

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**Б. В. ДИМО, В. В. КУЗНЕЦОВ,
С. С. РИЖКОВ, А. В. ЯЗЛОВЕЦЬКИЙ**

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу "ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ
ТА ПРИЛАДИ"**

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2017

УДК 621.18.08(076.5)
ББК 34.97я73
3-41

Автори: Б. В. Димо, канд. техн. наук, професор; В. В. Кузнецов, канд. техн. наук, доцент; С. С. Рижков, канд. техн. наук, доцент; А. В. Язловецький, асистент

Рецензент М. І. Радченко, д-р техн. наук, професор

3-41 **Збірник** лабораторних робіт з курсу "Теплотехнічні вимірювання та прилади" / Б. В. Димо, В. В. Кузнецов, С. С. Рижков, А. В. Язловецький; під заг. ред. Б. В. Димо. – Миколаїв : НУК, 2017. – 115 с.

Подано короткий опис лабораторних робіт з теплотехнічних вимірювань в обсязі наявної навчальної програми. Викладено основи експерименту і відповідні методики щодо перевірки приладів вимірювання теплотехнічних величин (температури, тиску, витрати тощо).

Призначено для студентів, які вивчають курси "Теплотехнічні вимірювання та прилади", "Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища" і "Теоретичні основи теплотехніки".

УДК 621.18.08(076.5)
Навчальне видання ББК 34.97я73

ДИМО Борис Васильович **КУЗНЕЦОВ** Валерій Валерійович
РИЖКОВ Сергій Сергійович **ЯЗЛОВЕЦЬКИЙ** Андрій Валерійович

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу "ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ
ТА ПРИЛАДИ"**

Навчальний посібник

Редактор *М. П. Фоміна*
Комп'ютерне верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

© Димо Б. В., Кузнецов В. В.,
Рижков С. С., Язловецький А. В., 2017
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2017

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 6,8. Об'єм даних 4940 кб.
Тираж 15 прим. Вид. № 24. Зам. № 119.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ПЕРЕДМОВА

Теплотехнічні вимірювання характеризують процеси виробництва, перетворення і споживання теплової енергії в суднових та стаціонарних енергетичних установках.

Їх вимірюють за допомогою засобів, які виробляють сигнал, що являє собою матеріальне втілення вимірювальної інформації.

До засобів вимірювань відносять міри, вимірювальні перетворювачі та прилади. На основі засобів вимірювань утворюються інформаційно-вимірювальні системи, призначені для автоматизованого управління сучасними енергетичними установками.

Метою лабораторних робіт є оволодіння методами вимірювання теплотехнічних величин, навичками повірки засобів вимірювань та оцінки похибок.

Збірник містить лабораторні роботи, передбачені робочими програмами "Теплотехнічні вимірювання та прилади", "Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища" і "Теоретичні основи теплотехніки".

Крім опису лабораторних робіт і методичних вказівок щодо їх виконання, у збірнику наведено короткі відомості з теорії вимірювання фізичних величин, а у додатках – необхідний для обробки дослідних даних довідковий матеріал.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні роботи у збірнику згруповані за спорідненими питаннями теоретичного курсу.

Перед виконанням чергового експериментального дослідження студент повинен засвоїти метод, зміст, обсяг і практичну значимість теми, оформити описувальну частину звіту із заготовленням необхідних таблиць для запису експериментальних величин.

Експериментальна частина дослідження виконується під наглядом лаборанта. Дані досліду та їх попередня обробка повинні бути подані викладачеві до закінчення заняття.

Звіт про виконання лабораторної роботи має відповідати наступним вимогам:

а) обсяг та зміст повинні відповідати вказівкам до конкретної роботи;

б) графічні зображення одержаних залежностей, процесів будуються нанесенням всіх дослідних точок;

в) результати обробки всіх експериментальних величин виконуються використанням системи одиниць фізичних величин – СІ;

г) текстова частина звіту повинна відповідати вимогам ЄСКД для текстових документів.

Розділ І. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Температурою називають фізичну величину, що характеризує ступінь нагріву речовини. На відміну від таких фізичних величин, як довжина, маса тощо, температура не екстенсивна (параметрична), а інтенсивна (активна) величина. Температура як інтенсивна величина властивості адитивності не має. Тобто, для системи, що знаходиться у термічній рівновазі, будь-яка мікроскопічна частина системи має однакову температуру. Тому неможливо створити еталон температури, подібно до того, як створюються еталони екстенсивних величин.

Вимірювати температуру можна тільки опосередковано, ґрунтуючись на залежності від неї фізичних властивостей тіл, які піддаються безпосередньому вимірюванню. Ці властивості називають термометричними (довжина, об'єм, густина, термоЕРС, електричний опір тощо). Речовини, що характеризуються термометричними властивостями, називають термометричними.

У залежності від термометричних властивостей прилади для вимірювання температури поділяються на такі типи:

- *термометри розширення* (рідинні скляні термометри, а також біметалічні і ділатометричні термометри, діапазон вимірювань від -200 до 750 °С);
- *манометричні термометри* (діапазон вимірювань від -160 до 600 °С);

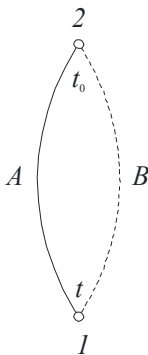
- *термометри опору* (діапазон вимірювань провідникових термометрів опору – від -260 до 1100 $^{\circ}\text{C}$, терморезисторів – від -240 до 300 $^{\circ}\text{C}$);
- *термоелектричні термометри* (діапазон вимірювань від -200 до 2200 $^{\circ}\text{C}$);
- *пірометри* (загальний діапазон вимірювань від 50 до 6000 $^{\circ}\text{C}$).

Лабораторна робота № 1

ГРАДУЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ТЕРМОПАР

Загальні відомості

Термопари належать до генераторних перетворювачів: вони є чутливими елементами термоелектричних термометрів. Вимірювання температури за допомогою термопар засноване на виникненні електрорушійної сили (термоЕРС) у замкнутому колі, що складається з різномірних провідників A і B , при різній температурі місць з'єднання (спаїв), рис. 1.1.



Спай 1, вміщений у вимірюване середовище з температурою t , називається робочим; спай 2, що знаходиться при постійній температурі t_0 , – вільним.

Значення термоЕРС термопари залежить від різниці температур спаїв та матеріалів провідників (термоелектродів) і визначається з рівняння

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (1.1)$$

Рис. 1.1. Термоелектричний перетворювач

де $e_{AB}(t)$ і $e_{AB}(t_0)$ – відповідно складові різниці потенціалів у спай при температурах t і t_0 .

Записане рівняння називають основним рівнянням термоелектричного перетворювача, з якого випливає, що термоЕРС $E_{AB}(t, t_0)$, яка виникає у контурі, залежить від різниці температур t і t_0 . Якщо температуру вільного спаю t_0 підтримувати постійною, тобто $t_0 = \text{const}$, то $e_{AB}(t_0) = \text{const} = c$. Тоді

$$E_{AB}(t, t_0)_{t_0 = \text{const}} = e_{AB}(t) - c = f(t). \quad (1.2)$$

Будь-які два різнорідних провідники, з'єднані між собою, можуть утворювати термоЕРС, але тільки обмежена кількість термоелектродів використовується в термоелектричних перетворювачах. Це зумовлено вимогами до матеріалів для термоелектродів. Вимогами до матеріалів є: однозначна і, за можливості, лінійна залежність термоЕРС від температури, жаростійкість і жароміцність з метою вимірювання високих температур, хімічна інертність, термоелектрична однорідність матеріалу провідника по довжині, що дозволяє відновлювати робочий спай без переградування, а також змінювати глибину його занурення, технологічність виготовлення з метою отримання взаємозамінних за термоелектричними властивостями матеріалів, невелика вартість матеріалів, а також стабільність і відтворюваність термоелектричних властивостей, що дозволяє створювати стандартні термопар.

Жоден з існуючих матеріалів не відповідає повністю всім вимогам, тому для різних діапазонів вимірювання використовують термоелектроди з різних матеріалів.

Для стандартних термопар залежність (1.2) визначається експериментальним шляхом, тобто градуванням при температурі вільного спаю $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Для підключення електровимірювального приладу коло термопари розривають у вільному спаї або в одному з термоелектродів (рис. 1.2). Обидві схеми підключення приладу можна подати як приєднання до електричного кола ще одного, третього провідника C .

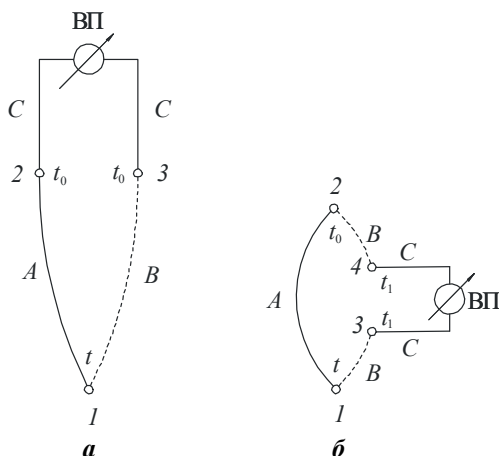


Рис. 1.2. Схеми включення електровимірювального приладу в коло термопари

Незважаючи на зовнішню різницю схем **а** та **б**, термоЕРС, що виникають у цих схемах, будуть однакові, якщо температури кінців третього провідника C у точках 2 і 3 для схеми **а** та у точках 3 і 4 для схеми **б** однакові.

З'єднання провідників у колі може виконуватися будь-яким способом (зварюванням, паянням).

Стандартні термоелектричні перетворювачі градуйовані при температурі вільних кінців (спаїв) $t_0 = 0^\circ\text{C}$, але у практиці вимірювань температура вільних спаїв може відрізнятись від 0°C . Для користування градуювальними таблицями (номінальними статичними характеристиками перетворення) у таких випадках треба вводити поправку на температуру вільних спаїв.

Поправка на температуру $E_{AB}(t, 0\text{ }^{\circ}\text{C})$ вводиться за допомогою рівняння

$$E_{AB}(t, 0\text{ }^{\circ}\text{C}) = E_{AB}(t, t_0) \pm E_{AB}(t_0, 0\text{ }^{\circ}\text{C}). \quad (1.3)$$

Знак "+" у формулі (1.3) відповідає умові $t_0 > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а знак "-" – умові $t_0 < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Опис експериментальної установки

Градуювання термопар проводиться двома способами: за постійними точками плавлення (затвердіння) і кипіння хімічно чистих речовин, тобто за реперними точками, і шляхом порівняння зі зразковими термометрами або термопарами.

Установка для градуювання термопар (рис. 1.3) заснована на другому способі. Вона складається з електричної трубчастості печі, посудини Дьюара, потенціометрів, зразкових термопар і термопар, що градуюються.

Для забезпечення однакових температур зразкової термопари і термопари, що градується, їхні робочі спаї поміщено в металевий блок, який встановлюється у середній частині печі. Вільні спаї і рідинний скляний термометр знаходяться у посудині Дьюара.

Установка дозволяє градуювати одночасно дві термопари, які підключені до потенціометра за допомогою компенсаційних проводів. Зразкова термопара підключена до електронного потенціометра, в якому здійснюється автоматична компенсація температури вільного спаю.

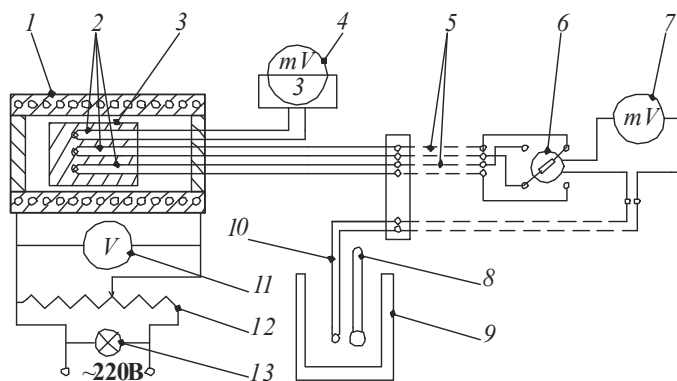


Рис. 1.3. Схема установки для градування термопар:

- 1 – трубчаста електрична піч; 2 – градуйована і зразкова термопари;
3 – металевий блок; 4 – електронний потенціометр; 5 – компенсаційні
проводи; 6 – перемикач термопар; 7 – потенціометр; 8 – контрольний
термометр; 9 – посудина Дьюара; 10 – вільні спаї термопар;
11 – вольтметр; 12 – автотрансформатор; 13 – сигнальна лампа

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, правилами користування обладнанням і вимірювальними пристроями.

2. Перевірити правильність підключення термопар.

3. Включити електричну піч і за допомогою автотрансформатора встановити на нагрівачі задану величину навантаження.

Попередження! Піч включати тільки після дозволу викладача або лаборанта.

4. Градування вести на таких режимах, щоб швидкість зміни температури не перевищувала $1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 5 хв.

Виміряти потенціометром термоЕРС термопар, що градуються, температуру вільного спаю (по два виміри на кожному режимі). У заданому інтервалі температур виконати вимірювання не менше ніж для 10 режимів (через $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

У випадку, коли температура вільного спаю відмінна від нуля, необхідно вводити поправку до виміряного значення термоЕРС термопар, що градууються. ТермоЕРС термопар, приведену до температури вільного спаю 0°C , розрахувати за формулою (1.3). Величину поправки визначити за допомогою таблиць у залежності від температури вільного спаю.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткі теоретичні відомості про роботу;
- 2) принципову схему установки;
- 3) таблиці вимірів та дані про прилади (оформлюється на окремому аркуші відповідно до протоколу експериментальних даних);
- 4) графічну залежність для термопар, що градууються, $E_{AB}(t, 0^{\circ}\text{C}) = f(t)$;
- 5) визначення величини відхилення термоЕРС термопар, що градууються, від значень градуювальних таблиць і відносну похибку при трьох значеннях температури ($200, 300$ і 500°C). Допустимі відхилення термоЕРС та похибки вказані у таблиці Додатка № 1.

Контрольні питання

1. Який механізм виникнення термоЕРС у замкнутому колі термопари?
2. Як впливає зміна температури вільного спаю на термоЕРС і як вводиться поправка на температуру вільних спаїв?
3. Призначення компенсаційних проводів.
4. Якими способами вимірюється термоЕРС?
5. Принципова схема потенціометра.
6. Якими способами проводиться градуювання термопар?

Розділ І. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Протокол експериментальних даних лабораторної роботи № 1

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Но- мер дослі- ду	Темпе- ратура у печі t , °C	ТермоЕРС термопар $E(t, t_0)$, мВ		Темпе- ратура вільно- го спаю t_0 , °C	Поправка на температуру вільного спаю $E(t_0, 0\text{ °C})$, мВ		ТермоЕРС термопар $E(t_0, 0\text{ °C})$, мВ	
		ХК	ХА		ХК	ХА	ХК	ХА
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 2

ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОМЕТРІВ ОПОРУ

Загальні відомості

Термометри опору ґрунтуються на властивості металів і напівпровідників змінювати свій електричний опір при нагріванні (охолодженні). Вони застосовуються для вимірювання температури у діапазоні від $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термометр опору складається з чутливого елемента 4 у вигляді обмотки з тонкого дроту або напівпровідникового стержня, з'єднувальних проводів 3, електровимірювального приладу 2 і джерела струму 1 (рис. 2.1).

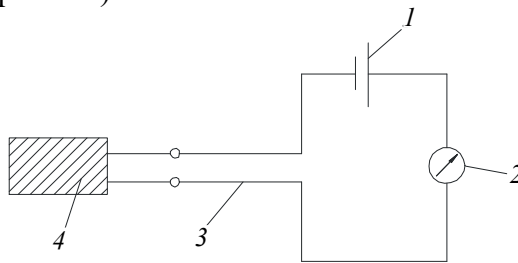


Рис. 2.1. Схема термометра опору

Термоперетворювачі опору виготовляють із металів і напівпровідникових матеріалів, що мають задовольняти ряд вимог, основними з яких є стабільність градуовальної характеристики, а також її відтворюваність, що забезпечує взаємозамінність термоперетворювачів опору, лінійність функції $R_t = f(t)$, високе значення температурного коефіцієнта електричного опору, великий питомий опір, хімічна інертність і невисока вартість матеріалу.

Більшість металів мають позитивний температурний коефіцієнт електричного опору, який для чистих металів дорівнює

$4 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, що визначає збільшення електричного опору при підвищенні температури на один градус приблизно на $0,4 \dots 0,6 \%$ від опору при температурі 0°C .

Мідні термоперетворювачі опору призначені для вимірювання температури у діапазоні від -50 до 200°C . При більш високих температурах мідь активно окиснюється. Мідні термоперетворювачі опору виготовляють з ізольованого дроту діаметром звичайно $0,1 \text{ мм}$. Дріт намотується на пластмасову колодку в декілька шарів і покривається лаком. Кінці дроту припаюють до відповідних проводів діаметром $1 \dots 1,5 \text{ мм}$. Такий елемент довжиною 40 мм вставляють у трубку, а далі – у захисний чохол. Мідні термометри мають лінійну залежність опору від температури.

Напівпровідникові термоперетворювачі опору застосовуються для вимірювання температури від -100 до 300°C . Їх виготовляють із суміші оксидів міді, магнію, марганцю, кобальту, титану, а також із кристалів германію. Температурний коефіцієнт опору напівпровідників негативний, тобто при підвищенні температури їх електричний опір зменшується. Основною перевагою напівпровідників є велике значення температурного коефіцієнта опору (у $5\text{--}15$ разів вищий, ніж у металів). При підвищенні температури напівпровідників на один градус їх опір зменшується на $3 \dots 5 \%$, що забезпечує високу чутливість при невеликих розмірах термоперетворювачів. Крім того вони мають значний питомий опір і тому навіть при дуже малих розмірах їх номінальний електричний опір становить від декількох до сотень кОм , що дозволяє не враховувати опір з'єднувальних проводів та елементів вимірювальної схеми.

Залежність електричного опору напівпровідників від температури в інтервалах, які не перевищують 100°C , визначається за формулою

$$R_t = A \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (2.1)$$

де R_t – опір при температурі T ; A , B – постійні коефіцієнти, які залежать від властивостей матеріалу напівпровідника.

Недоліком напівпровідникових матеріалів є значна нелінійність залежності електричного опору від температури і, головне, невідтворюваність градууювальної характеристики. Тому напівпровідникові термоперетворювачі, навіть одного і того ж типу, мають індивідуальні градуювання і є невзаємозамінними.

Через зазначені недоліки напівпровідникові термоперетворювачі опору майже не використовуються для вимірювання температури. Але вони широко застосовуються в системах температурної сигналізації, особливо завдяки притаманному їм релейному ефекту – стрибкоподібному змінюванню опору при досягненні певної температури.

Для вимірювання електричного опору термоперетворювачів у термометрах опору застосовуються зрівноважені і незрівноважені мости, логометри і компенсаційний метод за допомогою потенціометрів постійного струму.

Опис експериментальної установки

Установка (рис. 2.2) включає в себе термостат, всередині якого в посудині, заповненій маслом, розміщені терморезистор та мідний термометр опору, що градується, і лабораторний термометр. Терморезистор і мідний термометр опору підключені до приладу для вимірювання опору за допомогою мідних з'єднувальних проводів.

Температура в термостаті регулюється контактним ртутним термометром з температурною шкалою від 0 до 100 °С.

За допомогою контактного термометра, водяного холодильника і системи регулювання потужності електронагрівача можна підтримувати у термостаті задану температуру з точністю $\pm 0,05^\circ\text{C}$.

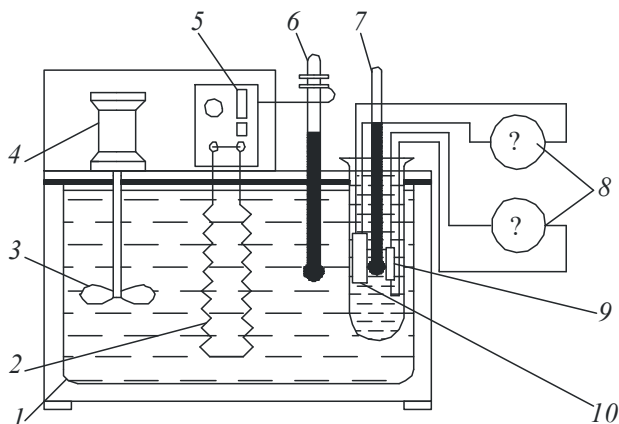


Рис. 2.2. Схема установки для градування термометрів опору:

1 – терморезистор; 2 – мідний термометр опору; 3 – термостат;
4 – електронагрівач; 5 – мішалка; 6 – електродвигун; 7 – блок живлення; 8 – електроконтактний термометр; 9 – лабораторний термометр; 10 – мости постійного струму

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією та правилами користування термостатом і приладами.

2. Перевірити правильність складання електричної схеми і приєднання приладів.

3. До включення термостата виміряти температуру й опір термометрів опору.

4. Включити електронагрівач на задане навантаження. Термостат включати тільки після дозволу викладача або лаборанта.

5. На сталих теплових режимах виконати вимірювання температури та опору (не менше 10 вимірювань), охоплюючи інтервал температури від 20 до 100 °С.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) принципову схему установки;
- 3) таблиці вимірів та дані про прилади (на окремому аркуші);
- 4) графічні залежності $R_t = f(t)$;
- 5) визначення емпіричних формул залежності $R_t = f(t)$;
- 6) визначення похибок вимірювання опору та температури [4, с. 30–31].

Примітка. Для мідного термометра опору емпіричну формулу знаходити методом найменших квадратів, для терморезистора – графічним методом [4, С. 245–250], [5, С. 209–214].

Контрольні питання

1. Як влаштовані термометри опору, який принцип їх дії?
2. Які вимоги висуваються до матеріалів для термометрів опору?
3. Якими приладами вимірюють опір термометрів?
4. Чому існують обмеження сили струму, що проходить через первинний перетворювач?
5. Чому підвідні проводи повинні мати більший діаметр порівняно з дротом чутливого елемента?
6. Чому терморезистори мають більшу чутливість і з їх допомогою можна вимірювати найменші зміни температури?
7. Які переваги і недоліки термометрів опору?

Розділ І. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

**Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 2**

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер дослідку	Показання лабораторного термометра t , °C	Опір, Ом		Примітки
		термо- резистора	мідного термометра	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 3

ГРАДУЮВАННЯ ЛОГОМЕТРА

Загальні відомості

Логометри – це прилади магнітоелектричної системи, що застосовуються в комплекті з термоперетворювачами опору для вимірювання температури. Дія логометра ґрунтується на вимірюванні відношення сил струмів, що проходять у двох паралельних електричних колах, які живляться від загального джерела постійного струму.

Рухома частина логометра (рис. 3.1) – це дві однакові рамки R_1 і R_2 з тонкого ізолюваного дроту, жорстко скріплені між собою і зі стрілкою. Рамки розміщені між полюсними наконечниками постійного магніту на осі сталюого циліндричного осердя. Наконечники, що мають овальний змінний зазор, виточки і циліндричне осердя, утворюють магнітну індукцію B , яка зменшується від середини наконечників до їх країв.

Рамки живляться постійним струмом від загального джерела струму Б. До рамки R_1 струм надходить через відомий опір R_N , а до рамки R_2 – через термоперетворювач опору R_t . Електричні струми I_1 та I_2 направлені так,

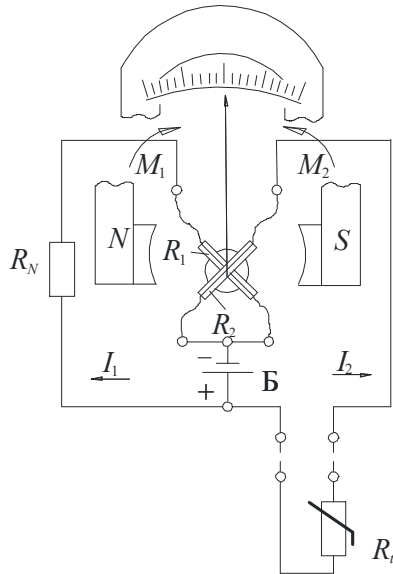


Рис. 3.1. Схема логометра

що обертові моменти рамок M_1 і M_2 діють назустріч один одному. Обертовий момент кожної рамки $M = cBI$. Тут стала c залежить від розмірів і кількості витків у рамці.

Якщо $R_N = R_t$, тоді сили струму $I_1 = I_2$. При цьому обертові моменти рамок однакові, а стрілка приладу буде на нульовій позначці шкали.

При змінюванні опору термоперетворювача (нагрівання або охолодження) через одну з рамок тече більший струм. Рухома система приладу обертається у бік дії більшого моменту. При цьому рамка з більшим струмом входить у зазор з меншою магнітною індукцією, інша рамка – навпаки, входить у зазор із більшою магнітною індукцією. Відповідно в одній рамці момент зростає, а в іншій – зменшується. Поворот рамок продовжується до тих пір, поки їх моменти не стануть однаковими, тобто $c_1 B_1 I_1 = c_2 B_2 I_2$. Якщо в це рівняння підставити відповідні значення сил струму, які визначаються формулами

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_N}; \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + R_t},$$

то відношення магнітних індукцій дорівнює

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{R_2 + R_t}{R_1 + R_N}.$$

Оскільки величина B_2 / B_1 визначається кутом повороту рамок φ , то

$$\varphi = f\left(\frac{R_2 + R_t}{R_1 + R_N}\right). \quad (3.1)$$

При постійних R_1 , R_2 і R_N кут повороту рамок однозначно визначається опором термоперетворювача, тобто $\varphi = f(R_N)$.

З метою виключення похибок вимірювання струм до рамок підводиться за допомогою безмоментних із тонкої

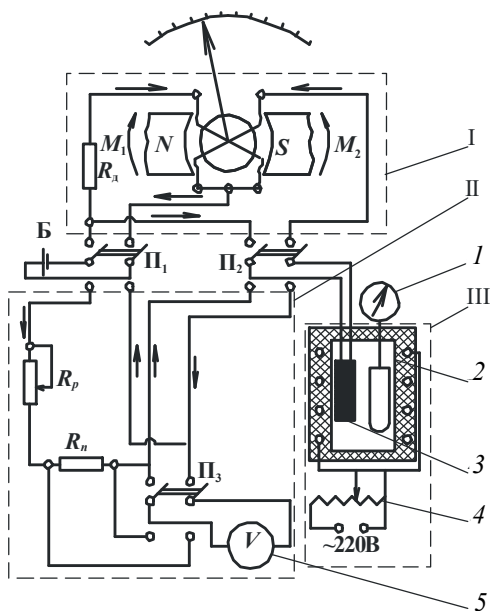
золотої стрічки або маломоментних з бронзового дроту малого діаметра струмопідводів, які утворюють незначний протидіючий момент при повороті рухомої системи приладу.

Логометри, що виготовляються серійно, мають класи точності: переносні – 0,2; 0,5; 1,0; щитові – 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5.

Опис експериментальної установки

Установка (рис. 3.2) складається з магнітоелектричного логометра І, компенсаційної схеми для вимірювання опору ІІ, нагрівальної установки ІІІ. Всередині корпусу нагрівальної установки розміщено платиновий первинний перетворювач термометра опору. За допомогою перемикача Π_2 він приєднується до логометра або компенсаційної схеми. Перемикач Π_1 забезпечує підключення джерела постійного струму Б до логометра або до компенсаційної схеми.

Рис. 3.2. Схема установки для переградування логометра:
 І – електроконтактний манометричний термометр;
 2 – нагрівальна установка;
 3 – платиновий термометр опору;
 4 – автотрансформатор;
 5 – цифровий вольтметр



Переградування шкали полягає у фіксації положення стрілки логометра при різній температурі платиного термометра опору.

Примітка. Докладний опис установки наведено на стенді.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією, правилами користування приладами.

2. Перевірити правильність складання схеми.

3. До включення нагрівача виміряти за допомогою цифрового вольтметра опір первинного перетворювача R_t . Визначити за градуовальною таблицею температуру масла. Після цього підключити первинний перетворювач до ланцюга логометра і зафіксувати положення стрілки.

4. Включити нагрівач на задану величину навантаження.

Включення проводити після дозволу викладача або лаборанта.

5. Виконати вимірювання падіння напруги на зразковому опорі і первинному перетворювачі, а також зафіксувати покази логометра (10 вимірювань), охоплюючи інтервал температур $0 \dots 140^\circ\text{C}$.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) принципову схему установки;
- 3) таблиці вимірювань та дані про прилади (на окремому аркуші);
- 4) нову шкалу логометра для платиного термометра опору.

При побудові шкали доцільно використовувати графічну залежність дійсної температури від положення стрілки відносно старої шкали;

5) визначення похибки вимірювання опору [4, С. 27–29].

Контрольні питання

1. Які вимоги висувають до матеріалів, використовуваних для первинних перетворювачів термометрів опору?
2. Конструкції первинних перетворювачів термометрів опору.
3. Якими методами вимірюється опір первинних перетворювачів?
4. Чому компенсаційний метод вимірювання опору забезпечує високу точність?

Розділ І. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Протокол експериментальних даних лабораторної роботи № 3

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер дослі- ду	Зразко- вий опір R_N , Ом	Падіння напруги, мВ		Показан- ня лого- метра n	Опір термо- метра опору R_t , Ом	Темпера- тура термоме- тра опору t , °C
		на зразковому опорі U_N	на термометрі опору U_{Rt}			
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ОБУМОВЛЕНОЇ ПРОМЕНЕВИМ ТЕПЛООБМІНОМ

Загальні відомості

Вимірювання температури контактними методами пов'язане з появою систематичних похибок, обумовлених теплопровідністю, тепловою інерцією і гальмуванням потоку. При вимірюванні температури газоподібних середовищ, що протікають у каналах, температура стінок яких відрізняється від температури газу, виникає ще похибка, обумовлена променевим теплообміном.

Власна температура t_T чутливого елемента (рис. 4.1) встановлюється в результаті теплової взаємодії з газом і оточуючими стінками. Якщо допустити, що перенесення теплоти теплопровідністю в чутливому елементі і захисному чохла відсутнє, то при встановленому тепловому режимі кількість теплоти, яку отримує чутливий елемент від газу шляхом конвективного теплообміну, дорівнює кількості теплоти, яку віддає поверхня чутливого елемента шляхом випромінювання на оточуючі стінки:

$$\alpha(t_f - t_T)S = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} S \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right], \quad (4.1)$$

де S – поверхня чутливого елемента; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений ступінь чорноти системи "чутливий елемент–оточуючі стінки".

Площа поверхні оточуючих стінок набагато більша за площу поверхні чутливого елемента, тому приведений ступінь чорноти системи практично дорівнює ступеню чорноти чутливого елемента ε_T .

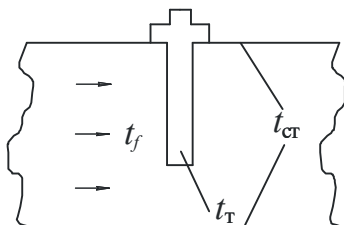


Рис. 4.1. Розміщення термометра в каналі

Систематична похибка вимірювання температури, зумовлена променистим теплообміном, дорівнює

$$\Delta t = -\frac{c_0 \varepsilon_T}{\alpha} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (4.2)$$

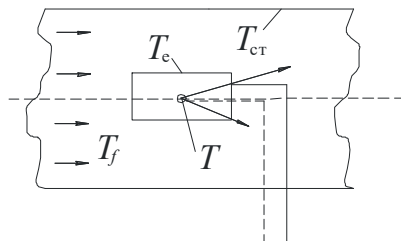
Аналіз формули показує, що похибка вимірювання може бути зменшена шляхом збільшення коефіцієнта тепловіддачі, зменшення ступеня чорноти поверхні чутливого елемента, а також екрануванням чутливого елемента.

Теплообмін випромінюванням зменшується при зменшенні ступеня чорноти поверхні ε_T . Для цього поверхню чутливого елемента треба робити полірованою, дзеркальною. Але в реальних умовах поверхня чутливого елемента забруднюється або окислюється. Тому цей фактор може бути використаний лише в окремих випадках.

Істотне зменшення похибки вимірювання забезпечує інтенсифікація конвективного теплообміну між газом і чутливим елементом термометра, тобто збільшення α . Коефіцієнт тепловіддачі збільшується при підвищенні швидкості обтікання і зменшенні розмірів чутливого елемента. Тому чутливі елементи термометрів треба розміщувати в місцях з підвищеними швидкостями руху газу. З цією метою здійснюють також відсмоктування газу за допомогою спеціальних пристроїв, що забезпечує обтікання датчика зі швидкістю 80...100 м/с.

Екранування полягає в тому, що чутливий елемент термометра розміщують всередині екранів, що зменшує інтенсивність променистого теплообміну з оточуючими стінками (рис. 4.2).

Рис. 4.2. Розміщення термометра в середині захисного екрана



Температура екрана T_e значно ближча до температури потоку T_f , ніж температура стінок. Це зменшує різницю абсолютних температур (4.2) і, відповідно, похибку вимірювання.

Розрахунки показали, що при одному екрані кількість променистої енергії, яка передається від чутливого елемента, зменшується в два рази, при двох екранах – у три рази і т. д. Внаслідок цього похибка від випромінювання зменшується приблизно в $1/(n + 1)$ разів, де n – кількість екранів.

Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки зображена на рис. 4.3.

Установка складається з аеродинамічної труби, нагрівальної камери і вимірювальної ділянки. Аеродинамічна труба встановлена на всмоктувальній стороні електровентильатора. Швидкість повітря регулюється за допомогою поворотної заслінки. У вимірювальну ділянку повітря надходить після підігріву в нагрівальній камері. Температура повітря залежить від споживаної потужності нагрівача і може досягати $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На вимірювальній ділянці розташовані дві термопари типу ХК. Робочий спай термопари 8 оточений двома кільцевими

екранами з тонколистової нержавіючої сталі з полірованими поверхнями. Термопара 6 виготовлена без захисного екрана, її робочий спай діаметром 1,5 мм має шорстку поверхню окисленого металу.

Примітка. Докладний опис установки наведено на стенді.

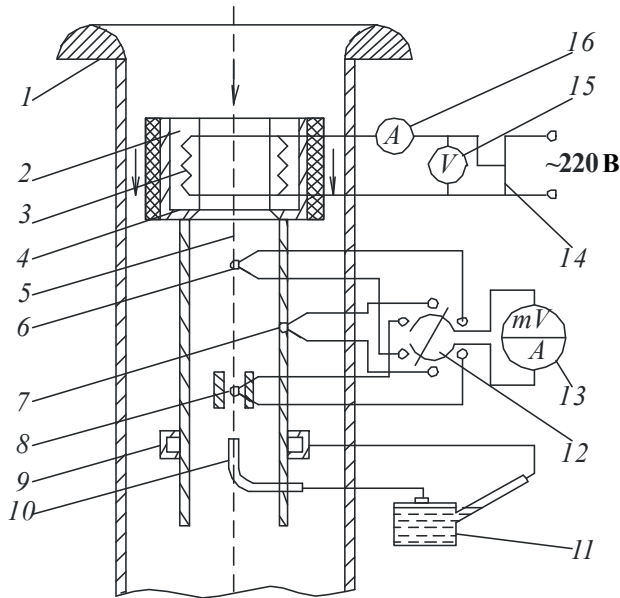


Рис. 4.3. Схема експериментальної установки:
 1 – аеродинамічна труба; 2 – нагрівальна камера; 3 – електронагрівач;
 4 – відбивний екран; 5 – вимірювальна ділянка; 6, 7 і 8 – неекранована,
 екранована і поверхневі термopари; 9 – кільцева камера; 10 – насадка
 повного тиску; 11 – мікроманометр; 12 – перемикач; 13 – потенціо-
 метр; 14 – автотрансформатор; 15 – вольтметр; 16 – амперметр

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією та правилами користування приладами.

2. Включити вентилятор і встановити за допомогою мікроманометра перший заданий викладачем режим роботи за швидкістю повітря. Після цього включити нагрівач і автотрансформатором встановити задане навантаження. Вимірювання слід проводити після виходу установки на стаціонарний режим (через 15–20 хв). При трьох значеннях потужності нагрівача і постійній швидкості повітря виконати вимірювання, встановивши залежність систематичної похибки від температури повітря.

Для визначення залежності похибки від швидкості повітря необхідно при постійній потужності нагрівача провести вимірювання для трьох значень швидкості.

Включати установку можна тільки після дозволу викладача або лаборанта.

Методика обробки дослідних даних

Експериментальні значення систематичної похибки знаходяться за різницею температур, виміряних екранованою і неекранованою термопарами. Показання екранованої термопарі приймаються рівними температурі повітря у вимірвальній ділянці.

Отримані дослідні значення порівнюються з їх значеннями, розрахованими за формулою (4.1).

Для розрахунку похибки за формулою (4.2) ступінь чорноти поверхні робочого спаю неекранованої термопарі може бути прийнятий $\varepsilon_t = 0,95$. При визначенні коефіцієнта тепловіддачі можна використовувати формулу для зовнішнього обтікання поверхонь різноманітної геометричної форми:

$$\alpha = 0,471 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0,5}, \quad (4.3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К); d – діаметр робочого спаю неекранованої термопари, м ($d = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м); $\text{Re} = x \cdot d / \nu$ – число Рейнольдса; ν – швидкість повітря, м/с; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с.

Швидкість повітря на вимірювальній ділянці визначається за величиною динамічного тиску:

$$\nu = \sqrt{\frac{2}{\rho} P}, \quad (4.4)$$

де P – динамічний тиск, виміряний мікроманометром, Па; ρ – густина повітря, кг/м³.

Фізичні параметри повітря λ , ρ і ν , що входять у формули (4.3) і (4.4), вибираються з таблиць за температурою екранованої термопари.

Температура стінки знаходиться усередненням показань двох термопар типу ХК.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) принципову схему установки;
- 3) таблиці вимірювань та дані про прилади (на окремому аркуші);
- 4) графічні залежності $\Delta t = f(\nu)$ і $\Delta t = f(T_f)$, отримані експериментальним і розрахунковим шляхом.

Контрольні питання

1. Які систематичні похибки виникають при вимірюванні температури?
2. Якими методами можна зменшити величину похибки, обумовленої променистим теплообміном?
3. Чому екранування первинного перетворювача термометра підвищує точність вимірювання температури?
4. Поясніть вплив швидкості і температури середовища на величину систематичної похибки.
5. Чому зовнішня теплова ізоляція каналу в районі вимірювання температури середовища призводить до зменшення похибки?

Розділ І. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Протокол експериментальних даних лабораторної роботи № 4

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер досліді	ТермоЕРС термопар, мВ				Темпера- тура вільного спаю $t, ^\circ\text{C}$	Показання мікромано- метра, число поділок при $\kappa =$	Баро- метричний тиск, мм рт. ст.
	екранованої	неекранованої	стілки № 1	стілки № 2			
1							
2							
3							
4							
5							

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 5

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОТОКІВ

Загальні відомості

Вимірювання температури контактними методами пов'язане з появою систематичних похибок, обумовлених теплопровідністю, променевим теплообміном, тепловою інерцією і гальмуванням потоку.

Систематична похибка, зумовлена гальмуванням, виникає при вимірюванні температури газу, що рухається з великою швидкістю. При гальмуванні газу на поверхні чутливого елемента термометра його кінетична енергія частково або повністю перетворюється на теплову, внаслідок чого збільшується температура загальмованої частини потоку і температура чутливого елемента.

Температура T_r , якої набуває газ при повному адіабатичному гальмуванні, є температурою *гальмування*:

$$T_r = T_f + \frac{v^2}{2c_p}, \quad (5.1)$$

де T_f – термодинамічна температура, тобто температура, яку показав би термометр, якби він рухався зі швидкістю газу; v – швидкість газу; c_p – теплоємність газу при постійному тиску.

У реальних умовах не вся кінетична енергія газу, який безпосередньо примикає до чутливого елемента, перетворюється на теплову енергію. Повне гальмування буде тільки в тих елементарних струминах, які підходять до поверхні чутливого елемента по нормалі. На решті поверхні чутливого елемента температура гальмування не досягається. Внаслідок цього на поверхні чутливого елемента відбувається кондуктивне (за рахунок теплопровідності) і конвективне

перенесення теплоти і чутливий елемент набуває деякої температури $T_{\text{Д}}$, яка менша за температуру гальмування, тобто $T_f < T_{\text{Д}} < T_{\text{Г}}$.

Якість чутливого елемента, призначеного для вимірювання температури гальмування, оцінюється коефіцієнтом відновлення

$$r = \frac{T_{\text{Д}} - T_f}{T_{\text{Г}} - T_f}. \quad (5.2)$$

Коефіцієнт відновлення визначають експериментальним шляхом у вигляді критеріальної залежності:

$$r = f(\text{Re}, \text{M}, \text{Pr}, k), \quad (5.3)$$

де Re – число Рейнольдса; M – число Маха; Pr – число Прандтля; k – показник адіабати.

Похибка, зумовлена гальмуванням – це різниця між температурами чутливого елемента і гальмування:

$$\Delta t = T_{\text{Д}} - T_{\text{Г}} = -\frac{v^2}{2c_p}(1 - r). \quad (5.4)$$

З цієї формули випливає, що похибка може бути зменшена за рахунок збільшення коефіцієнта відновлення і зменшення швидкості газу. Зменшення швидкості обтікання чутливого елемента досягається розміщенням його в спеціальній камері гальмування. Конструкція чутливого елемента повинна забезпечувати високе значення і сталість коефіцієнта відновлення у широкому інтервалі швидкостей середовища.

Термодинамічна температура обчислюється за температурою гальмування, швидкістю газу і коефіцієнтом відновлення, тобто

$$T_f = T_{\text{Г}} - r \frac{v^2}{2c_p}. \quad (5.5)$$

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка виконана за типом розіркнutoї аеродинамічної труби. Вона складається з високонапірного електровентильатора, робочої ділянки, нагрівача і вхідного вимірювального колектора (рис. 5.1).

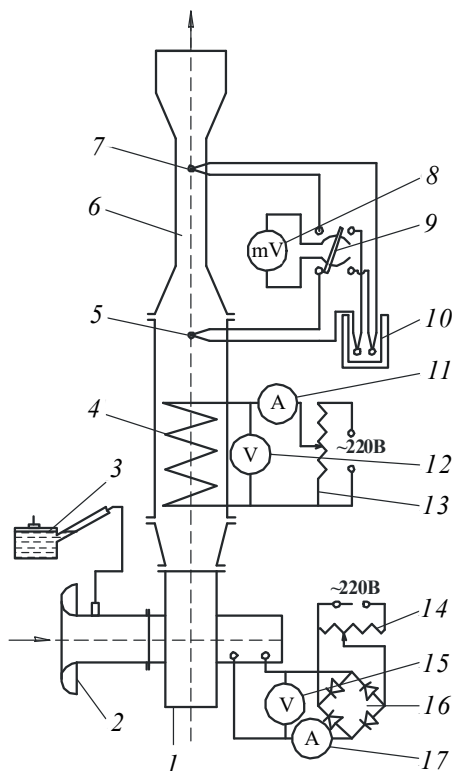


Рис. 5.1. Схема експериментальної установки:

1 – електровентильатор; 2 – вимірювальний колектор; 3 – мікроамперметр; 4 – електронагрівач; 5, 7 – термопари; 6 – робоча ділянка; 8 – потенціометр; 9 – перемикач; 10 – термостат; 11, 12 – амперметр і вольтметр нагрівача; 13 і 14 – автотрансформатори електронагрівача та електродвигуна; 15, 17 – вольтметр і амперметр електродвигуна; 16 – випрямляч

Швидкість повітря визначається за динамічним тиском, вимірюваним мікроманометром, у вхідному вимірювальному колекторі.

Температура чутливого елемента і термодинамічна температура повітря вимірюються за допомогою термопар ХК, які перемикачем по черзі підключаються до потенціометра. Вільні спаї термопар поміщають у термостат, в якому підтримується температура 0 °С.

Примітка. Докладний опис установки наведено на стенді.

Обробка результатів вимірювань

1. За виміряними значеннями термоЕРС, користуючись стандартними градувальними таблицями (ГОСТ 3044-74), визначити температуру чутливого елемента T_D і термодинамічну температуру T_f .

2. Середня швидкість повітря в робочій ділянці розраховується за величиною динамічного тиску:

$$v = \alpha_{\kappa} \frac{S_{\text{вх}}}{S_{\text{рд}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} P_D}, \quad (5.6)$$

де $S_{\text{вх}}$ і $S_{\text{рд}}$ – відповідно площі поперечного перерізу вхідного вимірювального колектора і робочої ділянки ($d_{\text{вх}} = 24$ мм і $d_{\text{рд}} = 12$ мм); ρ – густина повітря в робочій ділянці за температури T_f (вибирається з таблиці теплофізичних властивостей повітря); α_{κ} – коефіцієнт витрати ($\alpha_{\kappa} = 0,98$).

3. Температура гальмування визначається за формулою (5.5), а значення похибки за рахунок гальмування – зі співвідношення (5.4).

4. Коефіцієнт відновлення знаходиться за формулами (5.1) і (5.2).

5. Швидкість звуку

$$\alpha = \sqrt{k R_i T_f}, \quad (5.7)$$

де k – показник адіабати (для повітря $k = 1,4$); R_i – індивідуальна газова стала ($R_i = 287$ кДж/(кг·К)).

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис і принципову схему установки;
- 2) таблиці вимірів та дані про прилади (на окремому аркуші);
- 3) обробку дослідних даних, розраховані величини Δt та r ;
- 4) графічні залежності $\Delta t = f(M)$ та $r = f(M)$;
- 5) стислий аналіз результатів і висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Які систематичні похибки виникають при вимірюванні температури контактними методами?
2. Чим викликається поява похибки при вимірюванні температури газу, що рухається з великою швидкістю?
3. Що характеризує коефіцієнт відновлення?
4. Якими засобами можливо зменшити похибку за рахунок гальмування?
5. Призначення камери гальмування в датчиках.

Розділ І. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Протокол експериментальних даних лабораторної роботи № 5

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер дослі- ду	ТермоЕРС термопар, мВ		Темпера- тура, К		Дина- мічний тиск P_d , Па	Швид- кість повітря на робочій ділянці v , м/с	Швид- кість звуку a , м/с	Число $M =$ $= v/a$
	E_d	E_f	T_d	T_f				
1								
2								
3								
4								
5								

Підпис викладача _____

Дата _____

Розділ II. ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ І ШВИДКОСТІ ПОТОКУ

Тиск є параметром, що характеризує стан робочих тіл у процесах перетворення теплової енергії на механічну роботу. Тиск визначається силою, що діє на одиницю поверхні.

Прилади, призначені для вимірювання тиску і різниці тиску, називаються манометрами. Вони поділяються на рідинні, деформаційні (пружинні), вагопоршневі та електричні.

Для вимірювання тиску й швидкості в потоках рідини та газу застосовуються насадки повного і статичного тиску. Вони сприймають тиск і передають його по сполучній лінії для вимірювання манометром. За виміряною різницею між повним і статичним тиском визначається швидкість потоку. Широкого практичного застосування набули комбіновані насадки, за допомогою яких можливе одночасне вимірювання повного і статичного тиску та їх різниці.

Лабораторна робота № 6

ПОВІРКА ПНЕВМОМЕТРИЧНИХ ТРУБОК

Загальні відомості

Для вимірювання повного, статичного і динамічного тиску в потоках рідини і газу використовують універсальні пневмометричні трубки (насадки) Прандтля (рис. 6.1). Повний тиск вимірюється за допомогою лобового отвору в напівсферичній головці наконечника, статичний – через вузькі щілини або отвори на бічній поверхні наконечника. По трубочках, розташованих у державці, тиск передається для вимірювання манометрами. При виготовленні універсальних пневмометричних трубок слід суворо дотримуватися форми і співвідношення, розмірів, отриманих у результаті ретельного експериментального вивчення процесів. На рис. 6.2 показано розподіл статичного тиску вздовж твірної наконечника.

По осі ординат нанесено відношення $(p - p_c) / \frac{\rho v^2}{2}$, а по осі абсцис – відношення l / d . Тут прийняті наступні позначення: l – відстань від носика наконечника до перерізу, де вимірюється тиск; d – діаметр наконечника; p – тиск на поверхні наконечника у перерізі l ; p_c – статичний тиск; v – швидкість потоку; ρ – густина середовища.

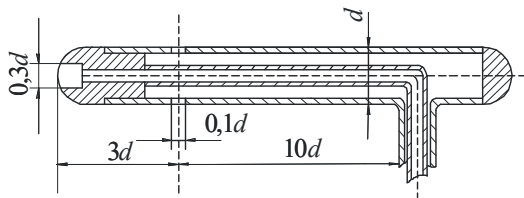


Рис. 6.1. Трубка Прандтля

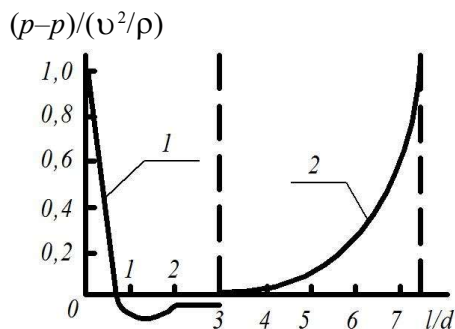


Рис. 6.2. Розподіл статистичного тиску

Крива 1 (див. рис. 6.2) характеризує розподіл статичного тиску уздовж твірної наконечника без державки; крива 2 – розподіл тиску з урахуванням впливу державки. Встановлено, що в перерізі $l_c = (3 - 4)d$ тиск на поверхні наконечника практично збігається зі статичним тиском, тобто $p = p_c$, тому отвори для відбору статичного тиску необхідно розташовувати на вказаній відстані.

Кутова характеристика пневмотрубки визначає діапазон нечутливості до кута скосу потоку α (рис. 6.3) і знаходиться експериментальним шляхом як відношення різниці тисків, виміряних при куті скосу, рівному α , і при $\alpha = 0$. Кожен тип пневмометричних трубок має певний діапазон нечутливості до кутів повороту, наприклад трубка Прандтля – до $\pm 16^\circ$.

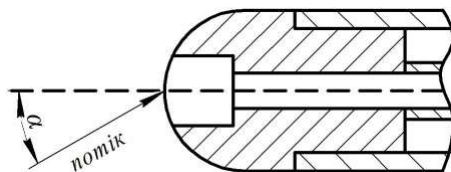


Рис. 6.3. Кут скосу потоку

За останні роки для вимірювання тиску в решітках турбомашин і компресорів широкого застосування набули насадки з протоком. Кут нечутливості насадок з протоком, зображених на рис. 6.4, досягає $30 \dots 40^\circ$.

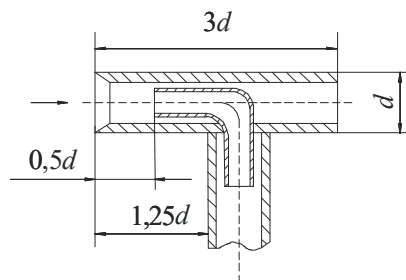


Рис. 6.4. Насадка з протоком

Повірка робочих пневмометричних трубок здійснюється найчастіше шляхом порівняння зі зразковими. У даному випадку обидві трубки (градуйована і зразкова) встановлюються у рівномірному полі швидкостей, тобто так, щоб напрямок і значення швидкості потоку, що набігає, на обох трубках були однакові.

Щоб уникнути взаємного впливу градуйованої та зразкової трубок, їх слід розташовувати одна від одної на відстані 5–10 діаметрів більшої трубки.

Опис експериментальної установки

Установка (рис. 6.5) являє собою аеродинамічну трубу відкритого типу.

Повірювана і зразкова пневмометричні трубки встановлені у вимірювальній ділянці на всмоктувальній стороні вентилятора. Динамічний тиск вимірюється мікроманометрами.

Примітка. Докладний опис установки наведено на стенді.

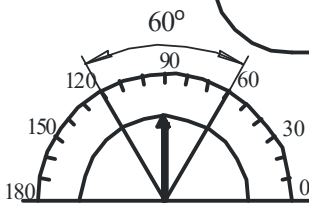


Рис. 6.5. Схема експериментальної установки:
1 – транспортер; 2 і 4 – повірювана і зразкова трубки; 3 – вхідний колектор; 5 і 9 – мікроманометри повірюваної і зразкової трубок;
6 – заслінка; 7 – електровентильатор; 8 – вимірювальна ділянка

Порядок проведения работ

1. Ознайомитися зі схемою установки, конструкцією та правилами користування приладами.
2. Встановити за зразковою трубкою режим роботи установки, за якого динамічний тиск вимірюється з похибкою 1,5 %.

На цьому режимі зразковою трубкою зняти поле динамічного тиску. Знайти координати точок із однаковим тиском, відстань між якими має бути не менше 5 діаметрів більшої трубки.

3. При повірці робочої комбінованої трубки встановити зразкову і повірювану трубки у знайдені за графіком тисків точки і провести вісім вимірювань динамічного тиску, охоплюючи весь діапазон його зміни.

4. На двох режимах зняти показання повірюваної трубки при різних кутах повороту, охопивши діапазон від 0 до 45°. Швидкість набігаючого потоку на цих режимах визначати за зразковою трубкою.

5. При повірці насадки повного тиску встановити зразкову трубку і повірювану насадку до точки з однаковим тиском і виміряти на восьми режимах повний тиск (надлишковий).

На двох режимах зняти показання повірюваної насадки при різних кутах повороту, охопивши діапазон від 0 до 45°. Швидкість набігаючого потоку на цих режимах визначати за зразковою трубкою.

6. Повірка насадки статичного тиску проводиться аналогічно п. 5. Трубки розташовувати так, щоб отвори для відбору статичного тиску повірюваної і зразкової трубок лежали в одній площині.

Методика обробки дослідних даних

1. За даними вимірювань для всіх повірюваних насадок визначити поправочний коефіцієнт k_p і швидкість потоку за динамічним тиском, виміряним зразковою трубкою. Швидкість звуку обчислювати за формулою $\alpha = \sqrt{k g R_i T}$, яка для повітря приймає вигляд $\alpha = 20,05\sqrt{T}$, оскільки до $k = 1,4$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

R_i – індивідуальна газова стала для повітря. Результати обробки дослідних даних представити у вигляді графіка $k_p = f(M)$. Визначити точність вимірювання $k_p = p_{зр}/p$, використовуючи загальну формулу для обчислення помилок непрямого вимірювання $y = f(x_1, x_1, x_1, \dots, x_n)$, тобто

$$\Delta y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (6.1)$$

2. Для визначення кутової характеристики насадок обробку дослідних даних проводити в табличній формі. Побудувати графік $(p_\alpha - p_{\alpha=0}) / p_{\alpha=0} = f(\alpha)$.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) принципову схему установки;
- 3) таблиці вимірів та дані про прилади;
- 4) поле динамічних тисків у вимірювальному перетині;
- 5) графічні залежності $k_p = f(M)$ і $(p_\alpha - p_{\alpha=0}) / p_{\alpha=0} = f(\alpha)$;
- 6) висновок про кутові характеристики повірюваної трубки;
- 7) оцінку точності визначення k_p .

Контрольні питання

1. Як виміряти статичний, динамічний, повний тиск за допомогою пневмотрубок (насадок)?
2. Як визначити швидкість потоку за допомогою пневмотрубок?
3. Чому отвори для відбору статичного тиску розташовуються в перетинах, віддалених від носика-наконечника на $3d$?

4. Навіщо в роботі необхідно вимірювати поле динамічного тиску?
5. Чому відстань між трубками в процесі повірки має бути більшою за $5d$?
6. Чи впливає кут атаки на показання пневмотрубок?
7. Кутова характеристика пневмометричних трубок і метод її визначення.
8. Чому мікроманометри виконуються чашкового типу і мають похилу шкалу?

**Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 6**

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер досліду	Найменування встановленої трубки	Динамічний тиск на зразковій трубці P_d , Па	Кут повороту повірюваної трубки	Динамічний тиск на повірюваній трубці P_d , Па	Швидкість повітря на робочій ділянці v , м/с	Швидкість звуку a , м/с	Число $M = v/a$
1							
2							
3							
4							
5							

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 7

ПОВІРКА ПРУЖИННОГО МАНОМЕТРА

Загальні відомості

Принцип дії деформаційних манометрів ґрунтується на деформуванні пружного чутливого елемента, що виникає під впливом вимірюваного тиску. Чутливими елементами деформаційних манометрів є мембрани, сильфони і трубчасті пружини. Деформаційні манометри мають просту і надійну конструкцію, невеликі розміри. Позитивною якістю їх є наочність показань, великий діапазон вимірювань (до 1000 МПа), можливість автоматичного запису і дистанційної передачі показань.

Найбільш поширеними деформаційними приладами для вимірювання надлишкового тиску є манометри з трубчастою пружиною. Вони виготовляються з одновитковими або багатовитковими трубчастими пружинами, які являють собою вигнуту по колу металеву пружну трубку овального або еліптичного перерізу. Під дією вимірюваного надлишкового тиску всередині трубки вона частково розкручується внаслідок деформації її перерізу, який прагне прийняти форму круга.

Трубчаста пружина (рис. 7.1) одним кінцем сполучається з вимірюваним тиском, а другий її кінець запааний. При зростанні тиску всередині трубки мала вісь еліпса b збільшується, а довжини дуг A_1B_1 і A_2B_2 залишаються практично постійними. Якщо r_1, r_2, b, γ – розміри трубчастої пружини до деформації, то r'_1, r'_2, b', γ' – розміри після деформації.

Після деформації пружини $b' > b, \gamma' < \gamma$, тобто під дією вимірюваного тиску, трубчаста пружина змінює свою кривизну, причому довжина пружини постійна. Тоді враховуючи, що $b' - b = \Delta b$, а $\gamma - \gamma' = \Delta \gamma$, можна записати

$$b\gamma = (b + \Delta b)(\gamma - \Delta \gamma). \quad (7.1)$$

Розв'язання цього рівняння дає

$$\Delta\gamma = \gamma \frac{\Delta b}{b + \Delta b}. \quad (7.2)$$

Аналіз формули (7.2) показує, що при пружній деформації трубчастої пружини зменшення її центрального кута пропорційне його початковому значенню, збільшенню розміру малої осі перерізу трубки й обернено пропорційне розміру малої осі після деформації. Деформація поперечного перерізу трубки залежить також від механічних властивостей матеріалу, товщини стінки трубки, відношення розмірів перерізу a/b і внутрішнього тиску. До певних граничних значень тиску спостерігається лінійна залежність деформації від тиску. При їх перевищенні трубка отримує залишкову деформацію і стає непридатною для вимірювання.

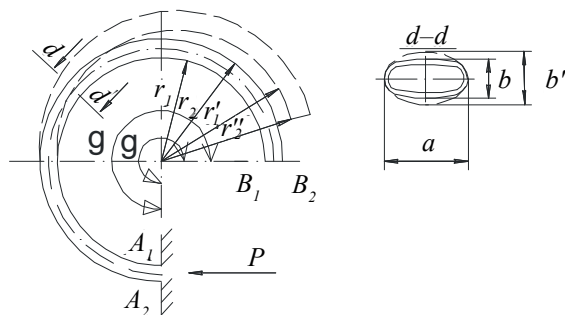


Рис. 7.1. Манометр з трубчастою пружиною

Манометри з одновитковою трубчастою пружиною виготовляють найчастіше з центральним кутом 270° . Вони поділяються на технічні, контрольні та зразкові.

Технічні манометри загального призначення мають діаметр корпусу 40; 60; 100; 160 і 250 мм; їх класи точності 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4. Контрольні манометри застосовують для перевірки

технічних манометрів на робочому місці, порівнюючи показання технічного манометра з показаннями підключеного до нього за допомогою вентиля контрольного манометра. Клас точності контрольних манометрів 0,6; верхня границя вимірювання до 160 МПа. Зразкові манометри застосовують для перевірки технічних і контрольних манометрів, а також для точних вимірювань в лабораторних установках. Верхня границя вимірювань до 60 МПа, а клас точності 0,16; 0,25; 0,4. Ці манометри призначені для вимірювання тиску при температурі 15...25 °С.

Вагопоршневі манометри є зразковими приладами. Вони широко застосовуються для перевірки та градування манометрів з трубчастою пружиною за допомогою зразкових вантажів, а також для точного вимірювання надлишкового тиску в лабораторній практиці.

Схема вагопоршневого манометра типу МП-60, який має верхню межу вимірювання 6 МПа, представлена на рис. 7.2. Неущільнений поршень з тарілкою 2 для вантажів 1 знаходиться в циліндрі 14 із зазором не вище 0,01 мм. При такому зазорі швидкість опускання поршня через витік робочої рідини не перевищує 0,05 мм/хв. Рівномірність зазору забезпечується обертанням тарілки за годинниковою стрілкою під час вимірювання.

Внутрішня порожнина манометра ретельно заповнюється робочою рідиною (гасом, газовим або трансформаторним маслом) через отвір у дні резервуара 5 при відкритому вентилі 6. Манометр, що підлягає повірці, встановлюється у стояк 11 та включається в роботу вентилям 10. Поршнем 8 гідравлічного преса 9 створюється необхідний тиск. Вентиль 7 служить для зливу робочої рідини. Для отримання заданого тиску на тарілку 2 накладаються вантажі у такій кількості, щоб зрівноважити показання манометра, який підлягає повірці, на заданій відмітці шкали. За цих умов надлишковий тиск, що

50

діє на поршень, становить $P = \frac{g \cdot M}{F}$, де M – маса вантажу з урахуванням маси поршня і тарілки; F – ефективна площа поршня, що дорівнює сумі площі торця поршня і половини площі зазору; g – прискорення вільного падіння.

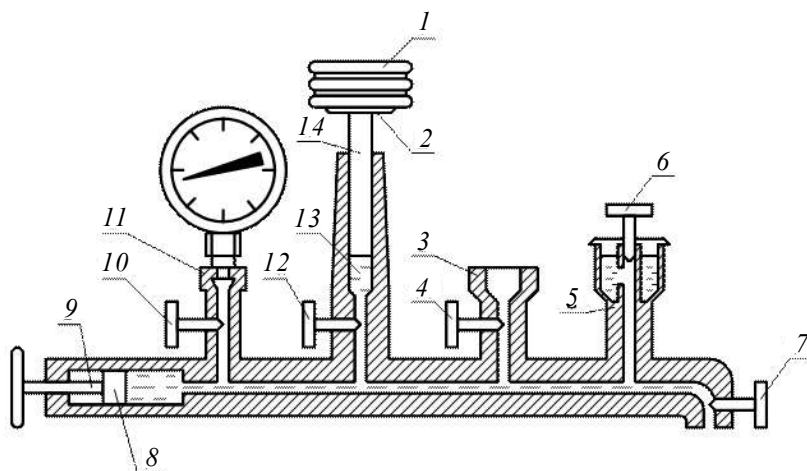


Рис. 7.2. Схема вагопоршневого манометра МП-60

Перевірку манометрів також можна виконати шляхом звірення показань манометра, що підлягає повірці, та зразкового манометра, створюючи пресом 9 надлишковий тиск у системі. У цьому випадку вагопоршнева колонка відключається вентилем 12.

Поршень манометра МП-60 має робочу площу $0,4985 \text{ см}^2$. Вага поршня разом із тарілкою (без вантажів) $0,4985 \text{ кг}$. Таким чином, поршень створює тиск, що дорівнює 1 кгс/см^2 . У комплект приладу входять калібровані вантажі, які дозволяють отримувати тиск через $0,5$; $1,0$; $5,0 \text{ кгс/см}^2$ ($0,05$; $0,1$ і $0,5 \text{ МПа}$). Клас точності приладу $0,05$; верхня межа вимірювання – 60 кгс/см^2 (6 МПа), нижня – 1 кгс/см^2 ($0,1 \text{ МПа}$). Швидкість

опускання поршня при тиску 60 кгс/см^2 (6 МПа) і заповненні трансформаторним маслом не більше 0,5 мм/хв.

Повірка технічних манометрів

Робочі пружинні манометри раз на рік підлягають обов'язковій повірці, опломбуванню або тавруванню.

При виборі зразкового приладу необхідно, щоб його похибка була у чотири рази менше за допустиму похибку приладу, що повіряється.

Повірку приладів для вимірювання тиску за допомогою вагопоршневого манометра можна проводити методом порівняння зі зразковим пружинним манометром і за допомогою тарованих (зразкових) вантажів. При використанні першого методу на стійках 11 (див. рис. 7.2) встановлюються зразковий манометр і манометр, що повіряється; вимірювальна колонка в цьому випадку вимикається вентилем 12. Тиск створюється пресом 9. Через однакові проміжки знімаються показання манометрів: спочатку при підвищенні, а потім при зниженні тиску.

При повірці манометра за допомогою вантажів відлік на шкалі проводять тільки під час обертання поршня, занурюючи його приблизно на $1/2$ – $1/3$ робочого ходу.

Щоб виключити вплив тертя в передавальному механізмі та люфтах у з'єднаннях, відліки потрібно проводити після постукування пальцем по бічній стінці вивіреного приладу.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з описом і правилами користування вагопоршневим манометром і приладами, що повіряються.
2. Відповідно до граничного тиску приладів, що повіряються, підготувати вантажі.
3. Підготувати протокол даних про прилади, а також протокол вимірювань.

4. Отримавши дозвіл лаборанта, заповнити систему чистим трансформаторним маслом.

5. Перевірку проводити за зростаючим тиском, включивши прилад, що повіряється (спочатку поршневий манометр), а на тарілку поршня покласти вантажі, що відповідають першій позначці шкали приладу. Тарілку притримувати рукою, вантажі класти без поштовхів; не допускати занурення поршня на глибину понад $2/3$ і менше $1/2$ його довжини.

Відлік за шкалою приладу, що повіряється, здійснювати під час обертання поршня.

Повірку приладу проводити не менше ніж у п'яти відмітках, рівномірно охоплюючи весь діапазон тиску.

6. Досягнувши граничного тиску, витримати прилад, що повіряється, протягом 5 хв на цьому тиску, а потім виконувати повірку у зворотному напрямку, знімаючи показання у тих же відмітках.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) протокол повірки пружинного манометра і висновок про його придатність.

Контрольні питання

1. Що таке клас точності приладу?
2. Будова і принцип дії манометрів з трубчастою пружиною.
3. Який принцип улаштування вагопоршневого манометра?
4. Назвіть основні правила експлуатації вагопоршневого манометра.
5. Які існують методи повірки приладів тиску за допомогою вагопоршневого манометра?

**Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 7**

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер досліді	Тиск, що визначається вагою поршня і вантажів $P_{дв}$, МПа		Показання манометра, що підлягає повірці P , МПа		Похибка приладу, МПа	Допустима похибка манометра, що підлягає повірці $\Delta_{доп}$, МПа
	При підвищенні тиску	При зниженні тиску	При підвищенні тиску	При зниженні тиску		
1–5						$\Delta_{доп} = \frac{P_{вер} \cdot K}{100}$ $P_{вер}$ – верхнє значення шкали манометра
1–5						

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 8

ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОЗМІННОГО ТИСКУ МЕХАНІЧНИМИ ІНДИКАТОРАМИ

Загальні відомості

Швидкозмінний тиск має місце в робочих процесах поршневих двигунів. Пульсації тиску також відбуваються внаслідок пульсуючої течії потоку в турбінах і компресорах.

Вимірювання швидкозмінного тиску має істотне значення для аналізу процесів у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ). За результатами вимірювання оцінюють роботу циліндрів двигуна, визначають середній індикаторний тиск та індикаторну потужність, вивчають динаміку тепловиділення, процеси газообміну тощо.

Пристрої для вимірювання і запису швидкозмінних тисків називають індикаторами, які за принципом дії поділяють на механічні, електричні та електропневматичні. Ці прилади записують індикаторні діаграми – залежність тиску від переміщення (ходу) поршня (згорнуті діаграми) і від часу або кута повороту колінчастого вала (розгорнуті діаграми).

Індикатори тиску повинні мати невелику динамічну похибку, бути нечутливими до вібрацій і коливань температури; їх чутливі елементи повинні мати невелику масу і габарити, здатність витримувати значні механічні навантаження.

Дія механічних індикаторів ґрунтується на зрівноважуванні тиску, який виникає в циліндрі двигуна і діє на поршень індикатора, силою пружної деформації пружини (циліндричної або стрижневої). Принципова схема індикатора показана на рис. 8.1.

Індикатор з циліндричною пружиною I за допомогою штуцерного з'єднання приєднується до індикаторного крана

циліндра двигуна. Тиск газів у циліндрі двигуна передається поршню циліндра індикатора 3. До штока 4 поршня 3 шарнірно приєднаний важіль 2 пишучого механізму. При русі поршня вгору циліндрична пружина 1 розтягується і її деформація стає пропорційною силі, яка утворюється тиском газів. Таким чином, положення поршня і тиск газів у циліндрі двигуна однозначно пов'язані. Рух поршня двигуна за допомогою передаточного механізму підсилюється настільки, що записуючий важіль 2 переміщується у 7–8 разів більше, ніж поршень індикатора.

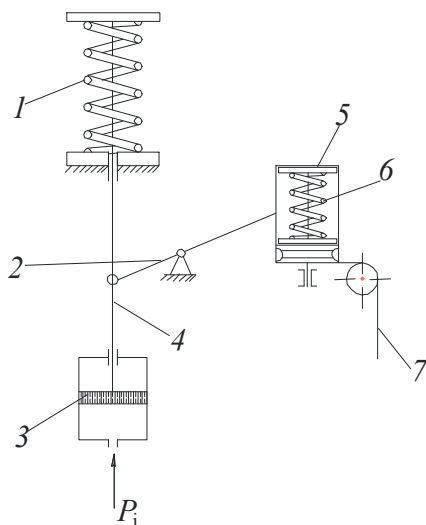


Рис. 8.1. Принципова схема механічного індикатора

На станині індикатора розміщується барабан 5 із паперотримачем і зворотною пружиною 6. Внизу барабана є канавка для індикаторного шнура 7, який другим кінцем приєднується до ексцентрика колінчастого вала двигуна. Барабан обертається в одному напрямку за рахунок натягу шнура при русі поршня вниз, а в іншому напрямку – за допомогою зворотної

пружини при русі поршня вгору. Записуючий механізм креслить на папері згорнуту індикаторну діаграму, що записується на крейдяному папері, який щільно намотується на барабан і фіксується пластинчастим паперотримачем.

Індикатор забезпечується набором змінних поршнів і пружин. На опорній частині пружин зазначаються масштаб, найбільший тиск і діаметр поршня. Масштаб пружини показує величину вертикального переміщення олівця на індикаторній діаграмі при зміні тиску в циліндрі двигуна на 0,1 МПа.

Частота вільних коливань механічних індикаторів з циліндричною пружиною не перевищує 400 Гц, що дозволяє застосовувати їх у двигунах з частотою обертання колінчастого вала до 10 с^{-1} .

Опис експериментальної установки

Установка (рис. 8.2) складається з електричного компресора і механічного індикатора тиску, сполученого з циліндром компресора мідною трубою.

Барабан індикатора за допомогою шнура пов'язаний зі шківом колінчастого вала компресора. Для вимірювання частоти обертання колінчастого вала використовується дистанційний магнітний тахометр типу ТЕ-204, датчик якого приєднаний до вала електродвигуна, а показчик закріплений на щиті. Тиск у збірнику-ресивері вимірюється пружинним манометром.

Примітка. Докладний опис установки наведено на стенді.

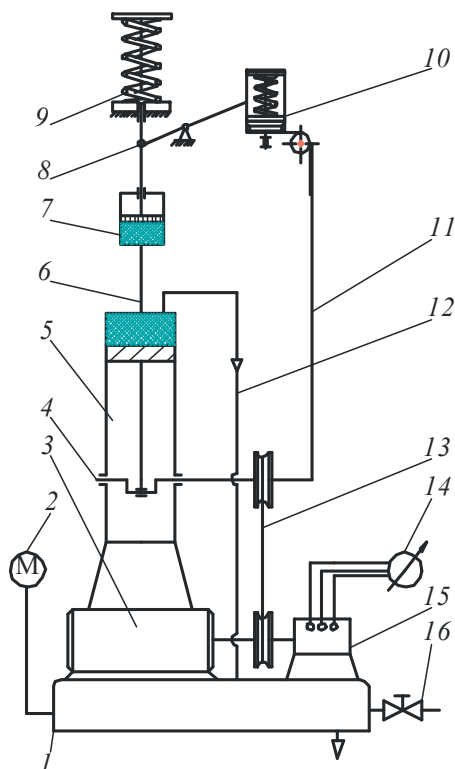


Рис. 8.2. Схема експериментальної установки:

1 – ресивер; 2 – манометр; 3 – електродвигун; 4 – вал компресора;
5 – компресор; 6 – з'єднувальна трубка; 7 – циліндр і поршень індикатора; 8 – записуючий важіль; 9 – пружина; 10 – барабан; 11 – шнур;
12 – повітропровід; 13 – клинопасова передача; 14, 15 – показчик і датчик тахометра; 16 – запобіжний клапан

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією та правилами користування компресором і приладами.

2. Перед пуском установки оглянути компресор і прилади, звернувши особливу увагу на наявність масла у картері (рівень масла повинен бути на контрольній рисці).

3. Пуск установки проводити після отримання дозволу викладача або лаборанта. Перед пуском відкрити крани збірника. Компресор повинен працювати без стуку, температура кришки циліндрів не повинна перевищувати 70 °С.

4. Після установки в збірнику тиску 0,2 МПа зняти індикаторну діаграму.

Методика обробки дослідних даних

1. За індикаторною діаграмою визначити середній індикаторний тиск з виразу

$$p_i = \frac{S'}{L} \mu, \quad (8.1)$$

де S – площа індикаторної діаграми, мм; L – довжина діаграми (хід поршня у масштабі), мм; μ – масштаб тиску, МПа/мм.

2. Визначити систематичні похибки вимірювання тиску механічним індикатором і уточнити значення середнього індикаторного тиску.

2.1. Похибка зумовлена впливом розтягування індикаторного шнура на довжину індикаторної діаграми. Площа індикаторної діаграми з урахуванням цієї похибки визначається за формулою

$$S = S' + h \frac{l}{2000}, \quad (8.2)$$

де h – висота індикаторної діаграми, мм; l – довжина індикаторного шнура, мм.

2.2. Похибка від опору, що виникає при проходженні газу в трубку, яка з'єднує циліндр компресора й індикатор, визначається за формулою

$$\Delta p_i = + \frac{n}{1,25 \cdot 10^6} \frac{l_K}{d} p_{\max}, \quad (8.3)$$

де n – частота обертання вала компресора, об/хв; l_K – довжина трубки, що з'єднує циліндр компресора з індикатором, мм; d – внутрішній діаметр трубки, мм; $p_{\max}$ – найбільший тиск у циліндрі компресора, МПа.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) принципову схему установки;
- 3) результати вимірів та дані про прилади;
- 4) індикаторну діаграму і результати її аналізу.

Контрольні питання

1. Якими приладами вимірюється швидкозмінний тиск?
2. На чому заснований принцип дії механічного індикатора тиску?
3. Будова механічного індикатора з циліндричною пружиною.
4. Що показує масштаб пружини індикатора?
5. З якою метою і як визначається середній індикаторний тиск?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

**Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 8**

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Вимірювана величина	Показання приладів	Похибка вимірювання
Тиск у ресивері, МПа		
Частота обертання вала компресора, об/хв		

Масштаб тиску: $\mu =$ _____.

Довжина індикаторного шнура: _____.

Довжина та внутрішній діаметр трубки, що з'єднує
циліндр компресора з індикатором: $d =$ _____ і $l_k =$ _____.Найбільший тиск у циліндрі компресора: $p_{\max} =$ _____.

Підпис викладача _____

Дата _____

Розділ III. ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

Витратою називається кількість речовини, яка протікає через поперечний переріз каналу за одиницю часу. Витрата виражається в об'ємних і масових одиницях. Прилади, призначені для вимірювання витрати, називаються витратомірами. Вони засновані на залежності витрат від різних фізичних величин: від перепаду тиску на звужуючому пристрої, різниці температур речовини при нагріванні та ін.

Для вимірювання кількості речовини, що протікає через поперечний переріз каналу за деякий проміжок часу, застосовуються лічильники кількості. Кількість речовини, яка протікає через лічильник, визначається як різниця показань на початку і в кінці проміжку часу.

У суднових енергетичних установках для вимірювання витрати та кількості робочих тіл: палива, води та інших речовин – значного поширення набули витратоміри змінного перепаду тиску, витратоміри постійного перепаду тиску (ротаметри), тахометричні та об'ємні лічильники кількості тощо.

Лабораторна робота № 9

ГРАДУЮВАННЯ ВИТРАТОМІРА ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ЗІ ЗВУЖУЮЧИМ ЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Загальні відомості

Витратоміри змінного перепаду тиску широко використовуються у вимірювально-інформаційних системах суднових енергетичних установок для вимірювання витрати робочих тіл: повітря, води і т. д. У них перетворювачами витрати у перепад тиску служать звужуючі пристрої: діафрагми, сопла, витратомірні труби (сопла і труби Вентурі). Процеси у звужуючих пристроях мають загальну теоретичну основу.

Принципова схема витратоміра змінного перепаду тиску показана на рис. 9.1.

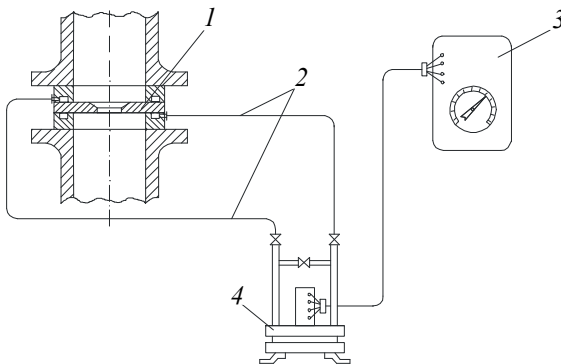


Рис. 9.1. Принципова схема витратоміра змінного перепаду тиску

Витратомір складається зі звужуючого пристрою 1, який розміщується в трубопроводі з метою місцевого стиснення потоку (первинний перетворювач), диференціального

манометра 4, призначеного для вимірювання різниці статичного тиску до і після звужуючого пристрою (вторинний прилад) і з'єднувальних ліній 2 (двох трубок). Показання диференціального манометра при дистанційній передачі реєструються приладом 3. Найпростішим пристроєм звуження є діафрагма. На рис. 9.2,*а* зображено ідеалізовану схему руху потоку, що протікає в трубопроводі 1 через звужуючий пристрій 2 (діафрагму), а також графіки розподілу тиску (рис. 9.2,*б*) і швидкості (рис. 9.2,*в*). Діафрагма 2 – це тонкий диск з центральним отвором, який концентрично розміщений у трубопроводі 1.

Наближаючись до діафрагми, швидкість потоку збільшується, і, відповідно, зменшується статичний тиск. Найбільше звуження потоку, внаслідок дії сил інерції, буде спостерігатися за діафрагмою, в перерізі II–II. Далі потік поступово розширюється до повного перерізу каналу. Перед діафрагмою і за нею утворюються вихрові зони. На рис. 9.2,*б* показано зміну статичного тиску біля стінок каналу. Внаслідок гальмування потоку перед діафрагмою виникає стрибок, де тиск p_1 більше за статичний тиск у спокійній частині трубопроводу p'_1 . Найменший статичний тиск спостерігається в перерізі II–II. По мірі розширення потоку тиск біля стінок зростає, але не досягає колишнього значення через втрати енергії на утворення вихорів. Різниця тиску δp називається безповоротною втратою тиску.

Перепад тиску $\Delta p = p_1 - p_2$ за відомих параметрів вимірюваного середовища безпосередньо визначається витратою через прилад.

Дія витратоміра змінного перепаду тиску полягає у наступному. Перепад тиску на пристрої, що звужується, 1 (див. рис. 9.1), обумовлений витратою середовища, передається по трубопроводах 2 диференціального манометра 4. Манометр містить параметричний перетворювач, в якому ви-

мірюється перепад тиску, що перетворюється на електричну величину. По сполучних проводах вона передається реєструвальному або показуючому пристрою 3. Виміряна пристроєм 3 електрична величина строго відповідає певній витраті середовища. За допомогою градуювання встановлюється залежність між витратою і результатами вимірювань пристроєм 3.

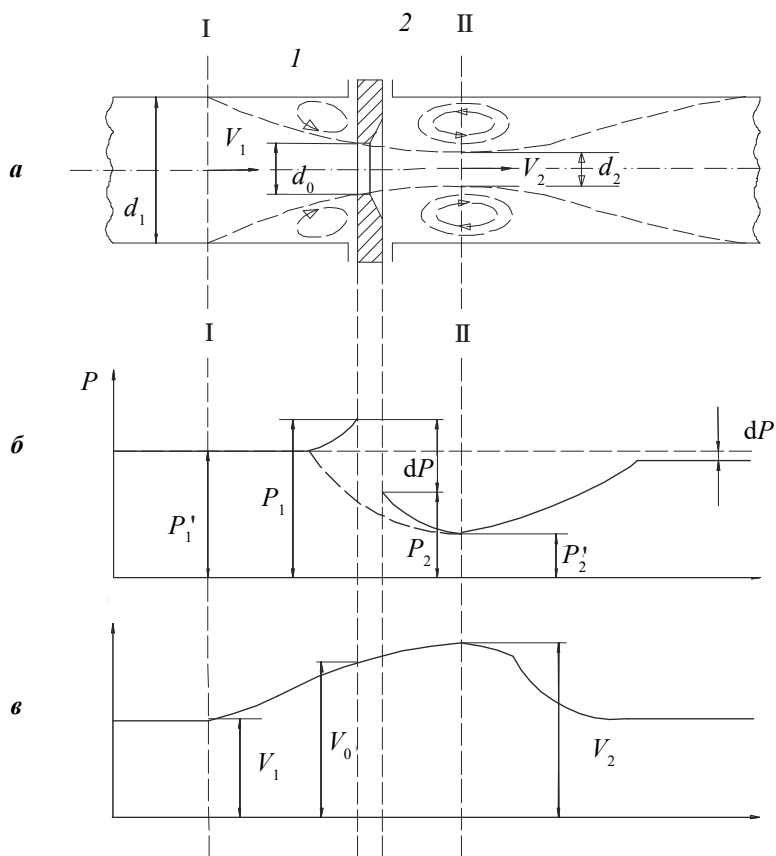


Рис. 9.2. Схема руху потоку через діафрагму

Теоретичні основи звужуючих пристроїв

Для горизонтального відрізка трубопроводу рівняння енергії потоку нестисливої рідини для перерізів I–I і II–II (рис. 9.2,а) має такий вигляд:

$$\frac{P'_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P'_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \xi \frac{v_2^2}{2}, \quad (9.1)$$

де P'_1 і P'_2 – абсолютні статичні тиски відповідно в перерізах I–I і II–II; v_1 і v_2 – швидкості потоку відповідно в перерізах I–I і II–II; ρ – густина рідини; ξ – коефіцієнт гідравлічних втрат; $\xi \frac{v_2^2}{2}$ – втрата енергії на тертя на відрізку I–I – II–II.

Відповідно до рівняння нерозривності маємо $v_1 S_1 = v_2 S_2$ (9.2), де S_1 і S_2 – площа поперечного перерізу потоку відповідно в перерізах I–I і II–II.

Введемо такі позначення:

$$\frac{S_0}{S_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} = m, \quad (9.3)$$

$$\frac{S_2}{S_0} = \frac{d_2^2}{d_0^2} = \mu, \quad (9.4)$$

де S_0 і d_0 – площа і діаметр отвору діафрагми; d_1 – внутрішній діаметр трубопроводу; m – модуль (відносна площа) звужуючого пристрою; d_2 – діаметр потоку в перерізі II–II; μ – коефіцієнт стиснення потоку.

З рівняння (9.2) і позначень (9.3) – (9.4) маємо:

$$v_1 = \mu m v_2. \quad (9.5)$$

Підставимо значення v_1 у рівняння (9.1) і визначимо швидкість потоку в місці найбільшого звуження:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\xi^2 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P'_1 - P'_2)}. \quad (9.6)$$

Зазвичай перепад тиску вимірюють не в перерізах I–I і II–II (тобто не $P'_1 - P'_2$), а безпосередньо до і після звужуючого пристрою, а саме $\Delta P = P_1 - P_2$. Співвідношення між цими перепадами визначається за допомогою поправочного коефіцієнта ψ , тобто

$$\sqrt{P'_1 - P'_2} = \psi \sqrt{P_1 - P_2}. \quad (9.7)$$

Тоді рівняння (9.6) запишеться так:

$$v_2 = \frac{\psi}{\sqrt{\xi - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (9.8)$$

Масова витрата рідини дорівнює:

$$G = v_2 S_2 \rho = v_2 \mu S_0 \rho. \quad (9.9)$$

Після підстановки v_2 з виразу (9.8) у (9.9) отримаємо:

$$G = \frac{\psi \mu}{\sqrt{\xi - m^2 \mu^2}} S_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)}. \quad (9.10)$$

Коефіцієнти μ і ψ не визначаються незалежно один від одного, тому їх об'єднують в один комплексний коефіцієнт α , який називають коефіцієнтом витрати:

$$\alpha = \frac{\psi \mu}{\sqrt{\xi - m^2 \mu^2}}. \quad (9.11)$$

Таким чином, з виразів (9.10) і (9.11), а також враховуючи, що $S_0 = \pi d_0^2/4$, отримаємо рівняння для масової G і об'ємної Q витрат нестисливої рідини:

$$G = \alpha \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \quad (9.12)$$

$$Q = \alpha \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}. \quad (9.13)$$

Якщо через звужуючий пристрій протікає стислива речовина (газ або пара), то внаслідок зниження тиску збільшується її об'єм. При цьому швидкість потоку зростає і стає більшою за швидкість нестисливої речовини. Внаслідок цього на звужуючому пристрої збільшується перепад тиску.

Для врахування цього явища у рівняння (9.12) і (9.13) вводять додатковий коефіцієнт $\varepsilon < 1$, який називають поправочним множником на розширення вимірюваної речовини.

Тоді рівняння для масової та об'ємної витрат стисливої рідини запишуться так:

$$G = c\alpha\varepsilon d_0^2 \sqrt{\rho_1(P_1 - P_2)}, \quad (9.14)$$

$$Q = c\alpha\varepsilon d_0^2 \sqrt{\frac{1}{\rho_1}(P_1 - P_2)}, \quad (9.15)$$

де $c = \frac{\pi}{4} \sqrt{2}$ – постійний коефіцієнт; ρ_1 – густина речовини в робочих умовах на вході до звужуючого пристрою, тобто при тиску P_1 і температурі T_1 перед звужуючим пристроєм.

Рівняння (9.14) і (9.15) можуть застосовуватися тільки за умови, що швидкість газу або пари менше критичної швидкості.

Коефіцієнт витрати залежить від типу звужуючого пристрою, модуля m і числа Рейнольдса. У загальному вигляді

$$\alpha = f(m, Re),$$

де $Re = v_1 D / \nu$ – число Рейнольдса, обчислене по діаметру; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Встановлено, що існує дві області залежності коефіцієнта витрати від числа Рейнольдса. Мінімальне значення числа Re , починаючи з якого коефіцієнт витрати при подальшому збільшенні Re не змінюється, називається граничним числом Рейнольдса Re_{gr} . При $Re > Re_{gr}$ коефіцієнт витрати залежить тільки від модуля, тобто значення α знаходиться відносно Re в автомобільній області. Граничні значення неоднакові для різних типів звужуючих пристроїв і значень модуля. Залежності для коефіцієнтів витрати встановлюються експериментальним шляхом.

Опис експериментальної установки

Схема установки для градування витратоміра наведена на рис. 9.3. Діафрагма встановлена на прямих ділянках напірного трубопроводу відцентрового насоса. Після діафрагми вода зливається в посудину, встановлену на платформних вагах. Масова витрата води змінюється клапаном і вимірюється зважуванням посудини, що заповнюється водою за певний проміжок часу. Час витікання води вимірюється секундоміром, а її температура – термометром.

Перепад тиску, створюваний діафрагмою, вимірюється мембранним диференціальним манометром з трансформаторним перетворювачем.

Примітка. Докладний опис установки наведено на стенді.

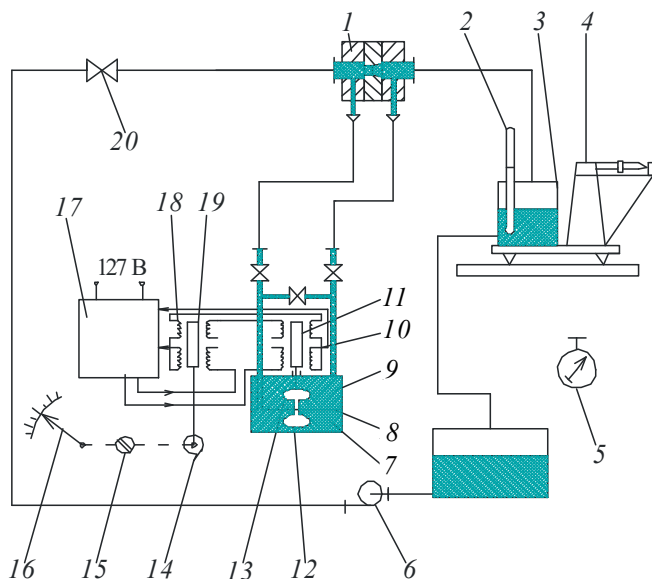


Рис. 9.3. Схема експериментальної установки:

1 – діафрагма; 2 – термометр; 3 – мірна ємність; 4 – ваги; 5 – секундомір;
6 – насос; 7, 9 – камери дифманометрів; 8 – діафрагма; 10, 18 – транс-
форматорні перетворювачі; 11, 19 – сердечники; 12, 13 – мембранні
коробки; 14 – профільований диск; 15 – реверсивний електродвигун;
16 – показник приладу; 17 – підсилювач

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися зі схемою експериментальної установки, інструкцією та правилами користування приладами.

2. За диференціальним манометром встановити витрату води, при якій похибка вимірювання перепаду тиску не перевищує 5 %, тобто $\Delta p = \frac{100}{5} \Delta(\Delta p)$, де $\Delta(\Delta p)$ – абсолютна похибка диференціального манометра.

На цьому режимі (найменшої витрати) три рази виміряти витрату і перепад тиску.

3. Дослід повторити для наступних п'яти режимів, охоплюючи весь діапазон зміни перепаду тиску на дифманометрі.

Обробка результатів вимірювань

1. За дослідними даними визначити для кожного вимірювання масову витрату води і знайти середнє значення витрати і перепаду тиску, тобто за формулами

$$\Delta M_{\text{cp}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{V_{mi}}{\tau_i}, \quad (9.16)$$

$$\Delta p_{\text{cp}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 p_i. \quad (9.17)$$

2. Емпіричну залежність масової витрати від перепаду тиску на діафрагмі зручно представити у вигляді степеневої функції $M = c \Delta p^n$.

Сталу c і показник ступеня n цієї формули знаходити графічним шляхом. Для побудови графіка результати дослідження необхідно представити у логарифмічних координатах.

3. Для побудови графічної залежності коефіцієнта витрати від числа Рейнольдса потрібно, використовуючи вираз (9.13), обчислити в кожному досліді значення α .

Середню швидкість води і число Рейнольдса слід визначати за формулами $v_{\text{cp}} = 4M_{\text{cp}} / (\pi D^2 \rho)$ і $\text{Re} = v_{\text{cp}} D / \nu$, де D – діаметр трубопроводу, м; ρ – щільність води, кг/м³; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис і принципову схему установки;
- 2) таблиці даних про прилади, результати вимірювань і обробки дослідних даних;
- 3) графіки $\lg M = f(\lg \Delta p)$ і $\alpha = f(\text{Re})$;
- 4) емпіричну формулу для діафрагми;
- 5) оцінку точності вимірювання витрати.

Контрольні питання

1. Чому перепад статичного тиску на діафрагмі однозначно визначається витратою нестисливої рідини?
2. Як змінюється статичний тиск на внутрішній поверхні трубопроводу за наявності в ньому діафрагми?
3. Назвіть інші типи звужуючих пристроїв та їх характеристики.
4. Якими приладами вимірюється перепад тиску на діафрагмі?
5. Коефіцієнт витрати і характер його залежності від числа Рейнольдса і модуля звужуючого пристрою.
6. Вкажіть величини, що належать до прямих і непрямих вимірів.
7. Чому нормальні діафрагми встановлюються на прямих ділянках?
8. Які переваги мають емпіричні формули порівняно з іншими методами подання результатів вимірювань?
9. Безповоротна втрата тиску і фактори, що її зумовлюють.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Протокол експериментальних даних лабораторної роботи № 9

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер дослі- ду	Перепад тиску Δp_i , Па	Маса води V_m , кг	Час ви- тікання τ_i , с	Ви- трата води M_i , кг/с	Середній перепад тиску		Середня витрата	
					Δp_{cp}	$\lg p_{cp}$	M_{cp}	$\lg M_{cp}$
1	а							
	б							
	в							
2	а							
	б							
	в							
3	а							
	б							
	в							
4	а							
	б							
	в							
5	а							
	б							
	в							

Підпис викладача _____

Дата _____

Лабораторна робота № 10

ГРАДУЮВАННЯ ВИТРАТОМІРА ПОСТІЙНОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ І ТАХОМЕТРИЧНОГО ЛІЧИЛЬНИКА КІЛЬКОСТІ

Загальні відомості

Ротаметри. Дія витратомірів постійного перепаду тиску (ротаметрів) ґрунтується на змінюванні прохідного перерізу пропорційно витраті речовини.

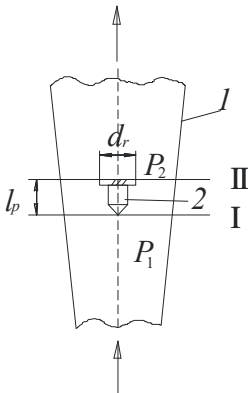


Рис. 10.1. Ротаметр

Ротаметр (рис. 10.1) складається з вертикальної конусної скляної або металевий трубки 1, всередині якої розміщується чутливий елемент (ротор) 2. Для забезпечення стійкої роботи ротора його верхній обід має гвинтові пази.

Речовина (рідини́на або газ), яка рухається через ці пази, обертає ротор. Внаслідок цього ротор центрується на осі трубки і не стикається зі стінками.

Ротор утворює в трубці звуження, де створюється перепад тиску, причому тиск над ротором P_2 менший за тиск під ним P_1 . У результаті виникає підйомна сила, рівна добутку перепаду тиску на площу поперечного перерізу ротора. Сили, що діють на ротор, врівноважуються його вагою. Зі збільшенням витрат перепад тиску збільшується, сили, що діють на ротор, перевищують його вагу і він переміщається вгору. При цьому збільшується прохідний перетин кільцевого зазору між ротором і стінкою конічної трубки, а отже, зменшується до колишньої величини значення перепаду тиску, і знову відновлюється рівновага ваги ротора і сил, що діють на

нього з боку потоку. Зі зменшенням витрат ротор переміщається вниз. Таким чином, при незмінних параметрах середовища (густини, в'язкості) положення ротора в конічній трубці визначається величиною витрати.

У верхній частині ротора виконані скісні прорізи. Завдяки цьому ротору потоком надається обертальний рух і він утримується в центрі, не торкаючись стінок трубки. При цьому чутливість приладу зростає і ротор переміщається навіть при незначній зміні витрати.

Ротаметри випускаються зі скляною і металевою трубкою. На поверхні скляної трубки нанесена рівномірна шкала, що має 100 поділок, градуйована у відносних одиницях. Показчиком відліку по шкалі служить верхній обріз ротора, добре видимого через скло. Ротаметри з металевою трубкою випускаються з дистанційною передачею електричних показань положення ротора.

Тахометричні лічильники кількості складаються з тахометричного перетворювача витрати і лічильного підсумовуючого механізму. За принципом дії вони поділяються на швидкісні і камерні. У швидкісних лічильниках тахометричними перетворювачами витрати є турбінки (вертушки), які обертаються під дією потоку рідини. Камерні лічильники мають один або декілька рухомих елементів, які при обертанні відсікають певні об'єми рідини (газу).

Дія швидкісних лічильників кількості ґрунтується на лінійній залежності частоти обертання n турбінки від швидкості рідини v , тобто

$$n = kv, \quad (10.1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Кількість речовини, що проходить через переріз S за певний проміжок часу Δt , дорівнює:

$$V = vS\Delta t \quad \text{і} \quad V_m = \rho vS\Delta t. \quad (10.2)$$

При постійних k , ρ , S і $\Delta\tau$ кількість речовини визначається тільки частотою обертання турбінки, тобто

$$V = Kn \quad \text{і} \quad V_m = K_m n, \quad (10.3)$$

де $K = \frac{S\Delta\tau}{k}$ і $K_m = \frac{\rho S\Delta\tau}{k}$ – коефіцієнти пропорційності приладу.

Тахометричні швидкісні лічильники кількості у залежності від розміщення турбінок відносно напрямку потоку поділяють на тангенціальні й аксіальні. У тангенціальних лічильниках вісь турбінки перпендикулярна напрямку потоку, а в аксіальних збігається з ним. У лічильниках з тангенціальними турбінками є потоковипрямляч 1 (рис. 10.2). Потік речовини тангенціально надходить на турбінку 2, обертання якої передається лічильному механізму.

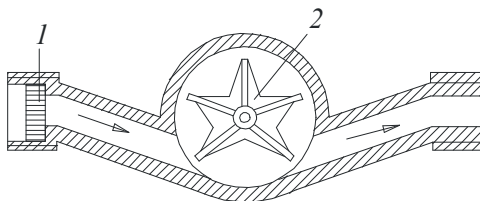


Рис. 10.2. Лічильник кількості з тангенціальною турбіною

В аксіальних турбінках 2 (рис. 10.3) лопаті мають гвинтову форму. Турбінка через черв'ячну передачу 3 обертає вал 5, який механічно зв'язаний з лічильним механізмом 6. Вал турбінки розміщений в опорах 1 і 4, які виконують одночасно роль обтічників.

Механічний лічильний механізм підсумовує кількість обертів турбінки. Шкала механізму проградуйована в одиницях об'єму (м^3). Передача обертання лічильному механізму

здійснюється контактними (рис. 10.2, 10.3) і неконтактними методами за допомогою магнітних півмуфт. Одна півмуфта приєднана до вала передачі і розміщена в потоці рідини, а друга півмуфта відокремлена діамагнітною перегородкою і зв'язана з лічильним механізмом.

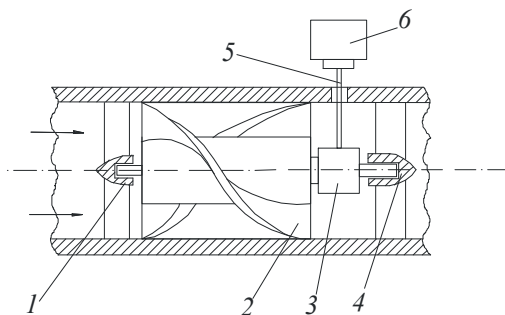


Рис. 10.3. Лічильник кількості з аксіальною турбінкою

Тахометричні витратоміри з лічильником характеризуються високою точністю і мають великий діапазон вимірювань.

Швидкісні лічильники з механічним лічильним механізмом застосовуються для вимірювання витрати води. Основна похибка швидкісних лічильників дорівнює 2 % при вимірюванні витрати в діапазоні 10...150 % від номінальної і 5 % – при менших витратах. Лічильники з тангенціальною турбінкою вимірюють кількість води при витратах від 1 до 10 м³/год, а з аксіальною турбінкою – від 10 до 100 м³/год.

Опис експериментальної установки

Схема установки наведена на рис. 10.4. Ротаметри і тахометричний лічильник розташовані на прямих ділянках напірної магістралі насоса. Вода надходить у посудину, встановлену на вагах. Масова витрата води через ротаметри і лічильник

змінюється клапанами і вимірюється зважуванням посудини, що заповнюється водою за певний проміжок часу. Час витікання води вимірюється секундоміром.

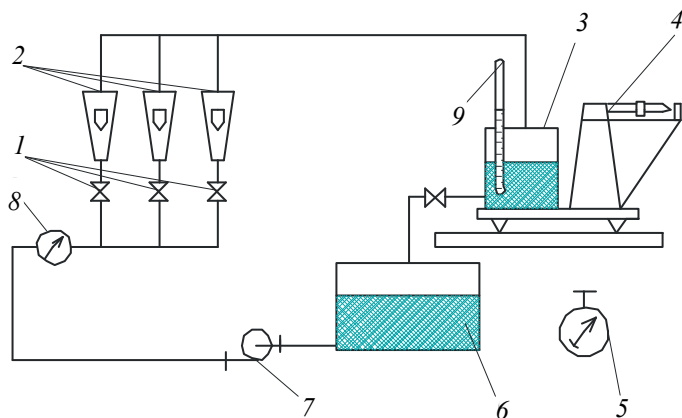


Рис. 10.4. Схема експериментальної установки:
1 – регулюючий клапан; 2 – ротаметр; 3 – мірна посудина; 4 – ваги;
5 – секундомір; 6 – запасна ємність; 7 – насос; 8 – тахометричний
лічильник кількості; 9 – термометр скляний

Після проведення дослідів вода з посудини зливається в запасну ємність. Установка дозволяє виконувати градування трьох ротаметрів з різними діапазонами витрати.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися зі схемою експериментальної установки, конструкцією та правилами користування приладами.
2. Встановити найменшу витрату води. На цьому режимі виміряти три рази витрату і зняти показання ротаметра і швидкісного лічильника.
3. Дослід повторити для наступних п'яти режимів, охоплюючи весь діапазон шкали ротаметра.

Обробка експериментальних даних

1. За дослідними даними визначити для кожного вимірювання масову витрату води і знайти середнє значення витрати:

$$\Delta M_{\text{cp}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{M_i}{\tau_i}, \quad (10.4)$$

2. Знайти середнє значення показань ротаметра в кожному досліді:

$$n_{\text{cp}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{n_i}{\tau_i}, \quad (10.5)$$

3. Визначити для кожного досліді кількість води, що протікає через швидкісний лічильник:

$$\Delta k = k_1 - k_2. \quad (10.6)$$

4. Побудувати графічні залежності: для ротаметра $M=f(n)$ і для лічильника $V_m=f(\Delta k)$.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи і принципову схему установки;
- 2) таблиці даних про прилади, результати вимірювань і обробки дослідних даних;
- 3) графіки залежностей $M=f(n_{\text{cp}})$ і $V_m=f(\Delta k)$ та емпіричні формули, що описують їх;
- 4) оцінку точності вимірювання витрати [4, С. 27–29].

Контрольні питання

1. Чому ротаметри називають витратомірами постійного перепаду тиску?
2. Які переваги і недоліки ротаметрів?
3. Як можна змінити межі вимірювання ротаметра?
4. Який принцип дії швидкісних лічильників кількості?
5. Чому існують обмеження за мінімальною витратою у швидкісних лічильниках кількості?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

***Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 10***

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер дос- ліду		Показання швидкісного лічильника, м ³			Показан- ня рота- метра, діл.		Витра- та води		Тем- пература води, °С	Густи- на, кг/м ³	Маса води, кг	Час виті- кання τ_i , с
		початкові k_1	кінцеві k_2	різниця Δk	n_i	середнє	M_i	середнє				
1	а б в											
2	а б в											
3	а б в											
4	а б в											
5	а б в											

Підпис викладача _____

Дата _____

Розділ IV. ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ

Особливе місце на суднах займають рідкі вантажі: паливо, масло, вода (поживна, питна, технічна) тощо. Кількість цих вантажів визначає доцільну швидкість та відстань, яку зможе пройти судно, норми витрати води та ін. На суднах використовуються різні пристрої для вимірювання кількості рідини за рівнем у відомому об'ємі (цистерни) і для безперервного контролю рівня рідких середовищ. Контроль і регулювання рівня у ряді випадків забезпечують безаварійну роботу найважливіших елементів суднової енергетичної установки. Наприклад, перевищення рівня води у паровому колекторі котла більше за допустиме може призвести до скидання води в пароперегрівач і навіть у турбіну, зниження рівня може порушити природну циркуляцію.

Вимірювачі рівня можуть бути поділені на дві характерні групи: прилади для безпосереднього виміру (наприклад, водомірні стекла) і прилади непрямого виміру, в яких рівень води визначається за перепадом тиску, електропровідності та інше.

Вимірювачі рівня можуть бути як місцевими, так і дистанційними.

Основні вимоги, що висуваються до суднових рівнемірів:

1. Відносна похибка вимірювання рівня повинна лежати у межах від +1 до +4 %. Найбільшу точність повинні забезпечувати рівнеміри для таких рідин, як паливо і масло.

2. Конструкції датчиків і кріплення повинні надійно забезпечувати їх повну герметичність.

3. Датчики, розташовані у пожежо- і вибухонебезпечних рідинах, мають бути вибухобезпечними та задовольняти Правилам виготовлення вибухозахищеного електрообладнання.

Лабораторна робота № 11

ПОВІРКА ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОКАЖЧИКА РІВНЯ РІДИНИ ТИПУ УУЖЕК

Загальні відомості

Для дистанційного вимірювання рівня рідкого палива, масла, запасів води в суднових цистернах застосовуються прилади типу УУЖЕК (показчик рівня рідини електричний корабельний).

У цих приладах для вимірювання рівня використовуюється гідростатичний тиск стовпа вимірюваної рідини, тобто $p = \rho gh$, де ρ – густина рідини; g – прискорення сили тяжіння; h – рівень рідини.

Схема рівнеміра типу УУЖЕК показана на рис. 11.1. Прилад складається з двох основних елементів: мембранного датчика 2 і логометра 5. У герметичному корпусі датчика закріплена мембрана 7, на яку знизу діє гідростатичний тиск стовпа рідини. Порожнина над мембраною за допомогою трубки 6 сполучається з простором над рідиною; цим зменшується похибка приладу. Під дією гідростатичного тиску мембрана прогинається; її прогин передається за допомогою штока 3 і передавального пристрою на рухомий контакт (движок) потенціометра 4. Переміщення движка змінює опір R_1 і R_2 у паралельних електричних колах логометра.

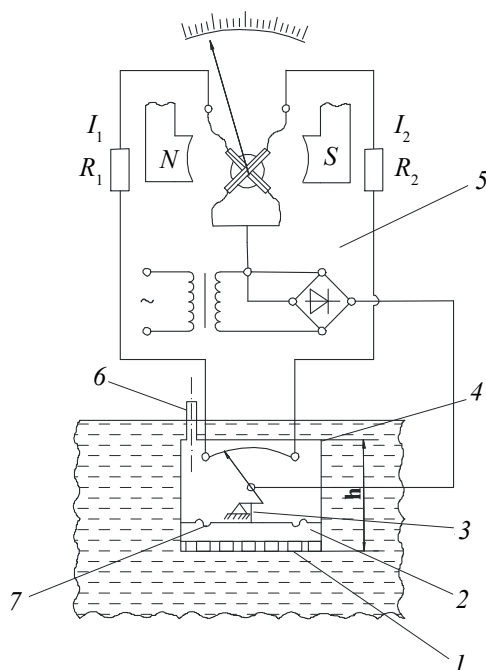


Рис. 11.1. Схема УУЖЕК

Співвідношення сил струмів I_1 і I_2 , яке вимірюється логометром, пропорційне прогину мембрани і, відповідно, гідростатичному тиску стовпа рідини. Шкала логометра відградується у метрах водяного стовпа. Докладний опис принципу дії логометра наведено у розділі III.

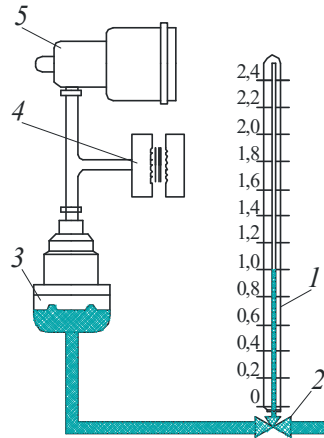
Від механічних пошкоджень мембрану захищає решітка 1.

Рівнеміри типу УУЖЕК призначені для вимірювання рівня води, рідкого палива, масла та інших неагресивних рідин. Похибка вимірювання рівня приладами типу УУЖЕК-56 не перевищує 5 %, УУЖЕК-60 і УУЖЕК-63І – 4 %. Діапазон вимірювань складає від 0...2 м до 0...10 м. У рівнемірах типу УУЖЕК-63І до одного датчика можуть приєднуватися декілька логометрів. Ресурс приладів типу УУЖЕК складає 10000 годин.

Опис експериментальної установки

Установка (рис. 11.2) складається з водяного манометра, зливного клапана, датчика, трансформатора і логометра. Водяний манометр висотою 3 м від вимірювальної мембрани датчика заповнюється водою з міського водопроводу.

Рис. 11.2. Схема установки для перевірки УУЖЕК:
1 – водяний манометр;
2 – зливний клапан; 3 – датчик;
4 – трансформатор; 5 – логометр



Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою експериментальної установки, конструкцією та правилами користування приладами.
 2. Перевірити правильність складання електричної схеми. Щоб уникнути постійної (систематичної) помилки, необхідно перед вимірами перевірити збіг площини відліку манометра (нульової лінії) з площиною мембрани.
 3. Заповнити водою манометр.
 4. Провести вимірювання тиску і зняти показання приладу.
- Зміну тиску здійснювати при заповненні та зливі води з манометра приблизно через кожні 0,2 м.

5. Порівняти показання приладу з результатами вимірювання діючого на мембрану тиску за допомогою водяного манометра.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) схему установки і приладу;
- 3) таблиці вимірів та дані про прилади;
- 4) графічну залежність показань приладу від дійсного тиску;
- 5) визначення похибок повірки [4, С. 15–17];
- 6) висновок за результатами повірки.

Контрольні питання

1. Значення і мета вимірювання рівня рідини на судні.
2. Назвіть основні групи рівнемірів і принцип їх дії.
3. Який принцип роботи УУЖЕК та його основні складові?
4. За яким принципом працює логометр?
5. Чим відрізняється логометр від мілівольтметра?
6. Як утворюється відновлювальний момент логометра?
7. Які основні типи помилок зустрічаються при вимірюваннях?
8. З якою метою внутрішня порожнина датчика з'єднана з атмосферою?

**Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 11**

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Но- мер дос- ліду	Показання водяного манометра, м	Показання УУЖЕК, м вод. ст.	Зміщення датчику мембрани, мм	Дійсний тиск, м вод. ст.	Похибка вимірювання тиску	
					абсолютна, м вод. ст.	відносна, %
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Підпис викладача _____

Дата _____

Розділ V. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ

Частота обертання є важливою експлуатаційною характеристикою режиму роботи суднової енергетичної установки. За виміряною частотою обертання визначається потужність головних двигунів, швидкість судна та ін.

Для визначення частоти обертання застосовуються підсумовуючі лічильники обертів і тахометри. Підсумовуючі лічильники обертів вимірюють кількість обертів за певний проміжок часу, а тахометри – миттєву частоту обертання. За принципом дії тахометри поділяються на відцентрові, електричні, магнітні та стробоскопічні.

Лабораторна робота № 12

ПОВІРКА ВІДЦЕНТРОВОГО ТАХОМЕТРА

Загальні відомості

Дія відцентрового тахометра заснована на використанні відцентрової сили, що виникає при обертанні тіла. Відцентрова сила пропорційна квадрату кутової швидкості. Дія механічних відцентрових тахометрів ґрунтується на використанні відцентрової сили F , яка виникає в масивному тілі при його обертанні:

$$F = mr\omega^2, \quad (12.1)$$

де m – маса обертового тіла; r – відстань від центра тяжіння тіла до осі його обертання; ω – кутова швидкість.

Залежність відцентрової сили від кутової швидкості нелінійна (квадратична) і тому механічні відцентрові тахометри мають нерівномірну шкалу.

Конструктивно механічні тахометри поділяють на переносні і стаціонарні. Переносні тахометри, наприклад тахометри ІО-10, мають діапазон вимірювань від 25 до 10000 об/хв. Тахометр має шестеренчастий редуктор зі змінним передаточним відношенням, що дозволяє мати один діапазон частоти обертання на всіх границях вимірювання: 25–100, 72–300, 250–3000, 2500–10000 об/хв.

Стаціонарні відцентрові тахометри, наприклад тахометр типу ТС-200, мають діапазон вимірювань частоти обертання від 50 до 10000 об/хв. Змінювання діапазонів вимірювань досягається через відповідний підбір змінних шестерень. Чутливий елемент тахометра утворюють чотири тягарці (рис. 12.1). При обертанні валика 6 тягарці 1, закріплені на хрестовині 2, переміщуються внаслідок дії відцентрової сили так, як показано стрілками. Переміщення тягарців передається тягами 3 муфти 5. Зворотно-поступальний рух муфти за допомогою передаточного зубчастого механізму 4 передається стрілці приладу.

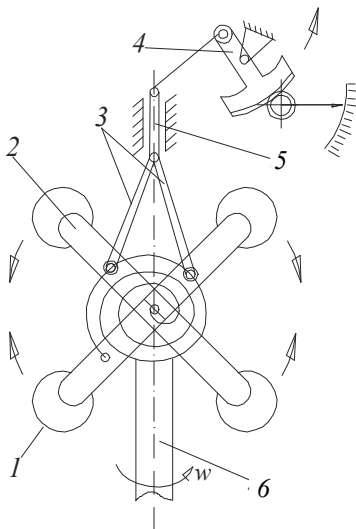


Рис. 12.1. Відцентровий тахометр з чотирма тягарцями

Загальним недоліком механічних відцентрових тахометрів є наявність тертьових механічних деталей: підшипників, шарнірів, зубчастих передач. При роботі тахометрів ці деталі спрацьовуються, а нещільності у з'єднаннях, що при цьому утворюються, збільшують похибки вимірювання частоти обертання.

Механічні тахометри мають нерівномірну шкалу; їх показання не залежать від напрямку обертання. Похибки контрольних тахометрів складають 0,5...1,0 %, а робочих – 1,0...8,0 %. Джерелами похибок є нестабільність властивостей пружин, вплив температури на в'язкість мастила, на модуль пружності пружин та розміри елементів передаточного механізму тощо.

Магнітоіндукційні тахометри. Дія магнітоіндукційних тахометрів ґрунтується на взаємодії магнітного поля, що обертається зі швидкістю, пропорційною вимірюваній частоті обертання, з полем вихрових струмів, які наводяться в чутливому елементі. Принципова схема магнітоіндукційного тахометра показана на рис. 12.2.

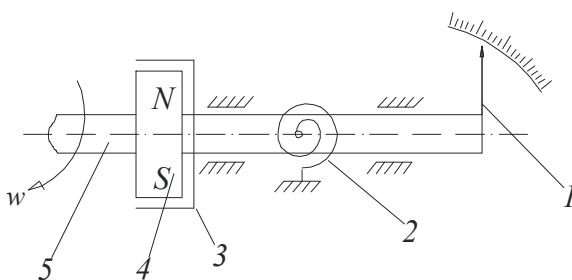


Рис. 12.2. Схема магнітоіндукційного тахометра

На валу 5 закріплений постійний магніт 4, розміщений у стакані 3 з немагнітного матеріалу з високою електропровідністю (алюмінію, міді). При обертанні вала в матеріалі стакана наводиться електрорушійна сила і виникають вихрові

струми, що проходять по замкнених контурах, які проходять над полюсами магніту. Внаслідок взаємодії магнітних полів стакан починає обертатися в одному напрямку з постійним магнітом. Вісь, на якій закріплений стакан і стрілка 1, утримується спіральною пружиною 2. При повороті осі пружина закручується і утворює протидіючий момент, пропорційний куту закручування $M_1 = k_1 \phi$, де k_1 – коефіцієнт пропорційності.

Стакан повернеться у напрямку обертання постійного магніту на такий кут, за якого протидіючий момент зрівноважує обертовий момент, що виникає при взаємодії магніт-

них полів. Обертовий момент $M_2 = k_2 n$, де $k_2 = \frac{2\pi B^2 l^2 D^2 P}{R}$;

B – магнітна індукція, l і D – довжина полюса і діаметр магніту, P – кількість пар полюсів магніту, R – опір замкненого контуру, який залежить від геометрії і властивостей матеріалу стакана, пропорційний частоті обертання вала n .

Таким чином, кут повороту стрілки пропорційний частоті обертання вала, тому шкала магнітоіндукційного тахометра рівномірна.

Розглянутий магнітоіндукційний тахометр не забезпечує дистанційне вимірювання частоти обертання і передачу показань одночасно на декілька постів.

Дія дистанційних магнітоіндукційних тахометрів полягає у передаванні частоти обертання за допомогою датчика – синхронного генератора від вала механізму до вимірювача – вторинного магнітоіндукційного приладу, який складається з синхронного двигуна і магнітоіндукційного вимірювального вузла зі стрілкою. У цих тахометрах застосовуються передачі типу "електричний вал".

Принципова схема дистанційного магнітоіндукційного тахометра показана на рис. 12.3.

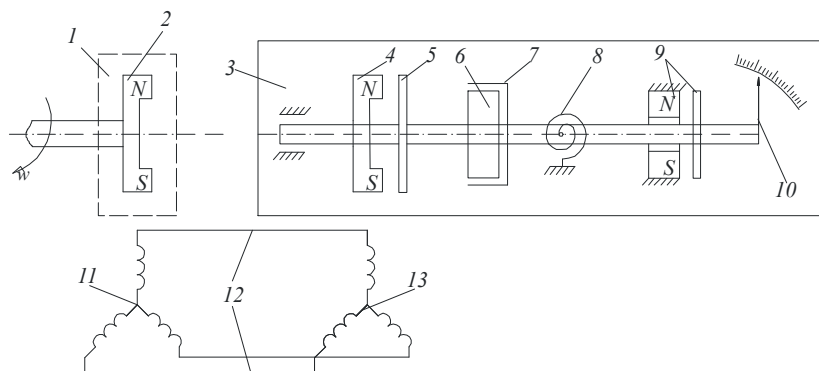


Рис.12.3. Схема дистанційного магнітоіндукційного тахометра

Тахометр складається з датчика 1 і вимірювача 3. Датчик – трифазний синхронний генератор з ротором 2 – приєднується до вала механізму, частота обертання якого вимірюється. В його статорній обмотці 11 виникає ЕРС, частота якої пропорційна частоті обертання вала. Статорні обмотки 11 генератора й обмотки 13 синхронного двигуна з'єднані проводами 12, внаслідок чого вимірювач 3 може розміщуватися на значній відстані від датчика 1 і до одного датчика можуть приєднуватися декілька вимірювачів.

До ротора 4 електродвигуна приєднані гістерезисний диск 5 і постійний магніт 6 вимірювача. У статорній обмотці електродвигуна утворюється трифазне обертове магнітне поле, швидкість обертання якого дорівнює швидкості обертання генератора. Гістерезисний диск 5 використовується для асинхронного запуску синхронного двигуна при малій частоті обертання магнітного поля статора і при переході з однієї частоти обертання до іншої, утворюючи асинхронний обертовий момент (асинхронний режим роботи). Коли частота обертання ротора електродвигуна збігається з частотою обертання поля статора, настає синхронний режим роботи. При

цьому асинхронний обертовий момент зменшується до нуля, а синхронний момент, який утворюється магнітом 4, досягає максимального значення, тому що індукція і магнітний потік збільшуються.

Вимірювальна частина тахометра складається з постійного магніта, прикріпленого до вала синхронного електродвигуна, стакану або диска 7 з алюмінію або марганцевої міді і вимірювальної протидіючої пружини 8. На валу стакану розміщується демпфер 9 і стрілка 10. Демпфер 9 застосовується з метою усунення коливань стрілки і являє собою магнітний вузол, в якому поле вихрових струмів рухомого диска взаємодіє з полем нерухомого магніту.

Магнітоіндукційні тахометри дозволяють вимірювати частоту обертання до 15000 об/хв (ТЕ-207). Цим тахометрам властива температурна похибка, що виникає внаслідок змінювання питомого електричного опору матеріалу стакану, модуля пружності вимірювальної протидіючої пружини і магнітної індукції.

Опис експериментальної установки

Основними елементами установки для повірки відцентрового тахометра методом порівняння (рис. 12.4) є електродвигун постійного струму, відцентровий тахометр, що підлягає повірці, і контрольний магнітоіндукційний тахометр. Живлення електродвигуна здійснюється від мережі змінного струму через напівпровідниковий випрямляч. Режим роботи електродвигуна визначається за показаннями вольтметра і амперметра. Частота обертання ротора електродвигуна плавно змінюється за допомогою лабораторного автотрансформатора.

Відцентровий тахометр приєднується до вала електродвигуна за допомогою гнучкого валика. Інший кінець вала

електродвигуна з'єднується з ротором датчика магнітоіндукційного тахометра. При обертанні ротора електродвигуна створюються однакові умови роботи чутливих елементів порівненого і контрольного тахометрів.

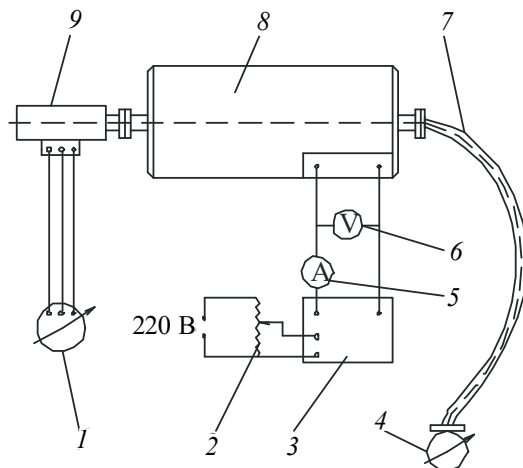


Рис. 12.4. Схема установки для перевірки тахометра методом порівняння:

1 і 4 – магнітоіндукційний і відцентровий тахометри; 2 – автотрансформатор; 3 – випрямляч; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – гнучкий вал; 8 – електродвигун; 9 – датчик

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією та правилами користування приладами.
2. Після отримання дозволу викладача або лаборанта включити електродвигун.

3. Виконати перевірку відцентрового тахометра, порівнюючи його показання з показаннями магнітоіндукційного тахометра в усіх оцифрованих позначках шкали. Порівняння

показань тахометрів виконати при підвищенні частоти обертання до верхньої межі вимірювання тахометра, що повіряється, і при подальшому зниженні частоти обертання, на однакових позначках шкали контрольного тахометра.

4. Порівняти отримані результати з основною допустимою похибкою приладу і дати висновок про придатність тахометра, що повіряється.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) принципову схему установки;
- 3) результати вимірів та дані про прилади;
- 4) аналіз результатів і висновок про придатність повіреного тахометра.

Контрольні питання

1. Якими приладами вимірюється частота обертання?
2. Будова і принцип дії відцентрових тахометрів.
3. Будова і принцип дії магнітоіндукційних тахометрів.
4. Якими методами повіряються тахометри?
5. Що таке клас точності?

**Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 12**

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Но- мер дослі- ду	Пока- зання магніт- ного тахометра n_m , об/хв	Показання відцентрового тахометра n_v , об/хв		Похибка відцентро- вого тахометра при повірці, $n_m - n_v$, об/хв	Відносна похибка $\delta = (n_m - n_v) \times$ $\times 100 \% / n_{гр}$
		при підви- щенні частоти обертання	при зниженні частоти обертання		
1					$n_{гр}$ – верхня межа тахо- метра, що повіряється
2					
3					
4					
5					

Підпис викладача _____

Дата _____

Розділ VI. ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ ГАЗІВ

Метою вимірювання складу газів є визначення енергетичної ефективності роботи енергетичного устаткування (двигунів, котлів), а також оцінювання ступеня забруднення навколишнього середовища (екологічні показники). За результатами вимірювань оцінюють повноту згоряння палива, визначають коефіцієнт надлишку повітря, токсичність газів тощо, а також визначають безпечність знаходження обслуговуючого персоналу біля устаткування.

Відпрацьовані гази теплових двигунів і котлів – це багатокomпонентна суміш, яка вміщує кисень, оксиди вуглецю, водяну пару, кислотоутворюючі оксиди тощо. У більшості випадків завдання газового аналізу полягає у вимірюванні концентрації якого-небудь одного компонента складної газової суміші. Такий аналіз можливий лише тоді, коли газ, концентрація якого підлягає вимірюванню, відрізняється від інших газів суміші хоча б одним фізико-хімічним параметром, який можна виміряти. Чим більше відрізняється фізико-хімічна властивість вимірюваного газу, тим точніше і чутливіше буде метод вимірювання його концентрації.

Прилади для вимірювання концентрації компонентів у газовій суміші називаються газоаналізаторами. Вони поділяються на автоматичні і неавтоматичні, стаціонарні і переносні. За принципом дії газоаналізатори поділяють на механічні, теплові, магнітні, оптичні тощо.

Лабораторна робота № 13

ПОВІРКА ГАЗОАНАЛІЗАТОРА

Загальні відомості

Для вимірювання концентрацій небезпечних речовин (отруйних та вибухонебезпечних) у робочій зоні машинних відділень СЕУ та устаткування стаціонарних об'єктів енергетики промисловістю випускається широкий спектр газоаналізаторів.

Структурна схема будь-якого газоаналітичного пристрою включає в себе (рис. 13.1):

- пристрій пробопідготовки ПП;
- вимірювальний перетворювач (камери) ВК;
- пристрій обробки інформації ПОІ;
- вихідний прилад ВП.

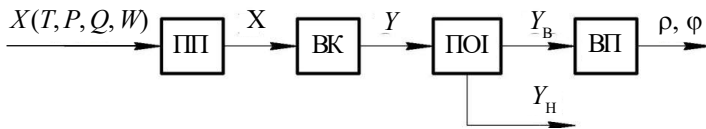


Рис. 13.1. Структурна схема газоаналітичного пристрою (газоаналізатора)

Пристрої пробопідготовки призначені для забору, транспортування, очищення, осушення, прокачування аналізованої суміші через вимірювальні камери ВК, а також стабілізації (за необхідності) її температури T , тиску P , витрати Q , споживаної потужності W та інших параметрів. Вимірювальні перетворювачі здійснюють перетворення параметрів, які характеризують стан газу, на електричний, пневматичний (або інший вид) інформаційний сигнал. Пристрій обробки інформації обробляє сигнал, що надходить з ВК, виділяючи потрібну

інформацію в аналоговому Y_B або цифровому Y_H вигляді. Вихідний прилад подає отриману у ПОІ інформацію в зручному для використання вигляді (наприклад, у вигляді масової концентрації ρ або об'ємної частки ϕ компоненти аналізованої суміші).

Вимірювальні перетворювачі (ВК), що використовуються у сучасних газоаналізаторах, характеризуються наступними технічними та економічними показниками:

- великими коефіцієнтами перетворення (чутливістю);
- поширеними градувальними характеристиками;
- стабільністю вимірювального перетворювача (незмінність у часі);
- вибірковістю (здатністю видавати сигнал на його виході, пропорційний тільки вмісту обумовленого компонента в газовій суміші);
- надійністю (властивість виконувати задані функції при збереженні своїх експлуатаційних показників у заданих межах протягом необхідного проміжку часу);
- високими метрологічними характеристиками.

У залежності від виду газу, що вимірюється, в газоаналізаторах застосовують вимірювальні перетворювачі, засновані на різних методах вимірювання (оптичні, колометричні, хроматографічні, термохімічні методи та ін.).

Дія *термохімічних газоаналізаторів* ґрунтується на вимірюванні теплового ефекту реакції каталітичного окислення (горіння) визначуваного компонента газової суміші. Ці прилади застосовують для визначення концентрації CO , H_2 , O_2 , NH_3 , CH_4 . Сигналом вимірювальної інформації в термохімічних газоаналізаторах є температура, значення якої залежить від теплового ефекту хімічної реакції. На рис. 13.2 показана схема термохімічного газоаналізатора, в якому використовується тепловий ефект реакції окиснення газів на каталітично

активній поверхні. Змінювання температури при такому окисненні (горінні) визначається залежністю

$$\Delta t = \varphi Q_H C, \quad (13.1)$$

де φ – постійний коефіцієнт, який залежить від природи визначуваного компонента і конструктивних параметрів чутливого елемента аналізатора; Q_H – нижча питома об'ємна теплота згоряння компонента; C – об'ємна концентрація визначуваного компонента.

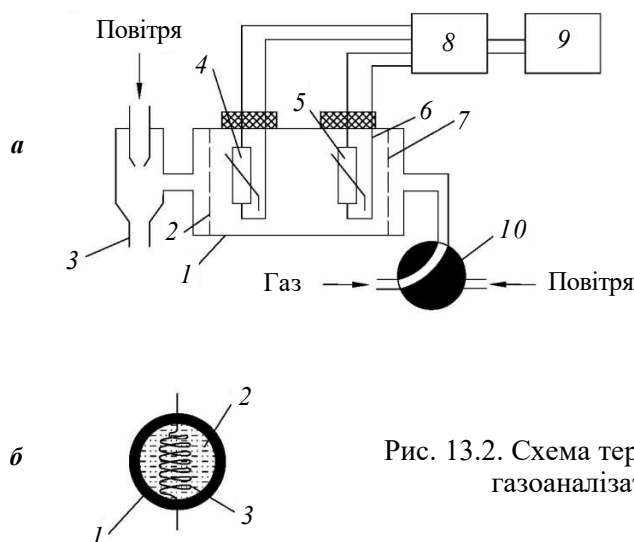


Рис. 13.2. Схема термохімічного газоаналізатора

У термохімічному газоаналізаторі газ за допомогою повітряного ежектора (струминного насоса) 3 проходить через кран 10 і камеру 1, в якій розміщені вибухозахисні сітки 2 і 7, вимірювальний 4 і порівняльний 5 чутливі елементи. Порівняльний чутливий елемент закритий ковпачком 6 і призначений для усунення впливу змінювання температури на

сигнал газоаналізатора. Чутливі елементи – це платинові дрітки з активованою поверхнею (пелістори). Пелістор (див. рис. 13.2,*б*) – це платиновий дріт з діаметром 0,3...0,5 мм, розміщений у шарикі 2 або у циліндрі з оксиду алюмінію, покритому шаром 1 платино-паладієвого каталізатора.

Чутливі елементи в термохімічних газоаналізаторах (див. рис. 13.2,*а*) нагріваються струмом нерівноважного моста 8 до температури 200...500 °С. При згорянні на поверхні вимірювального чутливого елемента горючого визначуваного компонента температура елемента збільшується, через що підвищується електричний опір платинового дротика, а це, у свою чергу, спричиняє розбаланс електричного моста, який вимірюється вторинним приладом 9 і визначається формулою

$$\Delta U = k_1 \varphi Q_H C = KC, \quad (13.2)$$

де k_1 – постійний коефіцієнт для даного нерівноважного моста; $K = k_1 \varphi Q_H$ – коефіцієнт перетворення аналізатора.

Для перевірки і коректування нульового значення сигналу газоаналізатора через кран 10 в камеру 1 надходить повітря, яке не містить горючих компонентів.

Термохімічні газоаналізатори застосовуються як сигналізатори вибухонебезпечних концентрацій газів і парів у повітрі. Найбільшого поширення набув вимірювальний перетворювач – датчик ТХМ-2,8-1.

Принцип дії *оптичних газоаналізаторів* заснований на особливостях поглинання-випромінювання окремих компонентів газової суміші. Це – інфрачервоні, хемілюмінесцентні, флуоресцентні та інші газоаналізатори.

Інфрачервоні газоаналізатори працюють за принципом селективного поглинання інфрачервоного випромінювання. Газ поглинає енергію певних довжин хвиль в інфрачервоній області спектра, інші хвилі проходять і при цьому не поглинаються.

Наприклад, область поглинання окису вуглецю лежить між 4,5...5,0 мкм. Інфрачервоний детектор (рис. 13.3) складається з двох камер однакового обсягу, розділених гнучкою металевою діафрагмою; в одній із них знаходиться нерухома металева головка. Головка і діафрагма утворюють конденсатор з мінливою ємністю. Обидві нижні камери містять однакову кількість газу. Інфрачервоне випромінювання від двох однакових джерел попадає у дві окремі ідентичні кювети. Одна з них, яку називають кюветою порівняння, заповнена інертним газом, зазвичай азотом; інша, яку називають робочою, являє собою циліндр, через який проходить газ, що аналізується. Наявний в робочій кюветі газ, що нас цікавить, поглинає інфрачервоне випромінювання у кількості, прямо пропорційній концентрації його молекул. У кюветі порівняння поглинання інфрачервоного випромінювання не відбувається. Після проходження інфрачервоного променя через камеру порівняння і робочу камеру детектора випромінювання поглинається газом у цих камерах. Поглинання енергії випромінювання призводить до нагрівання газу у камері порівняння детектора до більш високої температури, ніж у робочій камері.

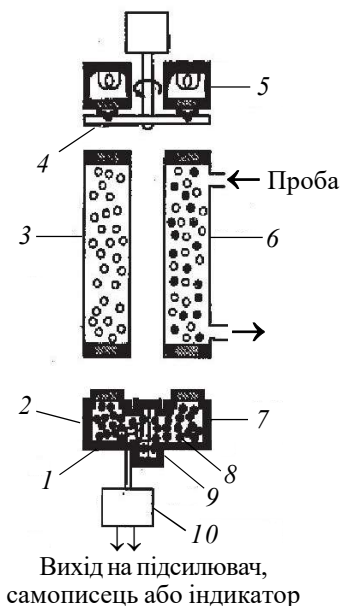
Оскільки обидві камери детектора герметизовані, у камері порівняння підвищується тиск у порівнянні з робочою камерою, що призводить до прогину діафрагми. Виникаюча в результаті цього зміна ємності конденсатора прямо пропорційна концентрації вимірюваної речовини в робочій кюветі. Між джерелом інфрачервоного випромінювання і кюветами розміщено обтюратор, який створює змінний сигнал з метою поліпшення характеристик електронної схеми.

Для виключення інфрачервоного випромінювання тих довжин хвиль, які не поглинаються обумовленим газом, застосовуються фільтри. Таким чином, якщо у потоці одночасно присутні два або більше газів, що поглинають інфрачервоне

випромінювання, то для їхнього вимірювання варто використовувати два різні вимірювальні осередки. Є прилади, які працюють за принципом недисперсійного поглинання інфрачервоного випромінювання для виміру SO_2 , NO_x , CO та HC у викидах стаціонарних джерел, в атмосфері і у вихлопних газах автотранспорту.

Рис. 13.3. Недисперсійний інфрачервоний газоаналізатор:

- 1 – нерухома металева головка; 2 – камера порівняння; 3 – непоглинаюча кювета порівняння; 4 – обтюратор;
5 – джерело ІК випромінювання;
6 – робоча кювета; 7 – робоча камера;
8 – детектор; 9 – металева діафрагма;
10 – блок осцилятора



Застосування інфрачервоних газоаналізаторів стосується здебільшого вимірювання концентрацій CO і CO_2 .

Повірка газоаналізаторів виконується на спеціалізованих стендах за допомогою повірочних газових сумішей або генераторів концентрацій газових сумішей. Повірка газоаналізаторів виконується один раз на рік при проведенні інших регламентних робіт. Крім того, при проведенні робіт з повірки газоаналізатора також можуть виконуватися роботи з постановки "нуля" та його калібровки.

Опис експериментальної установки

Основними елементами установки для повірки датчиків газоаналізатора (рис. 13.4) є блок живлення та сигналізації (Дозор-С-М), балон з ПГС, ротаметр, насадка повірочна для встановлення вимірювальних перетворювачів, газопроводи та вентиль точного регулювання.

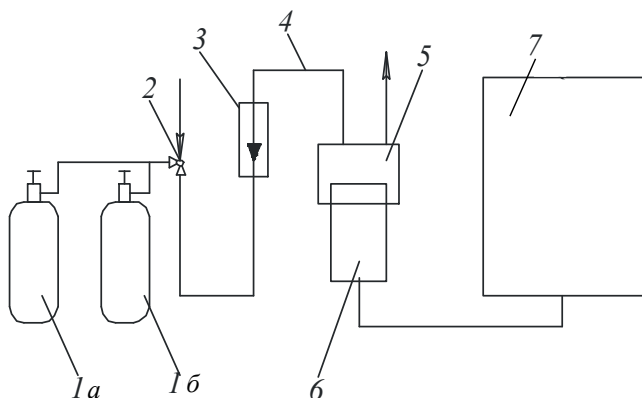


Рис. 13.4. Схема для повірки датчиків газоаналізатора за допомогою ПГС у балонах під тиском:

1а – балон з газом, що не містить вимірювальний компонент; 1б – балон із газом з постійною концентрацією вимірювального компонента; 2 – вентиль точного регулювання; 3 – ротаметр; 4 – поліхлорвінілова трубка; 5 – насадка повірочна; 6 – вимірювальний перетворювач; 7 – блок живлення і сигналізації

Повірка датчика газоаналізатора виконується у два етапи:

Етап 1. Коректування "нуля" здійснюється при подачі на вимірювальний перетворювач 6 газу, що не містить у своєму складі газу, на який налаштований вимірювальний перетворювач (використовуються балони з N_2), та автоматичного встановлення "нуля" за допомогою спеціально налаштованих

функцій у блоці живлення і сигналізації 7. Витрата газу через повірочну насадку повинна складати $(0,6 \pm 0,2)$ $\text{дм}^3/\text{хв}$. Час подачі ПГС не менше 5 хв. Перед проведенням операції сигналізатор має бути прогрітий після включення протягом не менше 2-х годин.

Етап 2. Перевірка вимірювального перетворювача здійснюється при подачі на вимірювальний перетворювач 6 повірочної газової суміші з постійною концентрацією газу, на який налаштований вимірювальний перетворювач, та порівняння показань блоку живлення і сигналізації з паспортними даними на повірочну газову суміш. Витрата повірочної газової суміші через повірочну насадку повинна складати $(0,6 \pm 0,2)$ $\text{дм}^3/\text{хв}$. Час подачі ПГС не менше 5 хв. Перед проведенням операції сигналізатор повинен бути прогрітий після включення протягом не менше 1-ї години.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з описом і правилами користування газоаналізатора.

2. Підготувати протокол даних про прилади, а також протокол вимірювань.

3. Отримавши дозвіл лаборанта, вимкнути живлення газоаналізатора та за наведеним вище порядком виконати перевірку датчика газоаналізатора. Порівняння показань датчика газоаналізатора виконати не менше 3-х разів з інтервалом у 10 хвилин на повірочній газовій суміші з постійною концентрацією вимірювального компонента, після попереднього коректування (встановлення) нуля.

4. Порівняти отримані результати з основною допустимою похибкою приладу і дати висновок про придатність повіреного датчика газоаналізатора.

Склад звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис роботи;
- 2) протокол перевірки датчика газоаналізатора і висновок про його придатність.

Контрольні питання

1. Якими приладами вимірюється склад газу?
2. Назвіть основні групи вимірювальних перетворювачів датчиків газоаналізаторів і принцип їх дії.
3. Будова і принцип дії термохімічних газоаналізаторів.
4. Будова і принцип дії оптичних газоаналізаторів.
5. Основні типи помилок, які зустрічаються при вимірюваннях складу газів.

***Протокол експериментальних даних
лабораторної роботи № 13***

Група _____

Студент _____

Таблиця № 1. Дані про прилади

Найменування і тип приладу	Похибка, клас точності	Межі вимірювань	Примітки

Таблиця № 2. Результати вимірювань

Номер дослі- ду	Найменування газу, на який налаштований датчик газоаналі- затора	Концентрація газу в повітряній суміші, % або мг/м ³	Показання газоаналізо- ра, % або мг/м ³	Похибка вимірювання	
				абсолютна, % або мг/м ³	відносна, %
1					
2					
3					

Підпис викладача _____

Дата _____

ДОДАТОК 1

Додаток 1

**Таблиця Д.1. Допустимі відхилення термоЕРС від граду-
ювальних таблиць**

Граду- ювання термопар	Відхилення термоЕРС, мВ		Відносна похибка, %	
	менше 300 °С	більше 300 °С	300 °С	600 °С
ПП-1	0,01	$0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot (t-300)$	0,43	0,33
ХА	0,16	$0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot (t-300)$	1,3	0,88
ХК	0,20	$0,20 + 6,0 \cdot 10^{-4} \cdot (t-300)$	0,87	0,78

Додаток 2

Таблиця Д.2. Градувальні таблиці термопар "хромель-конель" при температурі холодного спая 0 °C (0–380 °C)

Темпе- ратура, °C	ТермоЕРС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,68
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
60	3,35	3,42	3,48	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,37	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	1,0,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16

Продовж. табл. Д. 2

Темпе- ратура, °C	ТермоЕРС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,34	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38
210	15,48	15,56	15,64	15,72	15,80	15,89	15,97	16,05	16,13	16,21
220	16,30	16,38	16,46	16,54	16,62	16,71	16,79	16,86	16,95	17,03
230	17,12	17,20	17,28	17,37	17,45	17,53	17,62	17,70	17,78	17,87
240	17,95	18,03	18,11	18,19	18,28	18,36	18,44	18,52	18,61	18,70
250	18,77	18,85	18,93	19,02	19,10	19,18	19,27	19,35	19,43	19,52
260	19,60	19,68	19,76	19,85	19,93	20,01	20,10	20,18	20,26	20,35
270	20,43	20,51	20,59	20,67	20,75	20,84	20,92	21,00	21,08	21,16
280	21,25	21,33	21,41	21,50	21,58	21,66	21,74	21,83	21,91	21,99
290	22,08	22,16	22,24	22,33	22,41	22,49	22,58	22,66	22,74	22,82
300	22,91	22,99	23,08	23,16	23,24	23,33	23,41	23,50	23,58	23,67
310	23,75	23,84	23,92	24,01	24,09	24,18	24,26	21,35	24,43	21,52
320	24,60	24,69	24,77	24,86	24,94	25,03	25,11	25,20	25,28	25,37
330	25,45	25,54	25,62	25,71	25,79	25,87	25,96	26,04	26,13	26,22
340	26,31	26,39	26,48	26,56	26,65	26,74	26,82	26,91	26,99	27,08
350	27,16	27,25	27,33	27,42	27,50	27,59	27,67	27,76	27,81	27,93
360	28,02	28,11	28,20	28,28	28,37	28,46	28,55	28,63	28,72	28,81
370	28,89	28,98	29,07	29,15	29,21	29,33	29,41	29,50	29,59	29,67

Додаток 3

Таблиця Д. 3. Градувальні таблиці термонар "хромель-алюмель" при температурі холодильного спая 0 °С (0–380 °С)

Температура, °С	ТермоЕРС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982
60	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901

Продовж. табл. Д. 3

Темпе- ратура, °C	ТермоЕРС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302
230	9,343	9,383	9,423	9,464	9,504	9,545	9,585	9,626	9,666	9,707
240	9,747	9,788	9,828	9,869	9,909	9,950	9,991	10,031	10,072	10,113
250	10,153	10,194	10,235	10,276	10,316	10,357	10,398	10,439	10,480	10,520
260	10,561	10,602	10,643	10,684	10,725	10,766	10,807	10,848	10,889	10,930
270	10,971	11,012	11,053	11,094	11,135	11,176	11,217	11,259	11,300	11,341
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582
310	12,624	12,665	12,707	12,748	12,790	12,831	12,873	12,915	12,956	12,998
320	13,040	13,081	13,123	13,165	13,206	13,248	13,290	13,331	13,373	13,415
330	13,457	13,498	13,540	13,582	13,624	13,665	13,707	13,749	13,791	13,833
340	13,874	13,916	13,958	14,000	14,042	14,084	14,126	14,167	14,209	14,251
350	14,293	14,335	14,377	14,419	14,461	14,503	14,545	14,587	14,629	14,671
360	14,713	14,755	14,797	14,839	14,881	14,923	14,965	15,007	15,049	15,091
370	15,133	15,175	15,217	15,259	15,301	15,343	15,385	15,427	15,469	15,511

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Зайдель, А. Н.** Ошибки измерения физических величин [Текст] / А. Н. Зайдель. – М. : Наука, 1974. – 108 с.
2. **Иванова, Р. М.** Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / Р. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 230 с.
3. **Преображенский, В. П.** Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
4. **Рыжков, С. В.** Теплотехнические измерения в судовых энергетических установках [Текст] / С. В. Рыжков. – Л. : Судостроение, 1980. – 264 с.
5. **Єршов, В. В.** Теплотехнічні вимірювання та прилади в судових енергетичних установках [Текст] / В. В. Єршов. – Миколаїв : НУК, 2007. – 270 с.
6. **Рижков, С. В.** Збірник лабораторних робіт з курсу "Теплотехнічні вимірювання" : навчальний посібник [Текст] / С. В. Рижков, В. В. Єршов. – Миколаїв : УДМТУ, 1999. – 55 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	4
Розділ I. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	5
Лабораторна робота № 1	6
Лабораторна робота № 2	13
Лабораторна робота № 3	19
Лабораторна робота № 4	25
Лабораторна робота № 5	33
Розділ II. ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ І ШВИДКОСТІ ПОТОКУ	39
Лабораторна робота № 6	40
Лабораторна робота № 7	48
Лабораторна робота № 8	55
Розділ III. ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ	62
Лабораторна робота № 9	63
Лабораторна робота № 10	74
Розділ IV. ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ	82
Лабораторна робота № 11	83
Розділ V. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ	88
Лабораторна робота № 12	88

ЗМІСТ

Розділ VI. ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ ГАЗІВ	97
Лабораторна робота № 13	98
Додаток 1	108
Додаток 2	109
Додаток 3	111
Список літератури	113