

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Н. І. КОСАЧ

ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РЕЧОВИН

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2015

УДК 681.121:532.57 (075.8)
ББК 31.32Я73
К71

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Є. Т. Володарський,
д-р техн. наук, проф. О. Є. Середюк

Косач, Н. І.

К71 Вимірювання витрати речовин [Текст]: навч. посіб. / Н. І. Косач. – Х. :
Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2015. – 39 с.

ISBN 978-966-662-425-6

Наведено основи гідро- і газодинаміки стосовно вимірювання витрати речовин. Розглянуто теоретичні відомості про основні методи і засоби вимірювання витрати речовин, а також запитання для самоперевірки.

Для студентів вищих навчальних закладів напрямку підготовки «Метрологія, стандартизація і сертифікація», а також для науковців, аспірантів і викладачів.

Іл. 11. Табл. 3. Бібліогр.: 19 назв

УДК 681.121:532.57 (075.8)
ББК 31.32Я73

ISBN 978-966-662-425-6

© Косач Н. І., 2015
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2015

ВСТУП

Навчальний посібник має прикладну спрямованість – підвищення рівня робіт, зокрема метрологічних, на підприємствах, пов'язаних з розробленням і застосуванням витратовиміральної техніки. Це досягається шляхом об'єднання зусиль працівників як метрологічної, так і технологічної служб. Ефективність такого співробітництва забезпечується лише за умов, у першу чергу, підвищення рівня метрологічної освіти спеціаліста-метролога.

Посібник спрямований на покращання якості викладання і опанування дисципліни з навчального плану підготовки бакалаврів-метрологів за напрямом підготовки «Метрологія, стандартизація і сертифікація».

У посібнику наведено терміни і визначення їхніх понять, які застосовуються під час викладення матеріалу, загальні питання вимірювання витрати речовин, критерії вибору та нормування похибок засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Акцентується увага на методах вимірювання витрати речовин.

Для контролю засвоєння матеріалу подано запитання для самоперевірки.

Посібник є корисним у процесі опанування дисципліни «Вимірювання маси і витрати», а також для науковців, аспірантів і викладачів споріднених спеціальностей.

ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У посібнику застосовуються такі терміни і визначення їхніх понять.

Вимірювальний канал (ВК) – функціонально об'єднана сукупність засобів вимірювальної техніки та інших технічних засобів від місця відбору до пристрою подання інформації про виміряну фізичну величину.

Вимірювальна система (ВС) – сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших технічних засобів, призначених для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, оброблення і подання споживачу (у т.ч. введення в автоматизовану систему керування) у необхідному вигляді.

Єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їхні результати виражаються в одиницях вимірювання, визначених Законом України «Про метрологію і метрологічну діяльність», а характеристики похибок або невизначеності вимірювань відомі з певною ймовірністю і не виходять за встановлені границі.

Засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) – це засоби вимірювань, вимірювальні системи, матеріальні міри, стандартні зразки і будь-які складові засобів вимірювань або вимірювальних систем, якщо ці складові можуть бути об'єктом спеціальних вимог і окремого оцінювання відповідності.

Забезпечення якості експлуатації ЗВТ – діяльність, що планується, систематично здійснюється і спрямована на те, щоб усі роботи, які пов'язані з експлуатацією ЗВТ, були проведені певним чином, а результати цих робіт задовольняли вимогам, що ставляться до них.

Калібрування – сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з властивими їм невизначеностями вимірювань, і відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань. На другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу.

Метрологічна діяльність – діяльність, що пов'язана із забезпеченням єдності вимірювань.

Метрологічне забезпечення – це встановлення і застосування науково-технічних і організаційних основ, технічних приладів, метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення і застосування технічних засобів з метою забезпечення єдності й встановленої точності вимірювань. Метрологічне забезпечення у науковому аспекті базується на метрології.

Метрологічне забезпечення технічних пристроїв – це сукупність науково-технічних засобів, організаційних засад і засад, які проводяться відповідними організаціями з метою досягнення єдності та необхідної точності вимірювань, а також встановлених характеристик технічних приладів.

Одиниця вимірювання – визначена і прийнята за угодою величина, з якою може бути порівняна будь-яка інша величина того самого роду для вираження співвідношення двох величин у вигляді числа.

Одиниця фізичної величини – це фізична величина фіксованого розміру, якій умовно присвоєно числове значення, що дорівнює одиниці, і яка застосовується для кількісного вираження однорідних з нею величин.

Розмір фізичної величини – кількісне визначення фізичної величини, притаманне конкретному матеріальному об'єкту, системі чи процесу.

Розмірність фізичної величини – вираз у формі степеневого одночлена, складеного з добуток символів основних фізичних величин у різних ступенях, і який відображає зв'язок цієї фізичної величини з фізичними величинами, прийнятими у цій системі величин за основні з коефіцієнтом пропорційності, що дорівнює одиниці.

Фізична величина – одна з властивостей фізичного об'єкта (фізичної системи, явища чи процесу), загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного з них.

1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РЕЧОВИН

1.1 Напрямки вимірювання витрати

Вимірювання витрати речовин – рідинних або газових потоків – є досить розповсюдженим видом вимірювання у багатьох сферах економіки і застосовується:

- для контролю рідини або газів:
 - у промислових процесах і системах автоматизації;
 - у хімічній, нафтохімічній і харчовій промисловості;
- під час контролю витрати чи динаміки води у каналах, річках, зокрема, її забруднення;
- під час транспортування і зберігання сирої нафти, нафти і нафтопродуктів, зрідженого природного газу;
- для здійснення облікових операцій за спожиті газ, воду, нафту і нафтопродукти;
- під час обліку стічних вод.

1.2 Визначення витрати речовини

Витрата речовини (q) – це фізична величина, яка дорівнює відношенню прирощення маси (ΔM) (об'єму (ΔV)) речовини (рідини, газу), що протікає по трубопроводу через переріз, перпендикулярний напрямку швидкості потоку, до інтервалу часу (Δt), за який це прирощення здійснилося, за необмежене зменшення цього інтервалу часу:

$$q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta M (\Delta V)}{\Delta t}. \quad (1.1)$$

Витрату речовини поділяють на:

- **об'ємну витрату (q_V)**, яка вимірюється в одиницях об'єму речовини за одиницю часу, м³/с;
- **масову витрату (q_M)**, яка вимірюється в одиницях маси речовини за одиницю часу, кг/с.

Між витратою, швидкістю потоку, площею поперечного перерізу потоку, зокрема трубопроводу, існує взаємозв'язок, який описується співвідношеннями

$$q_V = v \cdot S, \quad q_M = \rho \cdot q_V, \quad (1.2)$$

де v – швидкість потоку речовини, м/с;

S – площа поперечного перерізу потоку речовини, м²;

ρ – густина речовини, кг/м³.

1.3 Визначення маси і об'єму плинної речовини

Маса (M) або об'єм (V) речовини, що протікає, зокрема, по трубопроводу, – це фізична величина, яка дорівнює масовій або об'ємній витраті, що пройшла за певний час t , і визначається у одиницях маси (кг) або об'єму (м^3), відповідно, за формулами

$$M = q_M t; \quad (1.3)$$

$$V = q_V t, \quad (1.4)$$

де t – час, за який визначається кількість плинної речовини, с.

1.4 Класифікація потоків

Потоки речовини (рідини, газу) поділяють на:

- ламінарний і турбулентний,
- стійкий і динамічний (пульсуючий),
- середній, максимальний і робочий,
- стисливий і нестисливий,
- рідинний і газовий.

Ламінарний потік – вид потоку в'язкої речовини (рідини, газу), при якому перемішування між її сусідніми шарами відсутнє.

Турбулентний потік – вид потоку в'язкої речовини (рідини, газу), при якому сусідні її шари перемішуються.

Стійкий потік – потік, який здатний зберігати свій стан (швидкість і напрямок) під час впливу на нього зовнішніх факторів.

Динамічний (пульсуючий) потік – потік, який здатний змінювати свій стан (швидкість і напрямок) під час впливу на нього зовнішніх факторів.

Середній потік – потік, швидкість якого дорівнює середньому значенню у перетині.

Максимальний потік – потік, швидкість якого дорівнює максимально можливій для певного режиму течії.

Робочий потік – потік, швидкість якого є найбільш придатною для певного режиму течії.

Стисливий потік – потік, який змінює свій первинний об'єм під дією перепаду тисків або під час зміни температури.

Нестисливий потік – потік, який не змінює свій первинний об'єм під дією будь-якого впливового фактору.

1.5 Впливові параметри

На характеристики потоків вимірюваної речовини впливають такі параметри:

- температура речовини,
- тиск речовини,
- в'язкість речовини.

1.6 Зв'язок тиску, швидкості й рівня рідини в потоці

Зв'язок тиску, швидкості й рівня рідини в потоці описується рівнянням Бернуллі:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 = \text{const}, \quad (1.5)$$

де p – тиск в потоці рідини, Па;

v – швидкість потоку рідини, м/с;

h – висота потоку рідини відносно деякого вибраного рівня, м;

g – прискорення вільного падіння в потоці рідини, м/с².

1.7 Число Рейнольдса

Число Рейнольдса (Re) – безрозмірний параметр, який характеризує співвідношення інерційних і в'язких сил у потоці й кількісно дорівнює відношенню добутку характерної густини, характерної швидкості та характерного лінійного розміру течії до динамічної в'язкості речовини:

$$\text{Re} = \frac{\text{Сили інерції}}{\text{Сили в'язкості}} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu}, \quad (1.6)$$

де ρ – характерна густина речовини – її деяке середнє значення у потоці, кг/м³;

v – характерна швидкість потоку рідини – її деяке середнє значення у потоці, м/с;

D – характерний лінійний розмір течії, зокрема, діаметр трубопроводу, м;

μ – динамічна в'язкість речовини, Па·с;

ν – кінематична в'язкість речовини, м²/с.

Динамічна в'язкість речовини – фізична величина, що дорівнює відношенню поздовжнього дотичного напруження і внутрішнього тертя при прямолінійному русі речовини до градієнта швидкості по нормалі до напрямку руху.

Одиниця динамічної в'язкості – Па·с, яка визначається як сила опору, що виникає під час зсуву двох шарів речовини площею в 1 м² зі швидкістю 1 м/с, які знаходяться один від одного на відстані 1 м (Па·с = кг/м·с).

Кінематична в'язкість речовини визначається як відношення динамічної в'язкості речовини до її густини:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.7)$$

Одиниця кінематичної в'язкості – м²/с.

За числом Рейнольдса визначається характер течії потоку речовини – ламінарний чи турбулентний.

1.8 Режими потоків

Ламінарний потік

Спостерігається за невеликих швидкостей, коли окремі місцеві збурення в потоці речовини за рахунок в'язкості швидко згасають. У таких потоках домінують сили в'язкості.

Ламінарна течія – впорядкований рух речовини, при якому рідина чи газ рухаються шарами, паралельними до напрямку течії.

Критерій ламінарного потоку: $Re < 2500$.

Профіль швидкості ламінарного потоку речовини у трубопроводі наведено на рис. 1.1.

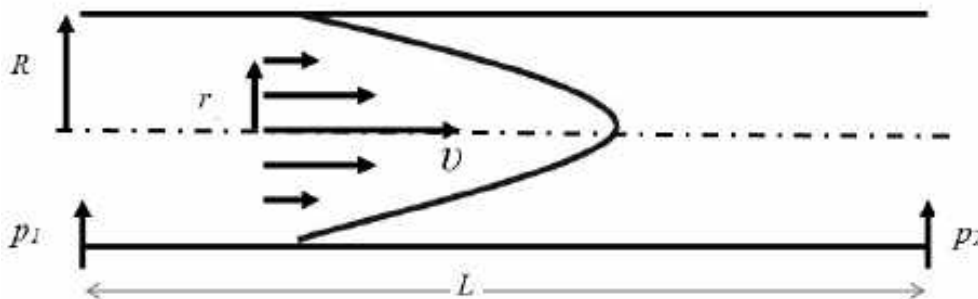


Рисунок 1.1 – Профіль швидкості ламінарного потоку у трубопроводі

Швидкість течії ламінарного потоку речовини у трубопроводі має параболічний характер і визначається за формулою

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu L} (R^2 - r^2), \quad (1.8)$$

де p_1 , p_2 – тиск речовини у двох перерізах потоку на відстані L (м), Па;

R – радіус трубопроводу, м;

r – відстань від осі трубопроводу до часток потоку за радіусом, м.

На стінці трубопроводу швидкість течії дорівнює нулю (домінують сили в'язкості та речовина «прилипає» до стінки), а на осі – вона максимальна і дорівнює

$$v_{осі} = v_{max} = 2 v_{сер}. \quad (1.9)$$

Об'ємну витрату речовини в трубопроводі визначають за законом Хагена–Пуазейля:

$$q_v = \frac{\pi \cdot R^4}{8\mu L} \Delta p = C_L \Delta p, \quad (1.10)$$

де $C_L = \frac{\pi \cdot R^4}{8\mu L}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя у трубопроводі при ламінарному

потоці, м³/Па·с;

Δp – різниця тисків речовини на деякій ділянці трубопроводу, Па, яка визначається за формулою

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (1.11)$$

де p_1 – тиск речовини на початку ділянки трубопроводу, Па;

p_2 – тиск речовини в кінці ділянки трубопроводу, Па.

Умовою переходу ламінарної течії у турбулентну є перевищення числа Рейнольдса його критичного значення, яке становить ~ 2500 ($Re \approx 2500$).

Перехід від ламінарного потоку до турбулентного – процес нестабільний: має місце зона переміжності, коли у потоці речовини можуть одночасно існувати області з ламінарною і турбулентною течіями. Протяжність зони переміжності залежить від багатьох факторів і, у першу чергу, від температури, тиску та хімічного складу речовини.

Турбулентний потік

Спостерігається за швидкістю, коли здійснюється змішування часток потоку на макроскопічному рівні. У потоці домінують сили інерції.

Характеризується нестабільністю і хаотичністю руху його елементарних частинок, що супроводжується утворенням вихорів.

Критерій турбулентного потоку: $Re > 2500$.

Профіль швидкості потоку речовини у трубопроводі має логарифмічний характер і залежить від числа Рейнольдса: при його збільшенні профіль потоку стає більш плоским (рис. 1.2)

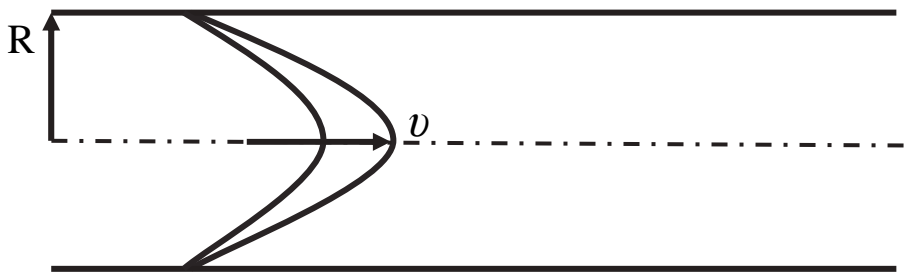


Рисунок 1.2 – Профіль швидкості турбулентного потоку у трубопроводі

На стінці трубопроводу, як і у випадку ламінарного потоку, швидкість течії дорівнює нулю, на осі вона максимальна, однак величина її значно менша, ніж у ламінарному потоці (профіль швидкості більш плоский) і становить

$$v_{oci} = v_{max} = 1,23 \cdot v_{сер}. \quad (1.12)$$

Об'ємну витрату речовини у трубопроводі визначають за формулою

$$q_v = C_T \sqrt{\Delta p}, \quad (1.13)$$

де C_T – коефіцієнт гідравлічного тертя у трубопроводі при турбулентному потоці, який визначається за різними формулами, залежно від ступеню шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу.

Зона переміжності течії в потоці

Зона течії речовини, в якій одночасно присутні як елементи турбулентного (вихровий рух речовини), так і ламінарного (паралельний рух шарів речовини) потоків, являє собою зону переміжності.

У цій зоні рух речовини нестійкий, нестабільний і характеризується, як правило, числами Рейнольдса – від 2000 до 4000.

2 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВТ ВИТРАТИ

2.1 Класифікація ЗВТ витрати

ЗВТ витрати за їхнім призначенням класифікуються таким чином:

Витратомір – ЗВТ, призначений для вимірювання об'ємної ($\text{м}^3/\text{с}$) і (або) масової ($\text{кг}/\text{с}$) витрати речовини.

Лічильник – ЗВТ, призначений для вимірювання об'єму (м^3) і (або) маси (кг) речовини, що протікає в трубопроводі через переріз, перпендикулярний напрямку швидкості потоку.

Витратомір-лічильник – ЗВТ, призначений для вимірювання об'ємної чи масової витрати, об'єму або маси речовини, що протікає в трубопроводі через переріз, перпендикулярний напрямку швидкості потоку.

Перетворювач витрати – ЗВТ, у якому створюється сигнал вимірювальної інформації, пропорційний масовій або об’ємній витраті, поданий в аналоговій або цифровій формі.

2.2 Метрологічні характеристики ЗВТ витрати, що нормуються

Для ЗВТ витрати повинні нормуватися:

- номінальна статична характеристика перетворення,
- діапазон вимірювання,
- інформативний параметр вихідного сигналу,
- характеристики систематичної складової похибки,
- характеристики випадкової складової похибки,
- характеристики основної похибки,
- неінформативні параметри вихідного сигналу,
- вплив ЗВТ витрати на потік,
- динамічна характеристика,
- функція впливу $\psi(\xi)$, де ξ – впливова величина,
- метрологічна надійність.

2.2.1 Номінальна статична характеристика перетворення

Визначають і нормують вид апроксимуючого рівняння, яке встановлює залежність між витратою та інформативним параметром вихідного сигналу.

Види апроксимуючих рівнянь:

$$q = a + bx + cx^2, \quad q = a + bx, \quad q = bx, \quad (2.1)$$

де a , b , c – коефіцієнти рівняння.

2.2.2 Діапазон вимірювання

Визначають границями вимірювання витрати речовини від q_{\min} до q_{\max} , у якому нормують похибки вимірювання.

2.2.3 Інформативний параметр вихідного сигналу

Нормують:

- фізичну величину,
- нижню границю вимірювання фізичної величини – X_{\min} ;
- верхню границю вимірювання фізичної величини – X_{\max} .

Найменування фізичної величини:

1) для аналогового вихідного сигналу:

- напруга U ,
- сила струму I ;

2) для частотного вихідного сигналу:

- середня частота слідування електричних імпульсів f (далі – частота електричних імпульсів);

3) для цифрового вихідного сигналу:

- код;

4) для механічного (пневматичного) вихідного сигналу:

- переміщення покажчика шкали.

При індивідуальному нормуванні нижню і верхню границі вимірювання інформативного параметра визначають за розрахунковими величинами, отриманими за рішенням апроксимуючого рівняння при $q = q_{\min}$ і $q = q_{\max}$.

При типовому нормуванні нижня і верхня границі вимірювання інформативного параметра визначаються як найменше X_{\min} і найбільше X_{\max} значення у виборці, округлені відповідно до найближчого меншого і більшого членів ряду R20 за ГОСТ 8032.

2.2.4 Систематична складова похибки

При визначенні систематичної складової похибки нормують її границі, які оцінюють за результатами калібрування (градування) ЗВТ витрати.

При індивідуальному нормуванні оцінкою систематичної складової похибки є границі її відносної величини δ (δ_c).

При типовому нормуванні оцінкою систематичної складової похибки є верхня границя її змінення δ_v (δ_c), яка визначається за сукупністю індивідуальних значень δ_j (δ_c), де j – порядковий номер елемента вибірки.

2.2.5 Випадкова складова похибки

При визначенні випадкової складової похибки нормують середній квадратичний відхил (СКВ) і функцію її розподілу, які оцінюють за результатами калібрування (градування) ЗВТ витрати.

При індивідуальному нормуванні СКВ σ (σ_v) оцінюють у відносній формі; оцінкою функції розподілу випадкової складової похибки є стандартна апроксимація за МИ 1317.

При типовому нормуванні СКВ оцінюють за його верхньою границею σ (σ_v). При цьому оцінюють ймовірність $P(\sigma_v)$, з якою СКВ знаходиться у границях від математичного очікування $M[\delta]$ до верхньої границі.

2.2.6 Основна похибка

При визначенні основної похибки нормують її границі, які оцінюють за результатами калібрування (градування) ЗВТ витрати.

При індивідуальному нормуванні оцінкою основної похибки δ є сума границь відносних випадкової і систематичної складової похибки ЗВТ витрати. При цьому встановлюють закон розподілу і задають довірчу ймовірність P для оцінювання границі випадкової складової похибки.

При типовому нормуванні оцінкою основної похибки δ служить її верхня границя δ_v у виборці.

Визначають ймовірність $P(\delta)$, з якою основна похибка знаходиться у границях від математичного очікування $M[\delta]$ до верхньої границі δ_v .

2.2.7 Неінформативні параметри вихідного сигналу

Неінформативні параметри визначають за результатами випробувань «Перевірка працездатності».

Перелік параметрів і способи їх нормування встановлюють у стандартах на загальні технічні умови або у технічних умовах на ЗВТ витрати конкретного типу.

Перелік параметрів, що нормуються, наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри вихідного сигналу, що нормуються

Інформативний параметр	Неінформативні параметри, що нормуються
Частота електричних імпульсів	Амплітуда напруги Форма
Напруга	Рівень шуму
Сила струму	Рівень шуму
Код	Вид коду. Число розрядів
Переміщення покажчика шкали	Амплітуда коливання покажчика шкали

2.2.8 Вплив ЗВТ витрати на потік

При визначенні впливу ЗВТ витрати на потік нормують гідравлічний опір первинного перетворювача ЗВТ Δp , який оцінюють за результатами випробувань «Оцінювання впливу на потік».

При індивідуальному нормуванні впливу ЗВТ витрати на потік оцінюють витрати тиску Δp (кг/м²) у потоці на ЗВТ витрати, користуючись рівнянням

$$\Delta p = K \cdot Re^2, \quad (2.2)$$

де K – коефіцієнт, який характеризує гідравлічний опір ЗВТ витрати.

При типовому нормуванні оцінками гідравлічного опору є номінальна $\Delta p_{ном} = \varphi_{ном}(Re)$ і гранична $\Delta p_{max} = \varphi_{max}(Re)$ функції впливу ЗВТ витрати на потік, які визначаються за сукупністю індивідуальних оцінок гідравлічного опору у виборці.

2.2.9 Динамічні характеристики ЗВТ витрати

При визначенні динамічної характеристики ЗВТ витрати нормують час встановлення показів τ_q , який оцінюють за результатами випробувань «Оцінювання інерційності».

При індивідуальному нормуванні визначають номінальне значення часу встановлення показів $\tau_{q,ном}$.

При типовому нормуванні оцінюють середнє по виборці значення часу встановлення показів $\tau_{q,сер}$, верхню $\tau_{q,в}$ і нижню $\tau_{q,н}$ границі його зміння.

2.2.10 Функції впливу

Функції впливу $\psi(\xi)$ нормують окремо для кожної впливової величини ξ . Здійснюють тільки типове нормування.

Нормують номінальну $\psi_{\text{ном}}(\xi)$ і граничну $\psi_{\text{гр}}(\xi)$ функції впливу, границі вимірювання впливових величин ($\xi_{\text{min}} - \xi_{\text{max}}$).

Функцію впливу оцінюють за результатами випробувань «Оцінювання функції впливу».

2.2.11 Метрологічна надійність

При визначенні метрологічної надійності ЗВТ витрати нормують:

- міжповірочний (міжкалібрувальний) інтервал $\tau_{\text{мп}}$, який являє собою час безвідмовної роботи ЗВТ витрати з нормованими метрологічними характеристиками і який залежить від режиму його експлуатації;
- значення допустимої основної похибки ЗВТ.

Здійснюють тільки типове нормування міжповірочного (міжкалібрувального) інтервалу.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛУ ЗВТ ВИТРАТИ

Вихідним сигналом ЗВТ витрати є інформація про вимірювану величину, яка може бути подана як безпосередньо в одиницях вимірюваної величини, так і, зокрема, у виді аналогового вихідного сигналу, пропорційного тій самій вимірюваній величині.

Вихідні сигнали ЗВТ витрати пропорційні вимірюваній величині, які визначають за формулою

$$X_i = X_{\text{min}} + (N_i - N_{\text{min}}) \cdot \left[\frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{N_{\text{max}} - N_{\text{min}}} \right], \quad (3.1)$$

де X_i – значення вихідного сигналу, який відповідає виміряній величині;

X_{min} – мінімальне значення діапазону вихідного сигналу, яке відповідає мінімальному значенню діапазону вимірювання;

N_i – значення виміряної величини;

N_{min} – мінімальне значення діапазону вимірювання;

X_{max} – максимальне значення вихідного сигналу, яке відповідає максимальному значенню діапазону вимірювання;

N_{max} – максимальне значення діапазону вимірювання.

Вимірювану величину за аналоговим вихідним сигналом визначають за формулою

$$N_i = N_{\text{min}} + (X_i - X_{\text{min}}) \cdot \left[\frac{N_{\text{max}} - N_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \right]. \quad (3.2)$$

Діапазони сигналів постійного струму для засобів вимірювання і автоматизації (ЗВА), зокрема, і тих, що входять до агрегатних комплексів (АК), а також вхідні та навантажувальні опори наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Діапазони сигналів постійного струму, вхідні та навантажувальні опори

Діапазони сили струму, мА		Максимальний опір, Ом	
сигналів ЗВА, що не входять до АК	сигналів ЗВА, що входять до АК	вхідний, не більше	навантажений, не менше
Від 0 до 5 включно	Від 0 до 5 включно	500	2500 (2000)
Від -5 до +5 включно	Від -5 до +5 включно	500	2500 (2000)
Від 0 до 20 включно	Від 0 до 20 включно	250	1000 (500)
Від 4 до 20 включно	Від 4 до 20 включно	250	1000 (500)
Від -20 до +20 включно*	-	250	1000 (500)
Від -100 до +100 включно*	-	150	250 (100)

Примітки. * - допускається за погодженням із замовником.

Величини, що зазначені у дужках, відносяться до ЗВА, які виконані на інтегральних мікросхемах.

Діапазони абсолютних значень сигналів напруги постійного струму, вхідні та навантажувальні опори наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Абсолютні значення сигналів напруги постійного струму, вхідні та навантажувальні опори

Діапазони напруги, В		Мінімальний опір, Ом	
сигналів ЗВА, що не входять до АК	сигналів ЗВА, що входять до АК	вхідний, не менше	навантажений, не більше
Від 0 до 0,01 включно*	-	10000	-
Від 0 до 0,05 включно*			
Від 0 до 0,10 включно*			
Від 0 до 1 включно			
Від -1 до +1 включно			
Від 0 до 5 включно	Від 0 до 5 включно	-	1000
Від 1 до 5 включно	Від 1 до 5 включно		1000
Від -5 до +5 включно	-	-	1000
Від 0 до 10 включно	Від 0 до 10 включно		2000
Від -10 до +10 включно	Від -10 до +10 включно		2000
Від 2,4 до 12,6 включно	-		-
Від -2,4 до -12,6 включно			

Примітка. * - допускається за погодженням із замовником.

4 ВИБІР ЗВТ ВИТРАТИ

Головна мета всіх вимірювань – отримання достовірних і точних даних про об'єкт вимірювання. Тому вибору ЗВТ слід приділяти достатньо уваги і при цьому враховувати допустиме значення похибки для певного вимірювання, яке встановлено у відповідних нормативних документах.

Під час вибору ЗВТ необхідно враховувати методи виконання вимірювань, допустимі відхилення і способи контролю отриманих результатів.

4.1 Критерії вибору ЗВТ

Головним критерієм вибору ЗВТ є його відповідність вимогам достовірності вимірювань, отримання дійсних значень вимірюваних величин з заданою точністю при мінімальних часових і матеріальних витратах.

Інформація, яку необхідно мати для оптимального вибору ЗВТ, це:

- номінальне значення вимірюваної величини;
- діапазон вимірювання (мінімальне і максимальне значення вимірюваної величини), який регламентується в нормативних документах;
- дані про умови проведення вимірювання.

Під час вибору ЗВТ для вимірювальної системи необхідно керуватися критеріями його точності. Це пов'язано з тим, що похибка вимірювальної системи має обчислюватися (визначатися) як сума похибок усіх елементів системи (мір, ЗВТ, вимірювальних перетворювачів) згідно з встановленим для кожної системи законом.

4.2 Попередній вибір ЗВТ

Попередній вибір ЗВТ здійснюють згідно з критерієм точності, а при остаточному виборі ЗВТ необхідно враховувати вимоги до:

- робочого діапазону значень величин, які впливають на процес вимірювання;
- вартості ЗВТ;
- габаритних розмірів і маси ЗВТ;
- конструкції ЗВТ.

Під час вибору ЗВТ надається перевага стандартизованим ЗВТ, а також їхній якості.

4.3 Якість ЗВТ

Якість ЗВТ – це рівень його відповідності своєму прямому призначенню, яке визначається тим, наскільки під час застосування ЗВТ досягається мета вимірювання.

Якість ЗВТ визначають за такими його характеристиками, як стала, чутливість, поріг чутливості, точність.

Стала ЗВТ – це деяке число, помножене на відлік з метою отримання шуканого значення вимірюваної величини, тобто показу ЗВТ. Стала ЗВТ у деяких випадках встановлюється як ціна поділки шкали, що являє собою значення вимірюваної величини, яке відповідає одній поділці.

Чутливість ЗВТ – це число, у чисельнику якого стоїть величина лінійного або кутового переміщення показника (якщо мова йде про цифровий ЗВТ, то у чисельнику буде зміна числового значення), а у знаменнику – приріст (зміна) вимірюваної величини, що спричинило це переміщення або зміну числового значення.

Поріг чутливості ЗВТ – це число, яке є мінімальним значенням вимірюваної величини, що може зафіксувати ЗВТ.

Точність ЗВТ – це характеристика, яка виражає ступінь відповідності результатів вимірювання дійсному значенню вимірюваної величини. Точність ЗВТ визначається шляхом встановлення нижньої і верхньої границь максимально можливих похибок.

5 ПОХИБКИ ЗВТ ВИТРАТИ

5.1 Типи похибок

5.1.1 Абсолютна похибка ЗВТ (ΔX) – це алгебраїчна різниця між показами ЗВТ (X_{II}) і дійсним значенням вимірюваної величини (X_B), яка виражається в одиницях вимірюваної величини і визначається за формулою

$$\Delta X = X_{II} - X_B. \quad (5.1)$$

Під час калібрування (повірки, атестації) за дійсне значення вимірюваної величини приймають таке, що визначене еталонним ЗВТ, тобто $X_B = X_{ET}$.

5.1.2 Відносна похибка ЗВТ (δ) – це число, яке відображає ступінь точності ЗВТ і дорівнює відношенню абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної або відтворюваної еталонним ЗВТ величини, виражено у безрозмірному вигляді або у відсотках і визначене, відповідно, за формулами

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{ET}}, \quad \delta = \frac{\Delta X}{X_{ET}} \cdot 100\%. \quad (5.2)$$

Якщо до діапазону вимірювання ЗВТ належить і нульове значення вимірюваної величини, то відносна похибка має значення нескінченності у відповідній йому точці шкали. У цьому випадку застосовують поняття зведеної похибки.

5.1.3 Зведена похибка ЗВТ (γ) – це число, яке дорівнює відношенню абсолютної похибки ЗВТ до деякого нормувального значення X_N (як правило, це верхнє значення діапазону вимірювання), виражене у безрозмірному вигляді або у відсотках і визначене, відповідно, за формулами

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N}, \quad \gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\% . \quad (5.3)$$

5.1.4 Систематична похибка ЗВТ (Δ_{cuct}) – це складова частина похибки ЗВТ, яка не змінюється або змінюється за визначеним законом під час багаторазових вимірювань однієї й тієї ж величини:

$$\Delta_{cuct} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i}{n}, \quad (5.4)$$

де ΔX_i – абсолютна похибка ЗВТ при i -му спостереженні, яку визначають за формулою (5.1).

У зальному випадку систематична похибка є функцією вимірюваної величини, впливових величин (температури, вологості, напруги живлення тощо) і часу.

5.1.5 Випадкова похибка ЗВТ ($\Delta_{вun}$) – це складова частина похибки ЗВТ, яка змінюється випадково у визначених границях під час проведення повторних вимірювань однієї й тієї ж величини і яку (без урахування знаку) визначають за формулою

$$\Delta_{вun} = t_{P,n} \cdot S, \quad (5.5)$$

де $t_{P,n}$ – коефіцієнт Стьюдента, який залежить від довірчої ймовірності P і числа спостережень n і може бути визначений за ГОСТ 8.207;

S – середня квадратична похибка середнього арифметичного значення вимірюваної величини – результату вимірювання, яку визначають за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (5.6)$$

де X_i – i -е показання ЗВТ в ряду з n спостережень;

\bar{X} – результат вимірювання – середнє арифметичне значення показів ЗВТ, що є функцією вимірюваної величини і яку визначають за формулою

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (5.7)$$

5.1.6 Границі похибки ЗВТ – це інтервал похибки, яка складається із систематичної та випадкової похибок, що одночасно проявляються під час вимірювання. Цей інтервал визначають за формулою

$$\Delta_{заг} = \pm K \sqrt{S^2 + \frac{\Delta_{сист}^2}{3}}, \quad (5.8)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від співвідношення випадкової і систематичної складової похибки і може бути визначений за ГОСТ 8.207.

5.2 Нормування похибок ЗВТ витрати

Похибки ЗВТ витрати нормують у вигляді границь допустимих основної і додаткової похибок, які виражають у формі *відносних або зведених похибок* залежно від характеру визначення похибок у границях діапазону вимірювань, а також від умов застосування і призначення ЗВТ витрати конкретного виду.

Границі допустимої додаткової похибки припускається виражати у формі, яка відрізняється від форми вираження границь допустимої основної похибки.

5.2.1 Границі допустимої відносної основної похибки (δ)

Виражають у безрозмірних величинах або у відсотках і визначають таким чином:

1) якщо границі відносної похибки практично незмінні, за формулами

$$\delta = \frac{\Delta}{X} = \pm q, \quad \delta = \frac{\Delta}{X} \cdot 100 = \pm q(\%), \quad (5.9)$$

де Δ – абсолютна похибка, визначена за формулою $\Delta = \pm a$;

q – позитивне число, яке вибирають з ряду $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $(1,6 \cdot 10^n)$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $(3 \cdot 10^n)$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$; ($n = 1, 0, -1, -2$ тощо);

2) якщо границі абсолютних похибок змінюються практично лінійно, за формулами

$$\delta = \frac{\Delta}{X} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_K}{X} \right| \right) - 1 \right], \quad \delta = \frac{\Delta}{X} \cdot 100 \% = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_K}{X} \right| \right) - 1 \right] \%, \quad (5.10)$$

де Δ – абсолютна похибка, визначена за формулою $\Delta = \pm(a + b \cdot X)$;

X_K – більше (за модулем) значення з границь вимірювань;
 c, d – позитивні числа, які вибирають з наведеного ряду для (5.9) і визначають за формулами

$$c = b + d, \quad d = \frac{a}{|X_K|}, \quad (5.11)$$

де a, b – позитивні числа, які не залежать від X .

5.2.2 Границі допустимої зведеної основної похибки (γ)

Виражають у безрозмірних величинах або у відсотках і визначають за формулами

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad \gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\% = \pm p, \% , \quad (5.12)$$

де Δ – абсолютна похибка, визначена за формулою $\Delta = \pm a$;

X_N – нормувальне значення, яке виражено у тих самих одиницях, що й Δ ;

p – позитивне число, яке вибирають з ряду, наведеного для формули (5.9).

Нормувальне значення X_N для ЗВТ з рівномірною, практично рівномірною або статечною шкалою, а також для вимірювальних перетворювачів, якщо нульове значення вхідного (вихідного) сигналу знаходиться на границі або поза діапазоном вимірювань, встановлюють таким, що дорівнює більшому з границь вимірювань або більшому з модулів границь вимірювань, якщо нульове значення знаходиться усередині діапазону вимірювання.

Пояснення

Практично рівномірна шкала – це шкала, довжина поділок якої відрізняється одна від одної не більш як на 30 % і має постійну ціну поділки.

Суттєво нерівномірна шкала – шкала із поділками, що звужуються, для яких значення вихідного сигналу, яке відповідає напівсумі верхнього і нижнього значень границь діапазону вимірювань вхідного (вихідного) сигналу, знаходиться в інтервалі між 65 % і 100 % довжини шкали, яка відповідає діапазону змінення вхідного (вихідного) сигналу.

Статечна шкала – шкала із поділками, які розширюються або звужуються, і відрізняється від шкал, зазначених вище.

5.2.3 Приклади нормування похибок при різних нормувальних значеннях

1. Нормувальне значення X_N для ЗВТ з рівномірною, практично рівномірною або статечною шкалою, а також для вимірювальних перетворювачів, якщо нульове значення вхідного (вихідного) сигналу знаходиться на кінці або поза діапазоном вимірювань, встановлюють таким, щоб воно дорівнювало більшій з границь вимірювання, а якщо нульове значення знаходиться усередині діапазону вимірювання – то більшому з модулів границь вимірювань.

2. Для електровимірювальних приладів з рівномірною, практично рівномірною або статечною шкалою і нульовою відміткою усередині діапазону вимірювання нормувальне значення припускається встановлювати таким, щоб воно дорівнювало сумі модулів границь вимірювань.

3. Для ЗВТ фізичних величин, для яких прийнята шкала з умовним нулем, нормувальне значення дорівнює модулю різниці границь вимірювань. Наприклад, для мілівольметра термоелектричного термометра з границями вимірювань 200 °С і 600 °С нормувальне значення $X_N = 400$ °С.

4. Для ЗВТ із встановленим номінальним значенням нормувальне значення дорівнює цьому номінальному значенню. Наприклад, для частотомірів з діапазоном вимірювань (45 – 55) Гц номінальною частотою 50 Гц нормувальне значення $X_N = 50$ Гц.

5. Для ЗВТ з суттєво нерівномірною шкалою нормувальне значення дорівнює всій довжині шкали або її частині, яка відповідає діапазону вимірювань. У цьому випадку границі абсолютної похибки дорівнюють довжині шкали в її одиницях.

6 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

6.1 Різновид методів вимірювання витрати

Для вимірювання витрати речовин застосовують досить різні методи, в основу яких покладено гідростатичні й механічні принципи, а також фізичні явища.

6.1.1 Методи, основані на гідростатичних принципах:

- змінного перепаду тиску;
- змінного рівня;
- постійного перепаду тиску;
- обтікання;
- парціальні;
- вихрові.

6.1.2 Методи, основані на механічних принципах з безперервно рухомим тілом:

- тахометричний;
- силовий (зокрема, вібраційний).

6.1.3 Методи, основані на фізичних явищах:

- електромагнітний;
- ультразвуковий (акустичний);
- оптичний;
- термометричний;
- коріолісовий;
- ядерно-магнітний;
- іонізаційний.

6.1.4 Особливі методи:

- кореляційний;
- меточний;
- концентраційний;
- швидкісного напору.

6.2 Метод змінного перепаду тиску

Метод змінного перепаду тиску оснований на зміні потенційної енергії (статичного тиску) речовини, що протікає через місцеве звуження у трубопроводі (рис. 6.1).

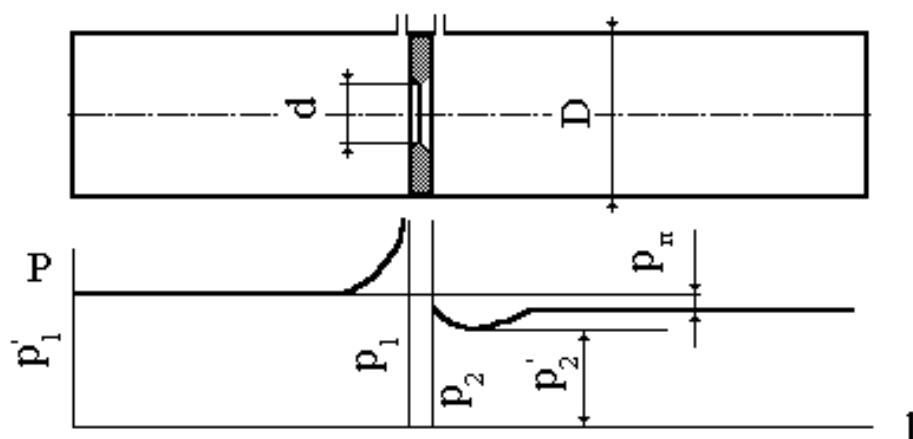


Рисунок 6.1 – Принцип застосування методу змінного перепаду тиску

Вимірювання витрати речовин за методом змінного перепаду тиску здійснюють непрямим методом – вимірюють перепад (різницю) статичних тисків ΔP на спеціальному пристрої звуження потоку (рис. 6.1):

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (6.1)$$

Масову і об'ємну витрату речовин може бути визначено з системи рівнянь Бернуллі й нерозривності потоку за формулами:

$$q_v = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad q_m = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta P}, \quad (6.2)$$

де ΔP – перепад тиску на пристрої звуження потоку (рис. 6.1), Па;

d – діаметр пристрою звуження, м;

α – коефіцієнт витрати, що враховує нерівномірний розподіл швидкостей по перетину потоку (це зумовлено в'язкістю рідини (газу) і тертям об стінки трубопроводу, вимірюванням тиску не в центрі потоку, а на периферії, а також введенням у рівняння витрати площі перерізу пристрою звуження, а не площі найменшого перерізу потоку);

ε – поправковий множник на розширення вимірюваного середовища;

ρ – густина вимірюваного середовища в робочих умовах, кг/м³.

6.3 Метод постійного перепаду тиску

Метод оснований на вертикальному переміщенні потоком вимірюваної речовини рухомого елемента (поплавця або поршня), у результаті чого змінюється площа прохідного перетину (рис. 6.2).

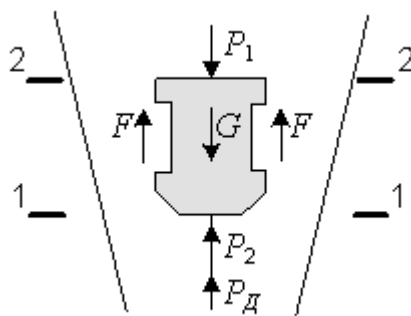


Рисунок 6.2 – Принцип застосування методу постійного перепаду тиску

На поплавок діють такі сили:

1. Сила тяжіння рухомого елемента G , яка прикладена до центру тяжіння рухомого елемента і є протидійною силою потоку:

$$G = V \cdot g(\rho_n - \rho), \quad (6.3)$$

де V – об'єм поплавка, м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ, ρ_n – густина рідини і густина матеріалу, з якого виготовлений поплавок, кг/м³.

2. Сила тиску P_1 , яка діє на верхню частину поплавка:

$$P_1 = p_1 \cdot s_1, \quad (6.4)$$

де p_1 – тиск рідини (газу) над поплавком, Па;
 s_1 – площа верхньої частини поплавка, м².

3. Сила тиску P_2 , яка діє на нижню частину поплавка:

$$P_2 = p_2 \cdot s_2, \quad (6.5)$$

де p_2 – тиск рідини під поплавком, Па;
 s_2 – площа нижньої частини поплавка, м².

4. Сила тертя потоку о поплавок:

$$F = K \cdot v_K \cdot s_6, \quad (6.6)$$

де K – коефіцієнт опору поплавка, який визначається індивідуально для кожного поплавка;

v_K – швидкість руху рідини у кільцевому каналі між поплавком і стінкою, м/с;

s_6 – площа бокової частини поплавка, м².

5. Сила динамічного тиску:

$$P_d = \varphi \cdot \rho \frac{v_1^2}{2} s_2, \quad (6.7)$$

де φ – коефіцієнт обтікання поплавка;

ρ – густина рідини, кг/м³;

v_1 – швидкість руху рідини у перетині 1–1 (рис. 6.2), м/с.

Зміна площі прохідного перетину відбувається так, що різниця тисків ΔP на рухомому елементі (перепад тиску) залишається практично постійною.

Перепад тиску на поплавок визначають з урахуванням умови рівноваги поплавка:

$$P_1 + G = P_2 + P_d + F, \quad (6.8)$$

$$p_1 s_1 + Vg(\rho_n - \rho) = p_2 s_2 + \varphi \rho \frac{v_1^2}{2} s_2 + K v_K s_6, \quad (6.9)$$

$$p_2 s_2 - p_1 s_1 = Vg(\rho_n - \rho) - \varphi \rho \frac{v_1^2}{2} s_2 - K v_K s_6. \quad (6.10)$$

Оскільки площа міделевого перетину (найбільшого з перетинів) s_2 , як правило, дорівнює s_1 , тобто $s_2 = s_1 = s_n$, рівняння (6.10) можна записати у вигляді

$$p_1 - p_2 = \frac{Vg(\rho_n - \rho)}{\omega_n} - \varphi\rho\frac{v_1^2}{2} - K v_k \frac{s_0}{s_n}. \quad (6.11)$$

Основне рівняння витрати рідини, що протікає через ротаметр, визначається за рівнянням Бернуллі для перетинів 1–1 і 2–2 (див. рис. 6.2) і має вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \xi \frac{v_2^2}{2g}. \quad (6.12)$$

Швидкість руху рідини в кільцевому каналі визначають за спільним розв'язанням рівнянь (6.11) і (6.12):

$$v_k = k \cdot \sqrt{\frac{2gV(\rho_n - \rho)}{\rho s_n}}. \quad (6.13)$$

Витрату обчислюють за рівнянням

$$q = s_k \cdot k \cdot \sqrt{\frac{2gV(\rho_n - \rho)}{\rho s_n}}, \quad (6.14)$$

де k – коефіцієнт витрати ротаметра, який залежать від кута конусності, форми і ваги поплавка, густини і в'язкості речовини;

s_k – площа кільцевого зазору між поплавком і стінкою, м².

Коефіцієнт витрати ротаметра k не піддається аналітичному визначенню, тобто визначити його, адже для будь-яких еталонних умов, практично неможливо, тому всі ротаметри підлягають індивідуальному градуюванню. Експериментальне градуювання шкали ротаметра є точним тільки за умов, якщо при експлуатації значення всіх величин, що входять до рівняння витрати, відповідають умовам градуювання.

При градуюванні ротаметра витрату рідини визначають окремо для кожної відмітки його вертикальної шкали, на яку піднімається поплавок залежно від швидкості рідини.

6.4 Ультразвуковий метод

Метод, оснований на застосуванні ультразвуку, характеристики якого в потоці рухомої речовини залежать від її швидкості, тобто оснований на явищі зміщення звукового коливання рухомою газоподібною або рідкою речовиною.

Відомі три методи вимірювання витрати речовини за допомогою ультразвуку:

1) метод, оснований на різниці часу поширення ультразвукових хвиль, спрямованих за потоком і проти нього;

2) метод, оснований на геометричному знесенні ультразвукової хвилі (з променем, перпендикулярним до потоку), зумовленому рухом потоку речовини;

3) метод, оснований на доплерівському зсуві часу, частоти і фази ультразвукового сигналу, відбитого від часток вимірюваного потоку.

6.4.1 Ультразвуковий метод, оснований на вимірюванні різниці часу поширення ультразвукових хвиль

Метод оснований на вимірюванні різниці часу Δt проходження звукової хвилі за потоком t_1 і проти нього t_2 (рис. 6.3).

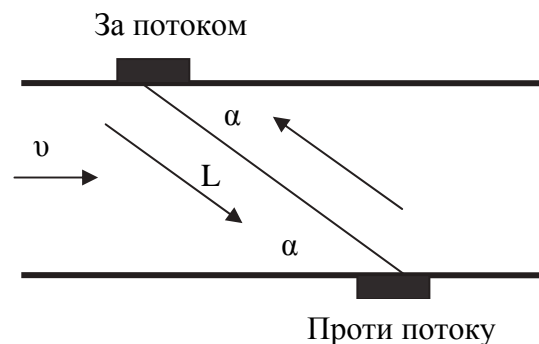


Рисунок 6.3 – Принцип застосування ультразвукового методу

Різницю часу визначають за формулою

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (6.15)$$

де t_2 – час проходження звукової хвилі проти потоку (с), який обчислюють за формулою

$$t_2 = \frac{L}{v - v_c \cdot \cos \alpha}, \quad (6.16)$$

t_1 – час проходження звукової хвилі за потоком (с), який обчислюють за формулою

$$t_1 = \frac{L}{v + v_c \cdot \cos \alpha}, \quad (6.17)$$

де L – відстань між ультразвуковими випромінювачем і приймачем, м;

v – швидкість речовини, м/с;

v_c – швидкість ультразвуку в речовині, м/с;

α – кут між ультразвуковими випромінювачем і приймачем, град.

Середню витрату визначають за різницею часу проходження Δt з урахуванням діаметра трубопроводу, відстані між датчиками, кута їх розташування і швидкості звуку:

$$q = B \frac{\pi D^2}{4} \frac{\Delta t v_c^2}{2L \cos(\beta)}, \quad (6.18)$$

де D – діаметр трубопроводу, м;

B – функція, яка характеризується параметрами вимірюваної речовини і параметрами трубопроводу і може бути виражена такою залежністю:

$$B = f(Re, \rho, \mu, t, p, \varepsilon, D), \quad (6.19)$$

де Re – число Рейнольдса;

ρ , μ , t і p – густина, кінематична в'язкість, температура і тиск вимірюваної речовини, відповідно;

ε – шорсткість трубопроводу.

Застосовують три методи визначення різниці часу:

1. Часоімпульсний метод – вимірювання різниці часу Δt проходження ультразвуку за потоком і проти нього:

$$\Delta t = \frac{2LqB}{v_c^2 - (qB \sin \alpha)^2}. \quad (6.20)$$

2. Фазовий метод – вимірювання різниці фаз $\Delta \varphi$ між ультразвуковими коливаннями:

$$\Delta \varphi = \omega \cdot \frac{2LqB}{v_c^2 - (qB \sin \alpha)^2}, \quad (6.21)$$

де ω – колова швидкість ультразвукового коливання.

3. Частотний метод – вимірювання різниці частот Δf автогенераторів, де речовина, що вимірюється, є зворотним зв'язком:

$$\Delta f = \frac{qB \sin \alpha}{L}. \quad (6.22)$$

6.4.2 Ультразвуковий метод, оснований на геометричному знесенні ультразвукової хвилі

Метод оснований на випромінюванні ультразвукової хвилі у вимірювану речовину за нормаллю до напрямку руху потоку (рис. 6.4).

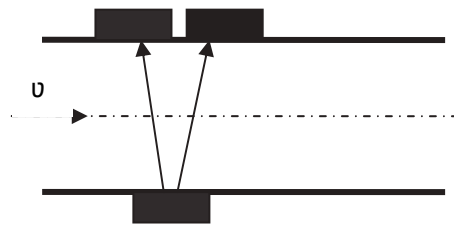


Рисунок 6.4 – Принцип застосування ультразвукового методу, основанийого на геометричному знесенні ультразвукової хвилі

Два приймальних п'єзоелемента встановлюють поруч таким чином, щоб при нерухомому вимірюваному потоці інтенсивності коливань, що прийняті кожним п'єзоелементом, були рівнозначними.

При русі вимірюваного потоку ультразвукові хвилі поширюються у напрямку потоку, при цьому інтенсивність ультразвукових коливань на приймальних п'єзоелементах різна. Виміряна різниця сигналів на приймальних п'єзоелементах є мірою витрати потоку речовини.

Метод застосовується для вимірювання в трубопроводах великих діаметрів і при великих швидкостях потоків.

6.4.3 Ультразвуковий метод, основанийий на доплерівському зсуві частоти ультразвукового сигналу

В основу методу покладено ефект Доплера. Принцип застосування цього методу наведено на рис. 6.5.

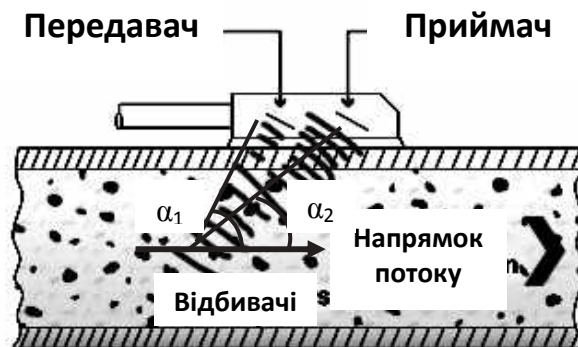


Рисунок 6.5 – Принцип застосування ультразвукового методу, основанийого на доплерівському зсуві частоти ультразвукового сигналу

Передавальний п'єзоелемент (передавач) випромінює гармонійний ультразвуковий сигнал у вимірювану речовину.

Приймальний п'єзоелемент (приймач) сприймає відбитий від неоднорідних часток потоку ультразвуковий сигнал, який внаслідок взаємодії з частками речовини, що рухаються, придбає зсув частоти, який має назву «доплерівський».

Частота (і довжина хвилі) зворотного сигналу, що надходить до приймача,

змінюється через те, що частка рухається з певною швидкістю.

Мірою витрати є доплерівська різниця частот випромінюваного і відбитого сигналів:

$$\Delta f_d = \frac{f_1(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)qB}{v_c}, \quad (6.23)$$

де f_1 – вихідна частота ультразвукових коливань, 1/с;

α_1 – кут між вектором швидкості частки відбивача і напрямом вихідного променя, град.;

α_2 – кут між вектором швидкості частки відбивача і напрямом відбитого променя, град.

6.5 Електромагнітний метод

Метод оснований на законі електромагнітної індукції, за допомогою якого здійснюють пряме перетворення швидкості вимірюваного потоку в електричний сигнал.

Принцип застосування електромагнітного методу при вимірюванні витрати електропровідної речовини наведено на рис. 6.6.

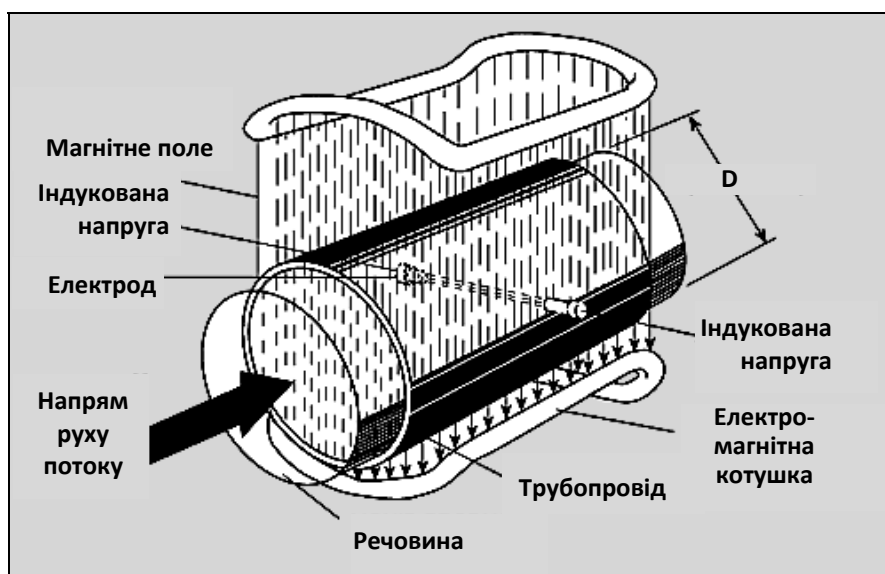


Рисунок 6.6 – Принцип застосування електромагнітного методу

Відповідно до закону Фарадея, під час руху електропровідної речовини (рідини, металу, плазми тощо) в магнітному полі в кожній її «точці» буде наводитися електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна швидкості потоку і магнітній індукції прикладеного поля в цій «точці» $E = [B \cdot v]$.

Величину ЕРС, індуквану в потоці електропровідної речовини, що рухається в магнітному полі по трубопроводу, визначають за формулою

$$E = BDv_{cp} = \frac{4q_v B}{\pi D}, \quad v_{cp} = \frac{4q_v}{\pi D^2}, \quad (6.24)$$

де B – магнітна індукція, Тл;

D – внутрішній діаметр трубопроводу (відстань між електродами), м;

v_{cp} – усереднена за перетином швидкість у трубопроводі, м/с;

q_v – об'ємна витрата, м³/с.

Об'ємну витрату речовини в трубопроводі при відомій індукції B і вимірній ЕРС E , користуючись рівнянням (6.24), визначають за формулою

$$q_v = K \cdot E, \quad (6.25)$$

де $K = \frac{\pi D}{4B}$ – постійний коефіцієнт, який розраховують для кожного ЗВТ витрати під час його калібрування (градування).

6.6 Коріолісовий метод

Коріолісовий метод є єдиним методом, який забезпечує безпосередньо вимірювання масової витрати речовини (газу, рідини, нафти, двофазних потоків).

Метод, оснований на вимірюванні коріолісової сили, реалізовано в коріолісовому витратомірі, принцип дії якого наведено на рис. 6.7.

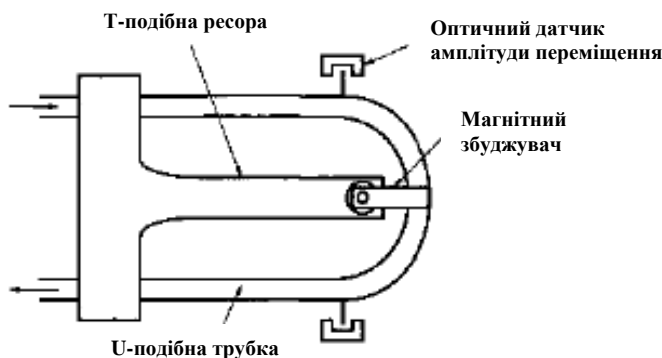


Рисунок 6.7 – Принцип застосування коріолісового методу

Основним елементом коріолісового вимірювача масової витрати є U-подібна трубка, через яку протікає речовина (рис. 6.7).

Потік речовини з визначеною масою, який рухається через вхідні патрубки U-подібної витратомірної трубки, створює коріолісову силу, яка чинить опір вібраціям цій трубки, що створюються магнітом, змонтованим на закругленій частині трубки, і котушки, укріпленої на кінці T-подібної ресори.

Оскільки сила Коріоліса F_k діє уздовж петлі нерівномірно і вздовж трубки йдуть поперечні коливання, перпендикулярні потоку речовини, її величина на кінцях витратомірної трубки визначається за рівнянням

$$F_k = 2\omega L \cdot q_M, \quad (6.26)$$

де q_M – масова витрата, кг/с;

ω – кутова швидкість речовини, 1/с;

L – довжина витратомірної трубки, м.

Сила Коріоліса (6.26) пропорційна частоті коливання, і тому, на практиці, при вимірюванні витрати речовини частіше вимірюють не саму коріолісову силу, а частоту коливання витратомірної трубки.

Колівання реєструються спеціальними датчиками, наприклад, оптичними або п'єзометричними (рис. 6.7).

За частотою коливань або зміщення фаз відносно їхнього джерела визначають масу речовини, що протікає.

Оскільки об'єм трубки V має постійну величину, можна визначити і густину речовини ρ (як відношення маси речовини M у трубці до її об'єму) за формулою

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (6.27)$$

6.7 Вихровий метод

Метод оснований на тому, що при обтіканні тіла, яке розташовано у трубопроводі, потоком речовини (рідини або газу) її шари, прилеглі до поверхні тіла, зриваються і створюють за ним два паралельних ряди вихорів, поперемінно з правого і лівого його боків. Ці вихори рухаються за потоком з однаковою відстанню L між ними в кожному ряду, тобто створюється так звана доріжка Кармана. Принцип застосування вихрового методу наведено на рис. 6.8.

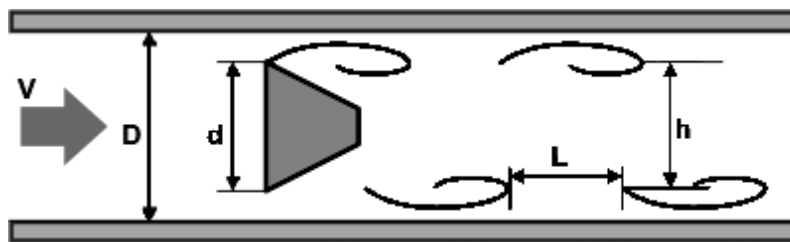


Рисунок 6.8 – Принцип застосування вихрового методу

Для будь-якого погано обтічного тіла частота f вихорів, що генеруються, при визначених умовах прямо пропорційна швидкості потоку речовини:

$$f = K_\phi \cdot \frac{v}{d}, \quad (6.28)$$

де v – швидкість потоку, м/с;

d – діаметр тіла, який спричиняє періодичні зриви вихорів, м;

K_ϕ – постійна величина в установленому діапазоні чисел Рейнольдса,

незалежна від густини, в'язкості, швидкості потоку та інших властивостей речовини.

За частотою f (6.28) обчислюють швидкість потоку речовини

$$v = f \cdot d / Sh, \quad (6.29)$$

де $Sh = f \cdot d / v$ – число Струхалія, яке визначає періодичні процеси у рухомій речовині, що пов'язані з обтіканням нерухомого тіла.

Формула (6.29) визначає статичну характеристику перетворення вихрових витратомірів.

Про величину витрати речовини можна судити за швидкістю v (6.29), яка при незмінному числі Sh пропорційна вимірюваній частоті f :

$$q = v \cdot S, \quad (6.30)$$

де S – площа поперечного перерізу трубопроводу, m^2 .

Для визначення лінійної залежності між частотою і швидкістю потоку необхідно, щоб число Sh залишалось незмінним у широкому діапазоні чисел Re , тобто коефіцієнт K_ϕ (6.28), (6.29) був незалежним від густини, в'язкості, швидкості потоку та інших властивостей середовища.

На рис. 6.9 наведено робочу область – діапазон чисел Рейнольдса, в яких K_ϕ є константа, і ЗВТ витрати, що реалізують вихровий метод, матимуть лінійну характеристику.

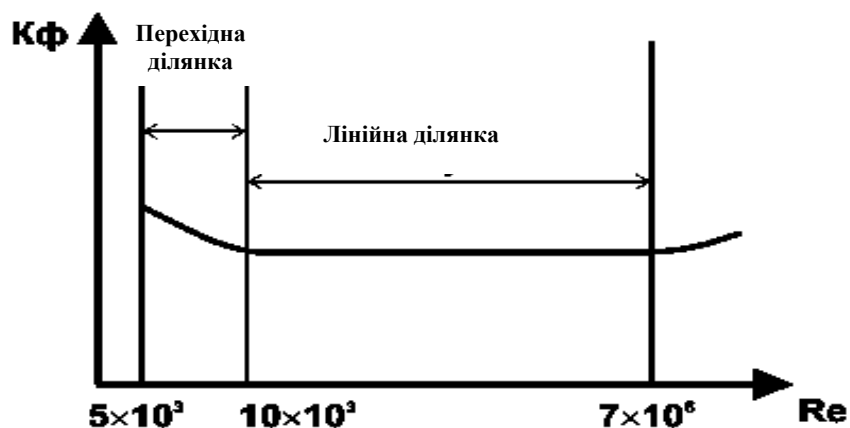


Рисунок 6.9 – Діапазон чисел Рейнольдса, в якому K_ϕ – константа

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Яка розмірність об'ємної витрати?
2. Яка розмірність масової витрати?
3. У яких розмірностях вимірюється об'єм речовини?
4. Яким рівнянням визначається розмірність об'ємної витрати ?
5. Яким рівнянням визначається розмірність швидкості рідинного потоку?
6. Що є інформативним параметром вихідного сигналу витратоміра?
7. Що є інформативним параметром вихідного сигналу лічильника?
8. Які метрологічні характеристики витратомірів (лічильників) нормуються?
9. Яким методом здійснюється калібрування (повірка) витратомірів (лічильників)?
10. Як називаються вимірювання, за якими значення виміряної фізичної величини знаходять безпосередньо з експериментальних даних?
11. За якою формулою визначається ціна поділки рівномірної шкали вимірювального пристрою?
12. Як називається найбільша за величиною похибка ЗВТ, за якою він признаний придатним до застосування?
13. До якого виду вимірювання витрати можна віднести електромагнітний метод?
14. До якого виду вимірювання витрати можна віднести ЗВТ витрати на основі пристрою звуження?
15. Які типи витратомірів основані на прямому методі вимірювання?
16. Які типи витратомірів основані на опосередкованому методі вимірювання?
17. За яким критерієм визначають характер течії речовини?
18. Потік рідини є стисливим або нестисливим?
19. Потік газу є стисливим або нестисливим?
20. Які методи вимірювання покладено в основу еталонних витратомірних установок?
21. Яким методом здійснюється повірка витратомірних установок?
22. Що таке чутливість витратоміра?
23. Що таке поріг чутливості ЗВТ витрати?
24. Яка шкала призначена для вимірювання у всьому діапазоні – основна або додаткова?
25. Що є критерієм ламінарного або турбулентного потоку?
26. При якому характері течії домінують сили в'язкості речовини?
27. При якому характері течії домінують сили інерції речовини?
28. Який потік називають стисливим?
29. Який потік речовини називають динамічним?
30. За якими признаками здійснюється класифікація потоків?
31. Яке рівняння зв'язує тиск, швидкість і рівень рідини в потоці?
32. Якими рівняннями можна апроксимувати номінальні статичні характеристики перетворення ЗВТ витрати?

33. Що є інформативним параметром вихідного сигналу ЗВТ витрати?
34. Що є неінформативним параметром вихідного сигналу ЗВТ витрати?
35. Що є динамічною характеристикою ЗВТ витрати?
36. Яка похибка ЗВТ витрати є систематичною і як вона визначається?
37. Яка похибка ЗВТ витрати є випадковою і як вона визначається?
38. Що таке основна похибка ЗВТ витрати?
39. За якими критеріями вибирають ЗВТ витрати?
40. Що таке якість ЗВТ витрати?
41. Які типи похибок вимірювання витрати існують?
42. Які є методи вимірювання витрати речовини?
43. На якому принципі оснований метод змінного перепаду тиску?
44. На якому принципі оснований метод постійного перепаду тиску?
45. Що покладено в основу ультразвукового методу вимірювання витрати речовини?
46. Що покладено в основу електромагнітного методу вимірювання витрати речовини?
47. Що покладено в основу коріолісового методу вимірювання витрати речовини?
48. Що покладено в основу вихрового методу вимірювання витрати речовини?
49. Які витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати рідини?
50. Які витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати газу?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ [Текст]: справочник. В 2 кн. / П. П. Кремлевский. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2002. – Кн. 1. – 409 с.
2. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ [Текст]: справочник. В 2 кн. / П. П. Кремлевский. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – Кн. 2. – 412 с.
3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст]: учеб. для вузов / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд., испр. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
4. Косач, Н. І. Методологічні новації повірочної схеми в галузі вимірювання витрати та кількості рідини [Текст] / Н. І. Косач // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 3. – С. 50–52.
5. Косач, Н. І. Створення мобільного еталона передавання одиниці витрати рідини [Текст] / В. Б. Большаков, Н. І. Косач, Р. В. Стеценко // Український метрологічний журнал. – 2009. – № 3. – С. 46–52.
6. Косач, Н. І. Основні принципи застосування коріолісових витратомірів для вимірювання витрати рідини і газу [Текст] / Н. І. Косач // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 1. – С. 47–49.
7. ДСТУ ISO 9104:2006. Вимірювання витрати рідини в закритих трубопроводах. Метод оцінювання характеристик електромагнітних витратомірів рідини (ISO 9104:1991, IDT) [Текст]. – Чинний від 2007-10-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. – 24 с.
8. ДСТУ ISO 6817:2006. Витрати електропровідної рідини в закритих трубопроводах. Метод вимірювання із застосуванням електромагнітних витратомірів (ISO 6817:1992, IDT) [Текст]. – Чинний від 2007-10-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. – 24 с.
9. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення [Текст]. – Чинний від 1995-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1994. – 72 с.
10. ДСТУ 7266:2012. Метрологія. Витратоміри швидкісні, вихрові та електромагнітні. Загальні технічні умови [Текст]. – Чинний від 2013-03-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2012. – 14 с.
11. ДСТУ ISO/TR 7066-1:2007. Оцінення невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати. Частина 1. Лінійні калібрувальні характеристики (ISO/TR 7066-1:1997, IDT) [Текст]. – Чинний від 2009-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2012. – 28 с.
12. ДСТУ ISO 7066-2:2007. Оцінення невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати. Частина 2. Нелінійні калібрувальні характеристики (ISO 7066-2:1988, IDT) [Текст]. – Чинний від 2009-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 34 с.
13. ДСТУ ГОСТ 8.207:2007 (ГОСТ 8.207-76 ГСИ). ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [Текст]. – Введ. 2008-10-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. – 7 с.

14. ГОСТ 8.401-80 ГСИ. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования [Текст]. – Введ. 1981-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 9 с.
15. ГОСТ 8.407-80 ГСИ. ГСИ. Расходомеры несжимаемых жидкостей. Нормируемые метрологические характеристики [Текст].– Введ. 1982-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 16 с.
16. ГОСТ 8032-84. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел [Текст].– Введ. 1985-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 16 с.
17. МИ 1317-86 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров [Текст].– Введ. 1987-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 32 с.
18. ГОСТ 26.011-80. Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные [Текст]. – Введ. 1982-01-01. – Изд. февр. 1988 с изм. 1, 2 (ИУС. 1986. № 11; 1987, № 11) – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 8 с.
19. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающей жидкости и газа. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1988-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 39 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ.....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РЕЧОВИН....	6
1.1 Напрямки вимірювання витрати.....	6
1.2 Визначення витрати речовини.....	6
1.3 Визначення маси і об'єму плинної речовини.....	7
1.4 Класифікація потоків.....	7
1.5 Впливові параметри.....	8
1.6 Зв'язок тиску, швидкості й рівня рідини в потоці.....	8
1.7 Число Рейнольдса.....	8
1.8 Режимми потоків.....	9
2 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВТ ВИТРАТИ.....	11
2.1 Класифікація ЗВТ витрати.....	11
2.2 Метрологічні характеристики ЗВТ витрати, що нормуються.....	12
3 ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛУ ЗВТ ВИТРАТИ.....	15
4 ВИБІР ЗВТ ВИТРАТИ.....	17
4.1 Критерії вибору ЗВТ.....	17
4.2 Попередній вибір ЗВТ.....	17
4.3 Якість ЗВТ.....	17
5 ПОХИБКИ ЗВТ ВИТРАТИ.....	18
5.1 Типи похибок.....	18
5.2 Нормування похибок ЗВТ витрати.....	20
6 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ.....	22
6.1 Різновид методів вимірювання витрати.....	22
6.2 Метод змінного перепаду тиску.....	23
6.3 Метод постійного перепаду тиску.....	24
6.4 Ультразвуковий метод.....	26
6.5 Електромагнітний метод.....	30
6.6 Коріолісовий метод.....	31
6.7 Вихровий метод.....	32
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ.....	34
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	36

Навчальне видання

Косач Наталія Ігорівна

ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РЕЧОВИН

Редактор Є. О. Александрова

Зв. план, 2015

Підписано до друку 25.12.2015

Формат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 2,1. Обл.–вид. арк. 2,43. Наклад 50 пр.

Замовлення 248. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків–70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків–70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001