Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин

01-06-37

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

«ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)

рівня за спеціальністю 144 «Теплоенергетика»

денної, заочної та дистанційної форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною комісією зі
спеціальності 144 «Теплоенергетика»
Протокол № 2 від 24 жовтня 2018 р.

Рівне – 2018

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теплотехнічні вимірювання та прилади» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» денної, заочної та дистанційної форм навчання. / Трофимчук І. П. – Рівне : НУВГП, 2018. – 40 с.

Укладач: Трофимчук І. П., ст. викладач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин

Відповідальний за випуск – Рябенко О. А., д.т.н., проф., завідувача кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин

Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Трофимчук І.П. 2018
© Національний університет водного господарства та природокористування, 2018

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Зміст

Вступ……... 3
Лабораторна робота №1……..…….... 4
Лабораторна робота №2……..…….... 13
Лабораторна робота №3…….... 26
Література……..... 35

Вступ

Сучасна людина в плині усього свого життя має справу з вимірами. Щодня ми вимірюємо температуру у квартирі і за вікном будинку, стежимо за показами ваг у магазині, отримуємо з різних джерел інформацію про температуру, вологість, тиск атмосферного повітря та ін. Виробнича діяльність людини також супроводжується численними і різнорідними вимірами, без яких неможливо забезпечити якість, надійність та безпеку проходження технологічних процесів.

Спеціаліст – теплоенергетик незалежно від профілю його практичної роботи повинен мати досить глибокі знання в області теорії і практики вимірювань основних теплотехнологічних параметрів роботи установок, таких як температура, тиск, витрата, рівень тощо та вміти їх використовувати в своїй професійній діяльності.

В міру розвитку техніки виміри стають усе більш складними, однак, суть виміру, що полягає в зіставленні кількісного вираження якоїсь фізичної величини з іншою такою ж фізичною величиною, прийнятою за одиницю, залишається без змін.

Для закріплення теоретичного матеріалу з дисципліни «Теплотехнічні вимірювання та прилади» передбачається проведення циклу лабораторних робіт, які повинні забезпечити практичну підготовку та активну самостійну роботу студентів.

На лабораторних роботах студенти ознайомлюються з вимірювальною технікою, вчаться проводити дослідження, виконувати обрахунки результатів досліджень. Також, студенти використовують різні графіки та діаграми для вивчення фізичного змісту методів та засобів вимірювань.

Після проведення лабораторної роботи кожен студент повинен оформити звіт.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Лабораторна робота №1

Тема: Дослідження основних принципів та технічних характеристик приладів для вимірювання температури.

Мета роботи: вивчити конструкцію і принцип дії термометрів розширення, манометричних термометрів, електричних термометрів опору і термоелектричних термометрів; експериментально дослідити зміну температури робочого тіла від часу при вимірюванні різними термометрами і охарактеризувати цю залежність.

1. Загальні положення

Виміряти температуру якого-небудь тіла безпосередньо, тобто так, як вимірюють інші фізичні величини, наприклад довжину, масу, об'єм або час, не представляється можливим, тому що в природі не існує еталона або зразка одиниці цієї величини. Тому визначення температури речовини роблять за допомогою спостереження за зміною фізичних властивостей іншого, так називаного термометричної речовини, яке наведе в зіткнення з нагрітим тілом, вступає з ним через якийсь час у теплову рівновагу. Такий метод вимірювання дає не абсолютне значення температури нагрітого середовища, а лише різницю щодо вихідної температури робочої речовини, умовно прийнятої за нуль.

Внаслідок зміни при нагріванні внутрішньої енергії речовини практично всі фізичні властивості останнього в більшому або меншому ступені залежать від температури, але для її вимірювання вибираються по можливості ті з них, які однозначно міняються зі зміною температури, не піддані впливу інших факторів і порівняно легко піддаються вимірюванням. Цим вимогам найбільше повно відповідають такі властивості робочих речовин, як об'ємне розширення, зміна тиску в замкнутому об'ємі, зміна електричного опору, виникнення термоелектрорушійної сили і інтенсивність випромінювання, покладені в основу улаштування приладів для вимірювання температури.

Прилади для вимірювання температури розділяються залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на наступні групи з діапазоном показань:

Термометри розширення (-190…+650 °*C*) засновані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм, а отже і лінійні розміри.

Манометричні термометри (-160…+600 °*C*) працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі при нагріванні або охолодженні цих речовин.

Термометри опору (-200…+650 °*C*) засновані на властивості металевих провідників змінювати залежно від нагрівання їхній електричний опір.

Національний університет
водного господарства

Термоелектричні термометри (-50…+1800 °*С*) побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю.

Пірометри (-30…+6000 °*С*) працюють за принципом вимірювання випромінюваної нагрітими тілами енергії, що залежить від температури цих тіл.

Термометри розширення. Фізична властивість тіл змінювати свій об'єм залежно від нагрівання широко використовується для вимірювання температури. На цьому принципі заснований пристрій рідинних скляних і дилатометричних термометрів, які з'явилися дуже давно і послужили для створення перших температурних шкал.

В рідинних термометрах, побудованих на принципі теплового розширення рідини в скляному резервуарі, як робочі речовини використовуються ртуть і органічні рідини — етиловий спирт, толуол і ін. Найбільш широке застосування одержали ртутні термометри, що мають у порівнянні з термометрами, заповненими органічними рідинами, істотні переваги: великий діапазон вимірювання температури, при якому ртуть залишається рідкою, незмочення скла ртуттю, можливість заповнення термометра хімічно чистою ртуттю через легкість її одержання та ін.

Ртутні термометри. Ртутні термометри за призначенням розділяються на промислові (технічні), лабораторні і зразкові. Основна похибка ртутних термометрів залежить від діапазону показань і ціни поділу шкали, зі збільшенням яких вона зростає. Внаслідок невеликого відхилення видимого коефіцієнта розширення ртуті в склі при зміні температури ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу. Ртутні термометри виготовляються двох видів; із вкладеною шкалою і паличні (рис. 1.1).

Термометр із вкладеною шкалою має заповнений ртуттю резервуар 1 (рис. 1), капілярну трубку 2, циферблат 3 з молочного скла зі шкалою і зовнішньою циліндричною оболонкою 4, у якій укріплений капіляр і циферблат. Зовнішня оболонка з одного кінця щільно закрита, а з іншого - припаяна до резервуара.

Паличний термометр складається з резервуара 1 (рис. 1.1), з'єднаного з товстостінним капіляром 2 зовнішнім діаметром 6-8 *мм*. Шкала термометра нанесена безпосередньо на поверхні капіляра у вигляді насічки по склу. Паличні термометри є більше точними в порівнянні з термометрами із вкладеною шкалою.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

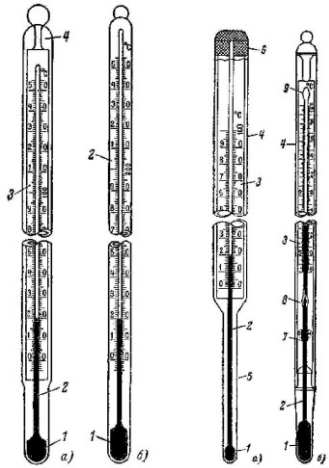


Рис. 1.1. Ртутні термометри.

Недоліками ртутних термометрів є їхня крихкість, неможливість дистанційної передачі і автоматичного запису показань, більша інерційність і труднощі відліку через нечіткість шкали і поганої видимості ртуті в капілярі.

Дилатометричні термометри. До дилатометричних термометрів відносяться стрижневі і пластинчастий (біметалічний) термометри, дія яких засноване на відносному подовженні під впливом температури двох твердих тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Стрижневий термометр (рис. 1.2, а) має закриту з одного кінця трубку 1, що поміщується у вимірювальне середовище і виготовлену з матеріалу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення. У трубку вставлений стрижень 2, що притискається до її дна важелем 3, з'єднаним із пружиною 4. Стрижень виготовлений з матеріалу з малим коефіцієнтом розширення. При зміні температури трубка змінює свою довжину, що приводить до переміщення в ній стрижня, що зберігає майже постійні розміри і з'єднаного за допомогою важеля 3 із вказівною стрілкою приладу.

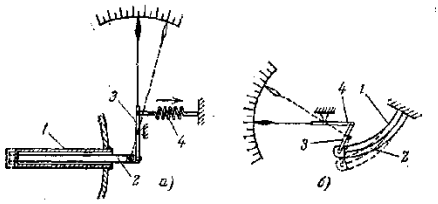


Рис. 1.2. Дилатометричні термометри
а) – стрижневий; б) – пластинчастий.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Пластинчастий термометр (рис. 1.2, б) складається із двох вигнутих і спаяних між собою по краях металевих смужок, з яких смужка 1 має великий коефіцієнт лінійного розширення, а смужка 2 — малий. Отримана пластинка міняє залежно від температури ступінь свого вигину, величина якого за допомогою тяги 3, важеля 4 і з'єднаної з ним стрілки вказується по шкалі приладу. При збільшенні температури пластинка вигинається убік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

Дилатометричні термометри не одержали поширення як самостійні прилади, а використовуються головним чином як чутливі елементи в сигналізаторах температури.

Манометричні термометри. Дія манометричних термометрів заснована на залежності тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі (термосистемі) від температури. Зазначені термометри є промисловими що показують і самописними приладами, призначеними для вимірювання температури в діапазоні до 600 °*С*. Клас точності їх 1-2,5.

Залежно від робочої речовини, яка використовується в термосистемі, манометричні термометри розділяються на газові, рідинні і конденсаційні (мають як робочу речовину органічні рідини з низькою температурою кипіння: хлористий метил, ацетон і фреон). Вибір робочої речовини виконується виходячи із заданого діапазону показань і умов вимірювання.

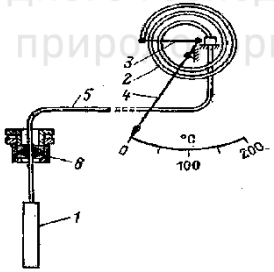


Рис.1.3. Схема манометричного термометра.

Схема манометричного термометра, що показує, приведена на рис. 1.3. Термосистема приладу, заповнена робочою речовиною, складається з термобалону 1, що занурюється у вимірювальне середовище, манометричної трубчастої пружини 2, що діє за допомогою тяги 3 на вказівну стрілку 4, і капіляра 5, що з'єднує пружину з термобалоном.

Термобалон являє собою металеву трубку, закриту з одного кінця, а з іншого з'єднану з капіляром. За допомогою знімного штуцера 6 з різьбленням і сальником термобалон установлюється в трубопроводах, баках і т.п. Можлива установка його і у захисній гільзі. При нагріванні термобалона збільшення тиску робочої речовини передається через капіляр трубчастій пружині і приводить до розкручування останньої доти, поки діюче на неї

Національний університет
водного господарства
зусилля, пропорційне різниці тисків у системі і навколишнім повітрі, не зрівноважиться силою її пружної деформації.

Термоелектричні термометри. Дія термоелектричних термометрів заснована на властивості металів і сплавів створювати термоелектрорушійну силу (термо-е.р.с), що залежить від температури місця з'єднання (спаю) кінців двох різнорідних провідників (термоелектродів), що утворюють чутливий елемент термометра - термопару. Маючи у своєму розпорядженні закон зміни термо-е.р.с. термометра від температури і визначаючи значення термо-е.р.с. електровимірювальним приладом, можна знайти шукане значення температури в місці вимірювання.

Термоелектричний термометр, що складається із двох спаяних і ізольованих по довжині термоелектродів, захисного чохла і головки із затискачами для підключення сполучної лінії, є первинним вимірювальним перетворювачем. Як вторинні прилади, що працюють із термоелектричними термометрами, застосовуються магнітоелектричні мілівольтметри і потенціометри.

Термоелектричні термометри широко застосовуються в енергетичних установках для вимірювання температури перегрітої пари, димових газів, металу труб котлоагрегатів і т.п. Позитивними властивостями їх є: великий діапазон вимірювання, висока чутливість, незначна інерційність, відсутність стороннього джерела електричного струму і легкість здійснення дистанційної передачі показань.

Для одержання порівняно високих значень термо-е.р.с. вибір термоелектродів проводиться таким чином, щоб у парі із платиною один з них створював позитивну, а інший негативну термо-е.р.с.

Термоелектричні термометри, що одержали практичне застосування, розділяються по матеріалам термоелектродів на дві групи: зі благородних (платина, платинородій) і неблагородних металів або сплавів (хром-алюмель, хромель-копеловий сплав). Термометри типів ТПП і ТПР із термоелектродами із благородних металів і сплавів застосовуються головним чином для вимірювання температури вище 1000 °*C*, тому що вони мають велику термостійкість. Незважаючи на відносно малі значення що розвиває термо-е.р.с. термометри типу ТПП завдяки винятковій сталості термоелектричних властивостей і великому діапазону вимірювання одержали широке поширення головним чином як лабораторні, зразкові і еталонні.

Випускаються одинарні (з одним чутливим елементом) і подвійні (із двома чутливими елементами) термоелектричні термометри різних типів.

На рис. 1.4 показаний устрій термометра типу ТПП. Термоелектроди, що утворюють робочий кінець (спай) 1, ізольовані по довжині порцеляновими трубками 2 і 3 і поміщені в захисний чохол 4, розрахований на атмосферний тиск. Для додання чохлу додаткової міцності неробоча частина його вставлена в сталеву трубку 5. За допомогою сталевих втулок 6 і 7 захисний

Національний університет
водного господарства
та природокористування

чохол з'єднаний з корпусом 8, у якому закріплені два затискачі 9 із припаяними до них термоелектродами, ущільненими мастикою 10. Корпус закритий знімною кришкою 11 на різьбленні, ущільненим прокладкою 12. Для уведення в корпус зовнішніх сполучних проводів служить штуцер 13 з ущільненням 14. На поверхні закріплена металева табличка 15, на якій зазначені: тип термометра, тиск, що допускається, і кінцеву температуру вимірюваного середовища, матеріал захисного чохла, дата виготовлення термометра і марка підприємства-виробника.

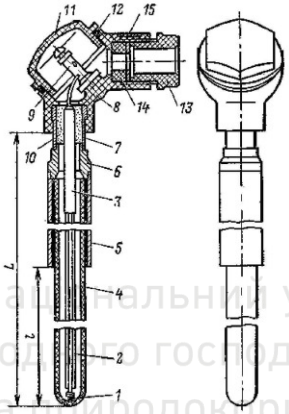


Рис. 1.4. Термоелектричний термометр

На точність вимірювання термоелектричним термометром великий вплив роблять спосіб установки і правильність проведення перевірки термометра і вторинного приладу.

Одним з основних вимог, які рекомендуються при установці термоелектричного термометра, є досягнення мінімального витоку тепла по його арматурах. Для цього термометр можливо глибше занурюють у вимірювальне середовище, що приводить до збільшення теплосприймаючої поверхні, і розташовується в місцях з великою швидкістю потоку, що поліпшує умови теплообміну.

Термометри опору. Для вимірювання температури широке застосування отримали термометри опору, дія яких заснована на зміні електричного опору металевих провідників залежно від температури. Метали, як відомо, збільшують при нагріванні свій опір. Отже, знаючи залежність опору провідника від температури і визначаючи цей опір за допомогою електровимірювального приладу, можна судити про температуру провідника.

Застосовуються технічні (промислові), зразкові і еталонні платинові термометри опору.

Національний університет
водного господарства

Будову платинового термометра опору типу ТСП-1 подано на рис. 1.5. На каркасі із слюдяної пластинки, що має по боках зубчасту насічку, біфілярно намотано платиновий дріт 2 діаметром 0,07 *мм* і завдовжки близько 2 *м*. До кінців платинової обмотки припаяно два виводи 5 з срібного дроту діаметром 1 мм, які сполучені з затискачами в головці термометра. Слюдяну пластинку з обмоткою ізольовано з обох боків ширшими слюдяними накладками 4 і зв'язано з ними в один спільний пакет срібною стрічкою 3.

Утворений так чутливий елемент термометра встановлено в плоский алюмінієвий вкладиш 8 (рис. 1.5, б) і разом з ним у трубчасту оболонку 7 з алюмінію. Срібні виводи ізольовані фарфоровими бусами 6.

Як вторинні прилади, що працюють із термометрами опору, застосовуються врівноважені і неврівноважені вимірювальні мости і магнітоелектричні логометри.

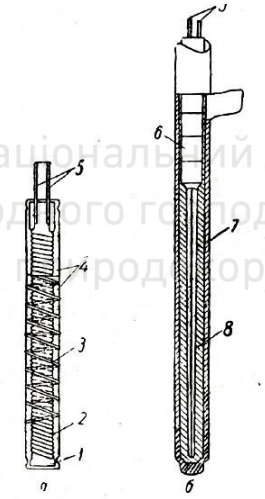


Рис. 1.5. Термометр опору типу ТСП-1

Кінцева межа вимірів дротових термометрів опору, обумовлена стійкістю їх при нагріванні, дорівнює 650 °*С*.

Достатками термометрів опори є: висока точність вимірювання, можливість одержання приладів з безнульовою шкалою на вузький діапазон температур, легкість здійснення автоматичного запису і дистанційної передачі показань і можливість приєднання до одного вторинного приладу за допомогою перемикача декількох однотипних термометрів. До недоліків цих приладів ставиться потреба в стороннім джерелі струму.

Національний університет
водного господарства

2. Схема і опис лабораторної установки

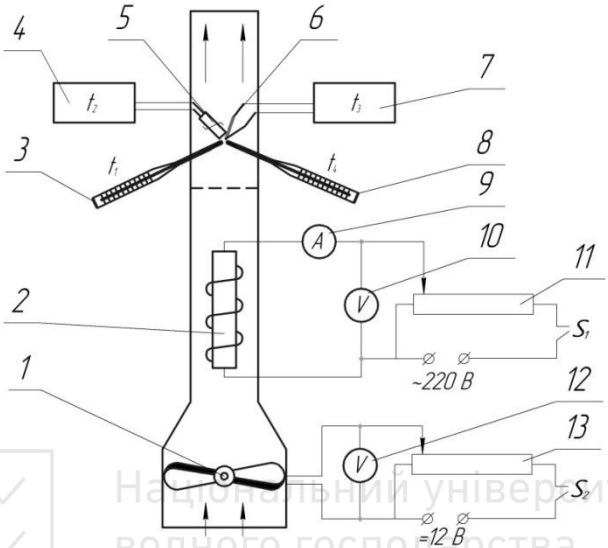


Рис. 1.6. Схема лабораторної установки

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Лабораторна установка складається з пульта управління і робочої ділянки. Робоча ділянка установки (рис. 1.6) являє собою трубку, в яку вставлено вентилятор 1, нагрівник 2 і вимірювальні прилади. Потік повітря, що створює вентилятор 1 проходить через нагрівник 2, та рухається до вимірювальних приладів. Температура нагрітого повітря вимірюється в одній площині за допомогою лабораторного ртутного термометра 3, термометра опору 5, термоелектричного пірометра (термопари) 6 та технічного ртутного термометра 8. Покази зміни електричного опору термометра опору 5 відображаються логометром 4, а покази термопари 6 відображаються автоматичним потенціометром 7. Зміна швидкості руху повітря в трубі здійснюється за допомогою реостата 13, а покази цієї зміни відображаються на пульті керування лінійним індикатором 12. Потужність нагрівального приладу керується реостатом 11. Покази вольтметра 10 та амперметра 9 відображають зміну електричної потужності нагрівального приладу.

В якості зразкового вимірювального приладу прийняти лабораторний ртутний термометр 3.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3. Порядок виконання роботи

3.1. Записати температуру повітря t в робочій ділянці для нульового досліду.

3.2. Оглянути лабораторну установку та пересвідчитись, що вимикачі вентилятора S_2 і живлення нагрівника S_1 вимкнені, а повзунки реостатів 11, 13 знаходяться в нульовому положенні.

3.3. Включити тумблер живлення лабораторної установки.

3.4. Включити вимикач вентилятор S_2 та повзунком реостата 13 встановити максимальні оберти вентилятора. Максимальні оберти вентилятора засвідчить червона поділка лінійного індикатора 12.

3.5. Включити вимикач живлення нагрівника S_1 та повзунком реостата 11 встановити необхідну потужність (задає викладач). Зняти значення напруги U та сили струму I.

3.6. Встановивши необхідну потужність нагрівника 2, увімкнути секундомір.

3.7. Через 3 хвилини зняти покази температур вимірювальних приладів.

3.8. За допомогою реостата 13 понизити оберти вентилятора (1 - 2 поділки) та увімкнути секундомір заново.

3.9. Через 3 хвилини зняти покази температур вимірювальних приладів.

3.10. Починаючи з п. 3.8 дослід повторити (5 разів).

3.11. За допомогою реостата 13 підвищити оберти вентилятора (1 - 2 поділки) та увімкнути секундомір заново.

3.12. Через 3 хвилини зняти покази температур вимірювальних приладів.

3.13. Починаючи з п. 3.11 дослід повторити (5 разів).

3.14. Вимкнути вимикач живлення нагрівника S_1 та вимикач вентилятор S_2. Повзунки реостатів 11, 13 повернути в нульове положення.

3.15. Вимкнути тумблер живлення лабораторної установки.

3.16. Всі результати вимірювань записати в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Дослідні дані

U, $[B]$= I, $[A]$=

№ п/п	Прямий хід					Зворотній хід				
	t_1, °C	t_2, °C	t_3, °C	t_4, °C	Час, с	t_1, °C	t_2, °C	t_3, °C	t_4, °C	Час, с
0										
1										
…										
n										

Національний університет
водного господарства

4. Обробка результатів досліду

4.1. Побудувати графік зміни температури повітря в трубі різними вимірювальними приладами в залежності від часу для прямого ходу вимірювання.

4.2. Побудувати графік зміни температури повітря в трубі різними вимірювальними приладами в залежності від часу для зворотного ходу вимірювання.

4.3. Проаналізувати отримані графіки та зробити відповідні висновки.

5. Контрольні запитання

5.1. Класифікація засобів вимірювання температури.

5.2. Манометричні термометри: принцип дії та будова.

5.3. Термометри розширення: типи, використання, будова та принцип роботи.

5.4. Термоелектричні перетворювачі, принцип дії, рівняння ТЕРС.

5.5. Характеристики термоелектричних перетворювачів, типи і конструкції.

5.6. Термостатування вільних кінців і схеми ввімкнення термопар.

5.7. Принцип роботи пірометричного мілівольтметра.

5.8. На чому заснований принцип дії термометрів опору?

5.9. Основні властивості та конструкції термометрів опору.

5.10. Схема та опис вимірювального моста постійного струму.

Лабораторна робота №2

Тема: Дослідження основних принципів та технічних характеристик приладів для вимірювання тиску.

Мета роботи: вивчити конструкції і принцип дії деформаційних засобів вимірювання з чутливими елементами у вигляді трубчастих пружин, сильфонів та мембран; експериментально дослідити зміну надлишкового тиску робочого середовища при вимірюванні різними манометрами, а також проградуювати манометр типу «МЭД».

1. Загальні положення

Засоби вимірювання тиску класифікують за видом вимірюваного тиску і принципом дії. За видом вимірюваного тиску засоби вимірювань поділяють на:

- манометри надлишкового тиску – для вимірювання надлишкового тиску;

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- манометри абсолютного тиску – для вимірювання тиску, відліченого від абсолютного нуля;
- барометри – для вимірювання атмосферного тиску;
- вакуумметри – для вимірювання вакууму (розрідження);
- мановакуумметри – для вимірювання надлишкового тиску і вакууму;
- напороміри – манометри малого надлишкового тиску (до 40 *кПа*);
- тягоміри – вакуумметри з верхньою межею вимірювання не більше 40 *кПа*;
- тягонапороміри – мановакуумметри з діапазоном вимірювань +20…–20 *кПа*;
- вакуумметри залишкового тиску – вакуумметри, призначені для вимірювання глибокого вакууму або залишкового тиску, тобто абсолютного тиску менше 200 *Па*;
- диференціальні манометри – засоби вимірювань різниці тисків.

За принципом дії засоби вимірювань тиску поділяють на:

- рідинні;
- деформаційні (пружинні);
- поршневі;
- теплові;
- електричні.

Існуючі у даний час засоби вимірювання тиску, дозволяють здійснювати вимірювання тиску в діапазоні $10^{-12}...10^{11}$ *Па* .

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Принцип дії деформаційних засобів вимірювань тиску заснований на використанні пружної деформації чутливого елемента (ЧЕ) або сили, що розвивається їм. Мірою вимірюваного тиску у засобах вимірювань даного типу – це деформація ЧЕ або сила, що розвивається їм. Розрізняють три основні форми ЧЕ, що набули поширення у практиці вимірювання: трубчасті пружини, сильфони і мембрани.

Трубчасті пружини (трубка Бурдона) – пружна криволінійна металева порожниста трубка, один з кінців якої може переміщатися, а інший – жорстко закріплений. Трубчасті пружини використовуються в основному для перетворення вимірюваного тиску, поданого у внутрішній простір пружини, у пропорційне переміщення її вільного кінця. Найбільш поширена одновиткова трубчаста пружина, яка являє собою зігнуту по дузі кола трубку, як правило, із овальним поперечним перетином (рис. 2.1).

Під впливом надмірного тиску трубка розкручується, а під дією розрідження – скручується. Переміщення трубки пояснюється наявністю різниці величин напівплощ зовнішньої поверхні трубки, які утворюються її поділом відносно більшої осі симетрії (проходить перпендикулярно до осі b, рис. 2.1). Під дією різниці тисків виникає різниця сил, що спричиняє деформацію трубки. Так як відношення величин напівплощ для конкретного вимірювального приладу є величиною постійною, то переміщення трубки

Національний університет
водного господарства

прямо пропорційне зміні різниці тисків (у трубці та барометричного). При цьому довжина трубки також змінюється, але ці зміни такі малі порівняно з її довжиною, тому на загальне переміщення трубки вони не чинять істотного впливу.

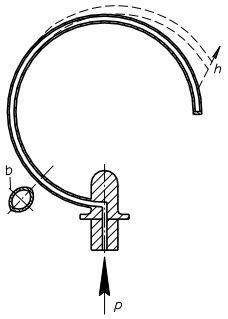


Рис. 2.1. Одновиткова трубчаста пружина (трубка Бурдона)

Для вимірювання високого тиску до 1000 *МПа* використовують криволінійні і прямолінійні трубчасті пружини. Форма перетину прямолінійної трубчастої пружини показана на рис. 2.2. Переміщення вільного кінця пружини відбувається не через зміну поперечного перетину, а завдяки згинальному моменту:

$$M = \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot P, \qquad (2.1)$$

де $\pi \cdot r^2$ - площа каналу; l - відстань від центра каналу до центра тяжкості; P - вимірюваний надлишковий тиск.

Рис. 2.2. Прамолінійна трубчаста пружина

Основний недолік розглянутих пружин – малий кут повороту, що вимагає вживання передавальних механізмів. Цей недолік усунений у чутливих елементах типу витої трубчастої пружини овального або зіркоподібного перетину (рис. 2.3).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

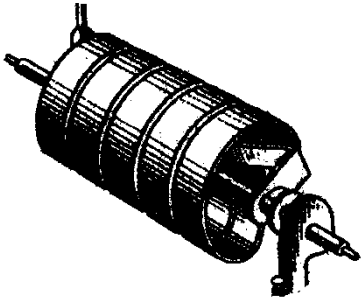


Рис. 2.3. Вита трубчаста пружина

Кут повороту такої витої пружини становить 40 60°. Це дозволяє відмовитися від застосування передавального механізму, оскільки стрілка може бути встановлена безпосередньо на вільному кінці пружини. Трубчасті пружини для тиску до 5 *МПа* виготовляють із латуні, томпаку, бронзи; для виготовлення пружин, розрахованих на тиск понад 5 *МПа*, застосовують леговані сплави, сталі різних складів. Для тиску 1000 *МПа* і більше застосовують леговану сталь типу 50ХФА.

Сильфони. Сильфон – тонкостінна циліндрична оболонка з поперечними гофрами (рис. 2.4), здатна отримувати значні переміщення під дією тиску або сили. У межах лінійності статичної характеристики сильфона відношення діючої на нього сили до викликаної його деформації залишається постійним і називається жорсткістю сильфона. Для збільшення жорсткості усередині сильфону розміщують пружину. Сильфони виготовляють із бронзи, напівтомпаку, вуглецевої сталі, неіржавіючої сталі, алюмінієвих сплавів та ін. Серійно виготовляють безшовні і зварні сильфони діаметром від 8 до 100 *мм* і завтовшки стінки 0,1…0,3 *мм*.

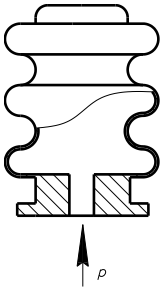


Рис. 2.4. Сильфон

Мембрани. Розрізняють пружні і еластичні (мляві) мембрани.

Національний університет
водного господарства

Пружна мембрана – гнучка, кругла, плоска або гофрована пластина (рис. 2.5). Статична характеристика плоских мембран змінюється нелінійно зі збільшенням тиску, тому тут як робочу ділянку використовують невелику частину можливого ходу. Гофровані мембрани можуть застосовуватися при більших прогинаннях, ніж плоскі, оскільки мають значно меншу нелінійну характеристику. Мембрани виготовляють із різних марок сталі, бронзи, томпаку, латуні і т.д.

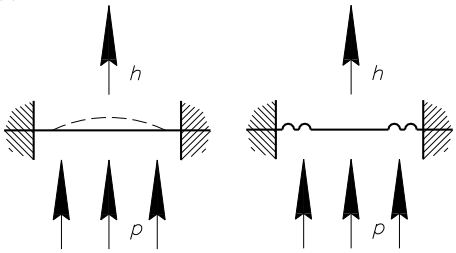


Рис. 2.5 Схема пружних мембран

Еластична мембрана, яка призначена для вимірювання малого тиску і різниці тиску, затискається між плоскими фланцями. Вона виготовляється з прогумованої тканини, тефлону та ін.

Плоскі і гофровані еластичні мембрани використовують також для створення достатніх перестановочних зусиль під час порівняно невеликих переміщень.

Висока точність, простота конструкції, надійність і низька вартість зумовили широке поширення деформаційних приладів для вимірювання тиску у промисловості і наукових дослідженнях.

Вимірювальні прилади з одновитковою трубчастою пружиною.

Ці прилади призначені для вимірювання надлишкового тиску і розрідження неагресивних рідких і газоподібних середовищ.

Прилади цього типу випускаються тільки показуючими у звичайному, вібростійкому, антикорозійному, пило-, бризко- і вибухозахищеному виконаннях.

Для передачі переміщення вільного кінця деформаційного ЧЕ до покажчика манометра використовують секторні і важельні передавальні механізми. За допомогою передавального механізму переміщення вільного кінця трубчастої пружини у декілька градусів або міліметрів перетвориться у кутове переміщення стрілки в 270…300°.

Передавальний механізм важеля застосовується у тих випадках, коли від манометра не потрібна висока точність вимірювання і він піддається вібрації.

Секторний передавальний механізм застосовується у зразкових приладах і в приладах, де за умов експлуатації виключена вібрація.

Національний університет
водного господарства

На рис. 2.6 показана конструкція манометра з секторним передавальним механізмом. Прилад складається з трубчастої пружини 5, один кінець якої упаяний в отвір утримувача 1, а інший (рухомий) кінець наглухо запаяний і несе на собі наконечник 10. Порожнина пружини пов'язана з вимірюваним середовищем через канал з утримувачем 1, який має радіальний штуцер 14. Утримувач приладу оснащений платою 2, на якій вмонтовано трибко-секторний механізм. Останній включає в себе зубчате колесо (трибку) 8 і зубчатий сектор 9. Для виключення люфта в передавальному механізмі використовується спіральна пружина 7, один кінець якої за допомогою штифта кріпиться на осі трибки, а інший – до колонки 6, укріпленої на платі 2. До хвостовика сектора 9 за допомогою гвинта 12 кріпиться тяга 11. За допомогою тяги переміщення вільного кінця пружини передається зубчатому сектору, який має вісь обертання 13. Обертання зубчатого сектора передається трибці, на осі якої насаджена стрілка 4 для відліку показань на шкалі 3. Шкала манометра рівномірна, оскільки переміщення вільного кінця пружини пропорційне вимірюваному тиску. Регулювання ходу стрілки виконується за допомогою гвинта 12.

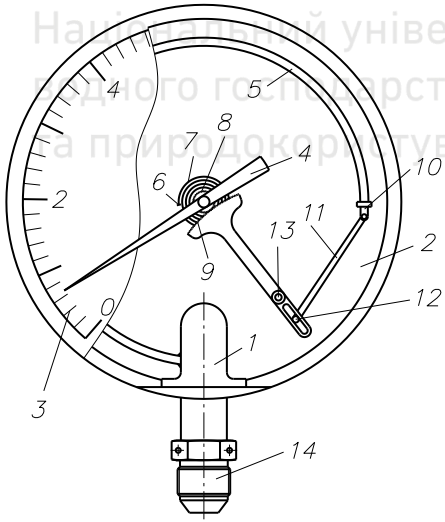


Рис. 2.6. Конструкція манометра з одновитковою трубчастою пружиною

Вакуумметр з одновитковою трубчастою пружиною конструктивно ідентичний даному манометру. Відмінність полягає тільки у шкалі і напрямку переміщення стрілки.

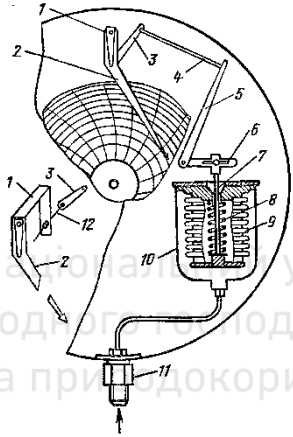
Відмітною особливістю мановакуумметра є шкала, яка виконується з нулем у середній частині. Шкала, розміщена зліва від нуля, служить для вимірювання вакууму, а справа – для вимірювання надлишкового тиску.

Національний університет
водного господарства

Манометри і вакуумметри з трубчастою пружиною можуть оснащуватися сигналізуючими електроконтактними пристроями. Такі засоби вимірювання називаються електроконтактами. Клас точності електроконтактних манометрів і вакуумметрів 1,5. Похибка спрацьовування сигналізуючого пристрою $\pm 2,5\,\%$.

Вимірювальні прилади з сильфонним чутливим елементом.

Прилади цього типу призначені для вимірювання надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків. Їх виконують показуючими і самописними. Схема самописного сильфонного манометра показана на рис. 2.7.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 2.7. Схема самописного сильфонного манометра

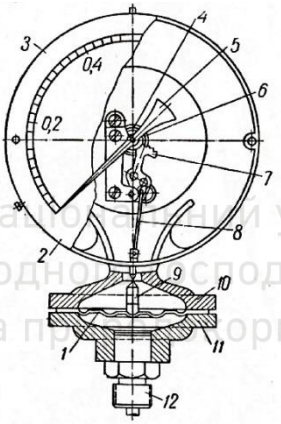
Вимірюваний тиск через штуцер 11 подається в камеру 10, де розміщений чутливий елемент – сильфон 9. Для збільшення жорсткості сильфона усередині нього розміщена гвинтова пружина 8. Під дією тиску сильфон деформується і дно його піднімає шток 7, жорстко пов'язаний із двоплечим важелем 6, останній через систему важелів 5, 4, 3 повертає вісь 12 і укріплений на ній *П*-подібний важіль 2. До *П*-подібного важеля прикріплена стрілка 1 з пером. Запис вимірюваного тиску проводиться на дисковій діаграмі, привід якої здійснюється за допомогою синхронного двигуна або годинникового механізму. Верхня межа вимірювань сильфонних приладів обмежена тиском 0,025÷0,4 *МПа*. Класи точності сильфонних манометрів надлишкового тиску, вакуумметрів і мановакуумметрів: 1,5; 2,5.

Для вимірювання різниці тисків і витрати рідких та газоподібних середовищ застосовуються сильфонні дифманометри. Граничні номінальні перепади тиску становлять 6,3÷250 *кПа*. Граничний допустимий робочий тиск: 6,3, 16 і 32 *МПа*. Класи точності сильфонних показуючих і самописних дифманометрів 1,0 і 1,5.

Національний університет
водного господарства

Вимірювальні прилади з мембранним чутливим елементом.

Ці прилади призначені для вимірювання атмосферного і надлишкового тиску і розрідження. Через малість зусиль, які розвиваються деформаційним ЧЕ, мембранні прилади випускаються в основному показуючими. Принцип дії приладів полягає в перетворенні вимірюваного тиску в переміщення жорсткого центра мембранного ЧЕ, яке за допомогою передавального трибко-секторного механізму перетворюється в обертальний рух покажчика. Максимальний діапазон вимірювань мембранних манометрів 0÷2,5 *МПа*, вакуумметрів від 0,1 *МПа* до нуля. Класи точності приладів 1,5 і 2,5. Випускаються також показуючі мембранні тягоміри і тягонапороміри класів точності 1,5 і 2,5.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 2.8. Манометр з плоскою мембраною

1 – плоска мембрана; 2 – шкала; 3 – корпус; 4 – спіральна пружина; 5 – стрілка; 6 – трибок; 7 – зубчастий сектор; 8 – поводок; 9 – штифт; 10 і 11 – фасонні фланці; 12 – штуцер.

Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску.

Вимірювальні перетворювачі тиску засновані на методі прямого перетворення переміщення або зусилля в сигнал вимірювальної інформації. Для перетворення переміщення чутливого елемента в сигнал вимірювальної інформації широко застосовуються індуктивні, диференціально-трансформаторні, ємкісні, тензорезисторні, п'єзоелектричні та інші перетворюючі елементи.

Індуктивні вимірювальні перетворювачі тиску

На рис. 2.9 показано схему вимірювального перетворювача тиску індуктивного типу. Мембрана 1, яка сприймає тиск, є рухомим якорем електромагніту 2 з обмоткою 3. Під дією вимірюваного тиску мембрана 1 переміщається, що викликає зміну індуктивності *L*.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

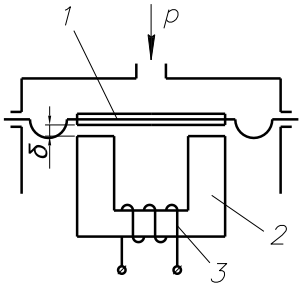


Рис. 2.9. Схема індуктивного перетворюючого елемента

Коли тиск становить 0,5÷1 *МПа* – товщина мембрани становить 0,1÷0,3 мм, а при 20÷30 *МПа* – 0,3 *мм*.

Робоче переміщення мембрани складає соті частки міліметра.

Основна похибка індуктивних перетворювачів тиску ±(0,2÷5)%, постійна часу $(2{,}2\div3)\cdot10^{-4}$ *с*.

Ємкісні вимірювальні перетворювачі тиску

Схема ємкісного вимірювального перетворювача тиску зображена на рис. 2.10.

Вимірюваний тиск сприймається металевою мембраною 1, який є рухомим електродом ємкісного перетворюючого елемента. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу за допомогою кварцових ізоляторів. Залежність ємкості *C* перетворюючого елемента від переміщення δ мембрани 1 має вигляд

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{\delta + \delta_0}, \qquad (2.2)$$

де ε - діелектрична проникність середовища, що заповнює міжелектродний зазор; S - площа електродів; δ_0 - відстань між електродами при тиску, що дорівнює нулю.

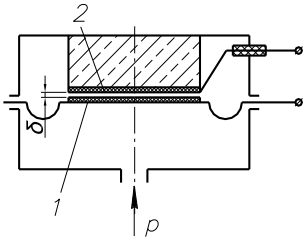


Рис. 2.10. Схема ємкісного вимірювального перетворювача тиску

Для перетворення ємкості *C* у сигнал вимірювальної інформації звичайно використовують мости змінного струму або резонансні контури. Ємкісні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

перетворювачі тиску застосовують для вимірювання тиску до 120 *МПа*. Товщина мембрани 0,05÷1 *мм*. Перетворювачі тиску даного типу використовуються для перетворення тиску, який швидко змінюється. Постійна часу перетворення 10^{-4} *с*, основна похибка ±(0,2÷5)%.

Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі тиску.

Перетворювачі тиску цього виду – це деформаційний ЧЕ, частіше всього мембрана або оболонка, на яку наклеюються або напилюються тензорезистори. Принцип дії електротензометра полягає в тому, що його опір змінюється під дією деформації мембрани, до якої він прикріплений. Зміна опору звичайно вимірюється за допомогою мостової схеми. Відносна зміна опору термоперетворювачів невелика (наприклад, для металевих вона не перевищує 1 %), тому температурний коефіцієнт матеріалу дроту повинен бути близьким до нуля. Крім того, для зменшення впливу температури застосовуються спеціальні схеми термокомпенсації.

Вживані різновиди електротензометрів можна розділити на три групи: дротяні, фольгові і напівпровідникові.

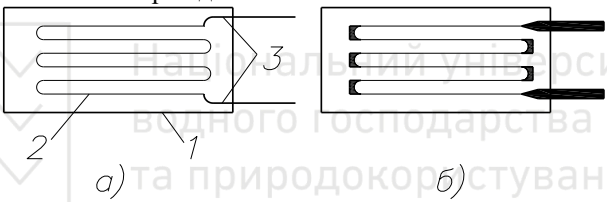


Рис. 2.11. Схема пристрою тензоперетворювачів:
а) дротяного; б) фольгового

Найбільшого поширення набули наклеювані тензорезистори, які виконуються із зигзагоподібно укладеної і приклеєної клеєм на підкладку 1 (з паперу або пластмаси) дроту 2 діаметром 0,01÷0,05 *мм* (рис. 2.11, а). До кінців дроту приварені вивідні провідники з діаметром 0,5 мм. На рис. 2.11 б показано пристрій фольгового тензоперетворювача. Ці перетворювачі виготовляються з металевої фольги завтовшки 0,001÷0,01 *мм* витравлюванням.

П'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі тиску.

В основу роботи цих перетворювачів покладено принцип перетворення вимірюваного тиску в зусилля за допомогою деформаційного чутливого елемента і подальшого перетворення цього зусилля в сигнал вимірювальної інформації п'єзоелектричним перетворюючим елементом. Принцип дії п'єзоелектричного перетворюючого елемента заснований на п'єзоелектричному ефекті, який можна спостерігати у ряді кристалів, таких, як кварц, турмалін, титанат барію та ін. Суть п'єзоелектричного ефекту полягає в тому, що якщо кварцові пластини Х-зрізу піддати стисненню

Національний університет
водного господарства
та природокористування

силою N, то на її поверхні виникнуть заряди різних знаків. Значення заряду Q пов'язано з силою N співвідношенням:

$$Q = k \cdot N, \qquad (2.3)$$

де k - п'єзоелектрична постійна.

Значення k не залежить від розміру пластини і визначається природою кристала. Для кварцу k=2,1 10^{-12} *Кл/Н*.

На рис. 2.12 показана схема п'єзоелектричного вимірювального перетворювача тиску. Вимірюваний тиск перетворюється мембраною 4 в зусилля, що викликає стиснення стовпчиків кварцових пластин 2 діаметром 5 *мм* і завтовшки 1 *мм*. Виникаючий електричний заряд Q через виводи 1 подається на електронний підсилювач 5, який має великий вхідний опір – 1013 *Ом*. Значення заряду пов'язано з вимірюваним тиском р залежністю:

$$Q = k \cdot F \cdot P, \qquad (2.4)$$

де F - ефективна площа мембрани.

Для зменшення інерційності перетворювача об'єм камери 3 мінімізують.

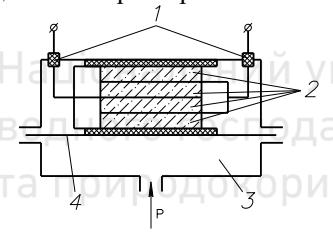


Рис.2.12 Схема п'єзоелектричного перетворювача тиску

Оскільки частота власних коливань системи «мембрана – кварцові пластини» складає десятки кілогерців, то вимірювальні перетворювачі цього типу володіють високими динамічними характеристиками, що зумовило їх широке вживання для контролю тиску в системах із швидкоплинними процесами.

Чутливість п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів тиску може бути підвищена шляхом застосування декількох, паралельно включених кварцових пластин і збільшення ефективної площі мембрани.

Верхні межі вимірювань п'єзоелектричних перетворювачів тиску з кварцовими чутливими елементами 2,5 – 100 *МПа*. Класи точності 1,5; 2,0. Через витік заряду з кварцових пластин перетворювачі тиску цього типу не використовуються для вимірювання статичного тиску.

2. Схема і опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 2.13) складається з пульта управління 12 і робочої ділянки. Робоча ділянка установки являє собою ресивер 6 на якому розташовані манометри (манометр типу «МЭД» з індукційним датчиком 7,

Національний університет
водного господарства
технічний манометр типу «МТП-160» 8 та електроконтактний пружинний манометр типу «ЭКМ-1» 9). Також, для запису зміни надлишкового тиску в ресивері використовується манометр самописець типу «МТС-71» 1. Для створення надлишкового тиску в ресивері слугує повітряний компресор, що розташований в аудиторії. Регулювання надлишкового тиску в ресивері установки здійснюється за допомогою редукційного клапана 5, а контроль тиску перед клапаном здійснюється за допомогою технічного манометра типу «МТ-3У-М» 4. Продувка трубопроводу від вологи проводиться через триходовий вентиль 3. На лабораторній установці вмонтована автоматизована група безпеки, яка складається з датчика-реле тиску «ДД-1,6» 2 і електромагнітного клапана 10. Зміна показів напруги манометра типу «МЭД» та сигнальні вогні роботи установки відображається на пульті управління 12.

В якості зразкового вимірювального приладу прийняти технічний манометр типу «МТП-160» 8.

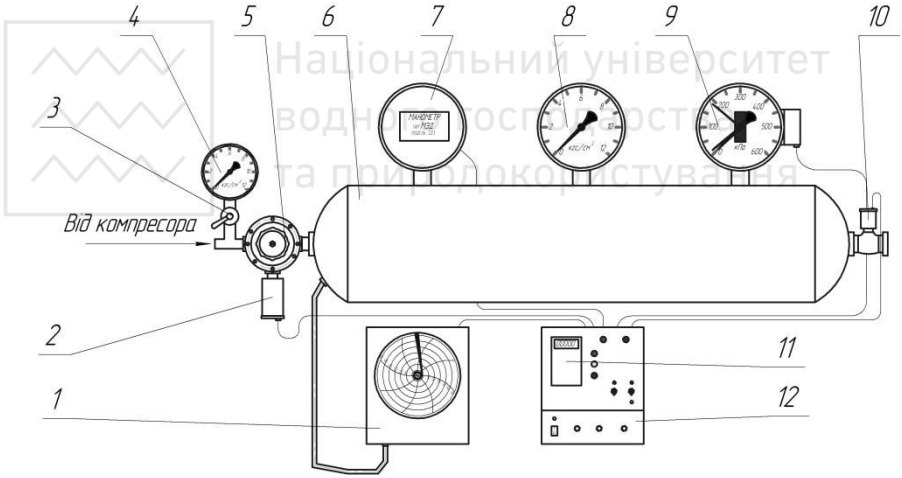


Рис. 2.13. Схема лабораторної установки

3. Порядок виконання роботи

3.1. Записати значення атмосферного тиску $P_б$ та температуру навколишнього повітря t.

3.2. Оглянути лабораторну установку та пересвідчитись у відсутності сторонніх предметів на ній. Стрілки манометрів повинні знаходитись на відмітці «0».

3.3. Увімкнути тумблер живлення лабораторної установки.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.4. Увімкнути повітряний компресор і накачати повітря, щоб тиск перед редукційним клапаном 5 був 4-5 *ат* (виконує учбовий майстер).

3.5. Обертаючи ручку редукційного клапана 5, за годинниковою стрілкою, встановити певне значення надлишкового тиску в ресивері установки 6 (значення вказує викладач), покази манометрів записати в табл. 2.1, (прямий хід).

3.6. Дослід, аналогічно п. 3.5, повторити п'ять разів, покроково збільшуючи надлишковий тиск в ресивері 6. При спрацюванні електромагнітного клапана 10 (перевищення максимального значення тиску в ресивері) дослід повторити заново, зменшивши крок збільшення надлишкового тиску в ресивері.

3.7. Обертаючи ручку редукційного клапана 5, проти годинникової стрілки, понизити надлишковий тиск в ресивері 6, покази манометрів записати в табл. 2.1, (зворотній хід).

3.8. Дослід, аналогічно п. 3.7, повторити п'ять разів, покроково зменшуючи надлишковий тиск в ресивері 6. ***Зменшення надлишкового тиску не повинно досягти нульової відмітки!!!***

3.9. Після завершення дослідження, стравити надлишковий тиск в ресивері 6 за допомогою включення електромагнітного клапана 10, натиснувши кнопку «Електромагнітний клапан» на пульті управління 12.

3.10. Вимкнути тумблер живлення лабораторної установки.

Національний університет водного господарства та природокористування

Таблиця 2.1

Дослідні дані

$P_б$, [мм.рт.ст]= t, [°C]=

№ п/п	Прямий хід				Зворотній хід			
	P_1, *мВ*	P_2, *кгс/см²*	P_3, *кПа*	P_4, *кгс/см²*	P_1, *мВ*	P_2, *кгс/см²*	P_3, *кПа*	P_4, *кгс/см²*
1								
2								
…								
n								

4. Обробка результатів досліду

4.1. Перевести значення тиску P_3 в *кгс/см²*.

4.2. Побудувати графіки залежності тиску P_1 від P_2, P_3 від P_2 та P_4 від P_2.

4.3. Графік залежності тиску P_1 від P_2 апроксимувати прямою, та перевести значення напруги мілівольтметра в значення тиску використовуючи апроксимуючу пряму.

4.4. Проаналізувати решту графіків і зробити висновок.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

5. Контрольні питання

5.1. Класифікація засобів вимірювання за видом вимірюваного тиску.

5.2. Класифікація засобів вимірювання тиску за принципом дії.

5.3. Основні форми чутливих елементів деформаційних засобів для вимірювання тиску.

5.4. Конструктивна схема манометра з трубкою Бурдона.

5.5. Конструкція трубчастої пружини для вимірювання високого тиску.

5.6. Конструктивна схема сильфонного манометра.

5.7. Конструктивна схема манометра з мембранним чутливим елементом.

5.8. Який пристрій використовується для захисту манометрів від дії високих температур і агресивних середовищ?

5.9. У чому полягає принцип дії електроконтактного та електричного манометра?

5.10. Переведення одиниць тиску.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Лабораторна робота №3

Тема: Дослідження основних принципів та технічних характеристик приладів для вимірювання витрати.

Мета роботи: ознайомитись з основними методами вимірювання витрати, вивчити конструкцію і принцип дії та оволодіти методикою повірки витратоміра змінного перепаду тиску.

1. Загальні положення

Витратою називаємо зміну кількості (маси, об'єму) речовини, яка проходить через переріз трубопроводу за одиницю часу. Витрата вимірюється в масових (*кг/с, кг/год*) або об'ємних ($м^3/с$, $м^3/год$) одиницях.

Прилади для вимірювання миттєвого значення витрати називають витратомірами. Для визначення кількості речовини, яка проходить за певний проміжок часу, використовують інтегратори або лічильники.

Найбільш поширені витратоміри:

- змінного перепаду тиску, які вимірюють витрату за зміною тиску на стандартному пристрої звуження потоку;
- постійного перепаду тиску, які вимірюють витрату за переміщенням чутливого елемента, що сприймає динамічний напір контрольованого потоку;
- електромагнітні (індукційні), які вимірюють витрату за електрорушійною силою, індукованою струмопровідною рідиною, що перетинає магнітне поле;

Національний університет
водного господарства

- швидкісного напору, які вимірюють витрату за залежністю динамічного напору від швидкості контрольованого потоку;

- ультразвукові, які вимірюють витрату за різницею частот повторення ультразвукових імпульсів, що направлені за і проти контрольованого потоку.

Вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску

Вимірювання витрати цим методом базується на зміні потенціальної

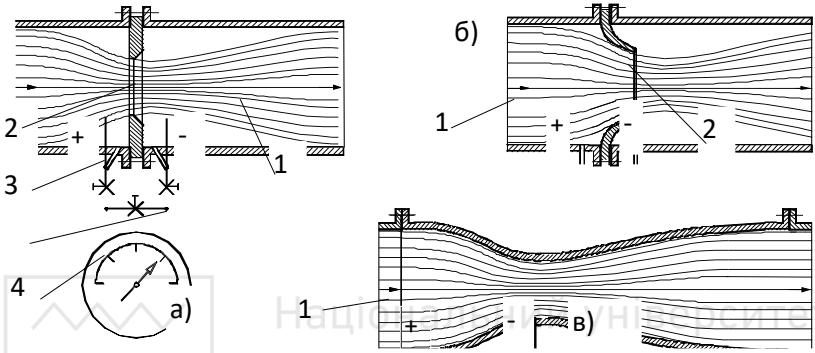


Рис. 3.1. Схема вимірювання витрати речовини методом змінного перепаду тисків та типи пристроїв звуження потоку: а) діафрагма; б) сопло; в) труба Вентурі;

1 - трубопровід; 2 – пристрій звуження; 3 - імпульсні трубки; 4 - дифманометр-витратомір.

енергії потоку речовини, яка проходить через встановлений в трубопроводі стандартний пристрій звуження. Створений при цьому перепад тисків є мірою витрати і вимірюється дифманометром (рис. 3.1). Як пристрій звуження потоку використовують *діафрагму* (рис. 3.1а), *сопло* (рис. 3.1б) та *трубу Вентурі* (рис. 3.1в).

Звуження потоку (рис. 3.2) починається з перерізу *А-А* і продовжується під дією сил інерції до перерізу *В-В*. Далі потік поступово розширюється до повного перерізу *С-С*. Тиск потоку біля стінки трубопроводу до пристрою звуження дещо зростає (P_1) та зменшується до мінімуму за звуженням в найбільш вузькому перерізі струменя (P_2) (рис. 3.2). Далі при розширенні потоку тиск його біля стінки знову підвищується, проте не досягає попереднього значення. Втрати тиску P_B зумовлені втратами енергії на тертя та завихрення.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

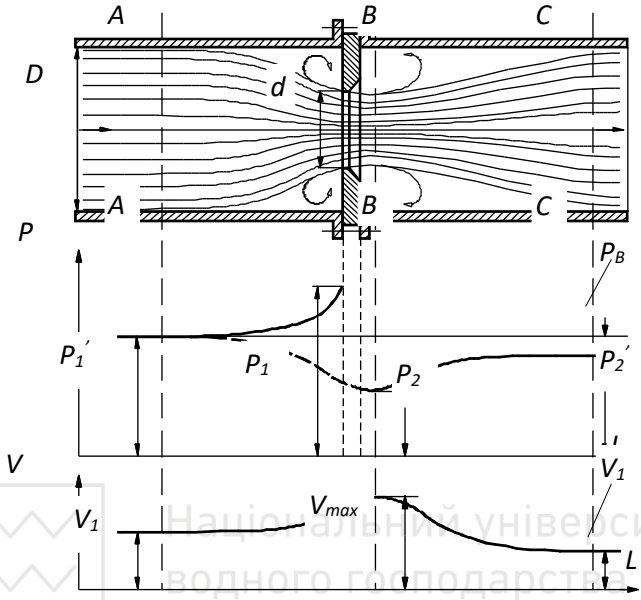


Рис. 3.2. Зміна тиску *P* та середньої швидкості *V* потоку при проходженні через діафрагму.

Характер потоку і розподіл тисків якісно однакові для всіх типів пристроїв звуження потоку, ось чому основні рівняння для них однакові, за винятком коефіцієнтів витрати, які визначаються дослідним шляхом.

Залежність між витратою і перепадом тиску можна встановити, використовуючи рівняння Бернуллі і рівняння нерозривності потоку:

$$\begin{cases} \dfrac{P_1'}{\rho_1} + \dfrac{V_1^2}{2} = \dfrac{P_2'}{\rho_2} + \dfrac{V_2^2}{2}; \\ P_1 \cdot V_1 \cdot S_1 = P_2 \cdot V_2 \cdot S_2, \end{cases} \tag{3.1}$$

де $\rho_1,\ P_1,\ V_1,\ S_1$ і $\rho_2, P_2,\ V_2,\ S_2$ - відповідно густина середовища, абсолютний тиск, швидкість, площа потоку в перерізах *A-A* і *C-C* до та після діафрагми (рис. 3.2). Розв'язуючи систему рівнянь (3.1), отримаємо залежності між об'ємною F_o або масовою F_m витратами та перепадом тисків $\Delta P = P_1 - P_2$ перед і за діафрагмою:

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$F_o = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_o \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \qquad (3.2)$$

$$F_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_o \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}, \qquad (3.3)$$

де α - коефіцієнт витрати; ε - поправковий множник на зміну густини середовища, яке проходить через пристрій звуження; $S_o = \pi \cdot d^2/4$ - площа прохідного отвору діафрагми.

Коефіцієнт витрати α залежить від типу пристрою звуження, його відносної площі $m = d^2/D^2$ та фізичних властивостей потоку, тобто є функцією числа Рейнольдса $Re = \frac{4 \cdot F_o \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu}$, де μ - динамічна в'язкість середовища (для повітря μ=1,81·10^{-5} *Па·с*). Крім того, для діафрагми коефіцієнт витрати α залежить від гостроти вхідного канту діафрагми, шорсткості поверхні діафрагми та стінок трубопроводу.

При вимірюванні витрат стискуваних речовин (газ, пара) вводиться поправковий множник ε. Для рідин $\varepsilon = 1$. Значення ε для газів і пари тим більше відрізняється від одиниці, чим більше відношення $\frac{P_1 - P_2}{P}$, де P - абсолютний тиск середовища на вході пристрою звуження. Крім того ε залежить від відносної площі пристрою звуження m та показника адіабати середовища χ: $\varepsilon = f\left(\frac{P_1 - P_2}{P},\ m,\ \chi\right)$. Коефіцієнти α і ε визначаються для кожного типу пристрою звуження [1].

Очевидно, що залежності F_m, F_o від $P_1 - P_2$ в (3.1) і (3.2) будуть однозначні, якщо в процесі вимірювання значення $\alpha, \varepsilon, S_o, \rho$ будуть постійні. Зміни цих величин спричинені похибками вимірювань, які можна оцінити лише в конкретних випадках [1, 2].

Для порівняння об'ємних витрат газових потоків їх попередньо приводять до певних умов (температура $T_H = 293{,}15$ *К*, тиск $P_H = 101325$ *Па*). Об'ємна витрата, приведена до нормальних умов $F_{ном}$, визначатиметься через відношення густин ($\rho / \rho_{ном}$) газового середовища при робочих і нормальних умовах: $F_{ном} = F_o \cdot \rho / \rho_{ном}$.

Дифманометри-витратоміри

Для вимірювання перепаду тисків на пристрої звуження використовують диференційні манометри. Найбільш розповсюджені серед них рідинні та деформаційні.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

До рідинних дифманометрів належить U -подібний, який широко застосовують, перш за все, в лабораторних умовах.

Прикладом деформаційного дифманометра є мембранний, показаний на рис. 3.3. Такий дифманометр складається з двох перетворювачів: мембранного 1 і диференційно-трансформаторного 2. Внутрішні порожнини металевих мембранних коробок 3 заповнені дистильованою водою. Більший тиск P_1 подається в нижню камеру А , менший - у верхню камеру В. Камери А і В розділені між собою перегородкою 4. Чутливим елементом приладу є

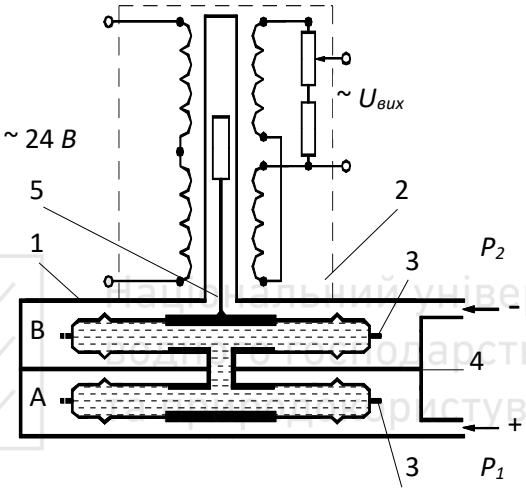


Рис. 3.3. Схема мембранного дифманометра-витратоміра:

1 - блок мембранних коробок; 2 - диференційно-трансформаторний перетворювач; 3 - мембранна коробка; 4 - перегородка; 5 - шток.

дві однакові мембранні коробки 3, створені зі зварених між собою металевих гофрованих пружних мембран. Коробки 3 закріплені на поділяючій перегородці 4. Внутрішні порожнини коробок сполучаються між собою через отвір в перегородці.

При зміні різниці тисків $\Delta P = P_1 - P_2$ блок мембранних коробок деформується, рухомі центри коробок переміщуються і вода перетікає з однієї коробки в другу. Деформація продовжується до зрівноваження зусилля, викликаного перепадом тисків зусиллям пружної деформації мембран. Блок мембранних коробок перетворює різницю тисків в лінійне переміщення рухомого центра верхньої мембрани та привареного до нього штока 5. Функція диференційно-трансформаторного перетворювача полягає

Національний університет
водного господарства

в перетворені переміщення штока у відповідну електричну напругу, яка вимірюється вторинним приладом 6 і є мірою перепаду тисків $\Delta P = P_1 - P_2$.

Інтегратори

Інтегратори є складовою частиною дифманометрів-витратомірів. Вони автоматично підсумовують поточні миттєві значення витрати і показують об'єм або масу речовини, яка пройшла через поперечний переріз трубопроводу за певний проміжок часу. З витратомірами змінного перепаду

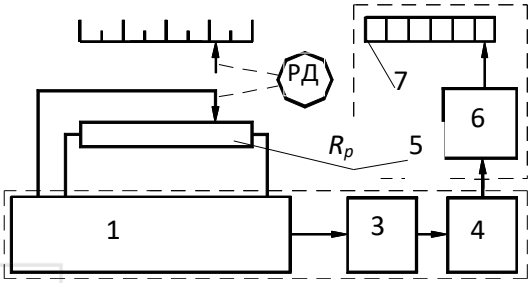


Рис. 3.4. Схема електричного інтегратора.

1 - мостова вимірювальна схема; 2 - блок керування; 3 - перетворювач частоти; 4 - підсилювач напруги; 5 - лічильний механізм; 6 - моментний мотор;

тиску використовують механічні, пневматичні, електричні інтегратори.

На рис. 3.4 показана схема електричного інтегратора. Інтегратор складається із мостової вимірювальної схеми, блока керування, лічильного механізму.

В склад мостової вимірювальної схеми 1 входять реохорд R_p і додаткові резистори. Значення напруги небалансу мостової вимірювальної схеми залежить від положення повзунка реохорда, тобто положення покажчика витрати відносно шкали приладу. Напруга небалансу подається на перетворювач 3 частоти блоку керування 2. Частота імпульсів вихідної напруги блока керування 2 пропорційна положенню повзунка реохорда і становить 0,375...1,5 *Гц.* Підсилені імпульси напруги з блока керування подаються на лічильний механізм 5, який складається з моментного мотора 6 (електромагніта з поворотним якорем) і механічного барабанного лічильника 7 імпульсів руху. Максимальна швидкість підсумовування інтегратора, яка відповідає положенню покажчика витратоміра на кінцевій позначці шкали, становить 1000 одиниць за годину. Кількість спрацювань інтегратора зміниться при зміщенні положення покажчика, тобто при зміні вимірюваної витрати.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2. Схема і опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 3.5) складається з баку 1 в якому знаходиться вода. Через кульовий кран 2 та механічний фільтр 3 за допомогою відцентрового насосу 4 вода прокачується по системі установки і знову повертається в бак 1. По напрямку руху води в системі установки, вода проходить через лічильник 6, а далі через діафрагму 8. Тиск води перед діафрагмою 8 вимірюється за допомогою *U*-подібного манометра 7, перепад тисків в діафрагмі 8 вимірюється за допомогою *U*-подібного дифманометра 9. Температура води в баку 1 вимірюється за допомогою лабораторного ртутного термометра 10. Регулювання витрати води в системі установки здійснюється покрокове, за допомогою частотного перетворювача обертів вала 5 відцентрового насосу 4.

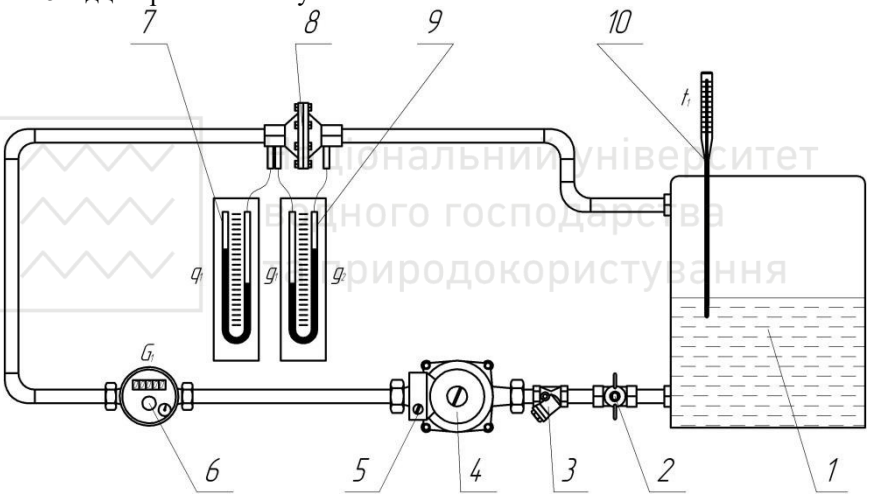


Рис. 3.5. Схема лабораторної установки

3. Порядок виконання роботи

3.1. Перед пуском лабораторної установки необхідно виміряти рівень охолоджуючої води в баку за допомогою мірної лінійки.

3.2. Записати температуру води в баку t_1 та тиск навколишнього середовища $P_б$.

3.3. Перемикач частотного перетворювача переключити в положення «I» та увімкнути відцентровий насос установки.

3.4. Зачекати 1 хв., щоб по системі прокачалась вода.

3.5. Увімкнути секундомір та миттєво подивитись початкові покази лічильника.

Національний університет
водного господарства

3.6. Зняти покази з U-подібного манометра і U-подібного дифманометра.

3.7. Вимкнути секундомір та миттєво зняти кінцеві покази лічильника.

3.8. Всі дослідні дані записати в таблицю 3.1.

3.9. Перемикач частотного перетворювача переключити в положення «II», другий дослід виконати згідно пп. 3.4 – 3.8, виконує інша бригада.

3.10. Перемикач частотного перетворювача переключити в положення «III», третій дослід виконати згідно пп. 3.4 – 3.8, виконує інша бригада.

Таблиця 3.1

Дослідні дані

$P_б$	t_1	g_1	g_2	q_1	V_1	V_2	τ
мм.рт.ст.	*°C*	*мм*		*мм*	$\frac{м^3}{год}$		*с.*

4. Обробка результатів досліду

4.1. З додатку 1 табл. II визначити питому вагу води в залежності від температури t_1 та тиску $p_б$.

4.2. З додатку 1 табл. I визначити коефіцієнт, який враховує тип диференційного манометра.

4.3. Визначити поправочний множник, який враховує теплове розширення діафрагми, (додаток 1 табл. III).

4.4. Визначити поправочний множник, який враховує теплове розширення трубопроводу установки, (додаток 1 табл. III).

4.5. Визначити відношення площ прохідного отвору діафрагми до отвору трубопроводу за формулою:

$$m = \frac{k_t}{k_t'} \cdot \left(\frac{d_{20}}{D_{20}} \right)^2 , \qquad (3.4)$$

де d_{20} - діаметр прохідного отвору діафрагми виміряний при температурі 20 *°C*, *мм*; D_{20} - діаметр трубопроводу виміряний при температурі 20 *°C*, *мм*.

4.6. Визначити вихідний коефіцієнт витрати діафрагми, скориставшись додатком 2 рис. I.

4.7. Визначити наближену масову витрату води за формулою, *кг/год*

$$G' = A \cdot \alpha' \cdot \varepsilon \cdot k_t \cdot d_{20}^2 \cdot \sqrt{h \cdot \rho_1} , \qquad (3.5)$$

де ε - поправочний множник, який враховує розширення (збільшення питомого об'єму) вимірюваної речовини під впливом перепадів тисків при проходження через звужуючий пристрій, для рідин внаслідок її нестисливості $\varepsilon = 1$; h - перепад тисків у звужувальному пристрої, *мм*,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$h = g_1 - g_2 . \qquad (3.6)$$

4.8. Визначити коефіцієнт динамічної в'язкості води в залежності від температури t_1, *кг·с/м²*, (додаток 1 табл. IV).

4.9. Визначити число Рейнольдса за формулою:

$$Re = 36100 \cdot \frac{G'}{D_{20} \cdot \mu_1}, \qquad (3.7)$$

4.10. Визначити граничне число Рейнольдса, (додаток 1 табл. V).

Якщо $Re \geq Re_{ГР}$, тоді коефіцієнт витрати α буде рівний вихідному коефіцієнту витрати α', що розрахований в п. 4.6.

Якщо $Re < Re_{ГР}$, тоді коефіцієнт витрати α визначається за формулою:

$$\alpha = \alpha' \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 , \qquad (3.8)$$

де $k_1; k_2; k_3$ - відповідно поправочний множник на в'язкість води, шорсткість трубопроводу та недостатню гостроту вхідної кромки діафрагми, (додаток 2, рис. II – IV):

4.11. Дійсна масова витрата визначається за формулою, *кг/год*

$$G = G' \cdot \frac{\alpha}{\alpha'} . \qquad (3.9)$$

4.12. Перевести об'ємну витрату лічильника в масову витрату за формулою, *кг/год*

$$G_Л = \frac{V_2 - V_1}{\tau} \cdot 3600 . \qquad (3.10)$$

4.13. Визначити похибку, порівнюючи масову витрату за показами лічильника з масовою витратою отриману при розрахунку діафрагми, %

$$\delta_G = \frac{|G_Л - G|}{G_Л} \cdot 100\% . \qquad (3.11)$$

4.14. Результати розрахунків записати в таблицю 3.2, зробити відповідні висновоки.

Таблиця 3.2

Результати розрахунків

m	$\frac{\Delta P}{P_1}$	α'	G'	Re	$Re_{гр}$	α	G	$G_Л$	δG
			$\frac{кг}{год}$				$\frac{кг}{год}$	$\frac{кг}{год}$	%

5. Контрольні питання

5.1. Поняття витрати та кількості, одиниці їх виміру.

Національний університет
водного господарства

5.2. Які прилади називають витратомірами, а які лічильниками кількості? Дайте визначення обох параметрів.

5.3. Витратоміри змінного перепаду тиску: принцип роботи, виведення рівняння витрати.

5.4. Стандартні звужуючі пристрої, їх особливості та характеристики, переваги, недоліки.

5.5. В якому випадку для виміру витрати чи швидкості рідких і газоподібних середовищ застосовують напірні трубки?

5.6. На чому ґрунтується принцип дії швидкісних лічильників?

5.7. На чому ґрунтується принцип дії об'ємних лічильників?

5.8. Зобразіть схему частотного ультразвукового витратоміра та електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем. Наведіть переваги, недоліки їх застосування.

5.9. Ротаметричні перетворювачі витрат; використання, будова. принцип дії.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Література

1. Денісов А. К., Денісов С. А. Теплотехнічні вимірювання та прилади: Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2013. 184 с.

2. Мурин Г. А. «Теплотехнічні вимірювання». М., «Енергія»1968. 584 с.

3. Співак О. Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навч. посіб. / О.Ю. Співак. Вінниця : ВНТУ, 2014. 137 с.

4. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процес сов». 3-е изд., перераб. М. : «Энергия», 1978. 704 с., ил.

5. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы: ученик для вузов/ Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Издательство МЭИ, 2005. 460 с., ил.

6. Курилов А. Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: навч. посіб. / А. Ф. Курилов, В. М. Козін. Суми : Сумський державний університет, 2015. 189 с.

7. Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., доп. М. : Энергоатомиздат, 1985. 328 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Додаток 1

Таблиця І

Вимірювана речовина	Тип диференційного манометра	Коефіцієнт *A*
Вода, пара	Рідинний скляний і поплавковий, заповнені ртуттю і над нею водою	0,0444
	Рідинний скляний і поплавковий, заповнені водою і над нею газом (повітря), а також мембранний, кільцевий і ковпакові, покази яких виражені у *мм.вод.ст.*	0,0125
	Мембранний, кільцевий і ковпакові, покази яких виражені у *мм.рт.ст.*	0,0461
Газ (повітря)	Рідинний скляний і поплавковий, заповнені водою і над нею газом (повітря), а також мембранний, кільцевий і ковпакові, покази яких виражені у *мм.вод.ст.*	0,0125
	Рідинний скляний і поплавковий, заповнені ртуттю і над нею газом (повітря), а також мембранний, кільцевий і ковпакові, покази яких виражені у *мм.вод.ст.*	0,0461

Таблиця ІІ

t_1, °C	*p, ата*							
	1	20	50	80	100	130	160	200
1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***
0	999,9	100,8	1002,3	1003,8	1004,8	1006,2	1007,7	1009,6
20	998,2	999	1000,3	1001,7	1002,5	1003,8	1005	1006,7
40	992,2	993	994,3	995,5	996,4	997,7	998,9	1000,5
60	983,2	984,2	985,4	986,7	987,6	988,8	990,1	991,8
80	971,8	972,8	974,1	975,4	976,3	977,6	978,9	980,6
100	958,4	959,2	960,7	962,1	963	964,3	965,6	967,4
120	-	944	945,4	946,9	947,9	949,2	950,7	952,6
140	-	927	928,5	930,1	931,1	932,6	934,1	936,2
160	-	908,2	909,9	911,6	912,7	914,3	916	918,1
180	-	887,5	889,4	891,3	892,6	894,6	896,3	898,6
200	-	865	867,2	869,3	870,7	872,8	874,9	877,6
220	-	-	842,6	841,5	846,7	849,1	851,5	854,6
240	-	-	815,3	818,3	820,2	823,1	825,9	829,5

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Продовження табл. II

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
260	-	-	784,3	788,1	790,5	794	797,4	801,8
280	-	-	-	753,1	756,3	760,9	765,1	770,6
300	-	-	-	-	715,4	721,6	727,5	734,6
320	-	-	-	-	-	672,5	681,2	691,6
340	-	-	-	-	-	-	617,6	636,5
360	-	-	-	-	-	-	-	547

Таблиця III

Температура, °С	Матеріал					
	Сталь 20, 20М, 15ХМА, 15М, 12МХ	Сталь Х23Н13, Х18Н25С2	Сталь 1Х18Н9Т	Бронза	Чугун, сталь Х17, Х17Н9	Сталь Х6СМ, Х7СМ, Х55
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
20	1	1	1	1	1	1
40	1,0002	1,00026	1,00032	1,00037	1,00017	1,00018
60	1,00045	1,00053	1,00064	1,00073	1,00037	1,00041
80	1,0007	1,00081	1,00097	1,00107	1,00057	1,00064
100	1,00095	1,0011	1,0013	1,00141	1,00077	1,00087
120	1,0012	1,0014	1,00163	1,00176	1,00097	1,0011
140	1,00145	1,00171	1,00197	1,00212	1,00118	1,00133
160	1,00171	1,00203	1,00232	1,00247	1,0014	1,00157
180	1,00197	1,00236	1,00267	1,00283	1,00162	1,00182
200	1,00224	1,00271	1,00302	1,00318	1,00185	1,00207
220	1,00251	1,00309	1,00338	1,00355	1,00208	1,00233
240	1,00279	1,0035	1,00373	1,00392	1,00233	1,0026
260	1,00307	1,0039	1,00409	1,0043	1,00258	1,00287
280	1,00336	1,0043	1,00444	1,00467	1,00285	1,00313
300	1,00365	1,0047	1,0048	1,00505	1,00312	1,0034
320	1,00394	1,00511	1,00516	1,00544	1,0034	1,00367
340	1,00423	1,00552	1,00551	1,00584	1,00368	1,00395
360	1,00452	1,00593	1,00587	1,00623	1,00397	1,00423
380	1,00481	1,00634	1,00622	1,00663	1,00427	1,00452
400	1,0051	1,00672	1,00658	1,00703	1,00457	1,00482
420	1,00541	1,00716	1,00693	1,00746	1,00488	1,00513
440	1,00572	1,00757	1,00728	1,00789	1,0052	1,00543
460	1,00603	1,00798	1,00763	1,00833	1,00552	1,00574
480	1,00634	1,00839	1,00798	1,00876	1,00587	1,00604

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Продовження табл. III

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
500	1,00665	1,0088	1,00833	1,0092	1,00623	1,00635
520	1,00699	1,00923	1,00868	-	-	1,00665
540	1,0073	1,00966	1,00904	-	-	1,00693
560	1,00764	1,0101	1,00939	-	-	1,0072
580	1,00798	1,01052	1,00975	-	-	1,00743
600	1,00833	1,01095	1,0101	-	-	1,00795

Таблиця IV

t_1, °C	$\mu \cdot 10^6$ кг · с / м^2	t_1, °C	$\mu \cdot 10^6$ кг · с / м^2	t_1, °C	$\mu \cdot 10^6$ кг · с / м^2
0	182,27	30	81,71	60	47,9
5	154,43	35	73,42	65	44,42
10	133,09	40	66,57	70	41,39
15	116,23	45	60,71	80	36,24
20	109,37	50	56,01	90	32,06
25	91,11	55	51,66	100	28,75

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця V

m	$Re_{ГР}$		m	$Re_{ГР}$	
	Діафрагма	Сопла		Діафрагма	Сопла
0,05	23000	60000	0,4	200000	165000
0,1	36000	65000	0,45	270000	180000
0,15	54000	75000	0,5	330000	190000
0,2	74000	90000	0,55	430000	200000
0,25	100000	110000	0,6	550000	200000
0,3	135000	125000	0,65	750000	200000
0,35	160000	145000	0,7	1100000	-

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Додаток 2

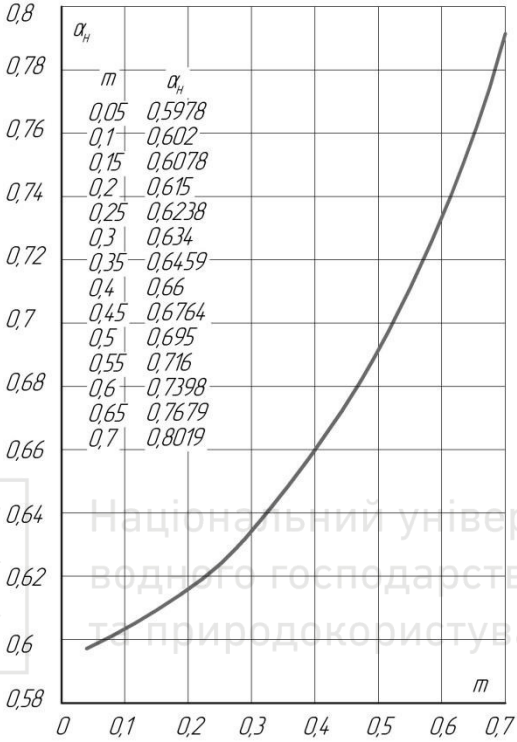


Рис. І. Вихідний коефіцієнт витрати стандартної діафрагми.

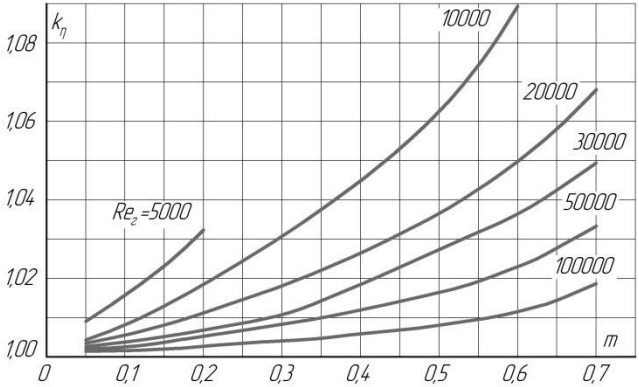


Рис. ІІ. Поправочний множник до вихідного коефіцієнта витрати стандартної діафрагми на в'язкість вимірюваного середовища.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

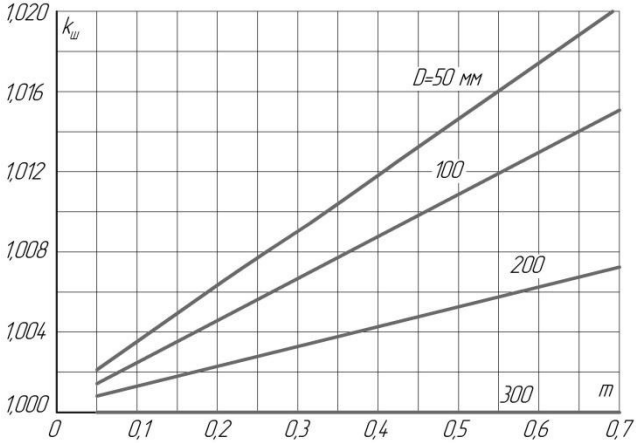


Рис. III. Поправочний множник до вихідного коефіцієнта витрати стандартної діафрагми на шорсткість стінок трубопроводу.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

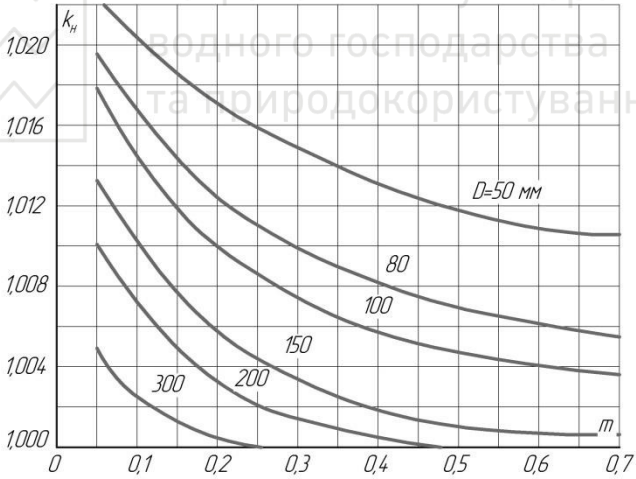


Рис. IV. Поправочний множник до вихідного коефіцієнта витрати стандартної діафрагми на недостатню гостроту вихідної кромки.