до рейтингу студента (слухача) з навчальної роботи  $R_{\text{нр}}$  (до 70 балів):

$$R_{\text{дис}} = R_{\text{нр}} + R_{\text{па}}$$

## 13. Методичне забезпечення

Наявність комп'ютерних класів, рекомендована література, методичні вказівки.

## 14. Рекомендована література

### Основна література

1. Максимов Г.А. Движение воздуха при работе систем вентиляции и отопления / Г.А. Максимов, В.В. Дерюгин – Ленинград: Издательство литературы по строительству, 1972. – 97 с.
2. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов. / Талиев В.Н. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
3. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / Шепелев И.А. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

4. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 264 с.

### Додаткова література

5. Системний аналіз технічних об'єктів: навчальний посібник / І.І. Назаренко, А.Т. Свідерський та ін. / За ред. І.І. Назаренка – К.: КНУБА, 2009. – 164 с.

6. Иванов О.П., Мамченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы: Учеб. Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки». – Л.: Машиностроение, Ленингр. От- ние, 1986. – 280 с.

7. Ткачук А.Я., Довгалюк В.Б. Аеродинаміка вентиляції: Навчальний посібник. – ІВНВП «Укреліотех», 2009. – 376 с.

### Інтернет джерела

8. Імпульсна аеродинамічна труба КБ «Південне». <https://www.youtube.com/watch?v=ZbL4cIgk1bE>.
9. Трубка Піто. [https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%9F%D1%96%D1%82%D0%BE](https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D1%96%D1%82%D0%BE).
10. Вихрова доріжка. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D1%85%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D1%85%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BA%D0%B0).
11. Витікання рідини через насадки. <https://sites.google.com/site/osnoviteplotehnikitagidravliki/rozdil-persij-osnovi-gidravliki-i-nasosi/-2-gidrodinamika/2-14-vitikanna-ridini-cerez-nasadki>

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

*Кафедра теплоенергетики*

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

## **ГІДРОГАЗОДИНАМІКА**

для студентів денної форми навчання освітнього ступеня  
**«Бакалавр»**  
зі спеціальності  
144 - «Теплоенергетика»

Київ 2022

**УДК 536.24;532.54**

Рекомендовано Вченою радою ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України (протокол № \_\_ від \_\_ \_\_\_\_\_ 2022 р.)

Укладачі: доцент Н.А. Сподинюк, доцент Є.О. Антипов

Рецензенти: д.т.н., професор В.Г. Горобець,

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни

## **ГІДРОГАЗОДИНАМІКА**

Укладачі: СПОДИНЮК Надія Андріївна

АНТИПОВ Євген Олексійович

Наведено основні положення з підготовки, проведення та оформлення лабораторних робіт з дисципліни «Гідрогазодинаміка» для студентів денної форми навчання освітнього ступеня «Бакалавр» зі спеціальності 144 - «Теплоенергетика». Вказівки містять короткі теоретичні відомості та практичні рекомендації щодо виконання лабораторних робіт.

## ЗМІСТ

Загальні вказівки до проведення лабораторних робіт .....	16
Лабораторна робота № 1..... <b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b> ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКІВ ТА ШВИДКОСТЕЙ ГАЗУ..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.9</b>
ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ ТА ВИТРАТИ, ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ ТЕЧІЇ РІДИНИ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.9</b>
Лабораторна робота № 3.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.9</b>
ПОБУДОВА НАПРНОЇ ТА П'ЄЗОМЕТРИЧНОЇ ЛІНІЙ ТРУБОПРОВОДУ. ВИВЧЕННЯ РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.9</b>
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 .....	36
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРІВ.....	36
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 .....	44
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ТЕРТЯ .....	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 .....	51
ТАРУВАННЯ ПНЕВМОМЕТРИЧНОЇ ТРУБКИ В АЕРОДИНАМІЧНІЙ ТРУБІ.....	51
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 .....	58
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ТИСКУ ПО ПОВЕРХНІ МОДЕЛІ БУДИНКУ ЗМІННОЇ ВИСОТИ .....	58
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 .....	67
ВИМІРЮВАННЯ ПОЛІВ ШВИДКОСТІ І ТИСКУ ПОТОКУ ПОВІТРЯ У РОБОЧІЙ ДІЛЯНЦІ РОЗІМКНЕНОЇ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ТРУБИ ДОЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЕЙ .....	67
Література .....	86

# ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

## 1. Організація роботи студентів у лабораторії

На першому занятті необхідно провести загальний інструктаж з техніки безпеки (ТБ). Студенти повинні розписатися на контрольному листку або в журналі проведення інструктажів з ТБ.

Перед початком виконання лабораторної роботи студент уточнює особливості виконання заходів безпеки при виконанні роботи на даній установці.

Студенти, які пропустили заняття, повинні вивчити питання, пов'язані з заходами безпеки самостійно, здати реферат і залік з ТБ завідуючому лабораторією, бо вони не будуть допущені до проведення лабораторних робіт.

Студенту необхідно усвідомити мету роботи, послідовність спостережень і вимірювань. Загальні теоретичні відомості по темі викладені коротко на початку кожної роботи.

У робочому зошиті повинна бути наведена назва роботи, її мета, схема експериментальної установки з зазначенням її основних функціональних вузлів, розрахункові формули і таблиці, для результатів вимірів і обчислень. Якщо для вимірювань використовуються прилади, які серійно випускаються промисловістю, то необхідно також записати їхні технічні характеристики.

У розрахунках рекомендується використовувати розмірність міжнародної системи одиниць (СІ). Дозволяється також використовувати ті позасистемні одиниці, що допускаються нормативними документами. Наприклад, літри – для вимірювання об'єму; метри водяного стовпа (м. вод. ст.), міліметри ртутного стовпа (мм. рт. ст.) – для вимірювання тиску. Результати вимірювань і обчислень рекомендується представити на захист у табличній і графічній формах. Графіки необхідно викреслювати на міліметровому папері, або на листах паперу в клітинку.

При захисті виконаних робіт студент повинен дати якісну оцінку результатів роботи, пояснити фізичний зміст явищ, що спостерігаються під час виконання роботи, область застосування одержаних результатів, пояснити можливу причину розбіжності результатів, отриманих у даній роботі з відомими, уміти пов'язати вивчені питання з потребами сільського господарства. В кінці опису кожної лабораторної роботи дається приблизний перелік контрольних запитань для самопідготовки до захисту лабораторних робіт.

## 2. Правила техніки безпеки під час роботи в лабораторії гідравліки та



## **гідрогазодинаміки**

Перед початком роботи на установках, необхідно пам'ятати, що часто це досить складні пристрої, які міняють свої властивості з часом (корозія, утворення відкладень, старіння гумових, пластмасових трубок та ізоляції), тому студенти повинні обережно ставитись до них, проявляти високу самодисципліну на всіх етапах виконання робіт.

Напряга живлення насосів та вентиляторів, підсвічувальних ламп (220 В) є небезпечною для життя людини. Тому, незважаючи на те що в конструкції лабораторних установок передбачена достатня ізоляція від струмопровідних ділянок, необхідно знати та чітко виконувати ряд правил техніки безпеки.

### **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:**

- торкатися проводів живлення та заземлення, з'єднувальних кабелів;
- порушувати порядок увімкнення й вимикання апаратних блоків;
- класти на апаратуру та столи сторонні предмети, залишати сміття;
- вмикати та вимикати установки, якщо на вмикачах є сліди води;
- палити в приміщенні, та користуватись відкритим вогнем (запальничками);
- користуватися на заняттях мобільними телефонами (їх потрібно перед заняттям вимикати).

Перед початком роботи на установках необхідно отримати дозвіл на роботу в уповноважених осіб педагогічно-лаборантського складу. Працювати на лабораторних установках дозволяється не менше 2-м студентам (особливо це стосується тих, хто пропустив заняття і відпрацьовує в додатковий час).

Під час роботи на установках

### **НЕОБХІДНО:**

- суворо дотримуватися інструкції з експлуатації апаратури;
- працювати чистими сухими руками, не натискаючи на вмикачі без потреби; крани крутити усвідомлено, а не навмання;
- після завершення роботи установки повинні бути вимкнені, крани, які відкривалися в процесі роботи - закриті.

У разі появи запаху горілого, самовільного вимикання апаратури, незвичних звуків, підтікання води треба негайно повідомити про це обслуговуючий персонал та вимкнути установку. Не можна працювати на установках при недостатньому освітленні, високому рівні шуму тощо.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

## ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКІВ ТА ШВИДКОСТЕЙ ГАЗУ

**Метою роботи** є ознайомлення з приладами для вимірювання тисків та швидкостей газу, вимірювання повного тиску.

### **Завдання:**

1. Вивчити основні прилади для вимірювання тисків та швидкостей газу.
2. Виміряти повний тиск диференціальним та електронним мікроманометром.
3. Зробити порівняльний аналіз отриманих результатів.

### **Загальні відомості**

#### *Прилади для вимірювання тиску газу*

Прилади для вимірювання надлишкових тисків називають манометрами. Прилади для вимірювання перепадів тисків називають диференціальними манометрами або дифманометрами.

Основними характеристиками манометрів є діапазон тисків, що вимірюються, точність, чутливість, лінійність та швидкодія.

Прилади для вимірювання тиску, які застосовують при гідрогазодинамічних дослідженнях, можна поділити на такі групи: рідинні, деформаційні, вантажопоршневі, електричні, іонізаційні та теплові.

Рідинні манометри. За принципом вимірювання рідинні манометри можна поділити на дві групи: манометри безпосереднього відліку та манометри «нульового» типу.

У манометрах з безпосереднім відліком вимірюють різницю висот між двома поверхнями рідини в сполучних посудинах. Кожна з висот визначається по відношенню до нерухомої рами приладу.

Манометри «нульового» типу основані на переміщенні однієї із сполучених посудин відносно другої нерухомої посудини зі збереженням незмінного рівня (нульового) рідини в нерухомій посудині. Тиск визначається за висотою рухомої посудини. Як робоче середовище в рідинних манометрах найчастіше застосовують спирт, воду і ртуть.

Основні вимоги до манометричних рідин: висока хімічна стійкість, мала в'язкість, мала величина капілярної сталої, низький коефіцієнт теплового розширення, низький ступінь випаровування, відсутність схильності до забруднення і поглинання вологи з повітря. Всі ці вимоги спрямовані на підвищення точності вимірювання.

Найпростішим рідинним дифманометром є  $U$ -подібний манометр (рис. 1.1, а). Він складається з  $U$ -подібної трубки, залитої рідиною до певного рівня. При подачі перепаду тисків  $p_1 - p_2$  ( $p_1 > p_2$ ) рівень рідини в трубці під вищим тиском ( $p_1$ ) знизиться, за рахунок підйому рівня рідини в трубці під нижчим тиском ( $p_2$ ) (рис.1.1, б).

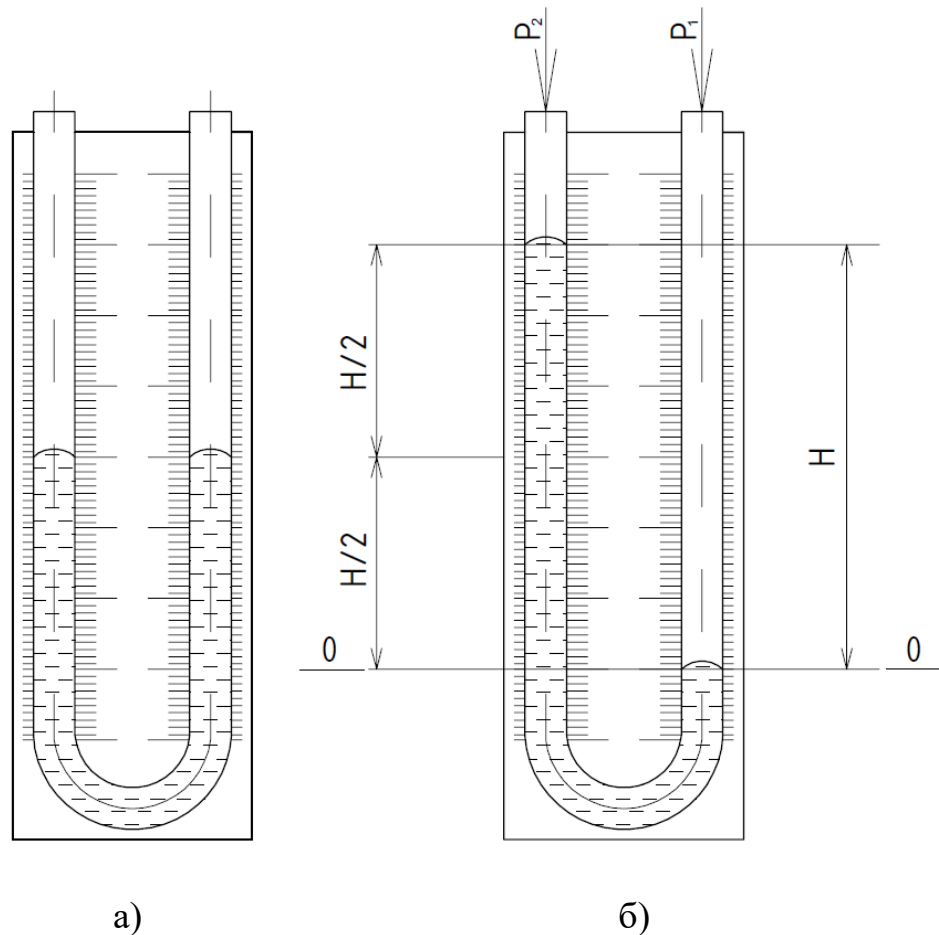


Рис. 1.1.  $U$ -подібний манометр  
а – вільний; б – під дією перепаду тисків

З рівняння гідростатичної рівноваги відносно площини 0-0 (рис. 1.1, б):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h \quad (1.1)$$

Цей прилад використовується тільки при тисках, що перевищують 200 Па з урахуванням обмеженої точності взяття відліку ( $\pm 0,5$  мм стовпа рідини).

Прилади для вимірювання низьких тисків називаються тягомірами або мікроманометрами.

Для підвищення точності приладу одна із трубок  $U$ -подібного манометра нахилиється. Друга трубка замінюється чашкою, площа перерізу якої значно перевищує переріз похилої трубки. При відношенні площі трубки до площі

резервуара 1:700 можна взагалі не враховувати зміну рівня рідини в чашці. Такий прилад називається чашковим манометром (рис. 1.2).

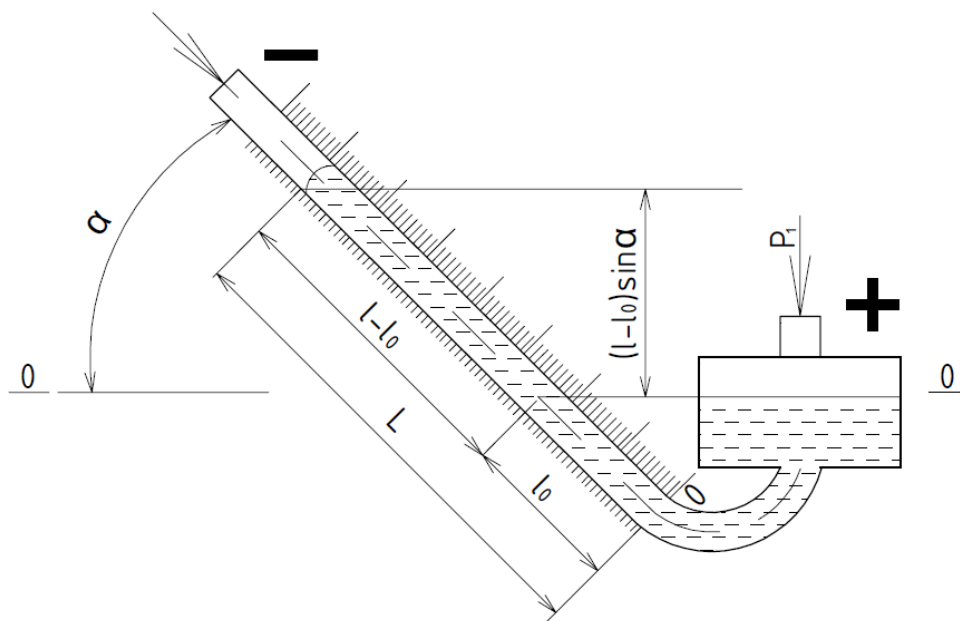


Рис. 1.2. Чашковий манометр

Запишемо рівняння гідростатичної рівноваги відносно площини 0-0 (рис. 1.2), з якого знайдемо перепад тисків:

$$p_1 - p_2 = c\rho g(l - l_0) \sin \alpha, \quad (1.2)$$

де  $c$  – градувальний коефіцієнт, що враховує неточності виготовлення приладу.

В мікроманометрі чашковому багатомезовому ММН (рис. 1.3) робочою рідиною є спирт з густиною  $\rho_0=0,8095 \text{ г/см}^3$ . Заповнення резервуара 1 спиртом відбувається через отвір 2. Обертаючи регулятор 3, можна рівень спирту в скляній трубці 4 вивести на нульову поділку.

На кришці бачка встановлений трьохходовий кран 5 з трьома штуцерами, а також з отвором для з'єднання з атмосферою. Перший штуцер використовується для постійного з'єднання крана зі скляною трубкою.

При вимірюванні надлишкового (над атмосферним) тиску використовується другий штуцер, а при вимірюванні розрідження – третій штуцер. У випадку перепаду тиску для вимірювання підвищеного тиску використовується другий штуцер, а пониженого – третій.

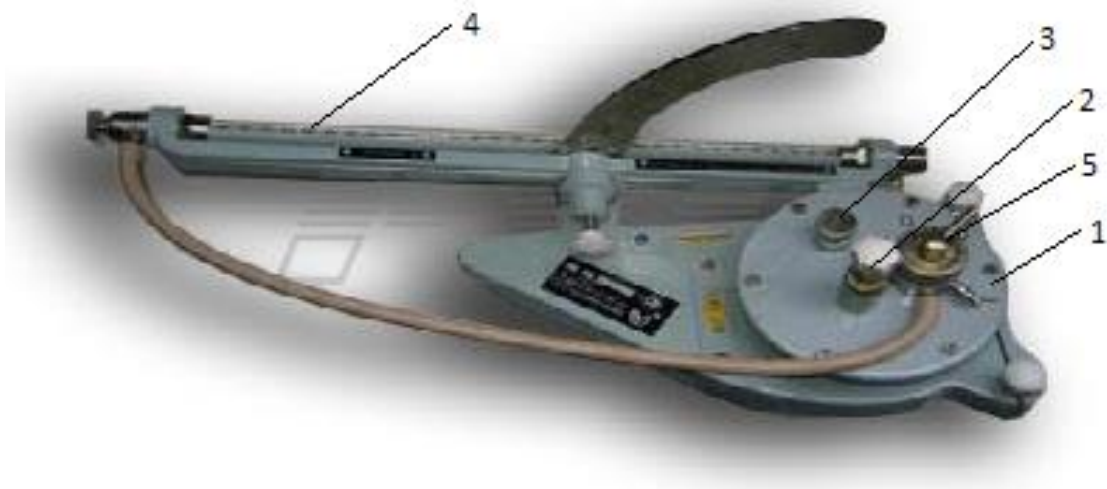


Рис. 1.3. Мікроманометр ММН

1 – резервуар; 2 – отвір заповнення мікроманометра; 3 – регулятор нульового положення меніска; 4 – проградуйована трубка; 5 – трьохходовий кран

При повороті крану за годинниковою стрілкою до упора виконують заміри, а при повороті проти годинникової стрілки до упора – контроль нуля.

На скляній трубці через 1 мм нанесені ділення від нуля до 250 мм. Скляна трубка може знаходитися в п'яти нахилених положеннях, відмічених на стійці цифрами 0,8; 0,6; 0,4; 0,3 і 0,2. Ці цифри позначають величину добутку  $A = \rho_0 i$ , де  $i$  – синус кута нахилу скляної трубки.

Перепад тисків визначається за формулою:

$$\Delta p_m = kA \frac{\rho}{0,8095} gh, \quad (1.3)$$

де  $k$  – коефіцієнт мікроманометра, що має розмірність густини;

$$k = c\rho \sin \alpha, \quad (1.4)$$

$\rho$  – густина спирту в час заміру;  $h$  – рівень спирту при замірі.

Густина спирту вимірюється аерометром при якій-небудь температурі  $t_0$ , а дослід ведеться при іншій температурі  $t$ , тому густина спирту:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + 0,0011(t - t_0)}, \quad (1.5)$$

де  $\rho_0$  – густина спирту при температурі  $t_0$ .

Дворідинний манометр. Якщо трубки  $U$ -подібного манометра з'єднати

зверху з двома широкими посудинами та наповнити трубки двома рідинами, що не змішуються, з густинами  $\rho_1$  і  $\rho_2$  (рис. 1.4), то переміщення поверхні розділу рідин буде визначатися залежністю:

$$h = \frac{(p_1 - p_2)}{g} \left[ (\rho_2 - \rho_1) + \frac{A_1}{A_2} (\rho_2 - \rho_1) \right], \quad (1.6)$$

де  $h$  – переміщення поверхні розділу під дією різниці тисків  $\Delta p = (p_1 - p_2)$ ;  $A_1$  і  $A_2$  – площі трубки і резервуара, які однакові в обох колінах манометра.

У випадку, коли відношення  $A_1 / A_2$  є дуже малою величиною, тоді:

$$h = \frac{\Delta p}{(\rho_2 - \rho_1)g}. \quad (1.7)$$

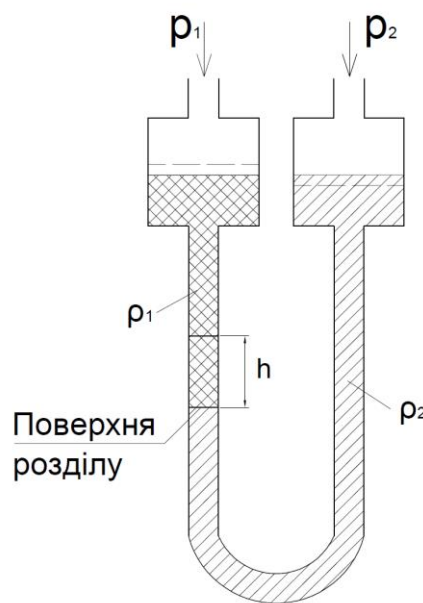


Рис. 1.4. Схема дворідинного манометра

Як рідини, що не змішуються, можна використовувати, наприклад, етиловий спирт і гас. Значення  $\rho_2 - \rho_1$  необхідно брати в межах  $0,07 \dots 0,2 \text{ г/см}^3$ . Застосування рідин з меншими різницями густин призводить до повільного реагування манометра на зміну перепаду тисків та до значних температурних похибок.

#### *Пневмометричні трубки*

Пневмометричні трубки вводяться в потік повітря і сприймають той або інший тиск, який згодом з допомогою резинових шлангів передається на мікроманометр.

Пневмометричні трубки розділяються на трубки повного, статичного і динамічного тиску.

Пневмометрична трубка повного тиску найпростішої конструкції наведена на рис. 1.5, а. Обидва кінці її відкриті. При цьому коротка ділянка трубки носить назву «носик», а довгий – «тримач».

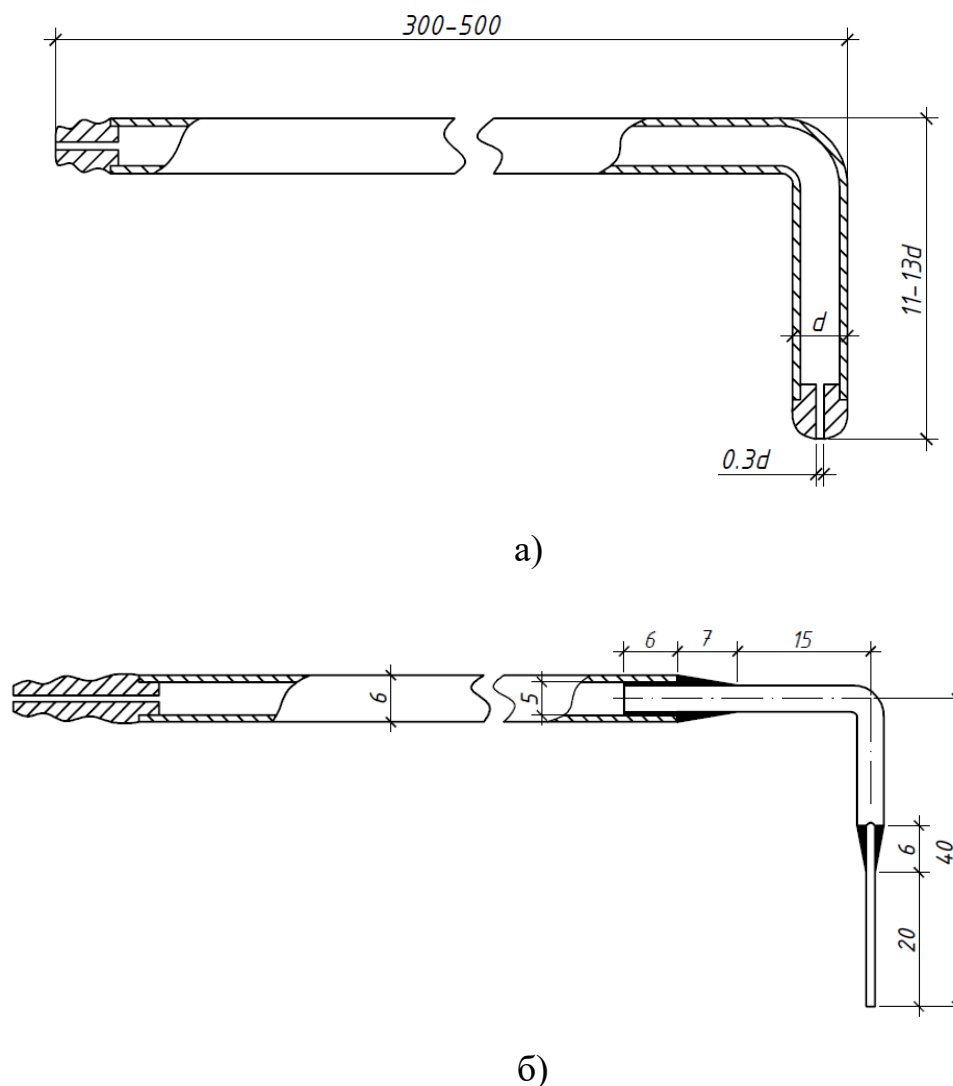


Рис. 1.5. Трубки повного тиску  
а – звичайна трубка; б – мікротрубка

При замірі тиску трубка вводиться в потік таким чином, щоб носик відкритим торцем був повернутий назустріч потоку повітря. При необхідності заміру повного тиску у вузьких щілинах або поблизу стінки носик трубки виготовляється з більш тонкої трубочки, наприклад з голки шприца. Такі тонкі трубки отримали назву мікротрубок (рис. 1.5, б).

Трубка статичного тиску не має отвору в носіку, а на відстані  $3d$  ( $d$  – діаметр носика) від торця носика рівномірно по поперечному січенню просвердлені два або чотири отвори діаметром 0,5 – 0,6 мм. При замірах носик трубки також встановлюється назустріч потоку повітря.

Трубка динамічного тиску, або швидкісна трубка (рис. 1.6), є з'єднанням в одній конструкції двох раніше описаних трубок повного і статичного тиску. Радіус заокруглення кінця носика приймається  $r = 0,5 \cdot d$ .

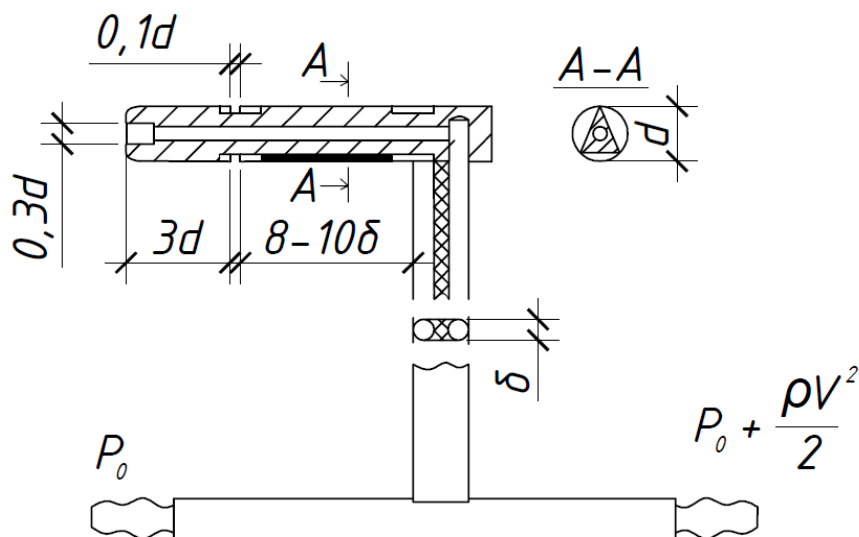


Рис. 1.6. Швидкісна трубка

Рекомендується при виготовленні носика трубки ретельно дотримуватися розмірів, приведених на рис. 1.6, щоб в подальшому не вимагалось тарування трубки.

Відхилення осі трубки від напрямку руху повітря до  $\pm 17^\circ$  практично не відображається на точності заміру. Така властивість трубки є досить цінною, оскільки в багатьох випадках встановити вісь носика вздовж потоку повітря можна лише орієнтовно.

На кінці тримача виведені два штуцера для приєднання резинових трубок, що приєднані до мікроманометра. Плюсом позначений штуцер, що передає повний тиск, а мінусом – статичний тиск.

При замірі тиску і швидкості повітря у всмоктуючих отворах застосовуються аеродинамічні гачки (рис. 1.7). Вони являють собою описані вище трубки, але носик в них має два повороти. Ці повороти можуть бути виконані навіть в різних площинах.



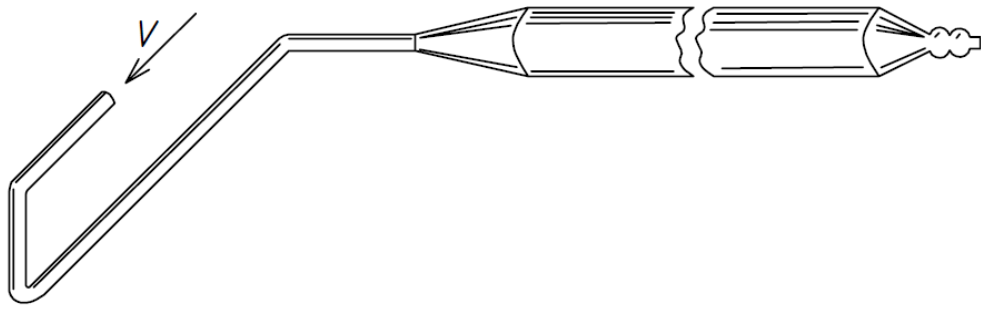


Рис. 1.7. Аеродинамічний гачок

Аеродинамічні гачки, як і трубки, можуть бути повного, статичного і динамічного тиску.

Тиск з допомогою трубок повного або статичного тиску визначають за формулою:

$$\Delta p = \zeta_1 \Delta p_m, \quad (1.8)$$

де  $\zeta_1$  - коефіцієнт швидкісної трубки при замірі повного і статичного тисків (зазвичай  $\zeta \approx 1$ ).

Швидкість повітря з допомогою швидкісної трубки знаходять за формулою:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \zeta_2 \Delta p_m}, \quad (1.9)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $\zeta_2$  - коефіцієнт швидкісної трубки або насадка.

Густина повітря в період дослідів підраховують за рівнянням стану газів:

$$\rho = \frac{p}{R(273+t)} = \frac{p}{287(273+t)}, \quad (1.10)$$

де  $p$  – тиск;  $R$  – газова стала;  $t$  – температура повітря, °С.

Коефіцієнти пневмометричних трубок встановлюються експериментально при їх таруванні.

При необхідності спостереження за рухом повітря в потоці використовують методи візуалізації потоку.

Один з найпростіших методів візуалізації потоків є натягнення в ньому сітки з тонких ниток або дротів з певним кроком, на перетині яких закріплюють тонкі шовкові нитки. Перевагою цього методу є простота та гарантована екологічна чистота. Недоліком методу є низька роздільна здатність зображення, тобто кількість точок зображення на одиницю довжини. Також нитки збурюють потік і інтенсивно коливаються, що знижує якість картини. Застосовується

метод для моделювання розповсюдження струминних течій у моделях приміщень.

### *Прилади для вимірювання швидкостей газу*

Вимірювання швидкості має важливе значення при експериментальному вивченні руху рідини і газу. Вимірювання швидкості повітря у приміщеннях (рухомості повітря) використовується при визначенні комфортності стану людини та умов роботи технологічного обладнання. За результатами вимірювання швидкості повітря у перерізі отвору або повітропроводу можна визначити витрату потоку. Вимірювання швидкості повітря у вентиляційних струминах дозволяє одержати інтенсивність їх затухання. Шляхом вимірювання швидкості повітря в зоні дії місцевих відсмоктувачів визначається їх ефективність.

Основними характеристиками приладів для вимірювання швидкості повітря є діапазон швидкостей, що вимірюються, точність, чутливість, лінійність та швидкодія, а також збурення потоку та вплив режиму руху на точність.

Анемометри. Чашкові анемометри (рис. 1.8) застосовуються в основному для вимірювання середньої швидкості руху повітря від 1 до 20 м/с. Приєднаною частиною анемометра є метеорологічна обертальна вісь з чашечками для вимірювання швидкості руху повітря незалежно від його напрямку.

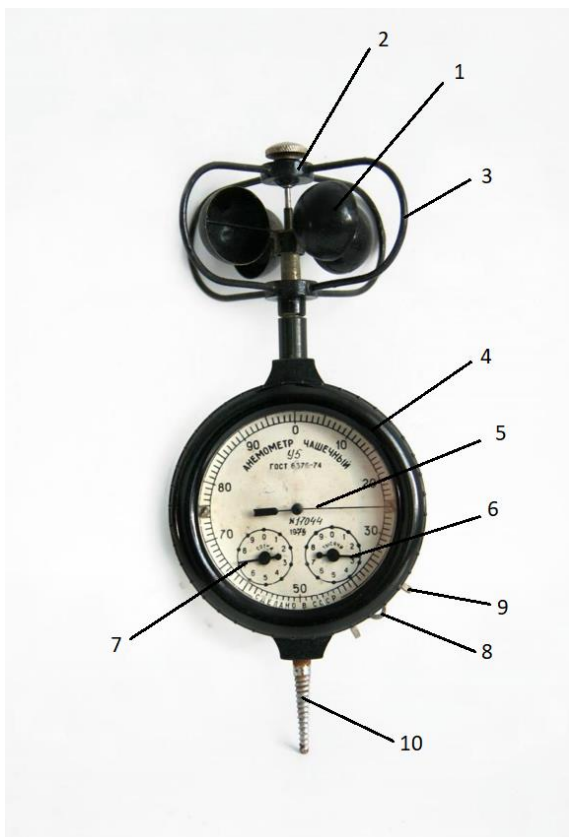


Рис. 1.8. Чашковий анемометр

- 1 – обертальна вісь з чашечками;
- 2 – вал;
- 3 – дротяні дужки для захисту від механічних пошкоджень;
- 4 – обліковий механізм;
- 5 – центральна стрілка облікового механізму, що показує одиниці і десятки обертів;
- 6 – ліва стрілка, що показує тисячі обертів облікового механізму;
- 7 – права стрілка, що показує сотні обертів облікового механізму;
- 8 – ввімкнення і вимкнення облікового механізму;

9 – фіксатори;

10 – гвинт для закріплення на стінці

Для вимірювання швидкості анемометр вносять в повітряний потік так, щоб вісь чашкового анемометра розміщувалась перпендикулярно до повітряного потоку. Для малих значень швидкостей в кожній точці необхідно провести вимірювання два рази, при невідповідності результатів в межах  $\pm 5\%$  виконують додаткові заміри. При вимірюванні швидкості руху повітря в нішах зовнішніх огорожень будівель, в нішах між приміщеннями і т.п. анемометри закріплюють на стійках або штангах, щоб не заступати площу живого січення ніші, в якій виконують заміри. В отворах площею 1 – 2 м<sup>2</sup> середня швидкість руху визначається при повільному переміщенні анемометра по всьому січенню. При великих розмірах січення розбивається на декілька рівновеликих площ і вимірювання проводять в кожній з них.

Крильчаті анемометри (рис. 1.9) використовуються в основному в повітропроводах і каналах для вимірювання швидкості направленої повітряного потоку від 0,2 до 10 м/с.

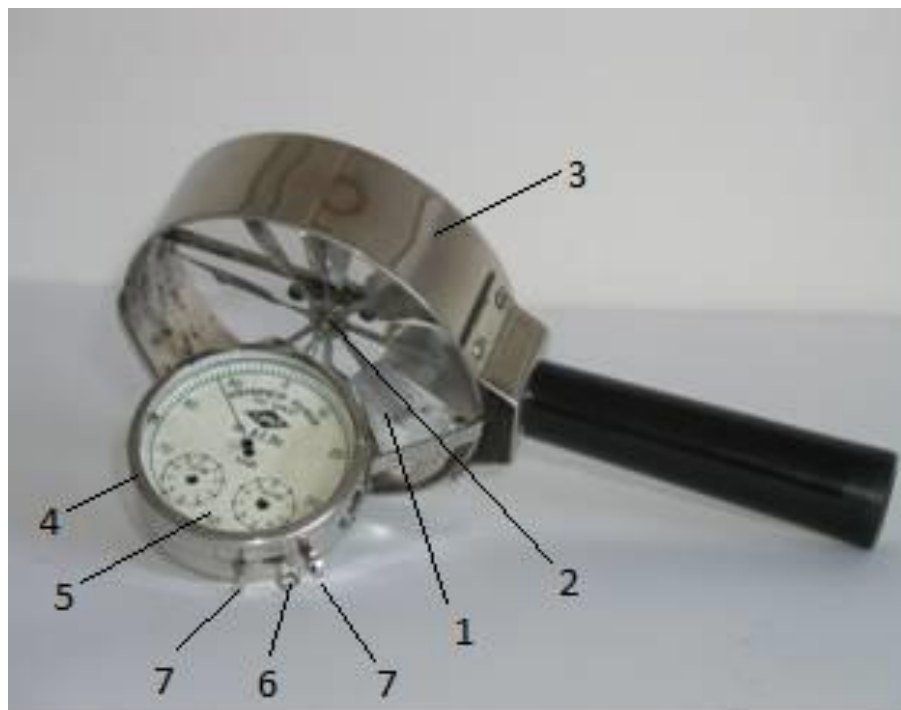


Рис. 1.9. Анемометр крильчатий

1 – крильчатка; 2 – вісь; 3 – корпус; 4 – обліковий механізм; 5 – циферблат має три шкали (одиниці, соті, тисячі); 6 - ввімкнення і вимкнення облікового механізму; 7 – фіксатори

Термоанемометри. Для вимірювання швидкості і температури повітря застосовують термоанемометри з ниткою розжарювання. В них швидкість повітряного потоку визначають залежно від температури нитки розжарювання, при зменшенні якої швидкість повітря збільшується. Діапазон вимірювання швидкості повітря від 0,1 до 25 м/с та температури повітря від 0 до 50°C.

Поширеним є термоанемометр з телескопічним зондом WALCOM HT-9829 (рис. 1.10). Він являє собою портативний прилад для вимірювання швидкості повітря та інших газів. Прилад може вимірювати швидкість повітря у різних одиницях виміру: м/с, км/год, фути/хв, миль/годину, вузли.



Рис. 1.10. Загальний вигляд термоанемометра з телескопічним зондом WALCOM HT-9829

а - термоанемометр; б - телескопічний зонд

Прилад оснащений сучасною електронною схемою, яка забезпечує високу точність вимірювання та широкий функціонал приладу, великим дисплеєм з підсвічуванням, на якому одночасно відображається швидкість і температура повітря та спеціальним тонким телескопічним зондом, який зручний навіть для проведення вимірювання через решітку або дифузор.

Телескопічний термоанемометричний зонд забезпечує швидке і точне вимірювання навіть низьких швидкостей повітря. Вбудовані функції DataHold (утримання значення на дисплеї), запис максимальних і мінімальних показників пам'яті пристрою з можливістю їх перегляду значно полегшують роботу користувача. Термоанемометр з телескопічним зондом WALCOM HT-9829 застосовують для моніторингу параметрів повітряного потоку в повітроводах та вентиляційних каналах, контролю роботи вентиляторів, двигунів, холодильних установок, систем фарборозпилення, при установці систем кондиціонування повітря та вентиляції, опалювальних приладів тощо.

### Хід виконання і обробка даних

1. Диференційним мікроманометром (рис.1.3) заміряють повний тиск повітряного потоку в повітропроводі. Для цього записують початковий та кінцевий відлік на трубці мікроманометра.

2. Визначають величину тиску за формулою:

$$P_{n1} = (l - l_0) \cdot k \cdot g, \text{ Па} \quad (1.11)$$

в якій  $(l - l_0)$  - різниця відліків за шкалою мікроманометра, мм;  $k$  – коефіцієнт мікроманометра, г/см<sup>3</sup>.

$$k = c\rho \sin \alpha. \quad (1.12)$$

Коефіцієнти мікроманометра  $k$  нанесені на стояк мікроманометра у г/см<sup>3</sup>. При цьому передбачені значення  $k = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8$ .

3. Вимірюють повний тиск повітряного потоку  $P_{п2}$ , Па електронним мікроманометром.

4. Дослід повторюють для різних режимів руху газу.

5. Результати вимірювань заносять в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

### Протокол результатів вимірювань

№ дослідів	$l$	$l_0$	$k$	$P_{п1}$ , Па	$P_{п2}$ , Па

### Звіт повинен включати:

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Технічні характеристики вимірювальних пристроїв.
3. Протокол результатів вимірювань.

4. Порівняння результатів вимірювань тисків диференційним та електронним мікроманометром.

5. Висновки та рекомендації.

### **Контрольні запитання**

1. Опишіть як виміряти повний, статичний та динамічний тиски повітряного потоку за допомогою диференційного мікроманометра та пневмометричної трубки.

2. Як враховується густина рідини в мікроманометрі під час вимірювання тиску?

3. Як визначити величину заміряного тиску за відомої різниці відліків шкали мікроманометра?

4. Охарактеризуйте прилади для вимірювання тиску газу.

5. Дайте характеристику пневмометричних трубок.

6. В чому відмінність чашкового та крильчастого мікроманометра?

7. Основні конструктивні характеристики електроанемометра.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ ТА ВИТРАТИ, ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ ТЕЧІЇ РІДИНИ

**Метою роботи** є вивчення основних величин гідравліки та аналогій між системами різної фізичної природи, експериментальне визначення режиму течії рідини.

#### Завдання:

1. Вивчити прилади та одиниці вимірювання тиску та витрати.
2. Дослідити кінематичну вязкість  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, середню швидкість потоку  $v$ , м/с та число Рейнольдса  $Re$ .
3. Визначити режими течії рідини.

#### Загальні відомості

Основними величинами гідравліки і пневматики є тиск  $p$  і об'ємна витрата  $Q$ . Відомо, що між системами різної фізичної природи є аналоги, які показані в таблиці 2.1. В стовпцях записані величини – аналоги. Наприклад, аналогом тиску в електричних системах є напруга  $U$ , а аналогом витрати - сила струму  $I$ . Розмірності величин у таблиці 2.1 наведені в СІ.

Таблиця 2.1.

#### Основні величини систем різної фізичної природи та їх аналоги

Тип систем		Основна величина	
Гідравлічні і пневматичні системи		$p$ – тиск, Па	$Q$ – об'ємна витрата, м <sup>3</sup> /с
Електричні системи		$U$ – напруга, В	$I$ – сила струму, А
Механічні системи	поступального руху	$F$ – сила, Н	$v$ – швидкість, м/с
	обертального руху	$M$ – момент, Н·м	$\omega$ – кутова швидкість, с <sup>-1</sup>

Утворення основних величин для всіх типів систем, наведених у кожному рядку таблиці 2.1, є нічим іншим, як потужність (Вт), тобто.

$$N = p \cdot Q \quad (N = U \cdot I; N = F \cdot v; N = M \cdot \omega). \quad (2.1)$$

Таким чином, тиск та витрата є найважливішими величинами. Для

успішного вирішення завдань проектування та експлуатації гідравлічних та пневматичних систем необхідно добре уявляти, що таке тиск і витрата, якими вони бувають, у чому і як їх вимірюють.

### Тиск

Тиск - це напруга, що виникає в рідині або газі в результаті дії стискаючих сил і сил тертя.

Якщо система перебуває у стані спокою, то сили тертя дорівнюють нулю. В цьому випадку тиск іноді називають гідростатичним. Гідростатичний тиск є не що інше, як напруга стиснення. Найважливішою властивістю гідростатичного тиску є його ізотропність. Це означає, що тиск у цій точці простору у всіх напрямках є однаковим. У динаміці через сили тертя тиск ізотропності не має. Однак ця особливість при вирішенні більшості прикладних інженерних завдань не враховується.

Розрізняють середній тиск і тиск у точці. Найчастіше використовують середній тиск, який дорівнює:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (2.2)$$

де  $F$  – сила стиснення, що припадає на поверхню площею  $S$ .

Тиск буває абсолютним  $p_{\text{абс}}$ , надлишковим  $p_{\text{надл}}$  і вакуумметричним  $p_{\text{вак}}$  (рис. 2.1).

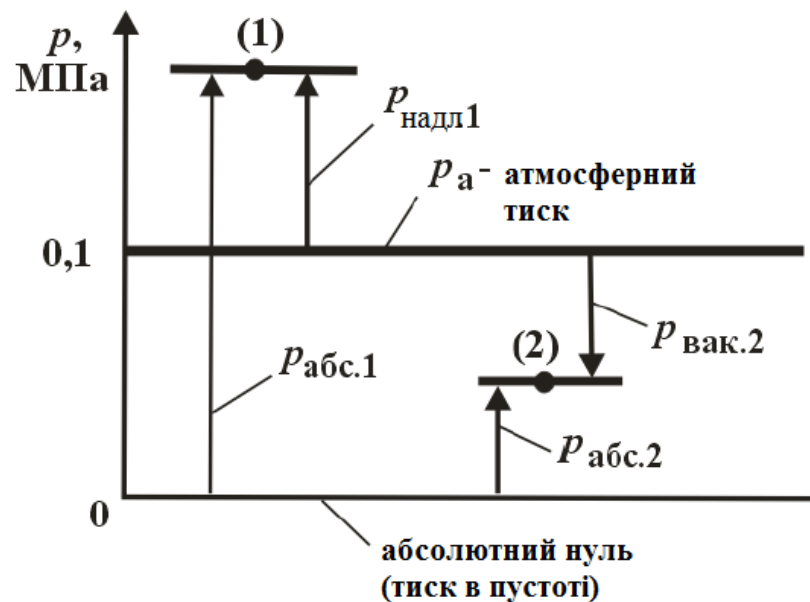


Рис. 2.1. Види тисків

Абсолютний тиск  $p_{\text{абс}}$  відраховується від абсолютного нуля, за який прийнято тиск у порожнечі. Абсолютний тиск може бути лише позитивним.



Надлишковий тиск  $p_{\text{надл}}$  відраховується від нуля, за який прийнято атмосферний тиск  $p_a$ .

Величина атмосферного тиску залежить від низки факторів: висоти над рівнем моря, погодних умов та ін.

**Примітка:** При вирішенні більшості інженерних завдань атмосферний тиск  $p_a$  можна вважати постійною величиною, яка дорівнює 0,1 МПа (736 мм рт. ст.).

Оскільки більшість об'єктів перебуває в умовах атмосферного тиску, найчастіше на практиці використовують надлишковий тиск.

Зв'язок надлишкового та абсолютного тиску встановлюється таким виразом:

$$p_{\text{надл}} = p_{\text{абс}} - p_a. \quad (2.3)$$

При  $p_{\text{абс}} < p_a$  надлишковий тиск є негативним. Тиск у такому разі називають вакуумметричним (негативним надлишком над атмосферою, вакуумом).

Вакуумметричний тиск:

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}}. \quad (2.4)$$

Як видно з рис. 2.1, тиск  $p_{\text{абс.1}}$  більший за  $p_{\text{надл.1}}$  на величину атмосферного тиску, тобто на 0,1 МПа. У точці 2 абсолютний тиск  $p_{\text{абс.2}}$  менший за атмосферний. Тому тиск у точці 2 можна характеризувати наступними тисками: абсолютним  $p_{\text{абс.2}}$  або вакуумметричним  $p_{\text{вак.2}}$ . Зв'язок між ними встановлюється виразом (2.4). Як очевидно з рис. 2.1, вакуумметричний тиск може змінюватися не більше 0...0,1 МПа. Абсолютному нулю відповідає тиск  $p_{\text{вак}} = 0,1$  МПа.

За одиницю тиску в міжнародній системі одиниць (СІ) прийнято паскаль – тиск, що викликається силою 1 Н, рівномірно розподіленою по нормальній до неї поверхні площею 1 м<sup>2</sup>. Поряд з цією одиницею тиску застосовують більші одиниці: кілопаскаль та мегапаскаль:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}.$$

У техніці для вимірювання тиску використовують також позасистемні одиниці – атмосферу технічну та бар:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98100 \text{ Па};$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \cdot \text{Па} = 1,02 \text{ ат}.$$

Тиск також можна умовно виражати висотою стовпа рідини над точкою, яка розглядається. При цьому висота стовпа рідини визначається виразом:

$$h = \frac{P}{\gamma}, \quad (2.5)$$

де  $\gamma$  – питома вага рідини.

Як випливає з (2.5), той самий тиск залежно від роду рідини може бути створений стовпом різної висоти. Так, наприклад, тиск, що дорівнює 1 ат, створюється стовпом води заввишки 10 м, ртуті - 0,736 м, тобто:

$$1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.} = 736 \text{ мм.рт.ст.}$$

Існує також таке поняття, як атмосфера фізична:

$$1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па} = 10,33 \text{ м.вод.ст} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$$

Для вимірювання тиску рідин та газів використовують *п'єзометри*, а також рідинні, механічні та електричні *манометри*. У техніці для вимірювання тиску найбільше застосування знаходять механічні та електричні манометри.

Механічні манометри бувають двох типів – пружинні та мембранні. Принцип їх дії заснований на деформації порожнистої пружини або мембрани під впливом тиску. Через перетворювальний механізм ця деформація передається стрілці, яка показує величину тиску, що вимірюється на циферблаті.

В електричному манометрі деформація мембрани передається на потенціометр, що призводить до зміни його електричного опору. Потенціометр включений до електричної вимірювальної схеми.

За допомогою *манометрів* вимірюють надлишковий тиск. Для вимірювання вакуумметричного тиску використовують *вакуумметри*. Існують також комбіновані прилади – *мановакуумметри*, які дозволяють вимірювати як надлишковий, так і вакуумметричний тиск.

Манометри, вакуумметри та мановакуумметри мають однаковий принцип дії. Ряд параметрів і характеристик цих приладів регламентований ГОСТ та іншими нормативними документами.

Найважливішою характеристикою манометра є клас точності (вказується на циферблаті). Манометри бувають таких класів точності: 0,1; 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2,5; 4. Допустима помилка вимірювання тиску манометром:

$$\Delta = \frac{K \cdot P}{100}, \quad (2.6)$$

де  $K$  – клас точності манометра;  $P$  – верхня межа вимірювання тиску.

Для вимірювання тиску із підвищеною точністю використовують зразкові манометри. Зразкові манометри мають клас точності 01; 0,15; 0,25 чи 0,4.

*Витрата*

Другою найважливішою величиною гідравліки та пневматики є *витрата*. Це кількість рідини (газу), що проходить через живий переріз потоку в одиницю часу.

Розрізняють об'ємну  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; вагову  $Q_G$ , Н/с та масову  $Q_M$ , кг/с, витрату.

Основною величиною у гідравліці є *об'ємна витрата*. Для вимірювання об'ємної витрати часто використовується позасистемна одиниця – літр за хвилину.

Вагова та масова витрати пов'язані з об'ємною такими залежностями:

$$Q_G = \gamma \cdot Q; \quad Q_M = \rho \cdot Q, \quad (2.7)$$

де  $\rho$  – густина рідини (газу).

Найбільш простим способом вимірювання витрати є об'ємний, за допомогою мірного бака. Суть його полягає в тому, що вимірюється час  $t$  проходження крізь систему певного обсягу рідини  $W_p$ , що надходить у мірний бак. Знаючи  $W_p$  і  $t$ , потім обчислюють об'ємну витрату, яка дорівнює:

$$Q = W_p / t. \quad (2.8)$$

На практиці найбільш широкое застосування для вимірювання витрати знаходять *витратоміри*, які бувають двох типів: об'ємні та швидкісні. Слід також враховувати, що витратоміри можуть бути типу інтегруючого, а можуть вимірювати миттєве значення витрати.

Принцип дії об'ємних витратомірів заснований на попереминому заповненні та випорожненні робочої камери. Число заповнень або спорожнень, що підраховується за допомогою спеціальних пристроїв (механічних, електричних), характеризує витрати через систему. Перевагою об'ємних витратомірів є висока точність виміру: максимальна відносна похибка не перевищує 1%. Недолік – громіздкість та складність конструкцій, а для деяких витратомірів – неможливість застосування для забруднених рідин.

Об'ємні витратоміри бувають різних типів: дискові, поршневі, шестерні, кільцеві та лопатеві.

Принцип дії швидкісних витратомірів заснований на тому, що рідина, яка протікає через прилад, обертає крильчатку або вертушку, частота обертання якої пропорційна швидкості потоку і, отже, витраті. Вісь крильчатки або вертушки за допомогою передавальних механізмів з'єднана з лічильником.

Швидкісні витратоміри за конструкцією простіші за об'ємні, але мають меншу точність вимірювань. Максимальна відносна похибка вимірювань може досягати 2...3%.

За конструктивною ознакою швидкісні витратоміри поділяються на крильчаті та турбінні. Нижче під час роботи використовується швидкісний

крильчатий витратомір.

### *Режими течії рідини*

Ламінарним називається такий режим, при якому потік рідини рухається окремими струминками або шарами, і траєкторії окремих частинок рідини між собою не перетинаються; лінії струму збігаються з траєкторіями частинок.

Турбулентним називається такий режим, при якому течія є збуреною, частинки рідини перемішуються, а траєкторії частинок являють собою складні лінії, що перетинаються між собою.

Наявність ламінарного або турбулентного режиму залежить від швидкості руху, в'язкості рідини та від геометричних розмірів живого перерізу потоку. При поступовому збільшенні середньої швидкості рух зберігається ламінарним лише до певної швидкості, після досягнення якої настає турбулентний режим.

Перехід від ламінарного режиму до турбулентного відбувається за так званої верхньої критичної швидкості  $v_{кр.в}$ . Зворотний перехід від турбулентного режиму до ламінарного відбувається за нижньої критичної швидкості  $v_{кр.н}$ . Однак у зв'язку з тим, що рух між  $v_{кр.н}$  та  $v_{кр.в}$  нестійкий, часто вважають, що перехід від ламінарного режиму до турбулентного та від турбулентного режиму до ламінарного відбувається при тому самому значенні критичної швидкості  $v_{кр} = v_{кр.н}$ .

Для визначення режиму руху рідини використовується безрозмірний критерій, який називають числом Рейнольдса та позначають символом  $Re$ .

Для напірного руху в круглих трубах:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2.9)$$

де  $v$  – середня швидкість руху потоку рідини, м/с;  $d$  – діаметр труби, м;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини, м<sup>2</sup>/с.

Для потоків некруглого перерізу у формулу (1.9) замість  $d$  підставляють так званий гідравлічний діаметр  $D$ .

Зміні режимів руху відповідає чисельне значення числа Рейнольдса, яке називають критичним:  $Re_{кр} = 2320$ . При  $Re < 2320$  режим руху ламінарний, а при  $Re > 2320$  – турбулентний.

На рис. 2.2 показано залежність втрат напору (питомої енергії) на тертя  $h_T$  від числа Рейнольдса.

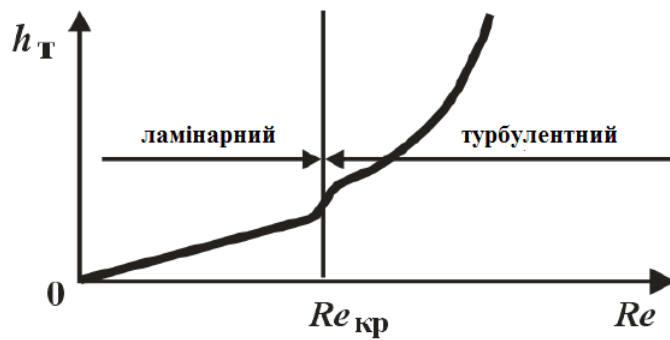


Рис. 2.2. Залежність втрат напору (питомої енергії) на тертя  $h_T$  від числа Рейнольдса  $Re$

Таким чином, як видно з рис. 2.2, при ламінарному режимі течії втрата енергії на тертя менша, ніж при турбулентному режимі. При розрахунках гідравлічних систем доводиться постійно контролювати режим течії (визначати  $Re$ ) у тому, щоб визначити втрати енергії на тертя. Режим течії газу визначається на основі використання критерію (2.9).

### Опис експериментальної установки

Принципова гідравлічна схема стану НТЦ-11.17.1 ГІДРАВЛІКА М1 наведена на рис. 2.3.

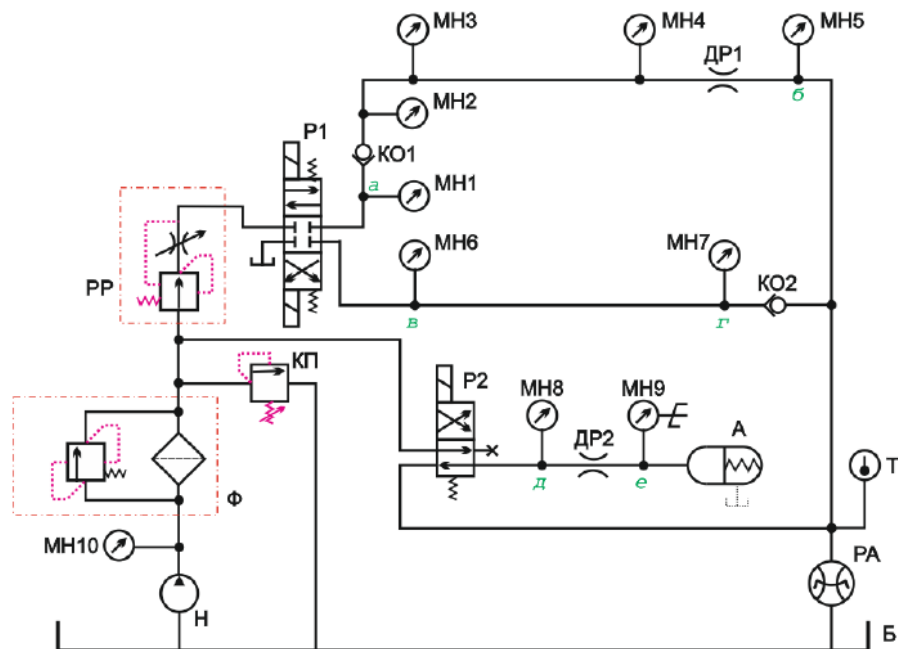


Рис. 2.3. Принципова гідравлічна схема стану НТЦ-11.17.1 ГІДРАВЛІКА М1

До складу стану входять гідробак Б, шестеренний насос Н, фільтр Ф,

запобіжний клапан КП, зворотні клапани КО1 та КО2, регулятор витрати РР, два гідророзподільники Р1 та Р2, пружинний акумулятор А, два гідродроселі ДР1 та ДР2, трубопроводи (у тому числі досліджувані ділянки трубопроводів *аб*, *вг* і ділянка *де* з встановленим дроселем ДР2). Привід насоса здійснюється електродвигуном.

Інформаційно-вимірювальна система стенду включає 10 манометрів (МН1 - МН8, манометр МН9 - електроконтактний з двома керованими контактами, манометр МН10 використовується для контролю тиску на виході насоса), витратомір швидкісного типу РА, термометр Т і електронний секундомір.

Управління гідророзподільниками здійснюється тумблерами Р1 і Р2 (тумблери встановлені на панелі та позначені так само, як і розподільники, для управління яких вони служать).

Номінальний тиск у системі 1,8 МПа (допускається до 2,0 МПа). Тиск встановлюється за допомогою регульовального гвинта, встановленого на запобіжному клапані. Гвинт повинен бути надійно зафіксований контргайкою.

Можливі два режими роботи електронного секундоміра – ручний та автоматичний (вказані режими роботи встановлюються тумблером на верхній панелі).

При встановленні тумблера в положення "РУЧН.", секундомір використовується для визначення часу проходження через витратомір РА заданого обсягу рідини для того, щоб у подальшому визначати витрату рідини в трубопроводі.

Живлення секундоміра включається тумблером "Вкл.", початок відліку часу - тумблером "Счет.", скидання показань електронного табло - кнопкою "Сброс". При натисканні кнопки "Сброс" секундомір не повинен робити відлік часу, тобто тумблер "Счет" необхідно переключити в нижнє положення.

При встановленні тумблера в положення "АВТ." секундомір використовується для підрахунку часу заповнення та спорожнення робочої порожнини пружинного акумулятора А. При цьому має бути включено живлення секундоміра та рахунок, тобто тумблери постійно встановлені в положення "Вкл." та "Счет". Увімкненням та вимкненням секундоміра управляє електроконтактний манометр МН9. Після завершення процесу заповнення або випорожнення робочої порожнини акумулятора А фіксується час процесу, а потім, натиснувши кнопку "Сброс", можна скинути показання табло.

Напруга живлення стенду - 380 В; струм змінний - 50 Гц. Напруга живлення електромагнітів гідророзподільників – 24 В при постійному струмі.

Заправна ємність гідробака – 60 дм<sup>3</sup> (літрів).

Рекомендовані робочі рідини: мінеральні олії МГЕ-46В, МГ-30у, М-8В.

### Порядок проведення дослідів

До увімкнення стенда необхідно переконатися, що:

- маховик керування регулятором витрати РР повністю вивернуто проти годинникової стрілки (показчик положення маховика встановлений у позицію «1»);

- тумблери управління гідророзподільниками Р1 та Р2 встановлені у положення «Викл.»;

- тумблер установки режиму роботи електронного секундоміра встановлено в положення «Ручн.», а тумблер увімкнення живлення секундоміра встановлено у нижнє положення.

Вимірювання тиску та витрати виконують у такій послідовності:

1. Вмикають живлення стенду ("Сеть").
2. Вмикають електродвигун М (кнопка "Пуск").
3. Вмикають живлення електронного секундоміра (тумблер у положення "ВКЛ").
4. Протягом 3...5 хвилин дають можливість стенду попрацювати в стаціонарному режимі.
5. Включають розподільник (тумблер Р1 у нижнє положення "ВКЛ. 2"). При цьому рідина від насоса через розподільник Р1 надходить до трубопроводу, встановленого на нижній панелі (ділянка 62). На початку цієї ділянки встановлено манометр МН6, а в кінці – манометр МН7.
6. При різних налаштуваннях регулятора витрати РР проводять кілька дослідів, у кожному з яких необхідно виміряти:

- час  $t$  проходження через витратомір заданого обсягу робочої рідини  $W_p$  за допомогою електронного секундоміра. Об'ємом  $W_p$  необхідно задатися, прийнявши його, наприклад, рівним  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л).
- температуру робочої рідини  $T$ , °С (за термометром).

Результати вимірювань заносять до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

### Результати досліджень

№ дослідю	$t, c$	$W_p, m^3$	$T, ^\circ C$	$v, m^2/c$	$Q, m^3/c$	$v, m/c$	$Re$	Режим течії
1								
2								
...								

Порядок завершення роботи:

- вимикають живлення секундоміра;
- вимикають електродвигун кнопкою "Стоп";
- відключають живлення стенда автоматичним вимикачем «СЕТЬ».

### Обробка результатів вимірів

Для визначення кінематичної в'язкості рідини  $\nu$  необхідно мати в лабораторії графічну залежність  $\nu = f(T)$  робочої рідини. Занести знайдені значення  $\nu$  в таблицю 2.2.

За результатами вимірювань для кожного дослідю необхідно обчислити:

1. Витрату  $Q, m^3/c$  за формулою (2.8).
2. Середню швидкість потоку  $v, m/c$ :

$$v = Q / S_{тр}, \quad (2.10)$$

де  $S_{тр}$  - площа перерізу трубопроводу,  $m^2$ .

3. Число Рейнольдса за формулою (2.9).

За отриманим числом Рейнольдса необхідно визначити режим руху рідини кожного дослідю.

При визначенні режиму течії рідини слід виходити з того, що якщо певне в досліді число Рейнольдса менше критичного значення  $Re_{кр}$ , то режим течії ламінарний. Для труб круглого перерізу  $Re_{кр} = 2320$ . При  $Re > Re_{кр}$  – режим течії турбулентний.

Після заповнення таблиці 2.2 необхідно за формулою (2.6) визначити допустимі похибки вимірювання для всіх типів манометрів, встановлених на стенді. Отримані результати необхідно навести у звіті.

### Звіт повинен включати:

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Схему експериментальної установки.
3. Протокол результатів вимірювань.
4. Технічні характеристики та допустимі похибки вимірювання для всіх типів манометрів.
5. Визначений режим течії рідини.



## Контрольні запитання

1. Основні величини гідравліки, аналогії між системами різної фізичної природи.
2. Тиск: фізична сутність; абсолютний, надлишковий, вакуумметричний тиск, способи, прилади та одиниці вимірювань.
3. Витрата: фізична сутність; об'ємна, вагова та масова витрата, способи, прилади та одиниці вимірювань.
4. Режим руху рідини та газів, необхідність та методика їх визначення.
5. Вплив режиму течії на втрати енергії на тертя по довжині трубопроводу.
6. Визначення потужності у гідравлічних системах.
7. Оцінка допустимої похибки вимірювання тиску манометром.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### ПОБУДОВА НАПІРНОЇ ТА П'ЄЗОМЕТРИЧНОЇ ЛІНІЙ ТРУБОПРОВОДУ. ВИВЧЕННЯ РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

**Метою роботи** є вивчення рівняння Бернуллі, з'ясування фізичної сутності повного напору та експериментальне визначення напірної та п'єзометричної ліній трубопроводу.

#### Завдання:

1. З'ясувати фізичну сутність повного напору.
2. Визначити напірну та п'єзометричну лінії трубопроводу.
3. Визначити потужності потоку для кожного січення.

#### Загальні відомості

Рух безнапірних та напірних потоків рідини супроводжується витратами енергії. Для характеристики енергетичного стану потоку у гідравліці застосовується спеціальний показник, який називають повним напором і позначають буквою  $H$  (вимірюється у метрах). Повний напір є повною питомою (з розрахунку на одиницю ваги) енергією.

Повний напір в  $i$ -му перерізі дорівнює:

$$H_i = h_{г.i} + h_{п.i} + h_{ш.і} \quad (3.1)$$

де  $h_{г.i}$  – геометричний напір в  $i$ -му перерізі, м;  $h_{п.i}$  – п'єзометричний напір в  $i$ -му перерізі, м;  $h_{ш.і}$  – швидкісний напір в  $i$ -му перерізі, м.

Напори, що входять у  $H_i$  рівні:

$$h_{z,i} = z_i;$$

$$h_{n,i} = \frac{p_i}{\rho g};$$

$$h_{ш,i} = \frac{\alpha_i v_i^2}{2g},$$

де  $z_i$  - вертикальна координата  $i$ -го перерізу трубопроводу, м;  $p_i$  - тиск у  $i$ -му перерізі, Па;  $\rho$  - густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - прискорення вільного падіння,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $v_i$  - середня швидкість потоку в  $i$ -му перерізі, м/с;  $\alpha_i$  - коефіцієнт Коріоліса, визначений для  $i$ -го перерізу.

Найчастіше вираз для повного натиску (3.1) записують у вигляді:

$$H_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{\alpha v_i^2}{2g} \quad (3.2)$$

Геометричний та п'єзометричний напори виражають питому потенційну енергію положення та тиску рідини відповідно. Швидкісний напір є питомою кінетичною енергією потоку.

При русі рідини трубопроводом відбувається постійне перетворення її питомої енергії, постійний перехід одного виду питомої енергії в інший (рис. 3.1). При зміні геодезичної висоти потоку геометричний напір  $h_{\Gamma}$  оборотно перетворюється на п'єзометричний  $h_{\Pi}$ , при зміні живого перерізу – п'єзометричний напір ( $h_{\Pi}$ ) переходить у швидкісний  $h_{\text{Ш}}$  і навпаки, і лише перехід п'єзометричного  $h_{\Pi}$  у втрачений напір  $h_{\text{втр}}$  відбувається незворотно.

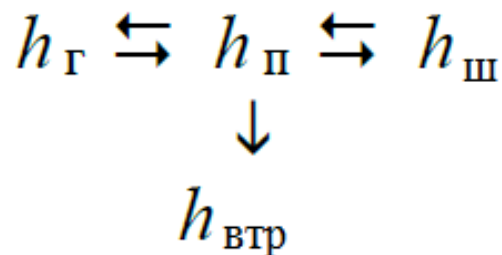


Рис. 3.1. Схема перетворення напорів

Зв'язок між значеннями питомої енергії у двох перерізах трубопроводу на встановлених режимах встановлюється рівнянням Бернуллі, яке виражає закон збереження енергії для гідравлічних систем та записується у такому вигляді:

$$z_i + \frac{p_i}{\rho \cdot g} + \alpha_i \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} = z_{i+1} + \frac{p_{i+1}}{\rho \cdot g} + \alpha_{i+1} \cdot \frac{v_{i+1}^2}{2 \cdot g} + h_{\text{втр},i,i+1} \quad (3.3)$$

Втрачений напір  $h_{\text{втр},i,i+1}$ , що виражається, як і інші напори, в метрах, витрачається на подолання гідравлічних опорів, розташованих між  $i$ -м та  $(i+1)$  -

м перерізами трубопроводу. Втрати напору в гідравлічних опорах на встановлених режимах бувають двох типів:

- 1) за довжиною трубопроводу (лінійні втрати);
- 2) втрати у місцевих опорах (місцеві втрати).

Лінія, що характеризує закон розподілу повного напору по довжині потоку, називається напірною лінією. Повний напір завжди зменшується у напрямі течії рідини. Нахил цієї лінії (зміна на одиницю довжини трубопроводу) називається гідравлічним ухилом.

Лінія, що характеризує закон розподілу питомої потенційної енергії потоку  $z_i + p_i / (\rho \cdot g)$ , називається п'єзометричною лінією. Нахил цієї лінії називається п'єзометричним ухилом.

Потужність і повний тиск пов'язані наступним співвідношенням:

$$N_i = H_i \cdot Q_{Gi} = H_i \cdot \gamma \cdot Q_i \quad (3.4)$$

де  $Q_{Gi}$  - вагова витрата, Н/с;  $\gamma$  - питома вага рідини, Н/м<sup>3</sup>;  $Q_i$  - об'ємна витрата, м<sup>3</sup>/с.

Втрати потужності  $\Delta N_{i,i+1}$  між  $i$ -м та  $(i+1)$  - м перерізами трубопроводу обчислюються з наступного виразу:

$$\Delta N_{i,i+1} = \gamma \cdot h_{\text{втр.}i,i+1} \cdot Q_i, \quad (3.5)$$

де  $Q_i$  - об'ємна витрата рідини на ділянці, укладеній між  $i$ -м та  $(i+1)$  - м перерізами ( $Q_i = Q_{i+1}$ ).

Втрачений напір дорівнює:

$$h_{\text{втр.}i,i+1} = H_i - H_{i+1}. \quad (3.6)$$

### Порядок проведення дослідів

Об'єктами випробувань у цій роботі є сталевий трубопровід (від перетину 1–1 до перерізу 5–5), схема якого представлена рис. 3.2. Внутрішній діаметр 6 мм.

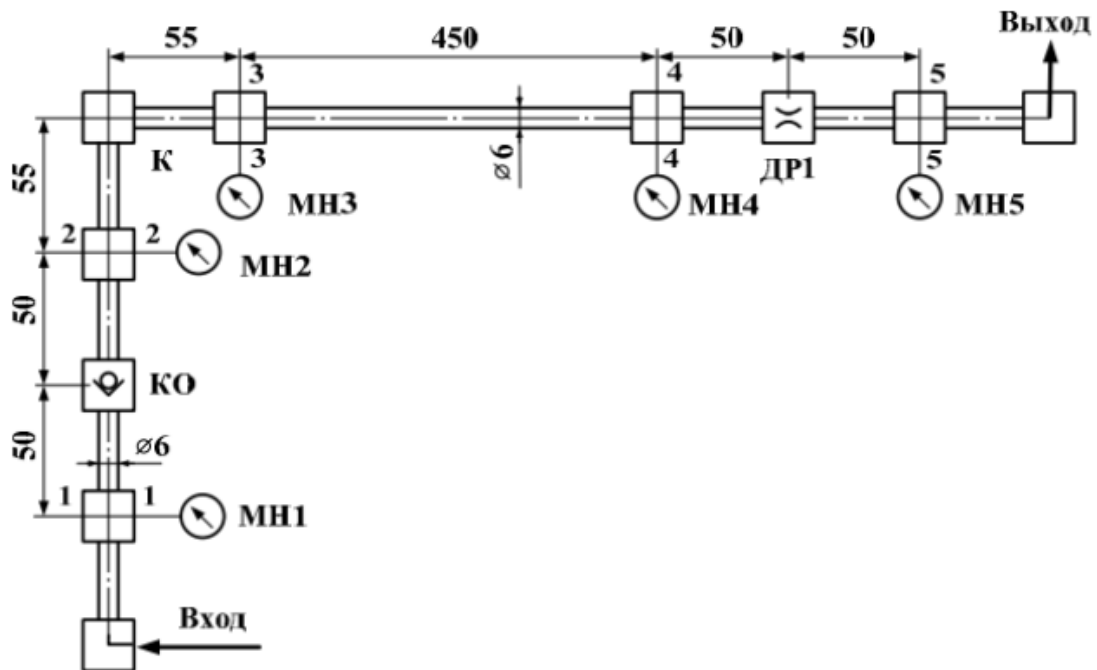


Рис. 3.2. Схема досліджуваного трубопроводу

Загальна довжина досліджуваного трубопроводу 760 мм (0,76 м). Розміри на схемі наведені у міліметрах. Трубопровід містить три місцеві опори:

- клапан зворотний КО (без пружини),
- коліно К (поворот на 90 град),
- нерегульований гідродросель ДР1.

До п'яти перерізів підключені манометри МН1...МН5.

Принципова гідравлічна схема стенду НТЦ-11.17.1 ГІДРАВЛІКА М1 наведена на рис. 2.3.

До увімкнення стенда необхідно переконатися, що:

- маховик керування регулятором витрати РР повністю вивернуто проти годинникової стрілки (показчик положення маховика встановлений у позицію «1»);

- тумблери управління гідророзподільниками Р1 та Р2 встановлені у положення «Викл.»;

- тумблер установки режиму роботи електронного секундоміра встановлено в положення «Ручн.», а тумблер увімкнення живлення секундоміра встановлено у нижнє положення.

Експериментальне визначення напірної та п'єзометричних ліній трубопроводу виконують у такій послідовності:

1. Вмикають живлення стенду ("Сеть").
2. Вмикають електродвигун М (кнопка "Пуск").
3. Включають живлення електронного секундоміра (тумблер у положення

"ВКЛ").

4. Протягом 3...5 хвилин дають можливість стенду попрацювати в стаціонарному режимі.

5. Включають розподільник (гумблер Р1 у верхнє положення "ВКЛ. 1"). При цьому рідина від насоса через розподільник Р1 прямує до досліджуваного трубопроводу (встановлений на середній панелі стенда).

6. При різних налаштуваннях регулятора витрати РР проводять два досліди. Перший дослід проводять при мінімальній витраті, а другий - при максимальній (дивитися по витратоміру РА).

У кожному досліді необхідно виміряти:

- тиски  $p_1...p_5$  (за манометрами МН1...МН5), МПа;  
 - час  $t$  проходження через витратомір заданого об'єму робочої рідини  $W_p$  за допомогою електронного секундоміра. Об'ємом  $W_p$  необхідно задатися, прийнявши його, наприклад, рівним  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л).

- температуру робочої рідини  $T$ , °С (за термометром).

Результати вимірювань за мінімальної та максимальної витрати заносять до таблиць 3.1, 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1.

**Результати досліджень при мінімальній витраті**

Номер січення $i$	1	2	3	4	5
$p_i$ , МПа					
$t$ , с					
$W_p$ , м <sup>3</sup>					
$T$ , °С					
$Q$ , м <sup>3</sup> /с					
$v$ , м/с					
$Re$					
$\alpha$					
$z_i$ , м					
$p_i / (\rho \cdot g)$ , м					
$\alpha \cdot v^2 / (2 \cdot g)$ , м					
$z_i + p_i / (\rho \cdot g)$ , м					
$H_i$ , м					
$N_i$ , Вт					

Таблиця 3.2.

**Результати досліджень при максимальній витраті**

Номер січення $i$	1	2	3	4	5
$p_i$ , МПа					
$t$ , с					
$W_p$ , м <sup>3</sup>					
$T$ , °С					
$Q$ , м <sup>3</sup> /с					
$v$ , м/с					
$Re$					
$\alpha$					
$z_i$ , м					
$p_i / (\rho \cdot g)$ , м					
$\alpha \cdot v^2 / (2 \cdot g)$ , м					
$z_i + p_i / (\rho \cdot g)$ , м					
$H_i$ , м					
$N_i$ , Вт					

Порядок завершення роботи:

- вимикають живлення секундоміра;
- вимикають електродвигун кнопкою "Стоп";
- відключають живлення стенда автоматичним вимикачем «СЕТЬ».

### Обробка результатів вимірів

За результатами вимірювань для кожного досліду:

1. Обчислюють витрату  $Q$ , м<sup>3</sup>/с:

$$Q = W_p / t. \quad (3.7)$$

2. Обчислюють середню швидкість потоку  $v$ , м/с:

$$v = Q / S_{\text{тр}}, \quad (3.8)$$

де  $S_{\text{тр}}$  - площа перерізу трубопроводу, м<sup>2</sup>.

У всіх перерізах швидкості однакові, оскільки діаметр трубопроводу  $d$  у всіх перерізах 6 мм.

3. Обчислюють число Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (3.9)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість, яка визначається з урахуванням температури за графіком  $\nu = f(T)$  (має бути в лабораторії для мастила, що застосовується в гідростанції) м<sup>2</sup>/с.

4. Визначають коефіцієнт Коріоліса  $\alpha$ :

$$\alpha = 2 \text{ при } Re < 2320;$$

$$\alpha = 1 \text{ при } Re > 2320.$$

5. Визначають геометричні напори  $z_i$ . Геометричні напори дорівнюють значенням вертикальних координат (у вибраній системі координат). У зв'язку з тим, що досліджуваний трубопровід розташований горизонтально для всіх перерізів  $z_i = \text{const}$ , місце розташування площини порівняння (а отже, і величину  $z_i$ ) необхідно узгодити з викладачем. Якщо вісь трубопроводу поєднати із площиною порівняння, то  $z_i = 0$ .

6. Розраховують п'єзометричні напори  $p_i/(\rho g)$  для кожного перерізу. При обчисленні п'єзометричних напорів  $p_i/(\rho g)$  густину мастила прийняти  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$ .

7. Розраховують швидкісний напір  $\alpha \cdot v^2/(2 \cdot g)$ .

8. Розраховують питому потенційну енергію потоку  $z_i + p_i/(\rho \cdot g)$  для кожного перерізу.

9. Обчислюють повні напори  $H_i$  для кожного перерізу за формулою (3.2).

10. Обчислюють потужності потоку  $N_i$  для кожного перерізу за формулою (3.4).

11. Результати обчислень заносять до таблиць 3.1, 3.2 та будують для обох дослідів:

- напірну лінію трубопроводу  $H = f_1(l_{\text{тр}})$ ;
- п'єзометричні лінії трубопроводу  $z + p /(\rho \cdot g) = f_2(l_{\text{тр}})$ ;
- залежність  $N_i = f_3(l_{\text{тр}})$ .

При побудові графіків необхідно враховувати, що початок трубопроводу перебуває у перерізі 1–1, а кінець – у перерізі 5–5.

#### **Звіт повинен включати:**

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Схему експериментальної установки.
3. Протокол результатів вимірювань.
4. Напірну лінію трубопроводу  $H = f_1(l_{\text{тр}})$ ;
5. П'єзометричні лінії трубопроводу  $z + p /(\rho \cdot g) = f_2(l_{\text{тр}})$ ;
6. Залежність  $N_i = f_3(l_{\text{тр}})$ .

#### **Контрольні запитання**

1. Конструктивні особливості лабораторного стенду.
2. Фізичний сенс геометричного, п'єзометричного, швидкісного та повного напорів, методика їх експериментального визначення.
3. Призначення та фізичний сенс рівняння Бернуллі.
4. Напірна та п'єзометрична лінії: призначення, методика побудови.

5. Фізичний сенс гідравлічного та п'єзометричного ухилів.
6. Зв'язок повного напору та потужності.
7. Визначення втрат напору та потужності.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРІВ

**Метою роботи** є вивчення методики експериментального визначення коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів.

#### **Завдання:**

1. Вивчити коефіцієнти опору зворотного клапана, коліна, постійного гідродроселя.
2. Встановити залежності коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів від режимів течії рідини.

#### **Загальні відомості**

Місцеві гідравлічні опори – це пристрої чи короткі ділянки трубопроводів, на яких мають місце суттєві втрати енергії, зумовлені змінами швидкості потоку за величиною та (або) напрямом і виникненням вихрових зон.

При виконанні розрахунків гідравлічних систем вважають, що місцеві гідравлічні опори не мають протяжності та зосереджені у точках.

На подолання місцевих опорів витрачається частина тиску (енергії) потоку. Зумовлено це так. Внаслідок виникнення вихрових зон частинки рідини стикаються між собою, що призводить до втрати механічної енергії, яку вони мають. Крім того, зміни профілю швидкостей потоку у місцевому опорі супроводжуються збільшенням відносних швидкостей і сил тертя між шарами рідини, отже, додатковими втратами напору тертя.

При турбулентному режимі течії рідини в місцевому опорі переважають втрати напору, зумовлені вихреутворенням, а при ламінарному режимі - навпаки, істотно збільшуються втрати на тертя.

Режими течії рідини у місцевих опорах вкрай нестійкі. Найчастіше навіть при низьких значеннях числа Рейнольдса ( $Re$ ) режим течії рідини є турбулентним.

Втрати напору у місцевих опорах у більшості випадків можуть бути



обчислені за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g}, \quad (4.1)$$

де  $\zeta_m$  - коефіцієнт місцевого опору;  $v$  - середня швидкість у перерізі трубопроводу перед місцевим опором, або після нього, м/с. Так, наприклад, для раптового розширення найчастіше швидкість приймається у перерізі перед ним, а для раптового звуження – навпаки, у перерізі після нього.

З огляду на велику складність структури потоку в місцевих опорах значення  $\zeta_m$  у більшості випадків можуть бути визначені лише досвідченим шляхом. Значення  $\zeta_m$  залежить від виду місцевого опору, його конструктивних розмірів, числа Рейнольдса  $Re$ , певною мірою від шорсткості стінок, а для запірних пристроїв (кранів, вентилів, засувок, клапанів та ін.) - від ступеня їх відкриття.

Дослідженнями встановлено, що  $\zeta_m$  залежить від числа  $Re$  лише при ламінарному режимі руху. У турбулентних потоках при досить великих числах  $Re$  вплив останніх на  $\zeta_m$  незначний, тому значення їх вважають залежними тільки від виду та конструктивного виконання місцевого опору.

Експериментальне визначення  $\zeta_m$  складає основі використання рівняння Вейсбаха (4.1).

При визначенні  $\zeta_m$  можливі два випадки:  $d_1 \neq d_2$ ;  $d_1 = d_2$ , де  $d_1$  і  $d_2$  – внутрішні діаметри трубопроводів на вході та виході місцевого опору відповідно.

У виконаних нижче дослідженнях мають місце обидва зазначені випадки.

Розглянемо методику експериментального визначення коефіцієнта місцевого опору найбільш складного випадку, коли діаметри трубопроводу до і після місцевого опору різні. Місцевий опір позначено літерою "М". Схема наведено рис. 4.1.

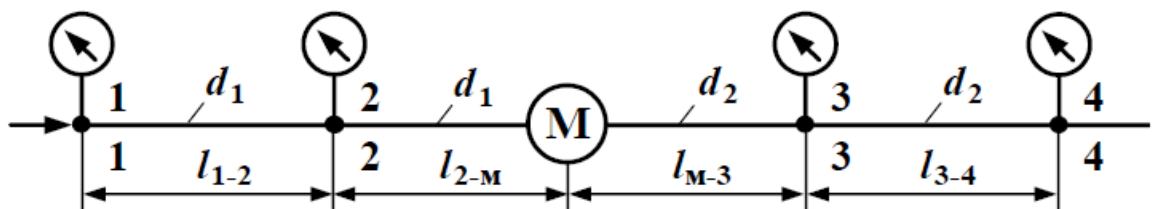


Рис. 4.1. Схема до визначення  $\zeta_m$

У зв'язку зі складністю процесів, що протікають у місцевих опорах (руйнування структури потоку, утворення вихорів тощо), з метою підвищення

точності експерименту рекомендується вимірювати п'єзометричні напори чи тиск не безпосередньо біля місцевого опору, а в деякому віддаленні від нього. Тобто вимірювання повинні проводитися в перерізах зі стабілізованою структурою потоку, що відновилася. Включати вимірювальні пристрої (п'єзометри, манометри або датчики тиску) рекомендують по обидва боки від місцевого опору  $M$  на відстані  $(10...50)d$ , де  $d$  – внутрішній діаметр трубопроводу. Отже,  $l_{2-M} = (10...50) \cdot d_1$ , а  $l_{M-3} = (10...50) \cdot d_2$ . Чим більша відстань до місцевого опору, тим вища точність експерименту.

В результаті виконання експериментів визначаються повні напори в перерізах, до яких підключені вимірювальні пристрої. Отже, повні напори  $H_2$  і  $H_3$  в перерізах 2–2 та 3–3 (рис. 4.1) будуть визначені експериментально. У зв'язку з тим, що напори  $H_2$  і  $H_3$  визначені не безпосередньо біля місцевого опору, а на деякій відстані від нього, втрати напору:

$$H_2 - H_3 = h_m + h_{д.2-м} + h_{д.м-3}, \quad (4.2)$$

де  $h_m$  – втрати у місцевому опорі (точніше було б сказати, що це втрати, зумовлені наявністю місцевого опору, тому що ці втрати виникають не тільки у місцевому опорі, а й на деякому віддаленні від нього), м;  $h_{д.2-м}$  і  $h_{д.м-3}$  – втрати на тертя по довжині трубопроводу відповідно на ділянках між перетином 2–2 та місцевим опором  $M$  та між  $M$  та перетином 3–3 при течії стабілізованих потоків, м.

Для визначення  $h_{д.2-м}$  і  $h_{д.м-3}$  необхідно створити дві контрольні ділянки, на яких слід визначити гідравлічні ухили.

Контрольна ділянка – це ділянка трубопроводу постійного діаметра зі стабілізованим потоком, що не містить між початковим та кінцевим перерізами (до яких підключені вимірювальні пристрої) місцевих опорів. На рис. 4.1 контрольні ділянки розташовані між перерізами 1–1 та 2–2, а також 3–3 та 4–4. Гідравлічні ухили:

$$i_1 = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}}; \quad (4.3)$$

$$i_2 = \frac{H_3 - H_4}{l_{3-4}}, \quad (4.4)$$

де  $H_1, H_2, H_3$  і  $H_4$  – повні напори на початку і в кінці контрольних ділянок, м;  $l_{1-2}$  та  $l_{3-4}$  – довжини контрольних ділянок, м.

Отже, гідравлічний ухил  $i$  величина безрозмірна, що дорівнює величині втрат повного напору на ділянці трубопроводу завдовжки 1 м.

Тоді втрати напору на тертя по довжині трубопроводу між перерізами 2–2

та М, а також М та 3-3 при течії стабілізованих потоків:

$$h_{д.2-М} = i_1 \cdot l_{2-М}; \quad (4.5)$$

$$h_{д.М-3} = i_2 \cdot l_{М-3}; \quad (4.6)$$

де  $l_{2-М}$  та  $l_{М-3}$  – відстані між перерізами 2-2 та М, М та 3-3, м.

Таким чином, для експериментального визначення коефіцієнта місцевого опору необхідно:

- 1) з формули Вейсбаха (4.1) виразити  $\zeta_M$ :

$$\zeta_M = \frac{2gh_M}{v^2}; \quad (4.7)$$

- 2) експериментально визначити втрати напору в місцевому опорі  $h_M$  та середню швидкість течії рідини  $v$ , а потім обчислити  $\zeta_M$ .

Чисельне значення  $h_M$  для випадку, коли діаметри до місцевого опору та після нього різні, визначається відповідно до викладеної вище методики.

Для місцевого опору – нерегульованого гідродроселя ДР1 методика визначення  $h_M$  дещо простіша. У зв'язку з тим, що діаметри до та після ДР1 рівні (тобто  $d_1 = d_2$ ), у цьому випадку достатньо створити одну контрольну ділянку (а не дві, як у попередньому випадку). Причому ця контрольна ділянка може бути розташована як до, так і після місцевого опору. У досліджуваній установці контрольна ділянка розташована до гідродроселя ДР1. Тому схема, наведена на рис. 4.2, для випадку, коли  $d_1 = d_2 = d$ , буде відповідати рис. 4.2.

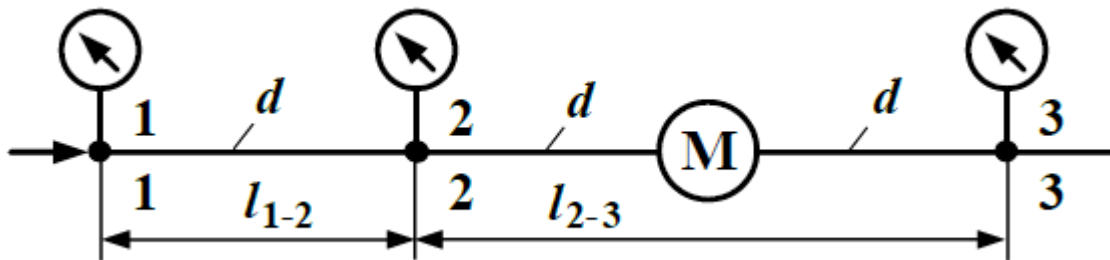


Рис.4.2. Схема до визначення  $\zeta_M$  при  $d_1 = d_2 = d$

Для розглянутого випадку:

$$H_2 - H_3 = h_M + i \cdot l_{2-3}, \quad (4.8)$$

звідки

$$h_M = H_2 - H_3 - i \cdot l_{2-3}. \quad (4.9)$$

Величина гідравлічного ухилу:

$$i = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}}. \quad (4.10)$$

### Порядок проведення дослідів

Об'єктами випробувань у цій роботі є сталевий трубопровід (від перетину 1–1 до перерізу 5–5). Трубопровід містить три гідравлічні місцеві опори:

- зворотний клапан (без пружини);
- коліно (поворот на 90°);
- постійний гідродросель ДР1.

Схема об'єкта дослідження наведено рис. 4.3.

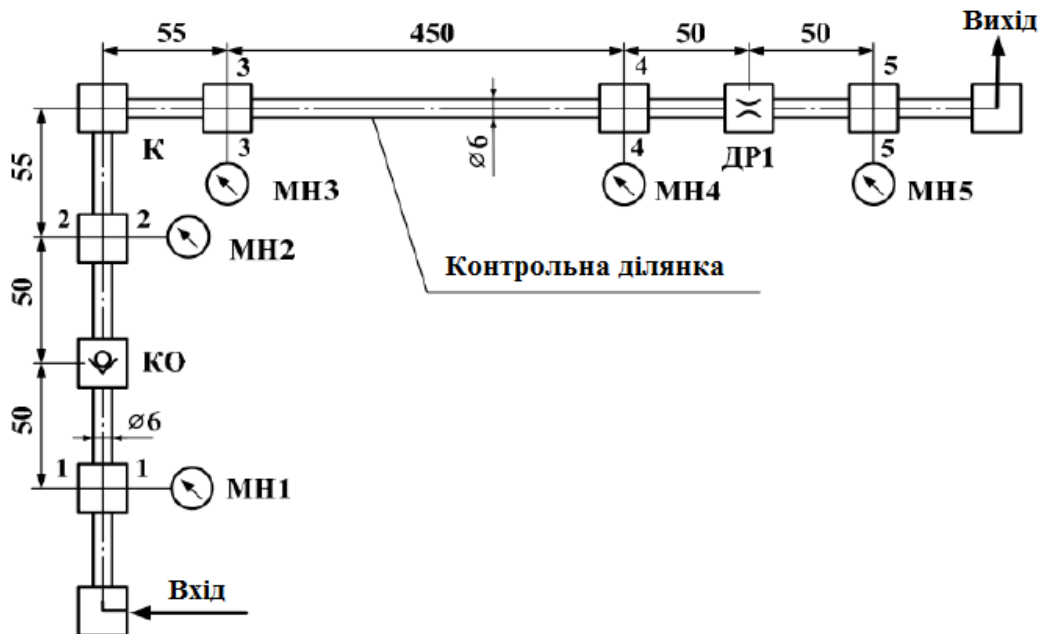


Рис.4.3. Схема об'єкта досліджень

Розміри на схемі наведені в міліметрах.

Трубопровід містить: клапан зворотний КО (без пружини), коліно (поворот на 90°) та постійний гідродросель ДР1 (діаметр 3 мм, товщина стінки 1,5 мм), контрольна ділянка (розташована між перерізами 3–3 та 4–4).

Принципова гідравлічна схема стенду НТЦ-11.17.1 ГІДРАВЛІКА М1 наведена на рис. 2.3.

До увімкнення стенда необхідно переконатися, що:

- маховик керування регулятором витрати РР повністю вивернуто проти годинникової стрілки (показчик положення маховика встановлений у позицію «1»);
- тумблери управління гідророзподільниками Р1 та Р2 встановлені у положення «Викл.»;
- тумблер установки режиму роботи електронного секундоміра встановлено в положення «Ручн.», а тумблер увімкнення живлення секундоміра встановлено у нижнє положення.

Експериментальне визначення коефіцієнта місцевого опору виконують у такій послідовності:

1. Вмикають живлення стенду ("Сеть").
2. Вмикають електродвигун М (кнопка "Пуск").
3. Включають живлення електронного секундоміра (тумблер у положення "ВКЛ").
4. Протягом 3...5 хвилин дають можливість стенду попрацювати в стаціонарному режимі.
5. Включають розподільник (тумблер Р1 у верхнє положення "ВКЛ. 1"). При цьому рідина від насоса через розподільник Р1 прямує до досліджуваного трубопроводу (встановлений на середній панелі стенда).
6. При різних налаштуваннях регулятора витрати РР проводять чотири досліди. Перший дослід проводять при мінімальній витраті, а останній - при максимальній (дивитися по витратоміру РА).

У кожному досліді необхідно виміряти:

- тиски  $p_1...p_5$  (за манометрами МН1...МН5), МПа;
- час  $t$  проходження через витратомір заданого об'єму робочої рідини  $W_p$  за допомогою електронного секундоміра. Об'ємом  $W_p$  необхідно задатися, прийнявши його, наприклад, рівним  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л);
- температуру робочої рідини  $T$ , °С (за термометром).

Результати вимірювань кожного досліду заносять до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

**Результати досліджень досліду №1....4**

Номер січення $j$	1	2	3	4	5
$p_j$ , МПа					
$t$ , с					
$W_p$ , м <sup>3</sup>					
$T$ , °С					
$Q$ , м <sup>3</sup> /с					
$v$ , м/с					
$Re$					
$\alpha$					
$h_{пj}$ , м					
$h_c$ , м					
$H_j$ , м					
$i$					
$h_{к0}$ , м					
$h_k$ , м					

$h_{др}, \text{М}$	
$\zeta_{ко}$	
$\zeta_{к}$	
$\zeta_{др}$	

Порядок завершення роботи:

- вимикають живлення секундоміра;
- вимикають електродвигун кнопкою "Стоп";
- відключають живлення стенда автоматичним вимикачем «СЕТЬ».

### Обробка результатів вимірів

Для виключення помилок усі чисельні значення параметрів необхідно у формули підставляти у системі СІ.

Для кожного досліду визначають та заносять до таблиці 4.1 відповідно:

1. Витрату рідини в трубопроводі  $Q, \text{м}^3/\text{с}$ :

$$Q = W_p / t. \quad (4.11)$$

2. Середню швидкість рідини в трубопроводі  $v, \text{м/с}$ :

$$v = Q / S, \quad (4.12)$$

де  $S$  - площа перерізу трубопроводу,  $\text{м}^2$ . (Внутрішній діаметр трубопроводу  $d = 6 \text{ мм}$ ).

3. Число Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (4.13)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість мастила при температурі  $T$  (за графіком  $\nu = f(T)$  для мастила, яким заправлена гідростанція),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d$  - діаметр трубопроводу,  $\text{м}$ .

4. Коефіцієнт Коріоліса  $\alpha = f(Re)$ : при  $Re > 2320$   $\alpha = 1$ , при  $Re < 2320$   $\alpha = 2$ .

5. П'єзометричні напори  $h_{Пj}$  для кожного перерізу:

$$h_{Пj} = \frac{p_j}{\rho \cdot g}, \quad (4.14)$$

де  $p_j$  - тиск в  $j$ -му перерізі,  $\text{Па}$ ;  $\rho$  – густина рідини,  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$ .

6. Швидкісний напір  $h_c$ :

$$h_c = \frac{\alpha \cdot v^2}{\rho \cdot g}, \quad (4.15)$$

7. Повні напори  $H_j$  для кожного перерізу:

$$H_j = h_c + h_{Пj}. \quad (4.16)$$

8. Гідравлічний ухил  $i$  (визначається на контрольній ділянці):

$$i = \frac{H_3 - H_4}{l_{3-4}}, \quad (4.17)$$

де  $l_{3-4}$  – довжина контрольної ділянки (див. рис. 4.3), м.

9. Втрати напору на місцевих опорах (КО, К та ДР1)  $h_{КО}, h_K, h_{ДР}$ :

$$h_M = H_{вх} - H_{вих} - il. \quad (4.18)$$

де  $h_M$  - втрати напору на місцевому опорі, м;  $H_{вх}$  – повний напір перед місцевим опором, м;  $H_{вих}$  - повний напір після місцевого опору, м;  $i$  - гідравлічний ухил, м;  $l$  – відстань між перерізами ділянки, що включає досліджуваний місцевий опір, м.

Так, якщо потрібно визначити втрати напору на клапані зворотному КО, то

$$h_{КО} = H_1 - H_2 - il_{1-2},$$

де  $H_1$  - повний напір в перерізі 1-1, м;  $H_2$  – повний напір в перерізі 2-2, м;  $l_{1-2}$  – відстань між перерізами 1-1 та 2-2 (за схемою на рис. 3.3  $l_{1-2} = 50 + 50 = 100$  мм = 0,1 м), м.

Аналогічний підхід використовується щодо втрат на інших опорах. Потрібно лише при визначенні втрат використати відповідні напори в перерізах  $H_j$  і довжини ділянок, на яких між двома суміжними перерізами встановлено досліджуваний опір.

10. Коефіцієнти місцевих опорів (КО, К та ДР1)  $\zeta_{КО}, \zeta_K, \zeta_{ДР}$  за формулою (4.7).

За результатами 4-х дослідів (таблиці 4.1) побудувати графічні залежності:

- $\zeta_{КО} = f(Re)$ ;
- $\zeta_K = f(Re)$ ;
- $\zeta_{ДР} = f(Re)$ .

Побудову виконати одному рисунку.

Отримані значення коефіцієнтів місцевих опорів можна порівняти з довідковими даними.

#### **Звіт повинен включати:**

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Схему експериментальної установки.
3. Протокол результатів вимірювань.
4. Графічні залежності:  $\zeta_{КО} = f(Re)$ ;  $\zeta_K = f(Re)$ ;  $\zeta_{ДР} = f(Re)$ .

#### **Контрольні запитання**

1. Дайте визначення місцевого опору, назвіть основні види місцевих опорів.

2. Поясніть причини, що спричиняють втрати напору у місцевих опорах.
3. У чому полягає методика експериментального визначення  $\zeta_m$ ?
4. З якою метою визначаються гідравлічні ухили?
5. Які фактори впливають на величину  $\zeta_m$  при ламінарному та турбулентному режимах течії?
6. Назвіть довідкові значення  $\zeta_m$  для досліджуваних місцевих опорів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ТЕРТЯ

**Метою роботи** є вивчення способів визначення коефіцієнта гідравлічного тертя.

#### Завдання:

1. Визначити коефіцієнт гідравлічного тертя сталевого трубопроводу.
2. Побудувати графічні залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса.

#### Загальні відомості

При русі рідин по трубах внаслідок тертя виникають сили гідравлічних опорів, на подолання яких витрачається частина енергії, що переноситься рідиною.

Найбільш загальною формулою для визначення втрат напору на тертя по довжині трубопроводу як при ламінарному, так і турбулентному режимах руху є формула Вейсбаха-Дарсі:

$$h_D = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя, чи коефіцієнт Дарсі;  $l$ ,  $d$  – довжина та діаметр ділянки труби, на якому визначаються втрати напору  $h_D$ , м;  $v$  – середня швидкість течії рідини, м/с.

Для визначення  $h_D$  в трубах довільного поперечного перерізу у формулу (5.1) замість  $d$  підставляють гідравлічний діаметр  $D$ .

Дослідженнями встановлено, що коефіцієнт гідравлічного тертя в загальному випадку залежить від числа Рейнольдса  $Re$  та відносної шорсткості стінок  $\Delta_\epsilon/d$ , де  $\Delta_\epsilon$  – абсолютна величина так званої еквівалентної



рівномірнoзернистoї шoрсткoсті. Визначення  $\lambda$  знаходиться в тісному зв'язку з поглядами на структуру турбулентного потоку, відповідно до яких вважають, що турбулентний потік складається з турбулентного ядра і пограничного ламінарного шару, розташованого біля стінок труби.

Товщина пограничного ламінарного шару  $\delta_{пл} = 30d / (\text{Re} \sqrt{\lambda})$ .

При  $\delta_{пл} > \Delta$  труба є гідравлічно гладкою, де  $\Delta$  – абсолютна шорсткість стінок труби.

При  $\delta_{пл} < \Delta$  (тобто нерівності стінки виступають за межі ламінарного шару) – труба є гідравлічно шорсткою.

Таким чином, та сама труба в залежності від режиму течії рідини може бути як гідравлічно гладкою, так і гідравлічно шорсткою.

На сьогоднішній день є кілька способів визначення коефіцієнта гідравлічного тертя  $\lambda$ . Розглянемо їх.

Перший метод. Відповідно до цього способу  $\lambda$  визначається експериментальним шляхом. Позначимо коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda_e$ . З рівняння (5.1):

$$\lambda_e = \frac{2 \cdot h_d \cdot d \cdot g}{l \cdot v^2}, \quad (5.2)$$

де  $h_d$  та  $v$  визначаються на основі експериментальних даних. Для горизонтального трубопроводу постійного перерізу

$$h_d = h_{пп} - h_{пк}, \quad (5.3)$$

де  $h_{пп}$ ,  $h_{пк}$  - пьезометричні напори відповідно на початку та в кінці досліджуваного трубопроводу, м.

Другий спосіб. Відповідно до цього способу всі можливі режими течії рідини розбиваються п'ять зон опору. Для кожної зони рекомендовано одну або кілька формул, на основі яких обчислюється значення  $\lambda$ . Для вибору зони, а отже, і формули для обчислення  $\lambda$  необхідно знати значення  $Re$ ,  $d$ ,  $\Delta_e$ . Визначений нижче коефіцієнт гідравлічного тертя відповідно до другого способу позначений  $\lambda_p$ .

Зони, їх межі та формули, що використовуються для обчислення  $\lambda$ , є наступними.

Зона 1 - в'язкого опору; рух ламінарний;  $Re < 2320$ .

$$\lambda = 64 / Re. \quad (5.4)$$

Зона 2 - турбулентного руху рідини в перехідній ділянці;  $2320 < Re < 4000$ .

Для обчислення коефіцієнта гідравлічного тертя у цій зоні використовується формула Френкеля:

$$\lambda = 2,7 / \text{Re}^{0,53} . \quad (5.5)$$

Зона 3 – гідравлічно гладких труб;  $4000 < Re < 20 \frac{d}{\Delta_e}$ .

Для обчислення  $\lambda$  в цій зоні користуються формулою Блазіуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} , \quad (5.6)$$

або формулою Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg \text{Re} - 1,5)^2} . \quad (5.7)$$

Зона 4 – доквадратичного опору, перехідна від зони гідравлічно гладких труб до зони квадратичного опору;  $20 \frac{d}{\Delta_e} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_e}$ . Розрахунок  $\lambda$  у цій зоні виконують за формулою Альтшуля:

$$\lambda \approx 0,11 \left( \frac{\Delta_e}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} . \quad (5.8)$$

Зона 5 – квадратичного опору (автомодельності);  $Re > 500 \frac{d}{\Delta_e}$ . Для розрахунку  $\lambda$  у цій зоні широко застосовується формула Шифрінсона:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_e}{d} \right)^{0,25} . \quad (5.9)$$

Таким чином, у перших трьох зонах  $\lambda$  залежить тільки від числа Рейнольдса, тобто.  $\lambda = f(Re)$ , у четвертій зоні  $\lambda$  залежить від числа Рейнольдса і відносної шорсткості стінки трубопроводу, тобто  $\lambda = f(Re, \Delta_e / d)$ , а в п'ятій зоні  $\lambda$  залежить тільки від відносної шорсткості стінки трубопроводу, тобто  $\lambda = f(\Delta_e / d)$ .

Слід зазначити, що п'ять зон гідравлічного опору – це максимальні числа згаданих та наведених у навчальній та науковій літературі зон. Найчастіше, при вирішенні прикладних інженерних завдань виділяється менша кількість зон (дві чи три). Так, наприклад, при вирішенні завдань у галузі машинобудівної гідравліки часто виділяють дві зони. Перша відповідає ламінарному режиму течії ( $Re < 2320$ ), для якого  $\lambda$  обчислюють за формулою (5.4), а друга – турбулентному режиму течії ( $Re > 2320$ ), для якого значення визначають за формулою Блазіуса (5.6). При підстановці у формулу Вейсбаха-Дарсі  $\lambda = 64/Re$

отримують формулу Пуазейля:

$$h_D = \frac{32 \cdot \nu \cdot l}{g \cdot d^2} \nu, \quad (5.10)$$

Слід зазначити, що, крім розглянутих вище, існують інші способи визначення  $\lambda$ , наприклад, графічні.

### Порядок проведення дослідів

Об'єктом випробувань у цій роботі є сталевий трубопровід (ділянка 62, від перерізу 6-6 до перерізу 7-7), схема якого представлена на рис. 5.1.

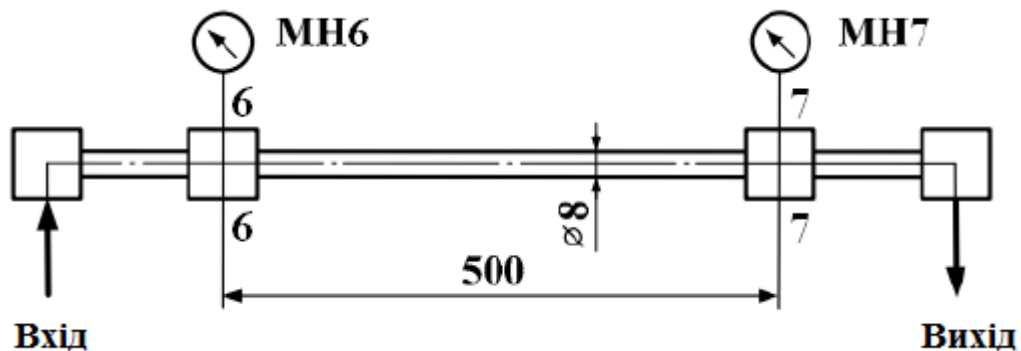


Рис.5.1. Схема досліджуваного трубопроводу

Розміри на схемі наведені у міліметрах. Внутрішній діаметр трубопроводу – 8 мм. До початкового 6-6 і кінцевого 7-7 перерізів досліджуваного трубопроводу підключені манометри МН6 і МН7. Еквівалентна шорсткість внутрішньої стінки трубопроводу  $\Delta_e = 0,1$  мм.

Принципова гідравлічна схема стенду НТЦ-11.17.1 ГІДРАВЛІКА М1 наведена на рис. 2.3.

До увімкнення стенда необхідно переконатися, що:

- маховик керування регулятором витрати РР повністю вивернуто проти годинникової стрілки (показчик положення маховика встановлений у позицію «1»);
- тумблери управління гідророзподільниками Р1 та Р2 встановлені у положення «Викл.»;
- тумблер установки режиму роботи електронного секундоміра встановлено в положення «Ручн.», а тумблер увімкнення живлення секундоміра встановлено у нижнє положення.

Експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного тертя виконують у такій послідовності:

1. Вмикають живлення стенду ("Сеть").

2. Вмикають електродвигун М (кнопка "Пуск").
3. Включають живлення електронного секундоміра (тумблер у положення "ВКЛ").
4. Протягом 3...5 хвилин дають можливість стенду попрацювати в стаціонарному режимі.
5. Включають розподільник (тумблер Р1 у верхнє положення "ВКЛ. 2"). При цьому рідина від насоса через розподільник Р1 прямує до досліджуваного трубопроводу (встановлений на середній панелі стенда).
6. При різних налаштуваннях регулятора витрати РР проводять шість дослідів. Перший дослід проводять при мінімальній витраті, а останній - при максимальній (дивитися по витратоміру РА).

У кожному досліді необхідно виміряти:

- тиски  $p_6, p_7$  (за манометрами МН6, МН7), МПа;
- час  $t$  проходження через витратомір заданого об'єму робочої рідини  $W_p$  за допомогою електронного секундоміра. Об'ємом  $W_p$  необхідно задатися, прийнявши його, наприклад, рівним  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л);
- температуру робочої рідини  $T, ^\circ\text{C}$  (за термометром).

Результати вимірювань кожного досліді заносять до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

### Результати досліджень

№ досліді	$p_6, \text{МПа}$	$p_7, \text{МПа}$	$t, \text{с}$	$W_p, \text{м}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$h_d, \text{м}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$v, \text{м/с}$	$v, \text{м}^2/\text{с}$	Re	$\lambda_e$	$\lambda_p$
1												
2												
3												
4												
5												
6												

Порядок завершення роботи:

- вимикають живлення секундоміра;
- вимикають електродвигун кнопкою "Стоп";
- відключають живлення стенда автоматичним вимикачем «СЕТЬ».

### Обробка результатів вимірів

Для кожного досліді визначити та занести в таблицю 5.1:

1. Втрати напору на ділянці між перерізами 6-6 та 7-7 трубопроводу (втрати за довжиною)  $h_d, \text{м}$ :

$$h_D = \frac{p_6 - p_7}{\rho g}, \quad (5.11)$$

де  $\rho$  – густина мастила, кг/м<sup>3</sup>.

Тиск  $p_6$  і  $p_7$  необхідно підставляти у формулу в Па.

2. Витрату рідини у трубопроводі  $Q$ , м<sup>3</sup>/с:

$$Q = W_p / t. \quad (5.12)$$

3. Середню швидкість рідини в трубопроводі  $v$ , м/с:

$$v = Q / S, \quad (5.13)$$

де  $S$  - площа перерізу трубопроводу, м<sup>2</sup>. (Внутрішній діаметр трубопроводу  $d = 8 \cdot 10^{-3}$  м (8 мм).

4. Число Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5.14)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість мастила при температурі  $T$  (для визначення  $\nu$  в лабораторії необхідно мати графічну залежність  $\nu = f(T)$  для мастила, яким заправлена гідростанція), м<sup>2</sup>/с;  $d$  – діаметр трубопроводу, м.

5. Коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda_e$ , який визначається експериментальним шляхом, обчислюється за формулою (5.2).

6. Коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda_p$ , який визначається розрахунковим шляхом.

Для цього необхідно в кожному досліді встановити, у якій зоні гідравлічного опору відбувається течія рідини. Для визначення зони гідравлічного опору необхідно використовувати чисельне значення  $Re$  (з таблиці 5.1). Після встановлення зони, в якій відбувається течія рідини, потрібно скористатися формулою, рекомендованою для обчислення в цій зоні. Так, наприклад, якщо течія відбувається в першій зоні ( $Re < 2320$ ), то потрібно скористатися формулою (5.4), тобто  $\lambda = 64/Re$ .

Після виконання всіх розрахунків необхідно побудувати графічні залежності в одних осях координат:

- $\lambda_e = f(Re)$ ;
- $\lambda_p = f(Re)$ .

Проаналізувати отримані результати.

#### **Звіт повинен включати:**

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Схему експериментальної установки.
3. Протокол результатів вимірювань.

4. Графічні залежності:  $\lambda_e = f(Re)$ ;  $\lambda_p = f(Re)$ .

5. Аналіз графічних залежностей.

### Контрольні запитання

1. Опишіть конструктивні особливості лабораторного стенду.

2. Як визначати втрати на тертя по довжині трубопроводу?

3. Методика експериментального визначення коефіцієнта гідравлічного тертя.

4. Методика розрахункового визначення коефіцієнта гідравлічного тертя.

5. Які фактори впливають на величину втрат тертя по довжині трубопроводу?

6. Що таке гідравлічно гладкі та гідравлічно шорсткі труби?

7. Поясніть фізичний сенс еквівалентної шорсткості труб  $\Delta_e$ .

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### ТАРУВАННЯ ПНЕВМОМЕТРИЧНОЇ ТРУБКИ В АЕРОДИНАМІЧНІЙ ТРУБІ

**Метою роботи** є експериментальне визначення тарувального коефіцієнта пневмометричної трубки в аеродинамічній трубі.

#### **Завдання:**

1. Вивчити схеми конструкцій аеродинамічних труб.
2. Здійснити тарування пневмометричної трубки в аеродинамічній трубі.
3. Визначити тарувальний коефіцієнт дослідної пневмометричної трубки.

#### **Загальні відомості**

У залежності від способу подавання повітря в робочу частину розрізняють два типи конструкцій: незамкнута аеродинамічна труба, в якій через робочу частину в кожен момент часу проходить нова порція повітря з оточуючого середовища (конструкція Ейфеля) (рис.6.1, а); замкнута аеродинамічна труба з переміщенням однієї і тієї ж маси повітря по замкнутому каналу (Геттінченська конструкція) (рис.6.1, б).

Перевагою замкнутої аеродинамічної труби є менша потужність приводу; труби такої конструкції можуть використовуватись як аерокліматичні.

Перевагою незамкнутої аеродинамічної труби є малі затрати на будівництво; недоліком – залежність параметрів потоку від зовнішніх погодних умов (такі труби встановлюються, як правило, за межами будинку на відкритому просторі), а також значне зашумлення оточуючого середовища.

Розміри, потужність і якість потоку аеродинамічної труби визначаються конструкцією робочої частини, розмірами сопла і форкамери, конструкцією вентилятора і його приводу.

Габаритні розміри аеродинамічної труби визначаються розмірами її робочої частини і, в першу чергу, площею її поперечного січення. Для досягання ідентичності процесу обтікання в аеродинамічній трубі з натурними умовами коефіцієнт блокування робочої частини повинен бути якомога меншим.

Коефіцієнтом блокування ( $K_{\text{бл}}$ ) називають відношення міделевого перерізу моделі до площі поперечного перерізу повітряного потоку в робочій частині труби. Міделевий переріз – площа проекції тіла на площину, нормальну до напрямку повітряного потоку. Згідно вимог авіаційної аеродинаміки,

коефіцієнт блокування робочої частини не повинен перевищувати 0,005.

В автомобільній аеродинаміці коефіцієнт блокування може бути більшим, а в будівельній аеродинаміці – значно більшим.

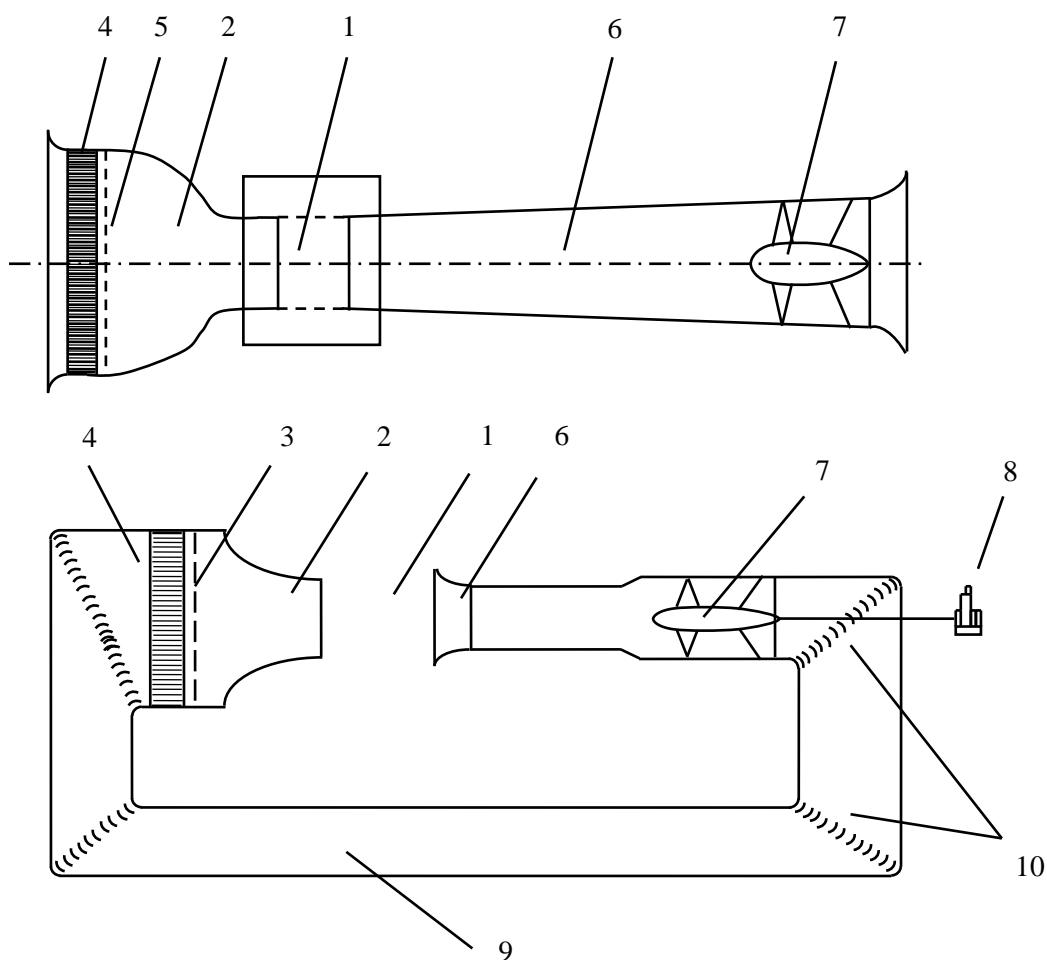
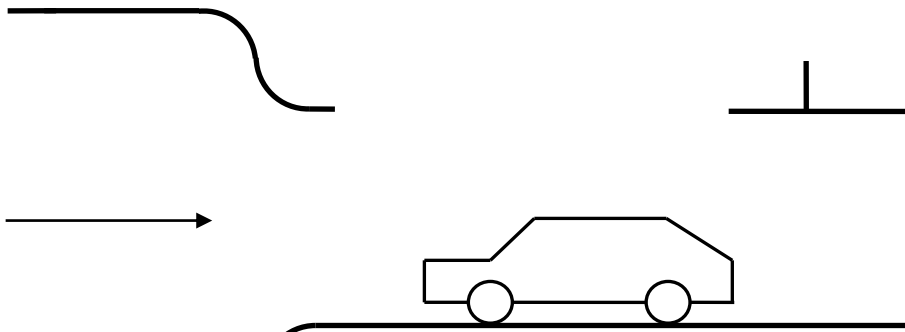


Рис.6.1. Схема конструкцій аеродинамічної труби незамкнутого (а) і замкнутого (б) типів: 1 – робоча частина; 2 – сопло; 3 – форкамера; 4 – спрямляючі ґратки; 5 – вирівнююча сітка; 6 – дифузор; 7 – вентилятор; 8 – провід вентилятора; 9 – рециркуляційний канал; 10 – направляючі лопатки.

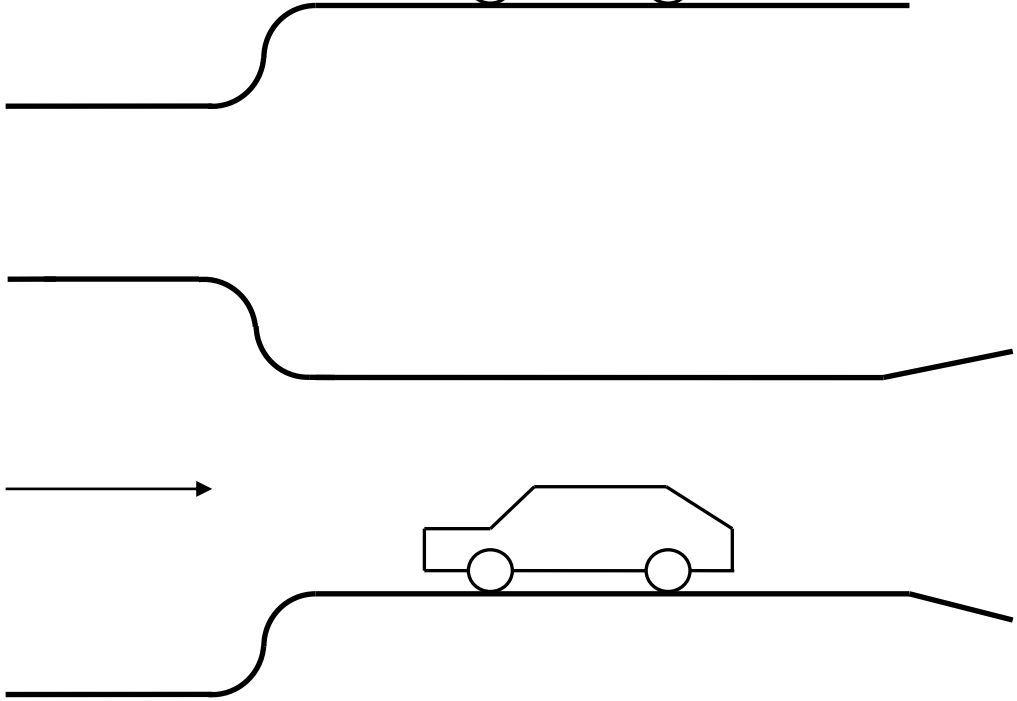
На рис.6.2. показані чотири типи конструкцій робочої частини автомобільних аеродинамічних труб.



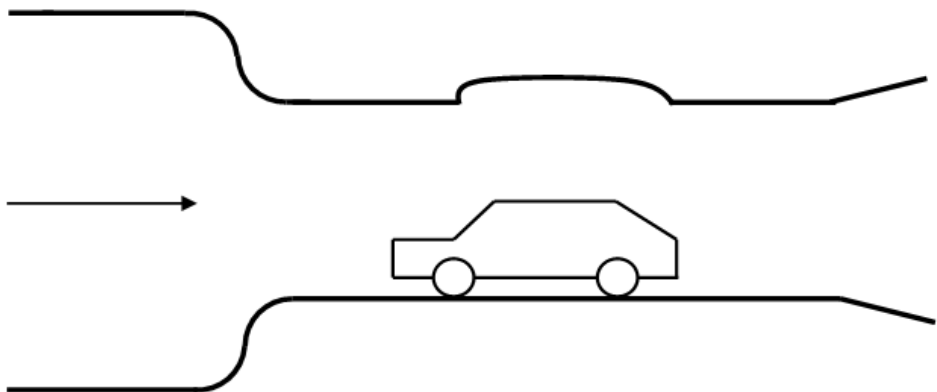
a



б



в



г

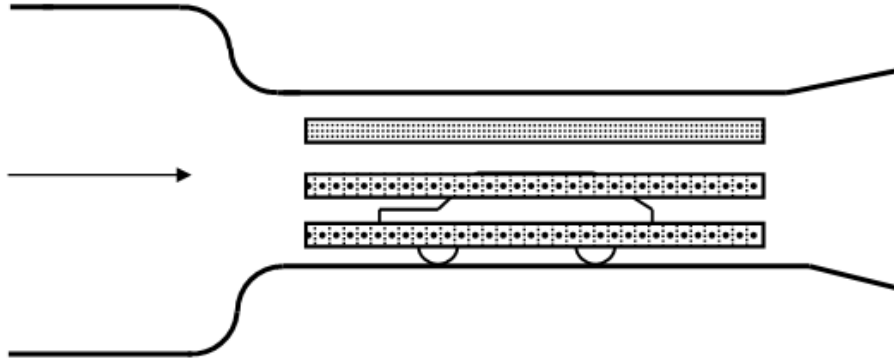


Рис.6.2. Тип конструкцій робочої частини аеродинамічних труб: а – відкрита; б - розкрита; в – у формі ліній течії; г – з повітропроникними боковими стінками (з поздовженими щілинами).

Суттєва перевага відкритої робочої частини полягає в тому, що при правильному виборі форми і розмірів вхідного отвору дифузора градієнт статичного тиску по осі аеродинамічної труби є надто малим. Це має особливо важливе значення при вимірюванні аеродинамічного опору тіл. Інші переваги відкритої робочої частини: сумарна поправка на коефіцієнт блокування, значно менша, ніж у закритої робочої частини; добрий доступ для проведення експериментів і вимірювання характеристик потоку.

Основний недолік відкритої робочої частини – високий рівень шуму при роботі, з яким неможливо боротись.

Переваги закритої робочої частини полягають в її більшій корисній довжині. Суттєвий недолік такої робочої частини є висока чутливість до блокування (поправка на коефіцієнт блокування вдвічі більша, ніж для відкритої робочої частини). Для ліквідації цього недоліка стінки робочої частини виконуються у формі ліній течії (рис.6.2, в).

Використання закритої робочої частини з поздовжніми щілинами в стінках дозволяє поєднати переваги відкритої і закритої робочих частин і позбавитись від недоліків, властивих кожній з цих схем.

Степінь підтискання сопла аеродинамічної труби і його форма в значній мірі визначають якість потоку в робочій частині та необхідну потужність приводу. Коефіцієнт підтискання ( $k_{nm}$ ) дорівнює відношенню площі на вході в сопло і на виході з нього. Висока степінь підтискання сприяє вирівнюванню профілю швидкостей потоку на виході з сопла і зменшенню турбулентності. Для випробування літаків рекомендуються аеродинамічні труби з  $k_{nm} = 10 \dots 12$ .

Незамкнуті аеродинамічні труби звичайно виготовляються з  $k_{nm} = 2 \dots 3$ . В

автомобільних і архітектурно-будівельних аеродинамічних трубах тенденція до збільшення  $k_{nm}$  пов'язана тільки зі зменшенням потужності приводу.

Визначальним для якості потоком в аеродинамічній трубці поряд з коефіцієнтом підтискання сопла є форма сопла. З точки зору вартості сопло повинно бути якомога коротшим. Дуже важливо, щоб локальний вектор швидкості в кожній точці потоку був паралельним до осі робочої частини. З багатьох математичних залежностей, які пропонують для розрахунку геометрії сопла, на сьогодні перевага віддається розрахунковій формулі Вітошінського, яка добре підходить для розрахунку осесиметричного сопла. Експериментально встановлено, що добрі результати можна одержати для сопел довжиною, що приблизно дорівнює  $1/3$  діаметра вхідного перерізу.

Швидкість потоку в аеродинамічній трубці повинна регулюватись плавно. В нових аеродинамічних трубах регулюють швидкість потоку за рахунок зміни числа обертів вентилятора. Ротори вентиляторів виконують полегшеними; лопатки виготовляють з дерева, або склопластику.

При коефіцієнті підтискання  $k_{nm} = 4$  і правильно підібраному соплі можна одержати поле швидкостей, в якому швидкість потоку в будь-якій точці, за винятком пограничної області, відрізняється від середньої швидкості не більше, ніж на  $\pm 1\%$ . Цього достатньо для вирішення задач автомобільної аеродинаміки.

### Хід виконання і обробка даних

Схема експериментальної установки для тарування пневмометричної трубки зображена на рис.б.3.

Тарування пневмометричної трубки в аеродинамічній трубці виконують у такій послідовності:

1. Дослідну 1 та еталонну 2 пневмометричні трубки встановлюють поряд в робочій частині труби.

2. В робочій частині труби створюють стабілізований повітряний потік зі швидкістю  $v_\infty$ .

3. Трубками 1 і 2 заміряють повні тиски повітряного потоку в точках замірювання, а їх величину визначають за формулою:

$$P_n = \Delta l \cdot K \cdot \zeta \cdot n \cdot g, \quad (6.1)$$

в якій  $\Delta l$  - різниця відліків за шкалою мікроманометра;  $K$  - коефіцієнт, який залежить кута нахилу відлікової трубки мікроманометра,  $\zeta$  - тарувальний коефіцієнт пневмометричної трубки;  $n$  - поправка на густину рідини, що залита у резервуар мікроманометра;  $g$  - прискорення вільного падіння,  $m/s^2$ .

$$n = \frac{\rho_p}{0,8095} \cdot \frac{1}{(1 + \beta_t) \cdot (t_p - 20)}, \quad (6.2)$$

де  $\rho_p$  - густина рідини, залитої у резервуар мікроманометра, г/см<sup>3</sup>;  $\beta_t$  - коефіцієнт температурного розширення рідини (для спирту  $\beta_t = 0,0011$  1/град; для води при  $t_p = 10 \dots 20$  °С  $\beta_t = 0,00015$  1/град);  $t_p$  - температура рідини у резервуарі, °С.

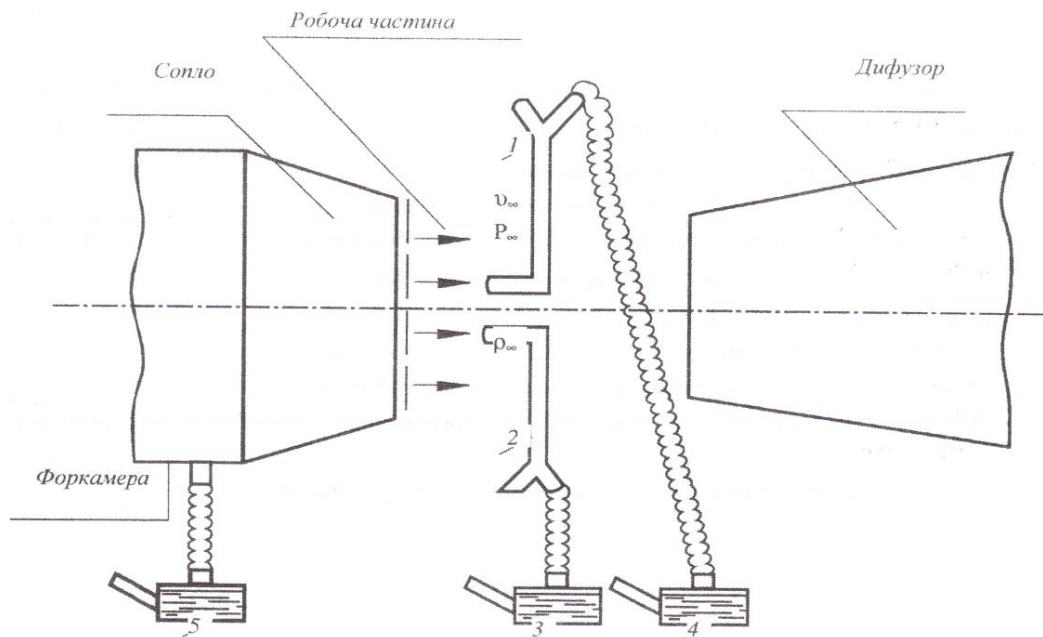


Рис. 6.3. Схема дослідної установки для тарування пневмометричної трубки: 1 – дослідна трубка; 2 – еталонна трубка; 3 – мікроманометр для вимірювання тиску повітряного потоку еталонною трубкою; 4 – те саме, дослідною трубкою; 5 – мікроманометр для вимірювання статичного тиску у форкамері аеродинамічної труби.

4. Кут нахилу відлікових трубок мікроманометрів 3 і 4 встановлюють однаковим.

5. Визначають тарувальний коефіцієнт дослідної пневмометричної трубки за формулою:

$$\zeta_D = \frac{\Delta l_{em}}{\Delta l_D} \cdot \zeta_{em}, \quad (6.3)$$

де  $\Delta l_{em}$  - різниця відліків за шкалою мікроманометра під час вимірювання тиску еталонною трубкою;  $\Delta l_D$  - те ж, при вимірюванні тиску дослідною трубкою;  $\zeta_{em}$  - коефіцієнт еталонної трубки.

6. Взаємно міняють положення трубок місцями і за іншої швидкості

повітряного потоку повторюють попередні п.3 та п.5.

7. Дослідження проводять якнайменше при трьох різних швидкостях повітряного потоку.

8. Усереднюють коефіцієнт трубки, що тарується.

9. При стабілізації швидкості повітряного потоку мікроманометром 5 заміряють статичний тиск у форкамері труби:

$$p_{ст.тр} = \Delta l_{ст.тр} \cdot K \cdot n \cdot g, \quad (6.4)$$

де  $\Delta l_{ст.тр}$  - різниця відліків за шкалою мікроманометра 5 при вимірюванні статичного тиску перед соплом труби.

10. Визначають швидкість повітряного потоку ( $v_\infty$ ) в робочій частині труби за формулою:

$$v_\infty = 0,9672 \cdot \sqrt{\frac{2p_{ст.тр}}{\rho_\infty}}, \quad (6.5)$$

де  $\rho_\infty$  - густина повітряного потоку,  $\text{кг/м}^3$ ;

$$\rho_\infty = \rho_0 \cdot \frac{P_{атм}}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_{атм}}, \quad (6.6)$$

де  $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$  - густина повітря за стандартних умов ( $T_0 = 273 \text{ К}$ ,  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ );  $T_{атм}$  - температура в приміщенні лабораторії ( $T_{атм} = 273 + t_{атм}$ ,  $\text{К}$ );  $P_{атм}$  - атмосферний тиск в приміщенні лабораторії,  $\text{Па}$  (вимірюється барометром-анероїдом).

#### **Звіт повинен включати:**

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Протокол вихідних даних.
3. Інформацію про марку і номери диференціальних мікроманометрів; марку і номер барометра-анероїда; тип термометра з характеристикою мірної шкали;  $P_{атм}$  та  $t_{атм}$ .
4. Схему дослідної установки.
5. Технічні характеристики еталонної та дослідної трубки.
6. Послідовність проведення досліджень, експериментальні дані, результати розрахунків.

#### **Контрольні запитання**

1. Як класифікують аеродинамічні труби за конструкцією?
2. Які типи конструкцій робочої частини аеродинамічних труб?

3. Зобразіть схему дослідної установки для тарування пневмометричної трубки.
4. Як враховується густина рідини в мікроманометрі під час вимірювання тиску?
5. Запишіть формулу визначення швидкості повітряного потоку в робочій частині аеродинамічної труби.
6. Як визначають тарувальний коефіцієнт досліджуваної пневмометричної трубки за допомогою еталонної пневмометричної трубки?
7. Як визначити величину заміряного тиску за відомої різниці відліків шкали мікроманометра?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ТИСКУ ПО ПОВЕРХНІ МОДЕЛІ БУДИНКУ ЗМІННОЇ ВИСОТИ

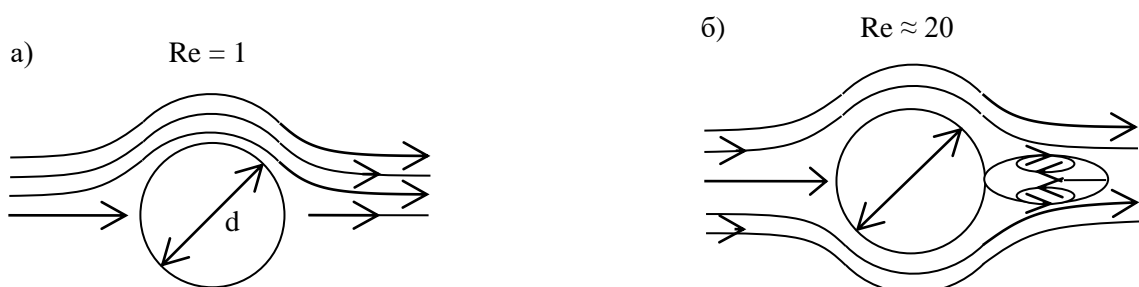
**Метою роботи** є моделювання приземного пограничного шару атмосфери та визначення розподілення надлишкового тиску по поверхні будинку змінної висоти.

#### Завдання:

1. Зобразити графічно розподіл тисків по поверхні моделі будинку.
2. Побудувати епюри швидкостей в характерних поперечних перетинах.
3. Визначити аеродинамічні коефіцієнти, віднесені до швидкісного напору незбуреного повітряного потоку і до швидкісного напору в пограничному шарі.

#### Загальні відомості

Проаналізуємо процес обтікання повітряним потоком циліндричного тіла з гладкою поверхнею, як один з найбільш вивчених. Структура ліній течії при обтіканні повітряним потоком такого тіла зображена на рис.7.1.



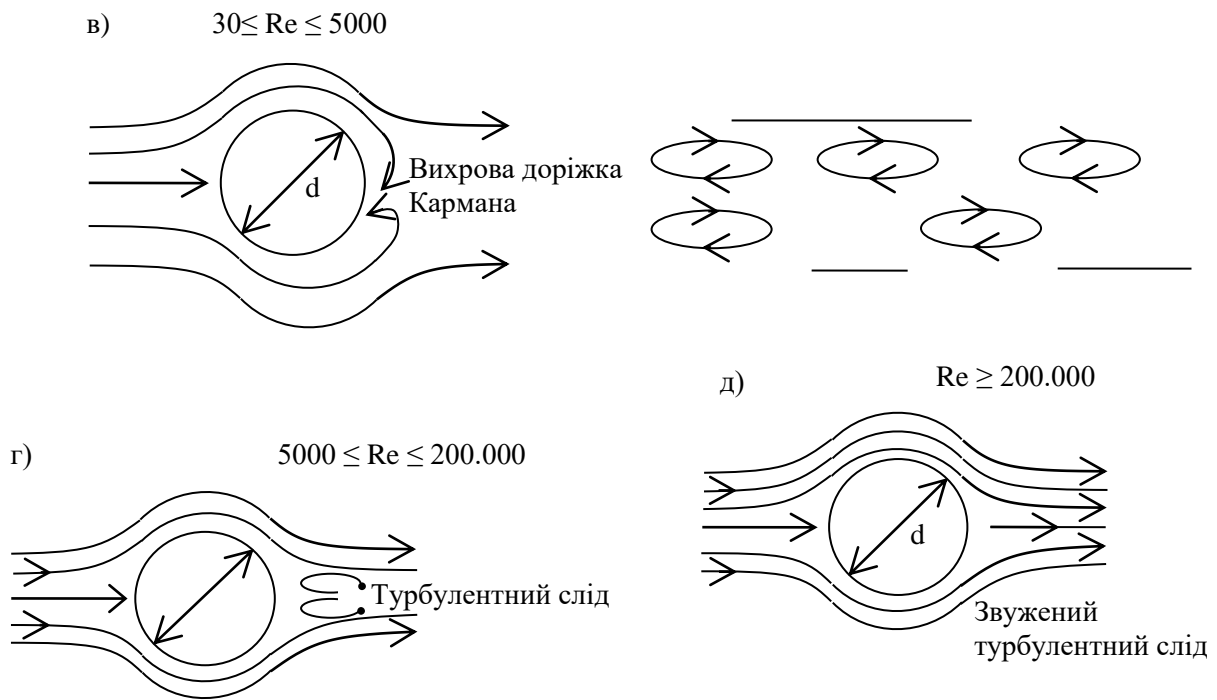


Рис.7.1. Характер обтікання циліндричного тіла повітряним потоком: а)  $Re = 1$ ; б)  $Re \approx 20$ ; в)  $30 \leq Re \leq 5000$ ; г)  $5000 \leq Re \leq 200.000$ ; д)  $Re \geq 200.000$ .

Відомо, що потокам з великими числами  $Re$  відповідають переважно або повністю турбулентні пограничні шари на поверхні циліндра. У цьому зв'язку є доцільним відтворення обтікання гладкого циліндра природними повітряними потоками за допомогою штучного збурення ламінарного пограничного шару, який формується в області відривання потоку. Цей ефект можна забезпечити за рахунок розміщення на поверхні циліндра елементів штучної жорсткості, наприклад тонких дротин або наждачного паперу.

Товщина  $\delta$  елементів, що моделюють жорсткість моделі, повинна відповідати наступним вимогам:

$$\frac{u\delta}{\nu} > 400, \quad \frac{\delta}{d_M} < 10^{-2},$$

де  $u$  – середня швидкість вітру;  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря ( $\nu = 1,51 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ );  $d_M$  – характерний поперечний розмір моделі (діаметр циліндра).

Найбільш середні максимальні значення тиску на моделі з гладкою поверхнею більш, ніж в 2 рази перевищують тиски на моделі зі штучно жорсткою поверхнею.

При порівнянні обтікання квадратних і прямокутних призм (рис.7.2) видно, що на результуючу супутню струмину впливає поганообтічна лобова поверхня тіла, довжина тіла в напрямку руху повітряного потоку і загальна форма тіла.

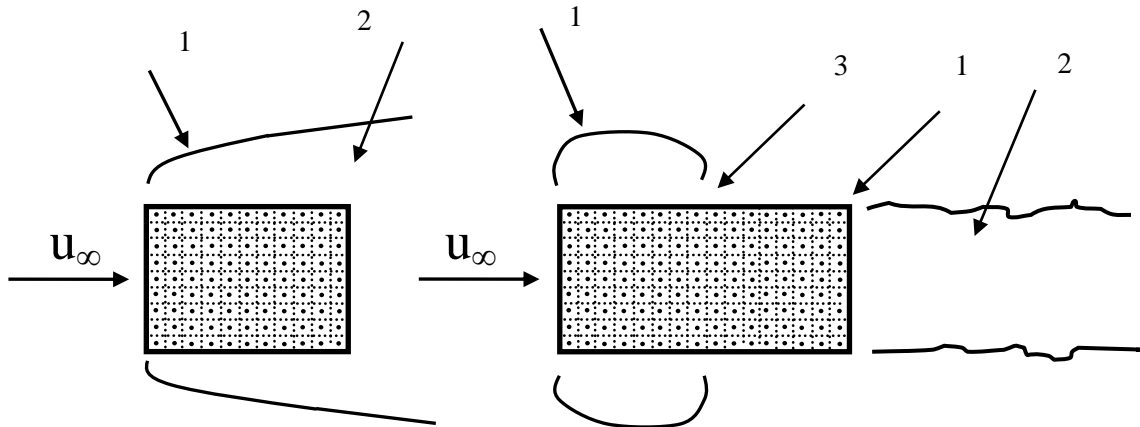


Рис. 7.2. Відривання потоку і супутні струмини при обтіканні квадратної і прямокутної призми: 1 – відривання потоку; 2 – супутня струмина; 3 – повторне поєднання потоку з тілом.

Отже, для тіл з гострими кряями, наприклад прямокутних в плані будинків, але при випробуваннях як в аеродинамічній трубці, так і в натурних умовах відривання потоку відбувається на гострих кряях, а характер потоку в області відривання не залежить від числа  $Re$ . Виходячи з цього, прийнято вважати, що і весь потік, що обтікає тіло з гострими кряями, також не залежить від числа  $Re$ .

Для кількості оцінки вітрового впливу на тіла різної форми і розмірів використовують відносний тиск (коефіцієнт тиску):

$$k = \frac{P_{\text{надл}}}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2 / 2}, \quad (7.1)$$

у якій  $P_{\text{надл}}$  – надлишковий тиск в довільній точці на поверхні тіла;  $\rho_{\infty} u_{\infty}^2 / 2$  – динамічний тиск повітряного потоку на відповідній відстані від підстеляючої поверхні.

Якщо в якості надлишкового приймається манометричний тиск ( $P_{\text{ман}} = P - P_{\text{атм}}$ ), то коефіцієнт тиску називають *аеродинамічним коефіцієнтом*.

$$k_a = \frac{P_{\text{ман}}}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2 / 2} = \frac{P - P_{\text{атм}}}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2 / 2}, \quad (7.2)$$

причому  $k_{a,n} = k_{a,m}$  за умови  $\rho_{\infty} = \rho_{\text{атм}}$  і  $u_{\infty} = u_n$  при частковій подібності сил аеродинамічного тиску (критерій Ейлера).

При дослідженнях розподілення тиску по поверхні будинків і споруд (особливо високих) необхідно враховувати розподілення швидкостей в



приземному шарі атмосфери, яке характеризується логарифмічним законом.

$$u_{(x)} = \frac{1}{k} \cdot u^* \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (7.3)$$

в якому  $k$  – постійна Кармана ( $k \approx 0,4$ );  $l$  - висота над поверхнею землі;  $z_0$  – параметр шорсткості земної поверхні (табл. 7.1);  $z$  – ефективна висота над поверхнею землі;  $u^*$  – динамічна швидкість повітряного потоку (швидкість тертя).

$$u^* = (\tau_0 / \rho)^{1/2}, \quad (7.4)$$

у якій  $\tau_0$  – напруження приземного тертя (залежить від швидкості повітряного пототку на деякій невеликій відстані від поверхні землі, параметру шорсткості земної поверхні  $z_0$  і густини повітря  $\rho$ );

$$z = z_g - z_d, \quad (7.5)$$

у якій  $z_g$  – висота над поверхнею землі;  $z_d$  – висота витіснення повітряного потоку (за межами населеного пункту не враховується).

Таблиця 7.1.

**Значення параметру шорсткості  $z_0$  коефіцієнта поверхневого тертя  $\sigma$  для різних типів земної поверхні:**

Тип земної поверхні	$z_0$ , см	$103 \sigma$
1	2	3
Пісок	0,01 ... 0,1	1,2 ... 1,9
Поверхня моря	0,0003 5* 0 ... 0,5 5**	0,7 ... 2,6
Сніговий покрив	0,1 ... 0,6	1,9 ... 2,9
Скошена трава ( $\approx 0,01$ м)	0,1 ... 1,0	1,9 ... 3,4
Низька степова трава	1,0 ... 4,0	3,4 ... 5,2
Зоряне поле	2,0 ... 3,0	4,1 ... 4,7
Висока трава	4,0 ... 10,0	5,2 ... 7,6
Карликові рослини	10,0 ... 30,0	7,6 ... 13,0
Низький ліс (середня висота дерев 15 м, одне дерево на 10 м <sup>2</sup> $z_d \approx 12$ м)	90,0 ... 100,0	28,0 ... 30,0
Приміська зона з рідкою забудовою	20,0 ... 40,0***	10,5 ... 15,4
Міста, приміська зона з суцільною забудовою	80,0 ... 120,0***	25,1 ... 35,6
Центри великих міст	200 ... 300***	61,8 ... 110,4

**Примітки:** \* - швидкість вітру над поверхнею землі дорівнює 1,5 м/с;

\*\* - швидкість вітру на висоті 10 м над поверхнею землі перевищує 1,5 м/с;

\*\*\* - значення  $z_0$  призначені для використання за умови, що  $z_d =$

0; параметр шорстковий  $z_0$  служить характеристикою розміру вихорів біля поверхні землі.

Структура пограничного шару в аеродинамічній трубі і в атмосфері зображена на рис.7.3, причому структура пограничного шару в трубі змодельована жорсткістю підстеляного шару поверхні, на якій встановлена модель.

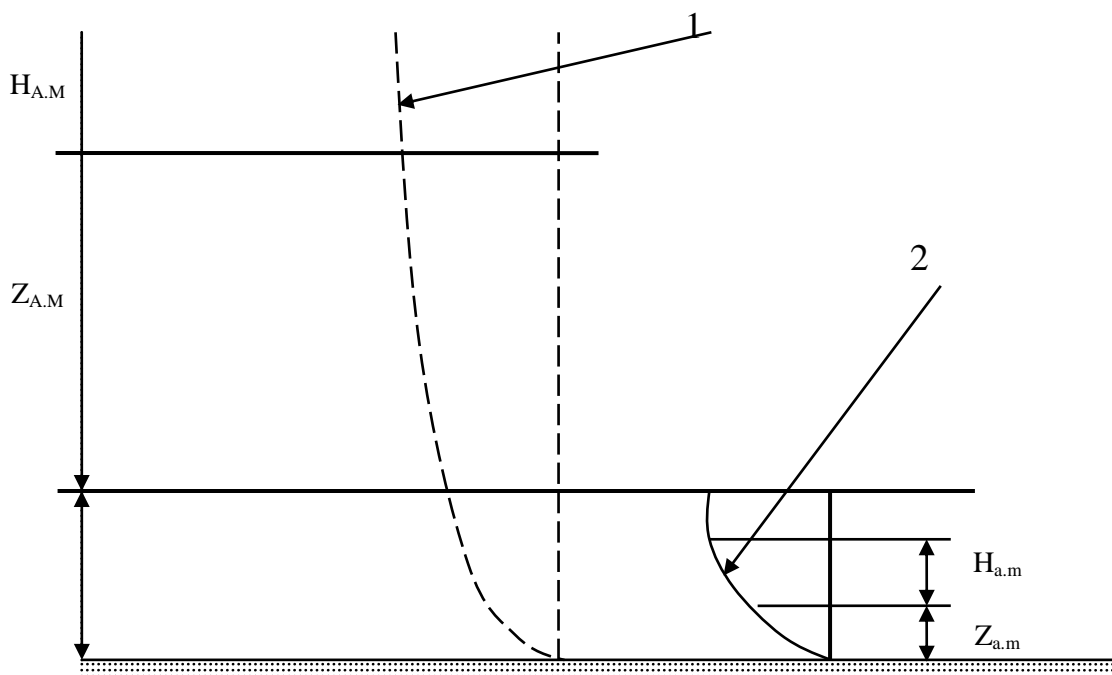


Рис. 7.3. Нижня і зовнішня частини пограничного шару в аеродинамічній трубі і в атмосфері: 1 – пограничний шар в атмосфері (приведений до мірила моделі); 2- те ж в аеродинамічній трубі

На рис. 7.3 суцільною лінією схематично зображений пограничний шар, сформований в довгій аеродинамічній трубі, а пунктирною лінією – пограничний шар атмосфери, приведений до мірила моделі. Нижня  $1/10$  і  $9/10$  товщини пограничного шару позначені відповідно  $z_a$  і  $H_a$ . Як видно з рис.7.3, потік повітря в нижньому шарі атмосфери  $z_{a,n}$  моделюється потоком зовнішньої області  $H_{a,m}$  пограничного шару в аеродинамічній трубі.

Така ситуація не обов'язково означає, що за своїми характеристиками повітряний тиск в аеродинамічній трубі не сприятливий для проведення досліджень. Однак, при дослідженнях моделі високого будинку, що знаходиться на місцевості з однорідною жорсткістю поверхні, результати досліджень необхідно трактувати достатньо обережно. Можливо в них

потрібно внести поправки, щоби врахувати відмінність в інерційному підінтервалі між спектром швидкостей в аеродинамічній трубі і спектром в натурних умовах.

В інерційному підінтервалі пограничного шару атмосфери турбулентний рух не залежить від в'язкості і визначається тільки швидкістю перенесення енергії, яка в свою чергу рівна швидкості дисипації енергії.

Приземна область пограничного шару атмосфери, тобто декілька сот метрів пограничного шару, складає менше 1/10 всієї товщини пограничного шару. Профіль середньої швидкості як в атмосфері, так і в аеродинамічній трубі, дуже близький до логарифмічного, конкретно в цій нижній частині, пограничного шару. Крім цього, проведені дослідження показали, що тут генерування турбулентної енергії приблизно врівноважується дисипацією енергії, що вказує на те, що приземна область пограничного шару належить до інерційного підінтервалу пограничного шару. Наприклад, при товщині пограничного шару над жорсткою підстеляючою поверхнею аеродинамічної труби приблизно 1 м, товщина інерційного підінтервалу приблизно 0,1 м від підстеляючої поверхні, що відповідає висоті до 40 м над поверхнею землі в натурі.

### Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки для дослідження розподілення тиску по поверхні моделей будинків зображена на рис. 7.4.

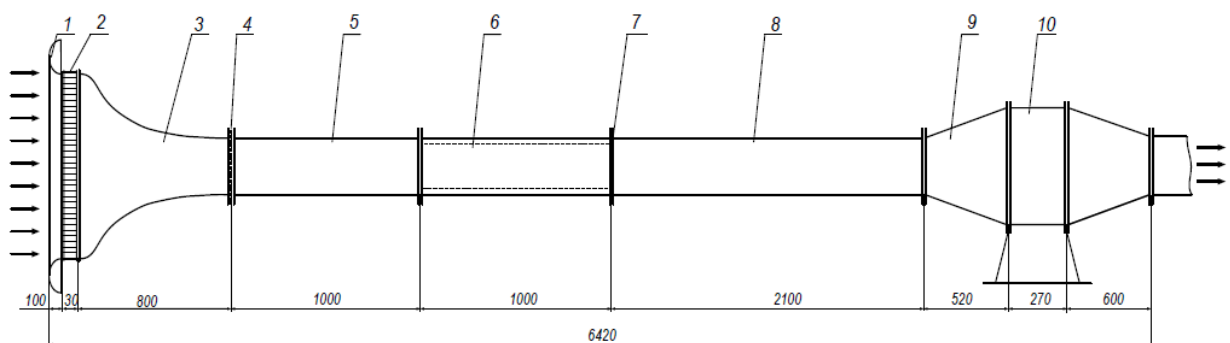


Рис. 7.4. Схема розімкненої аеродинамічної труби дозвукових швидкостей: 1 – колектор; 2 – хонейкомб; 3 – входне сопло Вітошинського; 4 – сітка; 5 – стабілізуюча ділянка; 6 – робоча ділянка; 7 – фланець; 8 – заспокоїлива ділянка; 9 – розтруб; 10 – осевий вентилятор

### Хід виконання і обробка даних

1. На рис. 7.4 згідно наведених позицій вказують елементи

експериментальної установки.

2. За міделевим перерізом моделі будинку визначають коефіцієнт блокування робочої частини експериментальної установки.

3. За розмірами сопла  $D_1$  і  $D_2$  визначають коефіцієнт підтискання сопла експериментальної установки.

4. Дослідження розподілення тиску по поверхні моделі будинку проводять у такій послідовності:

4.1. Включають в роботу вентилятор 10 установки і створюють в робочій частині незбурений робочий потік, швидкість якого визначають за формулою:

$$v = 0,9672 \sqrt{\frac{2p_{ст.тр}}{\rho_{\infty}}}, \quad (7.6)$$

у якій  $p_{ст.тр}$  – статичний тиск у стабілізуючій ділянці 5 установки;  $\rho_{\infty}$  – густина незбуреного повітряного потоку.

$$p_{с.мер} = \Delta l_{с.мер} kng, \quad (7.7)$$

у якій  $\Delta l_{с.тер}$  – різниця відліків по шкалі мікроманометра 14;  $k$  – коефіцієнт, який залежить від кута нахилу відлікової трубки мікроманометра 13;  $g$  – прискорення вільного падіння.

$$\rho_{\infty} = 1,2 \frac{p_{атм}}{101325} \times \frac{293}{T_{атм}}, \quad (7.8)$$

у якій  $p_{атм}$ ,  $T_{атм}$  – відповідно барометричний тиск (Па) і температура повітря (°C) у приміщенні лабораторії.

4.2. За допомогою координатника, трубки повного тиску 13 і шкали мікроманометра 14 (рис. 7.5) визначають розподілення повного (швидкісного) тиску  $p_{z,i}$  в пограничному шарі початкової області гладкої підстеляючої поверхні і будують епюру розподілення швидкостей в новому  $u_{z,i}$ .

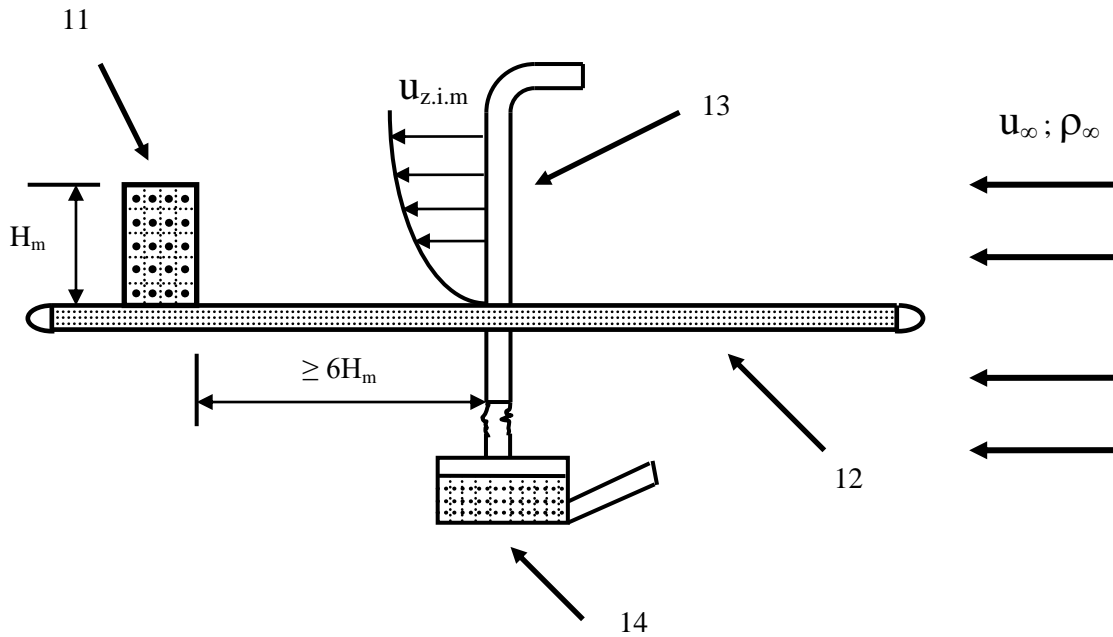


Рис. 7.5. Вимірювання тисків в пограничному шарі підстеляючої поверхні: 11 – модель будинку; 12 - підстеляюча поверхня; 13 – трубка повного тиску; 14 – мікроманометр

$$u_{z,i,m} = \sqrt{\frac{2p_{z,i,m}}{\rho_{\infty}}}, \quad (7.9)$$

у якій  $p_{z,i,m}$  – швидкісний тиск в пограничному шарі на висоті  $z_{i,m}$  від підстеляючого шару.

4.3. Визначають розподілення швидкості в приземному шарі атмосфери над рівною поверхнею землі, з параметром жорсткості поверхні  $z_{o,H} = 1$  см (низька степова трава, табл. 7.1) за логарифмічним законом:

$$u_{z,i,H} = \frac{1}{k} u^* \ln\left(\frac{z_{i,H}}{z_{o,H}}\right), \quad (7.10)$$

у якій  $z_{i,H}$  – ефективна висота над поверхнею змлі;  $u^*$  – динамічна швидкість вітру:

$$u^* = \frac{u(z_{g,H}, z_{o,H})}{2,5 \ln(z_{g,H}/z_{o,H})} = \frac{u z_{g,H=10}}{2,5 \ln(u z_{g,H=10}/z_{o,H})}, \quad (7.11)$$

у якій  $u_{g,H} = 10$  – розрахункова швидкість на висоті 10 м від поверхні землі.

4.4. Будують епюру розподілення швидкостей в пограничному шарі підстеляючої поверхні моделі в пограничному шарі атмосфери (рис. 7.5) над рівною земною поверхнею ( $z_{o,H} = 1$  см). У випадку подібностей цих епюр досліджують вітровий вплив на модель будинку (наприклад, досліджують

розподілення тиску по поверхні моделі або інші вітрові впливи).

У випадку відмінності епюр швидкостей в пограничному шарі змінюють жорсткість підстеляючої поверхні 12 (рис. 7.5).

4.5. Добившись подібності епюр пограничного шару моделі і природи, визначають розподілення надлишкового манометричного тиску в контрольних точках на поверхні моделі будинку.

Для вимірювання тиску використовують трубку повного тиску 13 і мікроманометр 14.

4.6. За формулою (7.2) визначають аеродинамічні коефіцієнти, віднесені до швидкісного напору незбуреного повітряного потоку ( $\rho_\infty u_\infty^2 / 2$ ) і до швидкісного напору в пограничному шарі, на висоті, що відповідає  $z_{g,h} = 10$  м від поверхні землі.

4.7. Дають аналіз одержаних результатів, вказують висновки.

4.8. Збільшують швидкість в робочій частині установки і повторюють п.4.2...4.7.

4.9. Збільшують висоту моделі на  $1/2$  початкової висоти і повторюють п.4.5...4.7.

#### **Звіт повинен включати:**

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Схему експериментальної установки.
3. Технічні характеристики вимірювальних пристроїв.
4. Послідовність проведення досліджень.
5. Експериментальні дані та результати розрахунків.
6. Графічне зображення розподілу тисків та швидкостей.
7. Висновки та рекомендації.

#### **Контрольні запитання**

1. Чи залежить обтікання циліндричного тіла від числа Рейнольдса?
2. Як моделюють жорсткість на поверхні гладких тіл для збурення пограничного шару?
3. Порівняйте обтікання квадратних і прямокутних в плані призматичних тіл.
4. Чи залежить обтікання тіл з гострими кроями від числа Рейнольдса?
5. В чому суть відмінності аеродинамічного коефіцієнта від коефіцієнта тиску?

6. За яким законом розподіляються швидкості повітря в приземному шарі атмосфери?
7. Проаналізуйте структуру пограничного шару в аеродинамічній трубі і в атмосфері.
8. Як визначають коефіцієнт підтискання сопла аеродинамічної труби і на які параметри труби він впливає?
9. Як визначають коефіцієнт блокування робочої частини аеродинамічної труби?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8**

### **ВИМІРЮВАННЯ ПОЛІВ ШВИДКОСТІ І ТИСКУ ПОТОКУ ПОВІТРЯ У РОБОЧІЙ ДІЛЯНЦІ РОЗІМКНЕНОЇ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ТРУБИ ДОЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЕЙ**

**Метою роботи** є вимірювання і аналіз полів швидкості і тиску та визначення їх середніх значень у робочій ділянці досліджуваної аеродинамічної труби.

#### **Завдання:**

1. Зобразити графічно розподіл тисків та швидкостей в робочій ділянці труби.
2. Побудувати епюри швидкостей і тисків в характерних поперечних перетинах.
3. Провести аналіз рівномірності розподілу тисків та швидкостей.

#### **Загальні відомості**

Значна кількість аеродинамічних та теплотехнічних експериментів у лабораторних умовах виконується за допомогою аеродинамічної труби. *Аеродинамічна труба* - це технічний пристрій, призначений для моделювання впливу середовища на рухомі в ній тіла. Застосування труб в аеродинаміці базується на принципі оборотності рухів і теорії подібності фізичних явищ. Об'єктами випробувань в аеродинамічних трубах є моделі натурних літальних апаратів, або їх елементів (геометрично подібні, пружно подібні, термічно подібні і т. д.), натурні об'єкти, або їх елементи, зразки матеріалів (винесення матеріалів, каталітичність поверхні і т. д.).

Аеродинамічна труба складається з одного або декількох вентиляторів (або інших пристроїв нагнітання повітря), які нагнітають повітря в трубу, де знаходиться модель досліджуваного тіла, тим самим створюється ефект руху тіла в повітрі з великою швидкістю (принцип звернення руху).

Залежно від швидкості потоку в робочій частині аеродинамічні труби діляться на наступні види:

- а) дозвукові ( $0 < M < 0,8$ );
- б) не звуковою і трансзвукові ( $0,8 < M < 1,2$ );
- в) надзвукові ( $1,2 < M < 5$ );
- г) гіперзвукові ( $M > 5$ ).

За конструктивними ознаками аеродинамічні труби можна розділити на два класи:

- а) труби незамкнутого типу;
- б) труби замкнутого типу.

За видом робочої частини розрізняють труби:

- а) з відкритою робочою частиною;
- б) із закритою робочою частиною;
- в) з герметичною камерою (камера Ейфеля).

Також існують окремі групи аеродинамічних труб:

- *Високотемпературні* - додатково дозволяють вивчати вплив високих температур і пов'язаних з ними явищ дисоціації і іонізації газів.

- *Висотні* - для дослідження обтікання моделей розрідженим газом (імітація польоту на великій висоті).

- *Аероакустичні* - для дослідження впливу акустичних полів на міцність конструкції, роботу приладів і т. д.

Дослідження характеристик надводних і підводних частин корпусу судів доводиться виконувати з використанням дубльованих моделей, що дозволяє задовольнити умові непротікання по поверхні розділу середовищ. В якості альтернативи можливе використання спеціального екрану, що імітує поверхню води.

Випробування, проведені на аеродинамічних трубах, в основному вирішують наступні завдання:

1. Дослідження впливу форми обтічного об'єкта газом на аеродинамічні характеристики цього об'єкта, в залежності від швидкості набігаючого потоку і положення тіла в просторі.

2. Дослідження повітряних машин - газових турбін, компресорів, гвинтів, вітряків, вентиляторів і т.п.



3. Дослідження характеристик двигунів (поршневих турбореактивних, прямоточних і ін.).
4. Дослідження динаміки польоту літаючого апарату.
5. Дослідження впливу аеродинамічних сил на пружні характеристики конструкцій літаючого апарату (наприклад, дослідження флатера крил літаків).
6. Фізичні дослідження, пов'язані з перебігом повітря в різних умовах (дослідження пограничного шару, просторових течій і т.п.).
7. Методичні дослідження, пов'язані зі створенням аеродинамічних труб, як фізичних установок і з розробкою методів випробувань в трубах і обробки отриманих результатів.

*Хонейкомб* є сотоподібними ґратами, які набрані з тонких металевих трубок. Його призначення - вирівнювати скоси потоку і руйнувати великі вихори.

Детурбулізуючі сітки сприяють вирівнюванню поля швидкостей і зменшення початкової турбулентності потоку в робочій частині труби.

Сопло служить для розгону потоку повітря від мінімальної до розрахункової швидкості на виході в робочу частину.

Поперечний переріз сопла може бути круглим, еліптичним, прямокутним, квадратні і восьмигранним. Форма поперечного перерізу робочої частини залежить від виду моделей, які передбачається дослідити. Наприклад, аеродинамічні труби, призначені для випробувань моделей літаків, часто мають еліптичний розтин. У цей перетин добре вписується проекція літака. Крила розташовуються уздовж великої півосі еліпса.

Багато аеродинамічних труб, призначені для випробувань автомобілів, макетів будинків, мають перетин робочої частини у формі прямокутника, або багатокутника, наприклад, восьмикутника. Крім призначення труби в розрахунок приймається технологічність виготовлення.

В аеродинамічній трубі може бути більше однієї робочої частини. Додаткова робоча частина має інший поперечний переріз і інші характеристики потоку. Робоча частина - це простір між соплом і дифузором. Тут встановлюються моделі для випробування, тут же розташовуються аеродинамічні ваги. Газовий потік в робочій частині труби повинен мати рівномірне поле швидкостей і тисків.

Відкрита робоча частина забезпечує вільний доступ до моделі і зручність спостережень. Але для таких труб необхідна додаткова потужність на заповнення втрат, викликаних взаємодією вільного струменя з навколишнім повітрям. У трубах замкнутого типу зі швидкостями до 100-150 м/с зазвичай

застосовують відкриту робочу частину.

З метою зменшення потрібної потужності приводу для труб з великими швидкостями застосовують закриту робочу частину. Аеродинамічні характеристики потоку в трубі із закритою робочою частиною вище, ніж в трубі з відкритою робочою частиною.

Основним пристроєм для отримання рівномірного потоку є сопло. Сопло розташовується перед робочою частиною і являє собою (для дозвукових аеродинамічних труб) канал, що звужується. Синонімами слова «сопло» для дозвуковій аеродинамічній трубі є слова «конфузор» і «колектор». Крім створення однорідного потоку у сопла є ще одна функція. Сопло служить переходом від найширшої частини труби з малими швидкостями до найвужчої частини з високою швидкістю.

З умов зворотності руху в аеродинамічних трубах слідує, що повітряний потік в тій частині труби, де встановлюються зразки, що досліджуються, тобто у робочій її частині, повинен мати рівномірні поля швидкостей і тисків. Для забезпечення таких умов необхідно виконувати аеродинамічний контур труби і пристроїв, що розташовані у трубі, так, щоб вони не створювали умов для виникнення у потоці повітря збурень (відриву пограничного шару і утворення вихорів, скосів потоку і т.п.). Поява збурень у будь-якій частині труби, будуть спотворювати потік, порушувати його рівномірність далеко в низ за течією, у тому числі і у робочій ділянці.

Основною частиною будь-якої аеродинамічної труби являється її робоча ділянка, цінність якої для експериментальних досліджень визначається характеристиками її полів швидкості і тиску. Тому їх визначення являється необхідною і обов'язковою умовою з підготовки (тарування) труби перед виконанням подальших досліджень.

### **Опис експериментальної установки**

Схема і основні розміри аеродинамічної труби дозвукових швидкостей наведені на рис. 8.1. Аеродинамічна труба складається з ділянок, що утворюють проточну частину (колектор (1), хонейкомб (2), сопло Вітошинського (3), стабілізуюча ділянка (5), робоча ділянка (6), заспокійлива ділянка (8), розтруб (9) і одного осьового вентилятора (10) типу ВО-46-130-5,6-0,1 продуктивністю 11000 м<sup>3</sup>/год і напором до 370 Па, який приводиться у обертання трьохфазним асинхронним двигуном потужністю 2,2 кВт.

Аеродинамічна труба працює за принципом всмоктування і представляє собою канал квадратного перерізу (300×300 мм<sup>2</sup>). Стінки каналу (короба) виготовлені із оцинкованої жерсті, а робоча ділянка з органічного скла.

Рівномірність розподілення швидкостей у входному перерізі труби досягається за рахунок профільованого за формулою Вітошинського входного сопла, при цьому, з метою зменшення опору і нерівномірності потоку, на вході у трубу встановлений плавний круговий колектор і хонейкомб, який вирівнює потік у напрямку руху, розбиваючи крупні вихори, а також зменшує нерівномірність розподілу повздовжніх швидкостей. За соплом Вітошинського знаходиться стабілізуюча ділянка, призначена для вирівнювання полів швидкостей і статичного тиску перед робочою ділянкою, власне у якій і розміщується досліджуваний об'єкт.

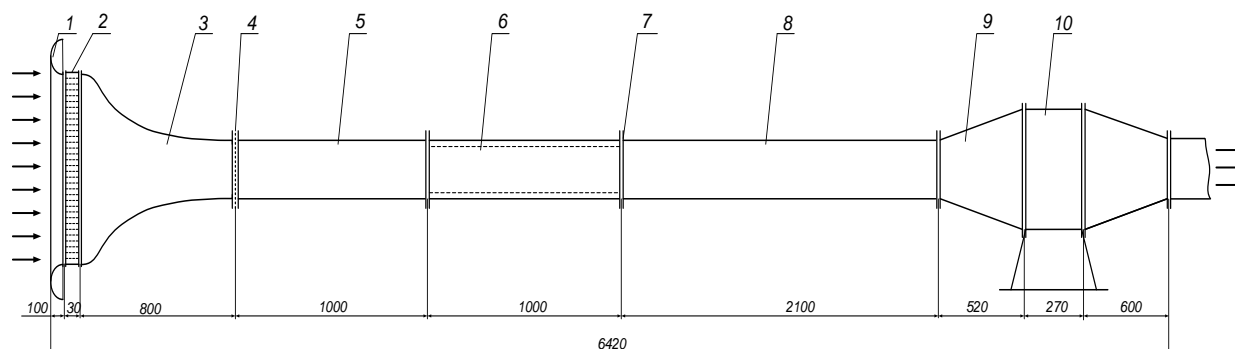


Рис. 8.1. Схема розімкненої аеродинамічної труби дозвукових швидкостей: 1 – колектор; 2 – хонейкомб; 3 – входне сопло Вітошинського; 4 – сітка; 5 – стабілізуюча ділянка; 6 – робоча ділянка; 7 – фланець; 8 – заспокійлива ділянка; 9 – розтруб; 10 – осевий вентилятор

Швидкість повітряного потоку регулюється за допомогою перетворювача частоти струму, який регулює частоту обертання ротора електродвигуна і відповідно частоту обертання робочого колеса вентилятора, змінюючи при цьому витрату повітря.

### Хід виконання і обробка даних

Дослідження полів швидкостей і тиску у робочій ділянці виконуються за допомогою термоанемометра АМ-70 і трубки Піто-Прандтля мікроманометра ММН ММН-2400 з класом точності 1,0.

1. За допомогою перетворювача частоти струму встановлюють частоту обертання ротора електродвигуна аеродинамічної труби.

2. Щуп термоанемометра, або трубку переміщують у площині поперечного перерізу робочої ділянки, по ширині та висоті координатника (координата  $x$  і  $y$  відповідно).

3. З показів термоанемометра АМ-70 і мікроманометра ММН ММН-2400 у відповідних координатах записують значення швидкості та тиску.

4. Будують епюри розподілення швидкостей та тисків в робочій ділянці аеродинамічної труби.

5. Рівномірність розподілу швидкостей у робочій ділянці труби визначають зі співвідношення:

$$\frac{\Delta v}{v_{cp}} = \frac{v - v_{cp}}{v_{cp}}, \quad (8.1)$$

де  $v$  – місцева швидкість у певній точці поперечного перерізу робочої ділянки аеродинамічної труби, м/с;  $v_{cp}$  – середня швидкість у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби, м/с.

6. Рівномірність розподілу тисків у робочій ділянці труби визначають зі співвідношення:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_{cp}} = \frac{p - p_{cp}}{p_{cp}}, \quad (8.2)$$

де  $p$  – місцевий тиск у певній точці поперечного перерізу робочої ділянки аеродинамічної труби, Па;  $p_{cp}$  – середній тиск у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби, Па.

7. Дають аналіз рівномірності розподілу тисків та швидкостей в робочій ділянці труби.

8. За допомогою перетворювача частоти струму збільшують частоту обертання ротора електродвигуна і повторюють п.2 – п.7.

#### **Звіт повинен включати:**

1. Мету і короткий опис основних етапів виконаної роботи.
2. Схему експериментальної установки.
3. Технічні характеристики вимірювальних пристроїв.
4. Послідовність проведення досліджень.
5. Графічне зображення та аналіз рівномірності розподілу тисків та швидкостей.
6. Висновки та рекомендації.

#### **Контрольні запитання**

1. Що таке аеродинамічна труба?
2. З яких основних елементів складається аеродинамічна труба?
3. Як класифікують аеродинамічні труби у залежності від способу подавання повітря в робочу зону?
4. Яка класифікація аеродинамічних труб залежно від швидкості потоку?

5. Які фактори впливають на розміри, потужність і якість потоку аеродинамічної труби?
6. Яку функцію виконує хонейкомб в конструкції аеродинамічної труби?
7. Які прилади використовували при проведенні досліджень.
8. Як визначити рівномірність розподілу тисків та швидкостей в робочій ділянці труби.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Жуковський С. С. Аеродинаміка вентиляції: Навч. Посібник / Жуковський С. С., Лабай В. Й. - Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. – 372 с.
2. Ткачук А.Я. Аеродинаміка вентиляції: Навчальний посібник / Ткачук А.Я., Довгалюк В.Б. – ІВНВКП «Укрґеліотех», 2009. – 376 с.
3. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. – Київ: Мінрегіон України. – 2013. – 134 с.
4. Назаренко І. І. Системний аналіз технічних об'єктів: навчальний посібник / Назаренко І. І., Свідерський А. Т. та ін. / За ред. І.І. Назаренка – К.: КНУБА, 2009. – 164 с.
5. Сазонов Э. В. Теоретические основы расчета вентиляции: Учебн. Пособие / Сазонов Э. В. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1990. – 208 с.
6. Ткачук А. Я. Розрахункова модель усередненого руху в турбулентній зоні плоских і вісесиметричних пристінних примезових шарів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Випуск 2 / Ткачук А. Я. – К.:КНУБА, 2001. – С. 3 – 19.
7. Гальперин Л. Г. Основы гидрогазодинамики. Учебное пособие / Гальперин Л. Г. – ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет». – Екатеринбург, 2007. – 238 с.
8. Науменко І. І. Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення дисципліни «Гідрогазодинаміка». Навчально-методичний комплекс / Науменко І. І., Токар О. І., Токар Л. О. – Рівне: НУВГП, 2007. – 118 с.
9. Чекулаєв Є. Ф. Гідрогазодинаміка: Навчальний посібник для самостійної роботи і виконання контрольних завдань з дисципліни «Гідрогазодинаміка» студентами денної та заочної форм навчання спеціальності 151 / Чекулаєв Є. Ф. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 90 с.
10. Василенко С.М. Гідрогазодинаміка. Монографія / Василенко С.М., Кулінченко В.Р., Шевченко О.Ю., Піддубний В. – К.: Кондор- Видавництво, 2016. – 676 с.
11. Ярхо А. А. Гидрогазодинамика. Учебное пособие / Ярхо А. А., Счастній Е. Е., Лялюк В. М. – Харьков: УкрГАЗТ. – Ч.1. – 2007. – 236 с.

Навчальне видання

## **ГІДРОГАЗОДИНАМІКА**

Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів  
денної форми навчання освітнього ступеня «Бакалавр»  
навчально-наукового інституту  
енергетики, автоматики і енергозбереження  
зі спеціальності 144 – «Теплоенергетика»

СПОДИНЮК Надія Андріївна  
АНТИПОВ Євген Олексійович

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15  
Тел.: (044)-527-81-55