

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Міністерство освіти і науки України

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Бербенюк Володимир Григорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження засобів вимірювання витрати двофазних потоків

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня \_\_\_\_\_ Бербенюк В. Г.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

О. Є. Середюк

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2024**



## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30 грудня 2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих методів вимірювання витрати газу та пристроїв для їх реалізації	11.01.2025 р.	
2	Розробка методики та пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків за методом постійного перепаду тиску	21.01.2025 р.	
3	Метрологічний аналіз і метрологічне забезпечення пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків	31.01.2025 р.	

Студент \_\_\_\_\_ Бербенюк В. Г. \_\_\_\_\_  
( підпис ) ( прізвище та ініціали )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Біліщук В. Б. \_\_\_\_\_  
( підпис ) ( прізвище та ініціали )

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 82 с., 11 рис., 1 табл., 2 додатки, 14 джерел, 5 аркушів креслення.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання витрати двофазних потоків.

Мета роботи – Аналітичне дослідження методів і засобів для вимірювання витрати рідких і газоподібних фаз.

Метод дослідження – аналітичне дослідження методу постійного перепаду тиску.

У магістерській роботі було проведено аналіз основних методів і приладів для вимірювання витрати двофазових потоків. На основі цих даних розроблено пристрій для вимірювання витрати двофазових потоків. Пристрій дозволяє проводити вимірювання і дистанційно реєструвати результати вимірювання. Особливістю даного пристрою є його використання для вимірювання витрати двофазових потоків та реєстрація результатів вимірювання за допомогою сучасного диференціально-трансформаторного перетворювача.

ВИТРАТА, ВИТРАТОМІР, МЕТОД ПОСТІЙНОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ,  
ДВОФАЗОВИЙ ПОТІК, РОТАМЕТР, ТРУБОПРОВІД, ПРИРОДНИЙ ГАЗ,  
ПОПЛАВОК, ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНИЙ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

## ABSTRACT

Master's thesis: 80 p., 11 fig., 1 table., 2 appendices, 14 sources, 5 sheets of drawings.

The object of the study is the process of measuring the flow rate of two-phase flows.

The purpose of the work is an analytical study of methods and means for measuring the flow rate of liquid and gaseous phases.

The research method is an analytical study of the constant pressure drop method.

The master's thesis analyzes the main methods and devices for measuring the flow rate of two-phase flows. Based on these data, a device for measuring the flow rate of two-phase flows was developed. The device allows you to perform measurements and remotely record measurement results. A feature of this device is its use for measuring the flow rate of two-phase flows and recording measurement results using a modern differential transformer converter.

FLOW, FLOW METER, CONSTANT PRESSURE DIFFERENCE METHOD, TWO-PHASE FLOW, ROTAMETER, PIPELINE, NATURAL GAS, FLOAT, DIFFERENTIAL TRANSFORMER CONVERTER.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1 Аналіз існуючих методів вимірювання витрати газу та пристроїв для їх реалізації.....	12
1.1 Аналіз об'єкту контролю.....	13
1.2 Огляд методів та пристроїв вимірювання витрати.....	17
1.2.1 Вихорові витратоміри.....	17
1.2.2 Теплові витратоміри .....	18
1.2.3 Ультразвукові витратоміри .....	8
1.2.4 Швидкісні витратоміри з тангенційною і аксіальною турбінкою .	12
1.2.5 Витратоміри обтікання (ротаметри).....	14
1.3 Порівняльна характеристика розглянутих витратомірів .....	17
1.4 Постановка задачі на проектування .....	20
2 Розробка методики та пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків за методом постійного перепаду тиску .....	22
2.1 Теоретичне обґрунтування методики вимірювання витрати двофазових потоків за методом постійного перепаду тиску .....	22
2.2 Аналіз та обґрунтування вибору вимірювальної схеми пристрою для дистанційної реєстрації результатів вимірювання .....	32
2.3 Розробка конструкції пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків .....	37
2.3.1 Опис структурної схеми пристрою .....	37
2.3.2 Опис конструкції ротаметра .....	38
2.3.3 Розрахунок конструктивних параметрів чутливого елемента ротаметра	41
2.3.4 Розробка електричної схеми витратоміра .....	47
3 Метрологічний аналіз і метрологічне забезпечення пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків .....	50

3.1 Метрологічний аналіз пристрою .....	50
3.1.1 Класифікація похибок вимірювання .....	50
3.1.2 Методика оцінки сумарної похибки .....	53
3.2 Метрологічне забезпечення пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків .....	58
ВИСНОВКИ.....	62
Література .....	63
Додаток А.....	65
Додаток Б .....	66

## ВСТУП

Вимірювання витрати різних речовин необхідне у всіх галузях народного господарства. Дуже велике значення ці вимірювання мають для обліку енергоносіїв, а також при вирішенні багатьох задач, які формуються сучасною наукою і технікою. Витратоміри необхідні для автоматизації виробництва і досягнення при цьому максимальної ефективності, для проведення лабораторних і дослідних робіт. Різноманітність як фізичних явищ, закладених в основу принципу вимірювання витрати, так і вимог, які ставляться до витратомірів, зумовлює існування великої кількості методів вимірювання витрати. Але до всіх приладів ставляться дві групи вимог. Перша група вимог: висока точність, надійність, незалежність результату вимірювання від зміни густини речовини, діапазон вимірювання. До другої групи вимог відносять: необхідність вимірювання витрати різноманітної номенклатури речовин при різних тисках і температурах. Висока точність – одна з основних вимог. Підвищення точності досягається як за рахунок застосування нових прогресивних методів і приладів так і за рахунок удосконалення старих класичних методів. Швидкодія приладу перш за все необхідна при вимірюванні швидкозмінних витрат, а також у випадку застосування приладу в системах автоматики. При виборі того чи іншого приладу необхідно виходити з властивостей вимірюваної речовини, значень витрат, вимоги до точності вимірювань, врахувати умови експлуатації.

Роль і значення витратомірів і лічильників ще більш зростає у зв'язку з необхідністю максимальної економії енергетичних і водних ресурсів країни. Вимірювання кількості нафти, води, газу і інших речовин, що транспортуються по магістральних трубопроводах має також велике економічне значення для народного господарства. В майбутньому економічний ефект від цих вимірювань може стати ще вищим, якщо врахувати стрімкі темпи розвитку видобутку нафти

і газу і будівництво великих магістральних нафтопроводів і газопроводів.

Слід зазначити, що потоки рідини, газу або пари, які протікають по трубопроводах і які приймають як однофазні, насправді в багатьох випадках містять в тій чи іншій мірі домішки іншої фази. Так, разом із газом зазвичай рухається в невеликій кількості вода, яка конденсується при пониженні температури із водяної пари, яка утримується в газі. Водночас водяні потоки нерідко утримують захоплене цим потоком повітря. Однак, при вимірюванні витрати подібних середовищ особливих забруднень не виникає і їх при цьому можна розглядати як однофазні. Так як додаткова фаза внаслідок її незначної кількості здійснює несуттєвий вплив на характер руху основної фази, а значить і на вимірювання витрати. Однак в нафтогазовій промисловості є потреба у контролі і вимірюванні двофазових потоків.

Незважаючи на наявність значної кількості відомих і нових методів контролю газорідних потоків існуючі в промисловості методи базуються на роздільному вимірюванні рідкої та газоподібної фази газоконденсатного потоку, інформація про фазовий склад потоку є не завжди вірогідною. Тому на сьогоднішній день розробка і створення ефективних засобів і методів контролю фазового складу і витрати двофазових газорідних потоків є актуальною проблемою.

Враховуючи широкий спектр застосування витратомірів виникає необхідність у вивченні, розробці і вдосконаленні приладів для вимірювання витрати газу, особливо ротаметрів, які б давали змогу вимірювати витрату двофазових потоків з дистанційною реєстрацією показів.

Мета і завдання дослідження. Аналітичне дослідження методів і засобів для вимірювання витрати рідких і газоподібних фаз.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- зробити аналіз засобів вимірювання витрати потоків газових і рідких фаз;
- зробити теоретичний аналіз вимірювання витрати двофазних потоків;
- розробити структурну і електричну схему витратоміра двофазних потоків;

- розробити конструкцію ротаметра;
- зробити метрологічний аналіз витратоміра двофазних потоків.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання витрати потоків рідких і газоподібних фаз.

Предметом дослідження є ротаметри постійного перепаду тиску.

Методи дослідження. В роботі використано методи аналітичного дослідження витратометрії рідких і газових потоків.

Наукова новизна отриманих результатів – вдосконалено засоби вимірювання двофазних потоків ротаметрами шляхом розроблення аналітичних залежностей витрати рідкої і газоподібної фаз контрольованого потоку .

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено математичну модель процесу руху поплавка під дією потоку;
- розраховано конструктивні параметри поплавка ротаметра для вимірювання витрати двофазних потоків;
- розроблено структурну, електричну схеми і конструкцію елементів приладу для вимірювання витрати двофазних потоків;
- зроблено метрологічний аналіз методики вимірювання витрати двофазних потоків.

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ ТА ПРИБОРІВ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

Вимірювання витрати відноситься до опосередкованого вимірювання, оскільки базується на залежності витрати від інших фізичних параметрів, які безпосередньо вимірюються. Оскільки таких параметрів є багато, то існує велика кількість методів для вимірювання витрати та пристроїв, в основі принципу роботи яких лежать дані методи. Залежно від діапазону вимірювання, параметрів навколишнього середовища, вимог до точності, надійності розрізняють такі витратоміри:

- змінного перепаду тиску;
- змінного рівня;
- турбінні, кулькові, роторно-кулькові, тахометричні;
- камерні;
- силові;
- вихорові і електромагнітні;
- теплові і оптичні;
- акустичні;
- обтікання (ротаметри);
- швидкісні витратоміри з аксіальною і тангенційною турбінкою;
- іонізаційні і ядерно-магнітні.

В даному розділі подано огляд витратомірів оснований на сучасних методах, які дають можливість реалізувати підвищені вимоги характеристик витратомірів, зокрема, для невеликих за значенням витрат та можливістю вимірювання витрати двофазних потоків.

## 1.1 Аналіз об'єкту контролю

Об'єктом контролю, у нашому випадку, є природний газ з домішками іншої фази, зокрема із краплинами рідини. Природний газ — це газова суміш, компонентами якої переважно є насичені вуглеводні ( $C_nH_{2n+2}$ ), азот, діоксид вуглецю і сірководень.

Компонентний склад — наявність різних складових (газоподібних, рідких і твердих фаз), що не вступають одна з одною в хімічну реакцію.

Компонентний склад суміші газів, в тому числі і природного газу, визначається в об'ємних або молярних частках за формулами:

$$r_i = \frac{V_i}{\sum_i V_i}, \quad (1.1)$$

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i}, \quad (1.2)$$

де  $r_i, x_i$  — об'ємна і молярна частка  $i$ -тої компоненти в газовій суміші;  $V_i$  — об'єм  $i$ -тої компоненти.  $n_i$  — кількість молів  $i$ -тої компоненти газової суміші, яка визначається за формулою:

$$n_i = \frac{m_i}{M_i}, \quad (1.3)$$

де  $m_i$  — маса  $i$ -тої компоненти, кг;  $M_i$  — молярна маса  $i$ -тої компоненти, кг/моль.

Ідеальний газовий стан — умовний стан газу або суміші газів, який характеризується відсутністю взаємодії молекул газу, а самі молекули не мають власного об'єму.

Реальний газ — газ, який дійсно існує в природі, тобто стан цього газу характеризується взаємодією молекул, а самі молекули мають власний об'єм.

За складом газу можуть бути чистими та сумішами. Чистими газами є газу, які містять не більше 0,05% (молярних) домішок газів інших найменувань. Газова суміш — суміш чистих газів, що не вступають один з одним в хімічну

реакцію.

Дослідження двофазових потоків в даний час має велике значення. Двофазні потоки набули широкого практичного застосування у технологічних об'єктах різних галузей техніки, зокрема в нафтових свердловинах, нафто- і газопроводах, технологічних трубопроводах, конденсаторах, тощо. В багатьох галузях техніки інженер, довіряючи особистому досвіду, може оцінити потрібні значення досліджуваного параметра з похибкою до 50%, але на двофазні потоки це положення переважно не поширюється. Висока невизначеність прогнозування пов'язана з великою кількістю змінних, що характеризують двофазний потік. Тому необхідна надзвичайно велика програма досліджень для отримання надійних емпіричних кореляцій і залежностей.

Багатофазні потоки досить широко поширені. Розглядаючи детально навіть звичайні потоки рідини, газу чи пари, які течуть в трубах, насправді в багатьох випадках вони містять в тій чи іншій мірі домішки іншої фази.

Двофазні потоки в залежності від роду фаз можуть бути трьох типів: суміш рідини і твердої фази, суміш газу і твердої фази та суміш рідини з газом. Дуже важливе значення в техніці має третій тип двофазних потоків, наприклад, нафта з свердловини як правило тече з газом. При цьому виникає важлива задача вимірювання витрати як цілого потоку так і кожної фази окремо.

"Багатофазний потік" — досить невизначений термін, який використовується, для опису багатьох типів потоків, що і зустрічаються в технологічних процесах. Згідно з назви багатофазний потік - це комбінація одного чи більшої кількості компонентів, які зазвичай, але не обов'язково, течуть у трубопроводі. Компонентами можуть бути газ, тверде тіло чи рідина, і кожний з них може бути сумішшю одного чи декількох компонентів.

Природний газ характеризується рядом параметрів, які наведені нижче. Масова витрата — маса газу  $m$ , що проходить через поперечний переріз потоку за одиницю часу:

$$Q_i = \frac{m}{t}, \quad (1.4)$$

де  $t$  — час, впродовж якого через даний переріз проходить газ.

Загальна масова витрата суміші становить:

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_d, \quad (1.5)$$

де  $M_g, M_p$  — масові витрати відповідно газу і рідини відповідно.

Об'ємна витрата — кількість газу в одиниці об'єму, що проходить через поперечний переріз потоку за одиницю часу,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q_o = \frac{V}{t}. \quad (1.6)$$

В'язкість — одна з основних властивостей потоків, яка характеризується силою внутрішнього тертя  $F$ , що виникає між сусідніми рухомими шарами газового потоку або рідини. Ця сила діє в напрямку, перпендикулярному до руху потоку. Вона прямо пропорційна швидкості відносного руху шарів потоку і площі їх дотику  $S$ . Сила  $F$  виражається рівнянням Ньютона:

$$F = -\mu S \frac{\Delta V}{\Delta n}, \quad (1.7)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт динамічної в'язкості речовини;  $\Delta V/\Delta n$  — градієнт швидкості в напрямі нормалі до рухомих шарів потоку.

Кількісно коефіцієнт динамічної в'язкості дорівнює тій силі, яка діє на одиницю поверхні одного з шарів речовини з боку другого шару, якщо  $\Delta V/\Delta n=1$ .

Коефіцієнт динамічної в'язкості, що віднесений до густини речовини за тих самих умов, називається кінематичною в'язкістю.

Кінематична в'язкість (в  $\text{м}^2/\text{с}$ ) визначається за формулою:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.8)$$

Відносна вологість газу  $\phi$  (в частках одиниці) визначається як відношення фактичного вмісту водяної пари  $G_{Bn}$  в газовому потоці до їх максимально можливого вмісту  $G_{Bnmax}$  за однакових робочих умов ( $p$  і  $T$ ):

$$\varphi = \frac{G_{Bn}}{G_{Bn \max}}. \quad (1.9)$$

Число Рейнольдса  $Re = v \cdot l / \nu$  (де  $v$  характерна для даної задачі швидкість потоку;  $l$  — характерний лінійний розмір;  $\nu$  - кінематична в'язкість потоку). Число Рейнольдса є безрозмірним критерієм гідродинамічної подібності потоків і є відношенням сил інерції до сил в'язкості потоку. Наприклад, при протіканні потоку в круглому трубопроводі діаметром  $D$  приймають  $l=D$ ,  $v$  — середня за перерізом швидкість потоку. Число Рейнольдса  $Re_D$ , що відноситься до діаметра при відомій об'ємній витраті  $Q_0$  газу в робочих умовах:

$$Re_D = 0,354 \frac{Q_0}{D\nu} = 0,0361 \frac{Q_0 \rho}{D\mu}. \quad (1.10)$$

Оскільки в'язкість газу змінюється несуттєво, то основний вплив на число Рейнольдса здійснює швидкість потоку або його об'ємна витрата, а також густина газу, яка суттєво змінюється від значення його робочого тиску.

Для характеристики руху двофазних потоків рідини і газу в багатьох випадках використовують критерій Фруда  $Fr$ , що показує відношення сили інерції до сили тяжіння:

$$Fr = \frac{U_c^2}{gD}, \quad (1.11)$$

де  $U_c$  — середня швидкість суміші;  $D$  — діаметр труби;  $g$  — прискорення сили тяжіння.

Число Струхалія — критерій подібності неусталеного руху середовища:

$$St = \frac{vT_x}{l}, \quad (1.12)$$

де  $v$  — характерна швидкість;  $T_x$  — характерний інтервал часу, який, наприклад, дорівнює періоду коливання для періодичного руху середовища;  $l$  — характерний розмір.

Число Маха (число Маєвського) характеризує вплив стисливості рідини на її рух:

$$M_x = \frac{v}{c}, \quad (1.13)$$

де  $v$  — швидкість рідини в точці, що аналізується;  $c$  — швидкість звуку в цій точці.

Для випадків, коли  $M_x \ll 1$ , рідину вважають нестискуваною. Рух стискуваного середовища називають дозвуковим, якщо  $M_x < 1$ , і надзвуковим, якщо  $M_x > 1$ .

## 1.2 Огляд методів та пристроїв вимірювання витрати

### 1.2.1 Вихорові витратоміри

Вихоровими називаються витратоміри, принцип роботи яких полягає у вимірюванні частоти коливань, що виникають в процесі вихроутворення. Залежно від способу утворення вихроутворення застосовують два суттєво відмінних один від одного типів перетворювачів витрати. У першому з них (рис. 1.1,а) вихори періодично виникають при обтіканні потоком якого-небудь тіла і утворюють при цьому пульсації тиску. В перетворювачі другого типу (рисунок 1.1,б) потік закручується, проходячи, наприклад, через відповідно розташовані напрямлені лопатки 1, набуває обертально-поступального руху. При виході такого потоку із звуженої частини в розширену камеру 2 його вісь починає стискуватись і створює при цьому пульсації тиску. На виході з камери установлений потоковипрямляч 4. Пульсації тиску перетворюються в пульсації електричної напруги або струму за допомогою перетворювачів 3.

Суттєвими недоліками у вихорових витратомірах є паразитні пульсації, які створюються насосами або компресорами, різними місцевими опорами, а також пульсації, які виникають внаслідок вібрацій трубопроводів. Для виключення

впливу цих перешкод рекомендується на протилежних кінцях якого-небудь діаметра в розширеній камері 2, встановлювати два п'єзоперетворювачі. При цьому сигнали, що виникають від паразитних пульсацій, будуть ліквідовані, а корисні сигнали, навпаки, підсилені, бо внаслідок прецесії ядра вихору, ці сигнали знаходяться в протифазі. Термоперетворювачі менш чутливі до різних шкідливих перешкод.

Частота пульсацій, що виникають в даних перетворювачах витрати, пропорційна середній швидкості потоку. Тому вихорові витратоміри вимірюють об'ємну витрату. Але якщо разом з вимірюванням частоти виміряти різницю тиску в зовнішній і внутрішній областях потоку, що обертається, яка залежить від густини середовища, то можна вимірювати і масову витрату.

Суттєвими недоліками є акустичні і вібраційні перешкоди. До їх числа відносяться пульсації, які створюються насосами або компресорами, пульсації внаслідок вібрації трубопроводів.

Перевагою вихорових витратомірів є відсутність рухомих елементів всередині трубопроводу, лінійність шкали у великому діапазоні вимірювання. Розроблений і створений ряд зразків цих приладів для діаметрів труб 25, 40, 50, 80, 100 і 150 мм на витрати рідини від 3 до 300 м<sup>3</sup>/год. Ці прилади придатні для агресивних і неагресивних речовин з в'язкістю не більше 5-10 м<sup>2</sup>/с. До числа переваг вихорових витратомірів слід віднести також достатньо добру точність, яка оцінюється похибкою в 0,5-1,5% від межі шкали, і лінійність останньої у великому діапазоні шкали, відсутність рухомих частин, простота і надійність перетворювача витрати, незалежність показів від тиску і температури.

### 1.2.2 Теплові витратоміри

Тепловими називаються витратоміри, принцип роботи яких базується на вимірюванні залежного від витрати ефекту теплової дії на потік чи тіло, яке

контактує з потоком. Вони використовуються для вимірювання витрати газу і рідше для вимірювання витрати рідини. Існує багато різновидностей теплових витратомірів, які відрізняються способом нагріву, розташуванням нагрівача і характером функціональної залежності між витратою і вихідним сигналом.

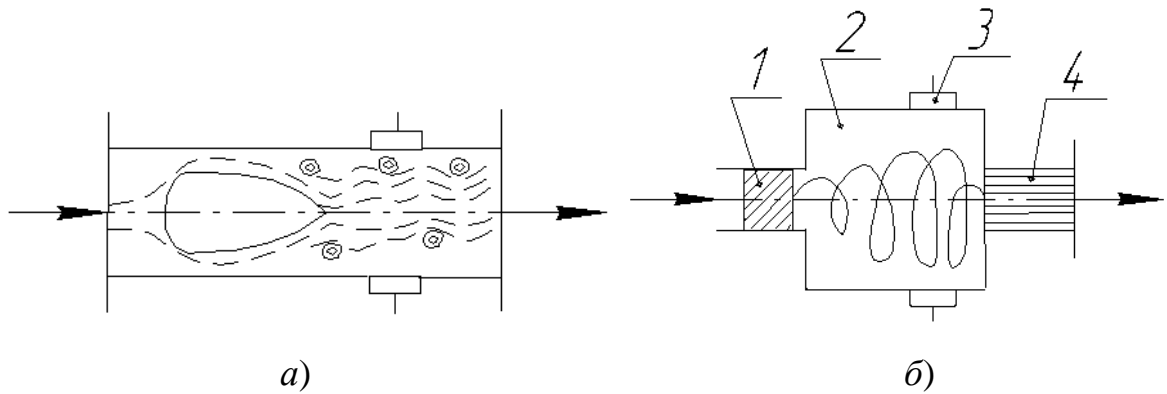
За характером теплової взаємодії з потоком теплові витратоміри поділяються на калориметричні, термоконвективні і анемометричні. У калориметричних і термоконвекторних витратомірах вимірюється різниця температур  $\Delta T$  газу чи рідини (при постійній потужності  $W$  нагріву) або потужність  $W$  (при  $\Delta T$  постійній). У термоанемометрах вимірюється опір  $R$  нагрівача (при постійній силі струму  $I$ ) або сила струму  $I$  (при  $R = \text{const}$ ).

Принцип роботи калориметричних витратомірів базується на залежності середньомасової різниці температур потоку від потужності нагріву. Калориметричний витратомір складається з нагрівача 3 (рис. 1.2), розташованого всередині трубопроводу і двох термоперетворювачів 1 і 2 для вимірювання температур до  $T_1$  і після  $T_2$  нагрівача.

Термоперетворювачі розташовуються зазвичай на рівних відстанях ( $l_1 = l_2$ ) від нагрівача. Розподіл температур по обидві сторони від джерела нагріву буде залежати від витрати речовини. При відсутності витрати  $Q_M = 0$  температурне поле симетричне. При появі витрати ця симетрія порушується. При малих швидкостях потоку  $T_1$  падає внаслідок притоку холодної речовини сильніше, ніж температура  $T_2$ , яка при малих швидкостях може навіть зрости. В результаті спочатку з ростом витрати росте різниця температур  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Але при достатньому збільшенні витрати  $Q_M$  температура  $T_1$  стане постійною, рівною температурі протікаючої рідини, в той час як  $T_2$  буде падати. Різниця температур  $\Delta T$  буде зменшуватись із збільшенням витрати. Ріст  $\Delta T$  при малих значеннях  $Q_M$  майже пропорційний витраті. Ця пропорційність спостерігається лише при швидкості 0,2 м/с. Величина витрати визначається за формулою:

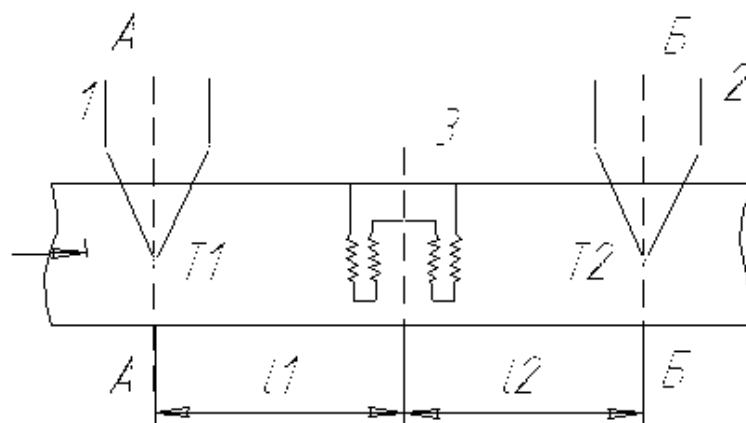
$$Q_M = \frac{W}{k c_p \Delta T}, \quad (1.14)$$

де  $W$  — потужність нагріву;  $k$  — поправочний коефіцієнт, який враховує втрату тепла в навколишнє  $c_p$  — теплоємність при температурі  $(T_2 - T_1)/2$ .



1 — направляючі лопатки; 2 — камера; 3 — перетворювач; 4 — потоковипрямляч, *a* — схема утворення вихорів при обтіканні перешкоди, *б* — конструкція вихорового витратоміра

Рисунок 1.1 — Метод вихорової витратометрії



1,2 — термоперетворювачі; 3 — нагрівач

Рисунок 1.2 — Принципова схем калориметричного витратоміра середовище, похибку вимірювання  $\Delta T$  із-за нерівномірності розподілу температур по перерізу трубопроводу і можливість підвищення  $T_1$  за рахунок теплопередачі від нагрівача;

Оцінюючи похибку вимірювання  $W$  значеннями  $\pm(0,1 \div 0,15) \%$ , а вимірювання  $\Delta T$  значеннями  $\pm(0,1 - 0,2) \%$ , то можна у випадку поправочного коефіцієнта  $k=1$  забезпечити вимірювання витрати з відносною приведеною похибкою  $\pm(0,3 \div 0,5)$

%.

Калориметричні і термоконвективні витратоміри вимірюють масову витрату при умові незмінності теплоємності вимірюваної рідини, що являється їх перевагами. Друга перевага термоконвективних витратомірів – відсутність контакту з вимірюваною речовиною. Недолік – велика інерційність. Приведена похибка термоконвективних витратомірів лежить в межах  $\pm(1,5 - 3) \%$ . В калориметричних витратомірах вона менша і становить  $\pm(0,3 - 1) \%$ .

### 1.2.3 Ультразвукові витратоміри

Акустичний метод вимірювання витрати рідин та газу оснований на тому, що швидкість розповсюдження ультразвукових коливань в рухомому середовищі відносно обраної системи відліку визначається геометричною сумою швидкості ультразвукових коливань в середовищі та швидкістю самого середовища. Таким чином, в основі методу лежить зміщення ультразвукової хвилі вимірюваним середовищем в напрямку його руху. Ультразвуковий витратомір складається з первинного перетворювача, що встановлюється на газопроводі, та вимірювального блока, який можна розміщувати на значній відстані від первинного перетворювача .

В залежності від вимірюваною ефекту, що дозволяє судити про величину витрати, акустичні витратоміри поділяють на фазові, частотні, часоімпульсні, доплерівські.

Перетворювач ультразвукового витратоміра складається із відрізка труби, на якому встановлені два чи чотири п'єзоелементи. В більшості випадків площини випромінюючих і приймальних п'єзоелементів розміщені під певним кутом  $\theta$  до осі труби. Тоді акустичні коливання під кутом  $\alpha=90^\circ-\theta$  до осі труби проходять шлях у випромінювальній речовині довжиною  $L$ . Позначивши через  $v_L$  швидкість потоку, усереднену по довжині  $L$ , її проекція на напрям  $L$  буде рівна

$v_L \cos \alpha$ . Якщо звуковий промінь напрямлений в сторону руху потоку, то час  $\tau_1$  проходження ним відстані  $L$  визначиться згідно формули:

$$\tau_1 = \frac{L}{(C + v_L \cos \alpha)}, \quad (1.15)$$

де  $C$  — швидкість поширення акустичних коливань в нерухомому середовищі, що вимірюється.

При зворотному напрямі звукового променя час  $\tau_2$  проходження ним такої ж відстані  $L$  буде більшим, оскільки це впливає із рівняння:

$$\tau_2 = \frac{L}{(C - v_L \cos \alpha)}. \quad (1.16)$$

Віднявши рівняння від одне від одного отримаємо:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{2L}{C^2} \cdot \frac{v_L \cos \alpha}{1 - (v_L \frac{\cos \alpha}{C})^2} \quad (1.17)$$

Враховуючи, що  $v_L \frac{\cos \alpha}{C} < 10^{-3}$ , знаходимо:

$$\Delta\tau = \frac{2L \cos \alpha v_L}{C^2}, \quad (1.18)$$

Якщо акустичні коливання напрямлено вздовж осі труби, то  $\cos \alpha = 1$  і різниця часу проходження ультразвуку буде визначатись за формулою:

$$\Delta\tau = \frac{2L v_c}{C^2}, \quad (1.19)$$

де  $v_c$  — осьова швидкість потоку.

Таким чином, різниця часу  $\Delta\tau$  прямо пропорційна швидкості  $v_c$  або  $v_L$ .

Відомо кілька способів вимірювання різниці часу  $\Delta\tau$ . Найбільшого поширення знайшов частотний метод, при якому вимірюється різниця частот повторень коротких імпульсів або пакетів акустичних коливань, які напрямлені за потоком і проти нього.

Частотними називають ультразвукові витратоміри, які працюють за принципом залежності різниць частот повторення коротких імпульсів або

пакетів ультразвукових коливань від різниці часу  $\Delta\tau$  проходження цими коливаннями одної і тої ж відстані  $L$  за потоком рухомої рідини або газу і проти нього. В залежності від того, чи вимірюється різниця частот пакетів ультразвукових коливань або коротких імпульсів, що проходять через рідину, називають частотно-пакетними або частотно-імпульсним.

Принципова схема частотно-пакетного двохканального витратоміра зображена на рисунку 1.3. Генератор створює коливання високої частоти ( $\approx 10$  МГц), які після проходження через модулятор 1 і модулятор 2 надходять до випромінювальних п'єзоелементів ВПП1 і ВПП2, які посиляють ультразвукові коливання під кутом  $\alpha$  до напрямку швидкості потоку. Час  $\tau_1$  проходження акустичних коливань між випромінювальним п'єзоелементом ВПП1 і приймальним ПП1 визначається згідно формули (1.15), а час  $\tau_2$  проходження між п'єзоелементами ВПП2 і ПП2 визначається згідно формули (1.16).

Як тільки перші електричні коливання, що створюються п'єзоелементами ПП1 і ПП2, пройшовши через підсилювачі і детектори, досягнуть модуляторів, останні, які працюють в тригерному режимі, закривають прохід коливанням від генератора до п'єзоелемента ВПП1 і ВПП2. Модулятори відкриваються знову, як тільки останні ультразвукові коливання перших пакетів досягнуть приймальних п'єзоелементів ПП1 і ПП2, і потрапляння електричних коливань до модуляторів припиняться.

Тому між п'єзоелементами ВПП1 і ПП1 будуть проходити пакети акустичних коливань з періодом повторення  $2\tau_1$ , а між п'єзоелементами ВПП2 і ПП2 — з періодом повторення  $2\tau_2$ . Частота повторення перших пакетів  $f_1 = \tau_1/2$ , а других —  $f_2 = \tau_2/2$ .

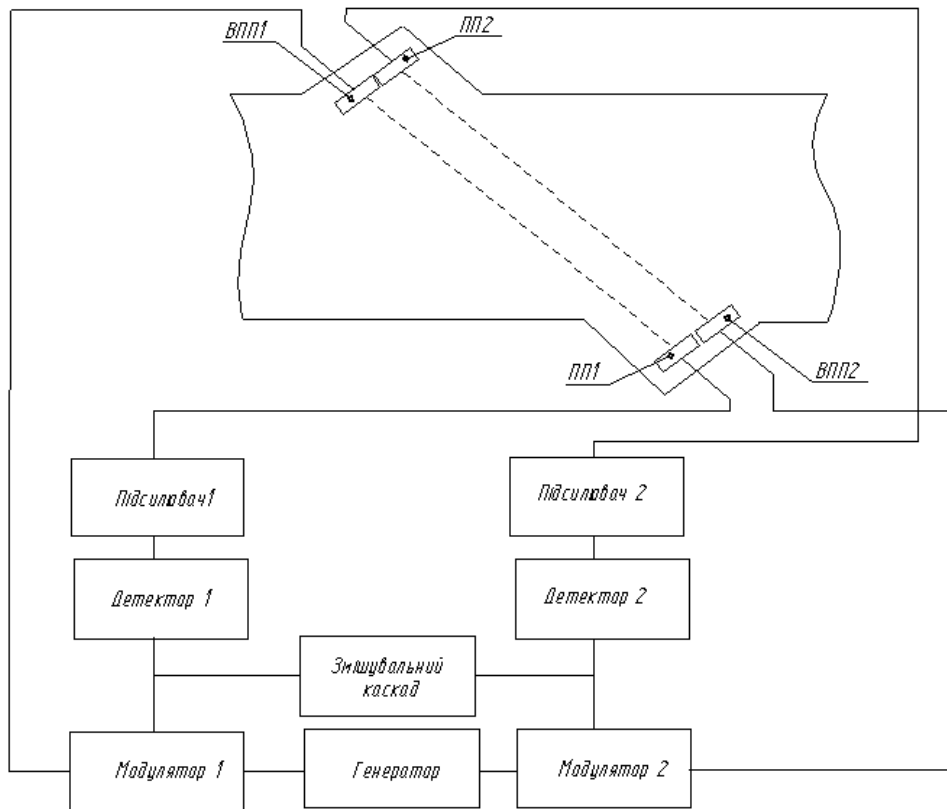


Рисунок 1.3 — Частотно-пакетний двохкаскадний ультразвуковий витратомір  
 Прилад, що під'єднано до змішувального каскаду, буде вимірювати різницю частот:

$$f_1 - f_2 = \frac{1}{2}(\tau_1 - \tau_2). \quad (1.20)$$

Із цієї формули випливає, що покази частотних витратомірів не залежать від швидкості звуку, що є їх великою перевагою.

До переваг акустичних витратомірів слід віднести: відсутність перепаду тиску на первинному перетворювачі, висока швидкодія, що дозволяє вимірювати пульсуючі потоки з великою частотою пульсації; можливість працювати на рідинах з будь-якою в'язкістю, а також на електропровідній рідинах; безконтактне вимірювання витрати; досить висока точність приладів при їх індивідуальному градуюванні та використанні спеціальних засобів автокомпенсації найбільш суттєвих завад, висока надійність чутливих елементів.

Недоліками акустичною методу є: залежність власної швидкості ультразвукових коливань від фізико-хімічних властивостей вимірюваного

середовища (температура, тиск, концентраційний склад); залежність результату вимірювання швидкості середовища від числа Рейнольдса; швидкість розповсюдження ультразвукових коливань є набагато більшою швидкості руху вимірюваною середовища; складність вимірювальної апаратури.

Приведена похибка ультразвукових витратомірів лежать в межах від 0,1 до 2,5%, але в середньому випадку може бути оцінена цифрами 0,5-1%. Ультразвукові витратоміри призначені для труб будь-якого діаметру, починаючи від 10 мм і більше.

#### 1.2.4 Швидкісні витратоміри з тангенційною і аксіальною турбінкою

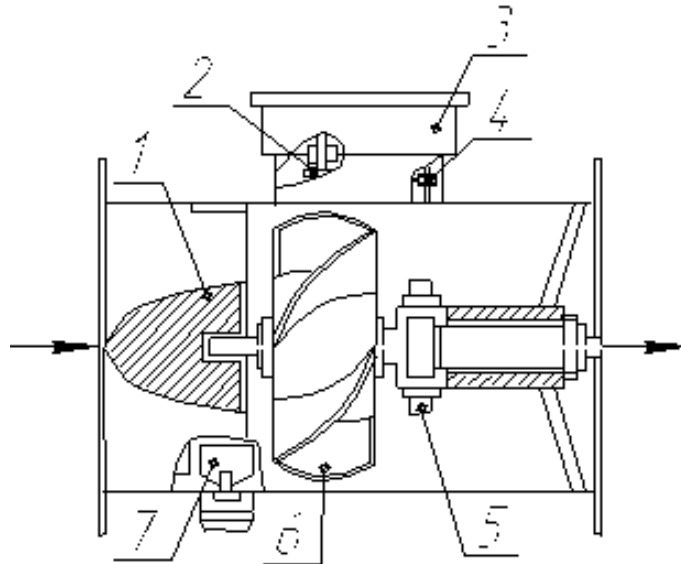
Швидкісні витратоміри не мають вимірювальних камер і здійснюють опосередковані вимірювання в об'ємних одиницях. Принцип дії базується на залежності частоти обертів турбінки від швидкості потоку, що омиває турбінку. Вимірюючи сумарну кількість обертів турбінки при допомозі лічильного механізму, можна отримати інформацію про об'ємну кількість речовини. Швидкісні витратоміри бувають двох типів: з аксіальною турбінкою, вісь якої збігається з напрямком досліджуваного потоку і з'єднана передачею з лічильником обертів, і з вертикальною турбінкою – вісь якої безпосередньо зв'язана з лічильником обертів. Всередині корпусу швидкісного витратоміра з аксіальною турбінкою (рис. 1.4) розміщена горизонтально вздовж напрямку вимірюваного потоку рідини турбінка 6, яка виконана у вигляді багатозахідного гвинта. Перед турбінкою встановлений струмовипрямляч 1, призначений для згладжування збурень потоку на вході. Обертання турбінки через черв'ячну пару 5 і кінематичний механізм 2 в камері 4 передається лічильному пристрою 3. Для регулювання швидкості обертання турбінки передбачено вузол 7, який дозволяє повертати одну з радіальних перетинок струмовипрямляча відносно напрямку потоку. Для вимірювання кількості рідини при малих витратах

використовуються витратоміри з тангенційними турбінками (рис. 1.5).

В цих приладах турбінка з лопастями встановлена на вертикальній осі. Потік рідини тангенційно підводиться до турбінки і надає їй обертового руху. Дані витратоміри мають діаметр умовного проходу від 15 до 40 мм, верхню границю вимірювання  $56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , класи точності 2, 3. Їхній істотний недолік — залежність показів від в'язкості рідини.

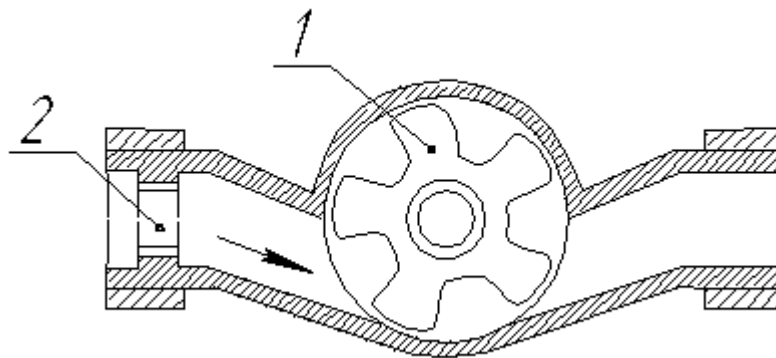
Для безпосередньої роботи турбінних витратомірів необхідна відсутність завихрень у потоці, що надходить на турбінку. Для цього використовують спеціальні випрямлячі струменя досліджуваної речовини, виконані у вигляді набору трубок або взаємоперпендикулярних схрещених пластин і вмонтованих по перерізу трубопроводу перед турбінкою та після неї.

При вимірюванні малих витрат швидкісними витратомірами з механічною передачею вимірювальної інформації виникають значні похибки, викликані механічним тертям. Ці похибки значно менші в індуктивних витратомірах турбінкового типу. Одним з різновидів таких витратомірів є витратомір з корпусом із не феромагнітного матеріалу, а в одну з лопаток турбіни вмонтований постійний магніт. При обертанні турбіни магніт індукує у вимірювальній обмотці, розміщеній у зовнішній частині корпуса, імпульси напруги, частота яких пропорційна кількості обертів турбіни.



1 – струмовипрямляч; 2 – кінематичний механізм; 3 – лічильний пристрій; 4 – камера; 5 – черв’ячна пара; 6 – турбінка; 7 – вузол для регулювання швидкості обертання турбінки

Рисунок 1.4 — Швидкісний витратомір з аксіальною турбінкою



1 – турбінка; 2 - фільтр

Рисунок 1.5 — Швидкісний витратомір з тангенційною турбінкою

### 1.2.5 Витратоміри обтікання (ротаметри)

Серед витратомірів сталого перепаду тиску для вимірювання малих витрат рідини ( $0,01 \dots 16 \text{ м}^3/\text{год}$ ) та газів ( $0,01 \dots 40 \text{ м}^3/\text{год}$ ) у вертикальних трубопроводах

найпоширенішими є ротаметри. Ротаметр складається з конічної (зазвичай скляної) трубки, всередині якої переміщується поплавков, шкала наноситься безпосередньо на скляну трубку. Її довжина знаходиться в межах від 70 до 600мм, а діаметр від 1,5 до 100 мм. Поплавков зазвичай має циліндричну форму з нижньою конічною частиною та верхнім бортиком. Під дією струменя досліджуваної речовини поплавков піднімається вгору. В міру підняття поплавка площа кільцевого проміжку між ним і внутрішньою поверхнею труби збільшуватиметься до положення, при якому підйомна сила, що діє на поплавков, зрівноважиться силою тяжіння поплавка. Отже, певним витратам відповідатиме певна площа кільцевого проміжку, тобто певна висота підняття поплавка.

У витратомірах обтікання зі скляною конічною трубкою, призначених для вимірювання витрати газів або прозорих рідин, шкала нанесена безпосередньо на зовнішню поверхню скла. Вказівником служить верхня горизонтальна площина поплавка. На верхньому патрубку знаходиться спеціальний обмежувач ходу поплавка. Такі ротаметри застосовуються для вимірювання витрат газів та прозорих рідин, що знаходяться під тиском не більше 0,6 МПа. Для вимірювання витрат середовища, що знаходиться під високим тиском, використовують ротаметри з металевою конічною трубкою. Їх клас точності 1,5 та 2,5.

В ротаметрах з дистанційним вимірюванням використовують безконтактні вторинні перетворювачі переміщення поплавка в електричний або пневматичний сигнал. На рисунку 1.6 показано ротаметр з котушкою індуктивності, на виході отримують частотний сигнал. Зверху вимірювальної трубки 1 розташована котушка індуктивності 3, яка входить в схему вимірювального генератора, утворює паралельний коливальний контур.

При зміні витрати поплавков 2 ротаметра переміщується, а разом з цим змінює своє положення і феромагнітний стержень 4, що індукує з котушкою 3, яка в свою чергу, спричиняє зміну частоти сигналу на виході вимірювального генератора. Вимірювальний генератор разом з опорним генератором складають диференціальну схему. Частота імпульсів вимірювального генератора і опорного

виділяється в зміщувачі і залежить від зміни витрати.

Основні переваги ротаметрів: простота конструкції; відсутність рухомих деталей, які перебувають у зіткненні; можливість неперервного вимірювання витрати плавномінних потоків; можливість вимірювання витрати слабо-забруднених рідин з дисперсними включеннями; можливість роботи ротаметрів в агресивних середовищах; висока чутливість до вимірювання витрати; порівняно широкий діапазон вимірювання; постійність відносної похибки па всьому діапазоні шкали.

Недоліки ротаметрів: вплив параметрів середовища (температури, тиску) на точність вимірювання, в зв'язку з чим їх експлуатаційна похибка може мати велике значення; крихкість і непридатність для вимірювання витрати речовин під значним тиском; пов'язаність приладу з місцем вимірювання; непридатність для вимірювання великих витрат.

Однак ротаметри в силу свого принципу дії можуть бути удосконаленими для можливості вимірювання двофазових потоків, а також є необхідним удосконалення конструкції для можливості дистанційної передачі показів.



Вихоровий	3-300 м <sup>3</sup> /год - для рідини	0,5; 1,5	Не застосовують при малих швидкостях, використовують для вимірювання забруднених, агресивних і абразивних речовин	Вплив геометричних розмірів тіла обтікання на утворення вихорів, для підсилення вихідного сигналу застосовують два тіла обтікання	Використовують для труб діаметром від 150 до 300мм	Вимірюють частоту вихорових коливань, частоту пульсації тиску або частоту зриву вихорів із обидвох сторін тіла обтікання	Ні
Тепловий	до 6500 м <sup>3</sup> /год	1,5; 3	Для вимірювання витрати потоків з високою теплопровідністю	Складність градування	Теплоперетворювачі розташовують на рівних відстанях від нагрівача	Теплова дія на потік	Так

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Ультразвуковий	до 30-300 м <sup>3</sup> /год - для рідини	0,5; 1	Відсутність твердих домішок	Строго симетрія акустичних каналів	Розміщення акустичних каналів якнайближче один до одного	Безконтактне вимірювання витрати	Ні
Швидкісний з аксіальною турбінкою	8,1·10 <sup>-4</sup> до 3640·10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup> /с	1; 1,5; 2	Обов'язкове випрямлення потоку	Центрування турбінки по осі трубопроводу	Відсутність завихрень у потоці	Залежність обертів турбінки від швидкості потоку	Так
Швидкісний з тангенційною турбінкою	56·10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup> /с	2; 3			Для труб від 15 до 50 мм		
Метод постійного перепаду тиску	0,01-16м <sup>3</sup> /год для рідини 0,01-40м <sup>3</sup> /год для газу	1,5; 2,5	Простота експлуатації і ремонту, стійкість при вимірюванні агресивних і вибухонебезпечних речовин	Простота конструкції, уніфікована конічна трубка, велика різноманітність поплавків	Строго вертикальне положення трубки, прямі ділянки трубопроводу до $l_1 \geq 10D$ і після $l_2 \geq 10D$ ротаметра	Зміна положення поплавка при зміні витрати, перетворення переміщення поплавка в електричний сигнал, можливість передачі показів на відстань	Так

## 1.4 Постановка задачі на проектування

Сучасний стан вимірювань у багатофазних потоках ставить ряд вимог. Ідеальний багатофазний витратомір повинен мати здатність вимірювати з необхідною точністю в повному діапазоні змін складових фаз потоку. Витратомір, крім здатності вимірювати з необхідною точністю, також повинен мати додаткові атрибути, зокрема такі:

- відсутність фізичного контакту первинного перетворювача з потоком, що мінімізує корозію пристрою, виключає виникнення перепаду тиску на цьому перетворювачі та зменшує затруднення з операціями по очищенню труби;
- надійність, потреба в мінімальному технічному обслуговуванні, особливо для підвідного використання вимірювача, де технічне обслуговування дороге;
- мала чутливість до зміни умов навколишнього середовища наприклад, температури;
- здатність функціонувати в широких межах зміни параметрів потоку як по витраті, так і по фазовому складу.

Ніякі доступні і відомі в даний час вимірювальні системи не виконують усіх цих вимог в повному обсязі. Ще один важливий фактор, який обов'язково розглядається при проектуванні витратомірного пристрою - вартість. Незважаючи на перспективу поліпшення продуктивності, багатофазні витратоміри не можуть бути широко прийняті, якщо ціни не будуть відповідати ринковим, зокрема цінам конкурентів.

Удосконалення методики та пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків будемо здійснювати на основі методу постійного перепаду тиску із застосуванням ротаметрів. Переваги ротаметрів: простота конструкції і експлуатації; наглядність показів; надійність в роботі; можливість застосування для вимірювання малих витрат різних рідин і газів; значний діапазон вимірювання і достатня рівномірна шкала.

Проектований пристрій повинен забезпечувати вимірювання витрати із

можливістю дистанційної реєстрації результатів вимірювання з досить високою точністю, відповідати світовому технічному рівню і бути конкурентоспроможним на ринку і, одночасно, бути недорогим в обслуговуванні і експлуатації.

У зв'язку з цим, необхідно в даній роботі розв'язати такі задачі:

- теоретично обґрунтувати можливість вимірювання витрати двофазових потоків за методом постійного перепаду тиску, розробити математичну модель процесу руху поплавка під дією потоку, пов'язавши параметри руху поплавка із витратами потоків рідини і газу;

- проаналізувати різні можливі схеми пристрою та обґрунтувати доцільність вибору схеми для дистанційної передачі результатів вимірювання з достатньою точністю та завадостійкістю;

- розробити структурну схему пристрою в цілому та розрахувати конструктивні параметри поплавка з метою досягнення заданих параметрів перехідного процесу;

- розробити конструкцію та розрахувати на сучасній елементній базі характеристики блоку живлення пристрою для забезпечення високо стабілізованого живлення всіх блоків пристрою;

- розробити конструкцію плати блока живлення;

- здійснити метрологічний аналіз розробленого пристрою з метою визначення сумарної похибки вимірювання, обґрунтувати методику оцінки сумарної похибки та розрахувати її складові;

- розробити метрологічне забезпечення пристрою для проведення його повірки в робочих умовах;

- визначити вплив шкідливих факторів на людину при роботі з пристроєм та розробити заходи для їх усунення;

- здійснити техніко-економічний розрахунок для доцільності розробки пристрою.

## 2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ДВОФАЗОВИХ ПОТОКІВ ЗА МЕТОДОМ ПОСТІЙНОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

Контрольованими параметрами для аналізу двофазових потоків найчастіше виступають компонентний склад, технологічні параметри потоків і їх витрата. В даному розділі пропонується до розгляду методика вимірювання витрати двофазових потоків методом постійного перепаду тиску за допомогою витратомірів обтікання, зокрема ротаметрів.

### 2.1 Теоретичне обґрунтування методики вимірювання витрати двофазових потоків за методом постійного перепаду тиску

Для вимірювання витрати двофазових потоків в даній роботі пропонується використовувати ротаметри з дистанційною передачею показів. Ротаметри володіють рядом важливих переваг: вони прості у виготовленні, надійні в експлуатації, можуть використовуватися в комбінації з різними вторинними перетворювачами або зовсім без них, мають широкий діапазон вимірювання і задовільні метрологічні характеристики, не втрачають працездатність в агресивних і забруднених середовищах, а також у великому інтервалі зміни фізичних властивостей потоків.

Термін “ротаметр” походить від латинського слова rotation – обертання [1]. Він закріпився за даним витратоміром через те, що перші конструкції таких приладів мали поплавки з косими отворами або прорізами на периферії, завдяки яким поплавок отримував обертальний рух і тим самим краще стабілізувався в потоці. В процесі удосконалення ротаметрів досить швидко було з'ясовано, що

при малих кільцевих зазорах між поплавком і стінкою трубки поплавки не торкаються трубки і за відсутності обертання. Абсолютна більшість сучасних ротаметрів має поплавки, що не обертаються, але не дивлячись на цю традиційну назву витратоміра збережено і введено в стандарти всіх країн.

Ротаметри – найбільш поширені витратоміри обтікання. При русі потоку знизу вгору усередині конічної трубки, поплавки під дією тиску підіймаються на певну висоту. Сили, прикладені до поплавка з боку потоку, залежать від швидкості течії, яка визначається при даній витраті величиною прохідного перерізу каналу потоку. Підйом поплавка приводить до збільшення зазору між ним і внутрішньою поверхнею трубки. При цьому швидкість потоку знижується і сила, що переміщає поплавок вгору, зменшується. При постійній витраті переміщення поплавка припиняється тоді, коли дія потоку зрівнюється з вагою поплавка. Таким чином, кожному постійному значенню витрати відповідає єдине положення рівноваги поплавка на певній висоті підйому його в конічній трубці.

Нижче наведено математичне обґрунтування методики вимірювання витрати методом постійного перепаду тиску і розглянуто процеси, які мають місце при вимірюванні витрати потоку.

Поплавок ротаметра сприймає силову дію набігаючого потоку. Цим силам протидіє вага поплавка. Сила дії потоку на поплавок виникає в результаті поєднання нормального тиску і дотичних сил, прикладених до поверхні поплавка. Дотичні сили (або сили тертя) пов'язані з в'язкістю рідини. Як сили нормального тиску, так і сили тертя залежать від значень швидкостей потоку біля поверхні поплавка, що сприймає дію потоку.

При виникненні витрати під дією сил потоку поплавок переміщується, змінюючи площу найменшого перерізу потоку, і тим самим змінюючи діючі сили до тих пір, поки дія сил потоку не зрівноважиться вагою поплавка. Таким чином, поплавок відіграє роль статичного регулятора рівня сил потоку, доводячи його завжди до граничного значення - ваги поплавка. Регулювання здійснюється

через зміну площі найменшого перерізу потоку. Оскільки поплавок переміщається в конічній вертикальній трубці, то зміна площі перерізу потоку однозначно пов'язана з вертикальним підйомом поплавка.

Площа найменшого перерізу потоку визначається: вагою поплавка, його конфігурацією, значенням характерної швидкості в найменшому перерізі і розподілом місцевих швидкостей по перерізах біля поверхні поплавка. Висота підйому поплавка, у свою чергу, залежить від площі найменшого перерізу і форми ротаметричної трубки.

Труднощі теоретичного опису процесів проходження потоку через ротаметр, полягають в неоднозначності і складності первинного перетворення, оскільки зв'язок між характерною і місцевими швидкостями залежить від в'язкості потоку, характеру і режиму течії. При русі потоку в області поплавка залежно від його конфігурації відбувається відрив струменя від поверхні поплавка. Режим течії змінюється в дуже широких межах.

В ротаметрі (рис. 2.1) виділяють три перерізи: 1-1 — переріз перед поплавком, де починається дія потоку на поплавок (площа перерізу потоку —  $f_{mp}$ ); 2-2 — вузький кільцевий переріз потоку, де змінюється максимальна швидкість на рівні перерізу поплавка (площа перерізу —  $f_k$ ); 3-3 — переріз, в якому закінчується дія потоку на поплавок, місце найбільшого перерізу потоку за поплавком.

Площа перерізу потоку на рівні перерізу 3-3 виражаємо так:

$$f_3 = \mu f_k, \quad (2.1)$$

де  $\mu \geq 1$  — коефіцієнт звуження потоку.

Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 3-3, нехтуючи різницею висот цих січень. Отримаємо:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \omega_1^2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho \omega_3^2 + \rho \delta_{em}, \quad (2.2)$$

де  $p_1$  і  $p_3$  — статичні тиски;  $\rho$  — густина потоку;  $\omega_1$  і  $\omega_3$  — швидкості у відповідних перерізах;  $\delta_{em}$  — втрати тиску між перерізами 1-1 і 3-3.

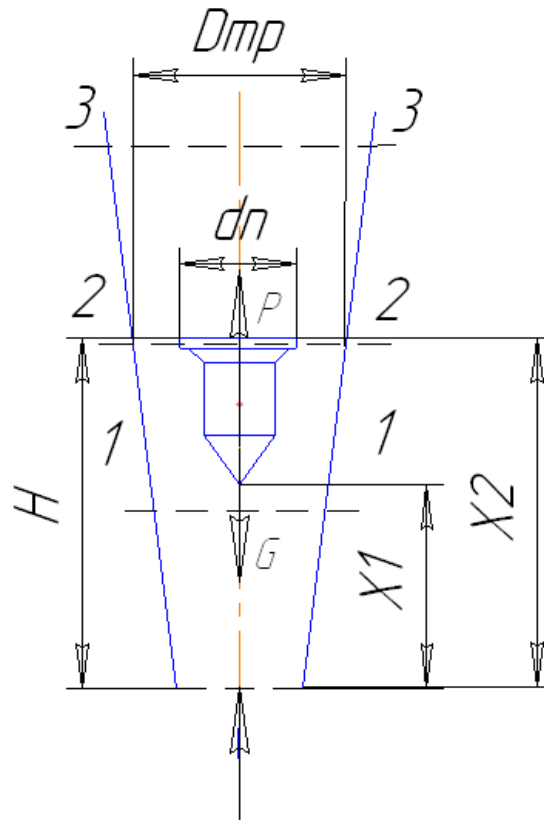


Рисунок 2.1 – Схема ротаметра

В силу нерозривності потоку маємо:

$$\omega_1 f_{mp} = \omega_2 f_k = \omega_3 \mu f_k. \quad (2.3)$$

Ввівши відносну площу кільцевого перерізу потоку  $m = f_k / f_{mp}$ , представимо швидкості  $\omega_1$  і  $\omega_3$  через швидкість  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = \omega_2 m, \quad (2.4)$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_2}{\mu}. \quad (2.5)$$

Втрати тиску  $\delta_{em}$  віднесемо до швидкості в кільцевому перерізі, тобто приймемо, що:

$$\delta_{em} = \xi_2^2 \frac{\omega_2^2}{2}, \quad (2.6)$$

де  $\xi_2$  – коефіцієнт втрат.

Підставивши формули (2.6) і (2.5), (2.4) у вираз (2.2), отримаємо:

$$\Delta p = p_1 - p_3 = \frac{1 - \mu^2(m^2 - \xi_2)}{\mu^2} \cdot \frac{\rho \omega_2^2}{2} = C_x \frac{\rho \omega_2^2}{2}. \quad (2.7)$$

В такій формі запису  $C_x$  характеризує долю динамічного тиску  $\rho\omega^2/2$ . Більш наглядний фізичний зміст  $C_x$  отримується, якщо домножити ліву і праву частину рівняння (2.7) на площу дії статичного тиску (тобто на переріз поплавка  $f_n$ ):

$$P = \Delta p f_n = C_x f_n \frac{\rho\omega_2^2}{2}, \quad (2.8)$$

де  $P$  — сила, прикладена до поплавка зі сторони потоку;  $C_x$  — коефіцієнт опору поплавка;  $\omega_2$  — швидкість в перерізі 2-2, це характерна швидкість потоку  $\omega_k$ .

Сила  $P$  виникає в результаті сумування всіх нормальних тисків і всіх дотичних сил, прикладених до поплавка, дія яких враховується коефіцієнтом  $\xi_2$  [2]. У виразі для  $C_x$  коефіцієнт  $\mu$  залежить від сил інерції потоку, а  $\xi_2$  — від сил інерції і сил тертя, спільна дія яких визначається числом Рейнольдса. Залежно від значення  $\xi_2$  коефіцієнт  $C_x$  приймає будь-яке значення в межах  $0 \leq C_x \leq \infty$ .

Умова рівноваги поплавка в ротаметрі буде мати вигляд:

$$P = G_n, \quad (2.9)$$

де  $P$  — сумарна сила, що діє зі сторони потоку, напрямлена вгору;  $G_n$  — вага поплавка.

На поплавок знизу діють три сили:

- різниця статичних тисків на поверхні поплавка, що виникає внаслідок переходу частини потенціальної енергії в характерну швидкість потоку у вузькому перерізі потоку, ця різниця рівна  $(p_1 - p_2) \cdot f_n$ , де  $f_n$  — площа найбільшого поперечного перерізу поплавка;

- динамічний тиск  $W$  потоку;

- сила тертя  $N$  потоку об поверхню поплавка.

Із рівняння рівноваги випливає:

$$p_1 - p_2 = \frac{(G_n - W - N)}{f_n}. \quad (2.10)$$

Якщо знехтувати силами  $W$  і  $N$ , то отримаємо  $p_1 - p_2 = G_n / f_n = \text{const}$  [2]. Ця рівність стала основою того, що ротаметр вважають витратоміром постійного перепаду тиску. Але ця постійність наближена, оскільки із збільшенням витрати

зростає як динамічний тиск  $W$ , так і сила тертя  $N$ . Як наслідок, із збільшенням витрати перепад тиску  $p_1 - p_2$  на поплавку повинен зменшуватись, хоч загальний перепад на ротаметрі з врахуванням втрат в приєднаних штуцерах при цьому і збільшується.

Вага поплавка визначається за формулою:

$$G_n = V_n g (\rho_n - \rho), \quad (2.11)$$

де  $V_n$  — об'єм поплавка;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $\rho_n$  — густина поплавка.

Підставивши формули (2.8) і (2.11) у рівність (2.10), отримаємо формулу для визначення характерної швидкості потоку:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2gV_n}{C_x f_n} \chi_\rho}, \quad (2.12)$$

де  $\chi_\rho = \frac{\rho_n}{\rho} - 1$  — відносна густина поплавка.

Об'ємна витрата  $Q$  визначається як добуток площі прохідного перерізу на середню швидкість потоку в цьому перерізі, тобто:

$$Q = f_k \omega_{k,sp}. \quad (2.13)$$

Прийнявши значення характерної швидкості як значення середньої швидкості потоку  $\omega_{k,sp}$ , отримаємо:

$$f_k = Q \sqrt{\frac{C_x f_n}{2gV_n \chi_\rho}}. \quad (2.14)$$

Беручи до уваги коефіцієнт  $\beta$ , що враховує особливості потоку, величина площі прохідного перерізу потоку набуде вигляду:

$$f_k = \frac{Q}{\beta} \sqrt{\frac{f_n}{2gV_n \chi_\rho}}. \quad (2.15)$$

Формула (2.15) показує, що в положенні рівноваги поплавка встановлюється так, що площа найменшого кільцевого зазору між ним і стінкою трубки стає прямо пропорційною об'ємній витраті потоку, який протікає через

ротаметр. Значення коефіцієнта  $\beta = 1/\sqrt{C_x}$  можна визначити тільки експериментальним шляхом.

За формулою (2.15) можна визначити величину  $Q$  у вигляді:

$$Q = \beta f_k \sqrt{2g \frac{V_n}{f_n} \chi_p}, \quad (2.16)$$

або

$$Q = \beta f_k \sqrt{2g L_n \chi_p}, \quad (2.17)$$

де  $L_n$  — характерний розмір поплавка.

Коефіцієнт витрати  $\beta$  залежить від усіх геометричних особливостей каналу в області поплавка і від режиму течії в цьому каналі. Характер і режим потоку, як відомо, повністю визначається числом Рейнольдса  $Re$  в характерному перерізі потоку. Для ротаметра характерним перерізом є площа найменшого перерізу потоку  $f_k$ . Середнє значення числа Рейнольдса можна визначити через гідравлічний діаметр каналу:

$$Re_k = \frac{v_k D_\Gamma}{\nu}, \quad (2.18)$$

де  $v_k$  — швидкість в кільцевій площі;  $D_\Gamma = D_{\text{трубки}} - d_n$  — гідравлічний діаметр площі  $f_k$ ;  $\nu$  — в'язкість середовища.

Взаємодія потоку з поплавком буде визначатись значеннями числа Рейнольдса і ряду геометричних розмірів, від яких залежить форма поплавка в кільцевому каналі. Геометричні розміри, які будуть чинити суттєвий вплив на процес обтікання поплавка, залежать від індивідуальних особливостей форми поплавка і трубки.

Враховуючи, що  $Q = f_k \omega_2$ , запишемо формулу витрати у вигляді:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{C_x}} f_k \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} = \beta f_k \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (2.19)$$

де коефіцієнт витрати  $\beta = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 (m^2 - \xi_2)}} = f(Re, m)$ , приймає значення в межах

$$0 \leq \beta \leq 1.$$

В даній формулі під густиною потоку  $\rho$  слід розуміти густину суміші двох фаз.

Густина суміші розраховується за формулою:

$$\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_p, \quad (2.20)$$

де  $\alpha$  – істинний об'ємний газовміст;  $\rho_g, \rho_p$  — густина газу і рідини відповідно.

Істинний об'ємний газовміст — це відношення площі поперечного перерізу, зайнятої газом, до загальної площі поперечного перерізу потоку  $A$ , тобто  $\alpha = A_g/A$ . Загальний поперечний переріз  $A$  — це сума площ перерізів, зайнятих газом ( $A_g$ ) і рідиною ( $A_p$ ), тобто  $A = A_g + A_p$  [3].

Істинний об'ємний вміст рідини:

$$\alpha_p = 1 - \alpha_g = \frac{A_p}{A}. \quad (2.21)$$

Рівняння збереження маси для фаз (рівняння нерозривності фаз) мають наступний вигляд:

для газу

$$M_g = \frac{A_g u_g}{v_g} = \frac{\alpha A u_g}{v_g}, \quad (2.22)$$

для рідини

$$M_p = \frac{A_p u_p}{v_p} = \frac{(1 - \alpha) A u_p}{v_p}, \quad (2.23)$$

де  $u_g$  і  $u_p$  — істинні об'ємні швидкості газу і рідини відповідно;  $v_g, v_p$  — питомі об'єми відповідно газу і рідини. Загальна масова витрата становить:

$$M = M_g + M_p,$$

де  $M_g, M_p$  — масові витрати відповідно газу і рідини.

Масові швидкості газу  $G_g$  і рідини  $G_p$ :

$$G_g = \frac{\alpha u_g}{v_g}; \quad G_p = \frac{\alpha u_p}{v_p}. \quad (2.24)$$

Істинний об'ємний газовміст:

$$\alpha = \frac{xv_2}{xv_2 + K(1-x)v_p}, \quad (2.25)$$

де  $x$  — витратний масовий газовміст;  $K$  — коефіцієнт швидкості,  $K=u_2/u_p$ .

Істинний об'ємний вміст рідини:

$$1 - \alpha = \frac{K(1-x)v_2}{xv_2 + K(1-x)v_p}, \quad (2.26)$$

де  $(1-x)$  — витратний масовий вміст рідини.

Об'ємна витрата газу обчислюється за такою формулою:

$$Q_2 = A_2 u_2 = G_2 v_2, \quad (2.27)$$

а об'ємна витрата рідини

$$Q_p = A_p u_p = G_p v_p. \quad (2.28)$$

Густина суміші розраховується за формулою (2.20).

Якщо підставити  $a$  з рівняння (2.25), то після перетворень отримаємо ще один вираз для обчислення густини суміші:

$$\rho = \frac{x + K(1-x)}{\frac{x}{\rho_2} + \frac{K(1-x)}{\rho_p}}. \quad (2.29)$$

Гомогенна густина — це густина суміші, в якій обидві фази мають одну і ту ж швидкість ( $K=1$ ) і її можна визначити за формулою:

$$\rho_{\text{гом}} = \frac{1}{\frac{x}{\rho_2} + (1-x)\rho_p}. \quad (2.30)$$

Істинна об'ємна швидкість газу записується виразом:

$$u_2 = \frac{M_2 v_2}{\alpha A} = G(xv_2 + K(1-x)v_p). \quad (2.31)$$

Істинна об'ємна швидкість рідини становить:

$$u_p = \frac{M_p v_p}{(1-\alpha)A} = \frac{G}{K}(xv_2 + (1-x)v_p). \quad (2.32)$$

Існують також такі співвідношення для складових швидкостей двофазних потоків:

$$u_{\text{сум}} = \frac{Q_p + Q_g}{A}. \quad (2.33)$$

Формула (2.19) є основним розрахунковим відношенням, що використовується при проектуванні ротаметрів. В даній формулі під витратою  $Q$  слід розуміти сумарну витрату газу і рідини, тобто:

$$Q = Q_p + Q_g, \quad (2.34)$$

де  $Q_p$  — витрата рідини;  $Q_g$  — витрата газу.

Відношення витрат обидвох фаз можна записати як відношення швидкостей цих фаз:

$$\frac{Q_g}{Q_p} = \frac{v_g}{v_p} = \frac{v \cdot \rho_g}{v \cdot \rho_p}, \quad (2.35)$$

де  $v_g$  — швидкість газу;  $v_p$  — швидкість рідини;  $v$  — загальна швидкість двофазового потоку.

Оскільки  $Q_g = Q - Q_p$ , підставивши цей вираз у рівняння (2.35) отримаємо:

$$\frac{Q - Q_p}{Q_p} = \frac{Q}{Q_p} - 1 = \frac{v \cdot \rho_g}{v \cdot \rho_p}, \quad (2.36)$$

Скоротивши вираз (2.36) на  $Q_p$  і знаючи, що  $v \cdot \rho_p = Q_p$  отримаємо рівність:

$$Q - Q_p = v \cdot \rho_g. \quad (2.37)$$

Знаючи загальну витрату потоку, швидкість потоку і густину газової фази можна визначити витрату рідини:

$$Q_p = Q - v \cdot \rho_g. \quad (2.38)$$

І навпаки, знаючи загальну витрату потоку, швидкість потоку і густину рідини можна визначити витрату газової фази:

$$Q_g = Q - v \cdot \rho_p. \quad (2.39)$$

Ротаметри можуть бути використані для вимірювання витрати будь-яких середовищ. Встановлення ротаметра не потребує наявності прямої ділянки трубопроводу. Це дозволяє встановлювати прилади такого типу безпосередньо до і після згинів трубопроводів і вентилів. Втрати тиску на ротаметрах дуже малі.

Прилади прості за конструктивним виконанням і містять малу кількість складових деталей. Похибки вимірювання не перевищують 2 %, а при особливо точній калібровці можуть бути зменшені до 1 %.

Удосконалення методики вимірювання витрати полягає у тому, що спроектований прилад дасть можливість дистанційно вимірювати величину лінійного переміщення тіла обтікання, отримувати цифровий сигнал за допомогою сучасного диференціально-трансформаторного перетворювача з застосуванням мікросхеми AD698.

## 2.2 Аналіз та обґрунтування вибору вимірювальної схеми пристрою для дистанційної реєстрації результатів вимірювання

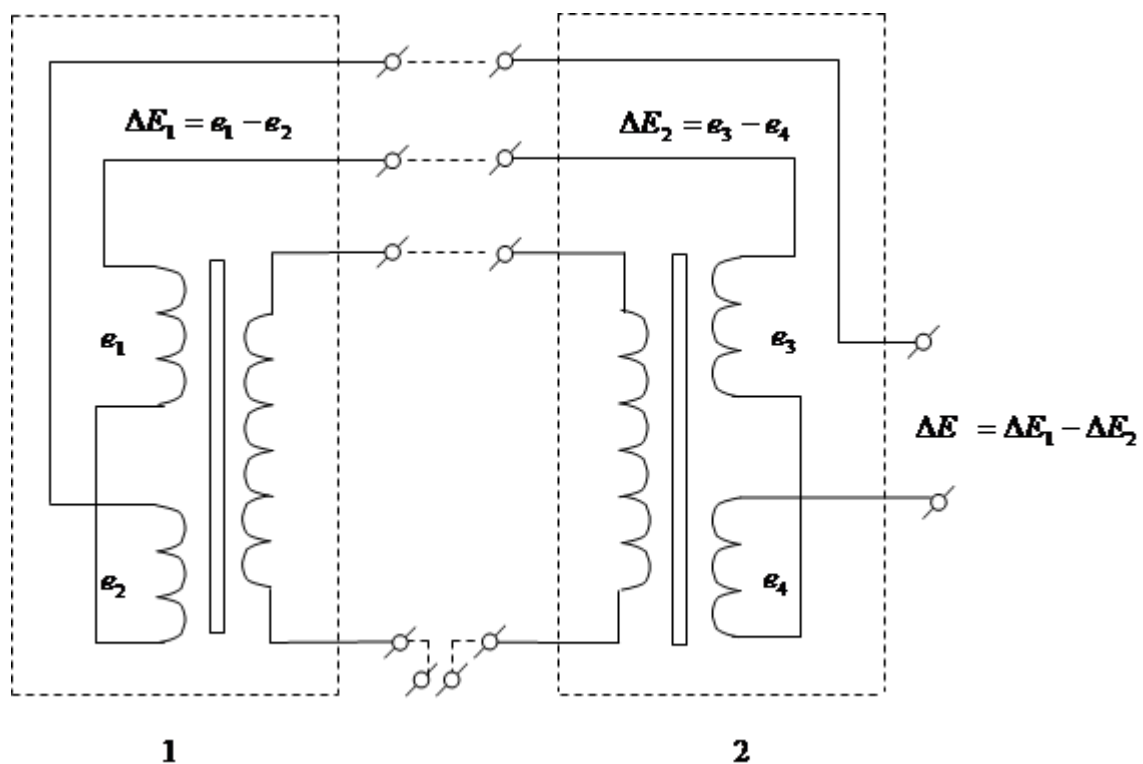
Вимірювальна схема проектованого пристрою складається з ротаметра, переміщення поплавка якого сприймає лінійний диференціально-трансформаторний перетворювач. В даному випадку поплавок виготовлений з фторопласту, у верхній частині якого вмонтований невеликий стержень з феромагнітного матеріалу.

Хід поплавкової системи таких ротаметрів значно менший ходу поплавка ротаметра з місцевою шкалою. Він визначається пристроєм неконтактного вторинного перетворювача, зокрема, диференціально-трансформаторним перетворювачем. Ротаметричні трубки зазвичай виготовляють із різноманітних немагнітних і непрозорих матеріалів (титану, фторопласту і інших), оскільки немає необхідності у візуальному спостереженні за поплавком.

Серед існуючих перетворювачів переміщення, зокрема індукційних, ємнісних, тензорезистивних, слід надати перевагу диференціально-трансформаторним перетворювачам, оскільки вони краще сприймають переміщення поплавка, сигнал не потребує підсилення і попередньої обробки, механічне переміщення чутливого елемента ротаметра отримуємо в цифровому

вигляді. В диференціально-трансформаторних перетворювачах переміщення осердя первинного пристрою зрівноважується відомим переміщенням вторинного пристрою.

Схема диференціально-трансформаторного перетворювача (рис. 2.2) складається з двох однакових котушок, одна з яких знаходиться в первинному пристрої 1, а інша – у вторинному пристрої 2. Первинні обмотки котушок ввімкнені послідовно і живляться напругою змінного струму. Вторинні обмотки ввімкнені назустріч одна одній. Всередині котушок знаходиться магнітне осердя. Якщо осердя обидвох котушок знаходяться в середньому положенні, то величини електрорушійних сил  $e_1$  і  $e_2$ , що виникають в котушках, рівні між собою, тобто  $\Delta E_1 = e_1 - e_2 = 0$  і  $\Delta E_2 = e_3 - e_4 = 0$ , і різниця  $\Delta E = \Delta E_1 - \Delta E_2$  на виході вторинного пристрою також рівна нулю.



1 – первинний пристрій; 2 – вторинний пристрій

Рисунок 2.2 – Схема диференціально-трансформаторного перетворювача

При зміні положення осердя величина електрорушійної сили, що виникає в котушках, змінюється.

Величина струму у вторинному колі котушок первинного і вторинного пристроїв визначається за допомогою формул:

$$I_n = \frac{M_1 U - M_2 U}{2Z + Z_n} = \frac{e_1 - e_2}{2Z + Z_n}, \quad (2.40)$$

$$I_e = \frac{M_3 U - M_4 U}{2Z + Z_n} = \frac{e_3 - e_4}{2Z + Z_n}, \quad (2.41)$$

де  $M_1, M_2, M_3, M_4$  — коефіцієнти взаємоіндукції;  $U$  — напруга живлення первинної обмотки;  $Z$  — повний опір вторинної обмотки кожної котушки;  $Z_n$  — опір навантаження.

Результуючий струм:

$$\Delta I = I_n - I_e = \frac{U \Delta M}{2Z + Z_n}, \quad (2.42)$$

де  $\Delta M$  — результуючий приріст коефіцієнта взаємноіндукції, викликаний зміною положення осердь.

На вихід вторинного пристрою подається результуюча напруга:

$$\Delta E = \Delta I \cdot Z_n = \frac{U \cdot \Delta M \cdot Z_n}{2 \cdot Z + Z_n}. \quad (2.43)$$

У вимірювальній схемі можна вважати, що  $Z_n = \infty$ , тоді:

$$\Delta E = \Delta I \cdot Z_n = \frac{U \cdot \Delta M}{\frac{2 \cdot Z}{Z_n} + 1} \approx U \cdot \Delta M. \quad (2.44)$$

Ця напруга розбалансу приводить в рух асинхронний двигун, який переміщує осердя трансформатора вторинного пристрою поки різниця напруг не стане рівною нулю.

Лінійні диференціальні трансформатори є точними і надійними засобами для вимірювання лінійного переміщення з можливістю передачі показів на відстань. В лінійному диференціальному трансформаторі вихідна напруга є пропорційною положенню магнітного осердя, що переміщається. Первинна обмотка збуджується джерелом змінної напруги, наводячи при цьому у вторинних обмотках напругу, яка змінюється із зміною положення магнітного

осердя всередині ротаметра.

Вторинні обмотки намотуються зустрічно, і коли осердя знаходиться в центрі, напруги на вторинних обмотках рівні і протилежні за знаком, а вихідна результуюча напруга рівна нулю. Коли осердя зміщується від центру, напруга у вторинній обмотці, в бік якої зміщується осердя, зростає, в той час, як напруга на протилежній обмотці зменшується. В результаті вихідна диференціальна напруга змінюється лінійно в залежності від положення осердя. Лінійність такої системи по діапазону переміщення досить висока, досягає 0,5% і вище.

Лінійні диференціальні трансформатори забезпечують високу точність, лінійність, чутливість, володіють широким спектром діапазонів вимірювання переміщення від 100 мкм до 25 см. Типові напруги збудження лежать в межах від 1В до 24В, і з частотами від 50 Гц до 10 кГц.

На рис. 2.3 показана мікросхема нормування сигналів з лінійного диференціального трансформатора AD698 індустріального стандарту, яка виконує всю необхідну обробку сигналу із даного пристрою. За допомогою єдиного внутрішнього конденсатора можна змінювати частоту збудження внутрішнього генератора від 20 Гц до 20 кГц. AD698 працює з 4-провідним диференціальним трансформатором і використовує метод синхронної демодуляції. Два синхронні канали демодуляції в AD698 використовуються, щоб знайти початкову і повторювану амплітуду сигналу. Дана мікросхема має хорошу температурну стабільність і не потребує ніякого коригування сигналу, конструктивно виконана на одному чіпі, за винятком декількох пасивних елементів, які потрібні для завершення конвертації механічного переміщення в електричний сигнал.

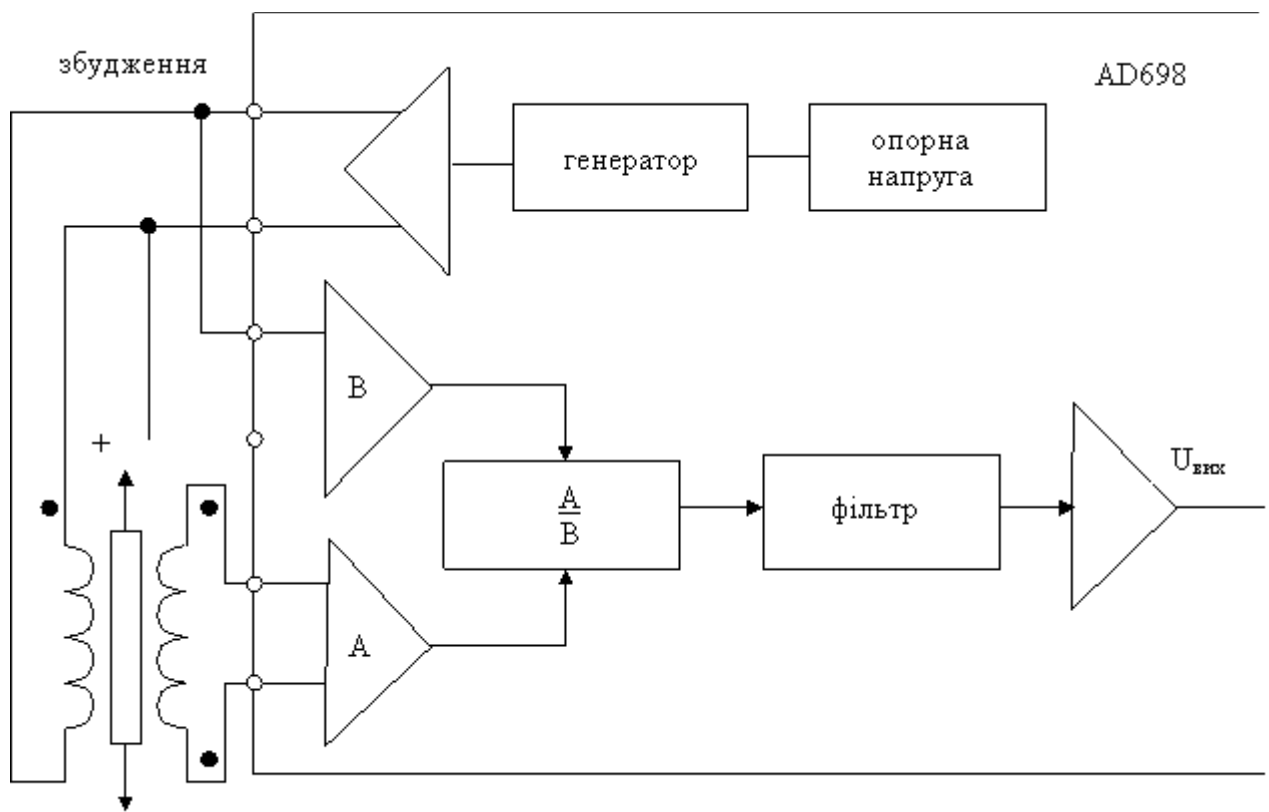


Рисунок 2.3 – Пристрій нормування сигналів AD698 з лінійного диференціального трансформатора

Кожен процесор по каналам А і В складається з пристрою виділення абсолютної величини і фільтра. Потім значення вихідного сигналу каналу А ділиться на значення вихідного сигналу каналу В, щоб кінцевий вихідний сигнал був відносним і не залежав від амплітуди напруги збудження. Слід зазначити, що для AD698 сума вторинних напруг з лінійного диференціального трансформатора не обов'язково повинна залишатись постійною.

## 2.3 Розробка конструкції пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків

### 2.3.1 Опис структурної схеми пристрою

Пристрій складається із двох основних блоків: блоку вимірювання витрати двофазового потоку і блоку обробки результатів вимірювання. Блок вимірювання, до складу якого входить ротаметр і турбінний вимірювач швидкості потоку, безпосередньо під'єднаний до трубопроводу. Ротаметр 1 складається з конічної трубки невеликої конусності і поплавка з феромагнітного матеріалу. Турбінний вимірювач швидкості потоку 2 з аксіальною турбінкою визначає загальну швидкість обидвох складових двофазового потоку, тобто загальну швидкість рідини і газу. Блок обробки результатів вимірювання складається з диференціально-трансформаторного перетворювача, перетворювача кількості обертів, мікропроцесорного блоку, блоку живлення і блоку індикації.

Потік природного газу, протікаючи через трубку ротаметра, спричиняє переміщення поплавка. Диференціально-трансформаторна система передачі 3 сприймає механічне переміщення поплавка ротаметра і перетворює у електричний сигнал.

На зовнішню частину ротаметричної трубки намотані диференціально-трансформаторні котушки. У вторинний пристрій вмонтовано аналогічний трансформатор з осердям. Обмотки котушок ротаметра і вторинного приладу включені по диференційно-трансформаторній схемі. При живленні первинних обмоток диференційних трансформаторів змінною напругою у вторинних обмотках індуються змінні напруги, величина і фаза яких залежить від положення плунжерів в котушках. При неузгодженні положення плунжера напруги, індуквані у вторинних обмотках, стають різними. Ця напруга

розбалансу приводить в рух асинхронний двигун, який переміщує осердя трансформатора вторинного пристрою поки різниця напруг не стане рівною нулю. Таким чином, кожному положенню осердя трансформатора ротаметра, яке пропорційне величині витрати, відповідає певне положення осердя трансформатора вторинного пристрою і, як наслідок, певний цифровий сигнал на індикаторі.

Одночасно, перетворювач кількості обертів аксіальної турбінки 4 здійснює перетворення обертів турбінки в електричний сигнал. Мікропроцесорний блок 5 за допомогою мікросхеми AD698 здійснює цифрову обробку електричного сигналу. Живлення пристрою здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В за допомогою блоку живлення 6, який формує необхідні робочі напруги +15В і –15В. Блок живлення забезпечує живленням диференціально-трансформаторний перетворювач, перетворювач кількості обертів, мікропроцесорний блок і блок індикації. Блок індикації 7 призначений для виведення значення вимірної загальної витрати двофазового потоку на екран індикатора пристрою.

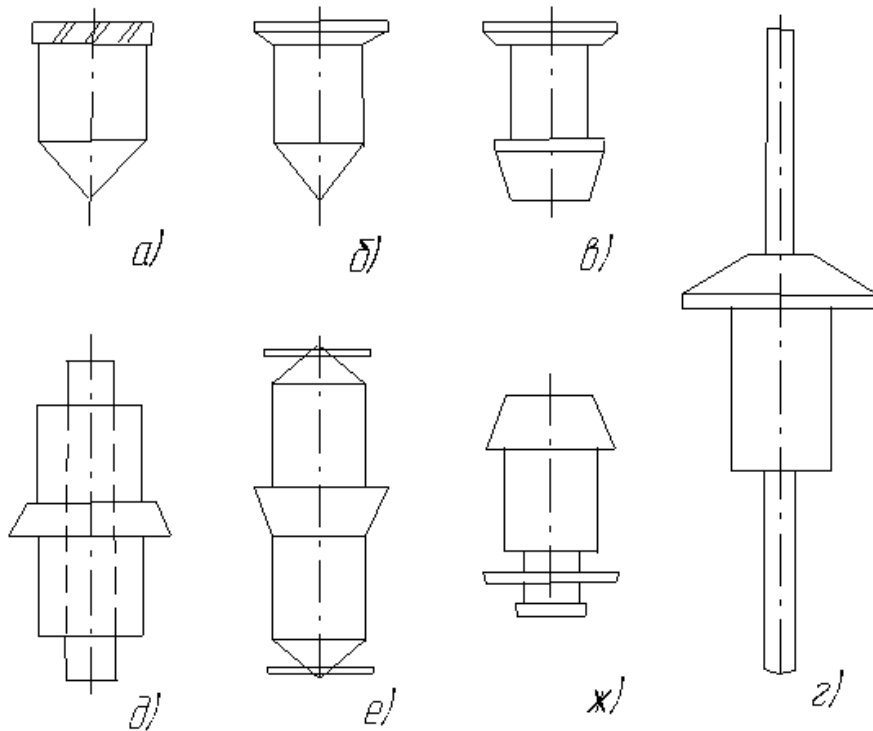
### 2.3.2 Опис конструкції ротаметра

Основні елементи ротаметрів — конічна трубка і поплавки — утворюють його протічну частину. Форми поплавок можуть бути доволі різними. Класична його форма показана на рис. 2.4,*a*. Поплавки має конічну нижню частину, циліндричну середню частину і дисковий верх. На боковій поверхні нанесені косі канавки для центрування поплавка відносно осі конічної трубки і уникнення тертя між ними. В подальшому виявилось, що поплавки і без обертового руху займає співвісне розташування з трубкою при тих малих зазорах, котрі наявні між ними. У зв'язку з цим тепер косих каналів на поплавок зазвичай не роблять. Суттєвий недолік такої форми поплавка – велика залежність градувальності

характеристики від в'язкості вимірюваної речовини. Для зниження цієї залежності доцільно зменшити висоту верхньої дискової частини поплавка і діаметр циліндричної його частини, щоб він був не більшим 0,6-0,7 від діаметра верхнього диска (рис. 2.4,б). В меншій степені вплив в'язкості помітний при формі поплавка у вигляді котушки, показаний на рис. 2.4,в, який найчастіше використовується. Ще сильніше ліквідується вплив в'язкості при дисковій і тарельній формі поплавків, коли основне тертя потоку проходить на дуже невеликій боковій поверхні диска. Але маса таких поплавків досить мала, тому доводиться або збільшити довжину циліндричного тіла поплавка в одну або дві сторони від диска, або підвішувати на стержні додатковий вантаж. Крім того такі поплавки нестійкі і для усунення перекосу і тертя об стінки трубки їх необхідно оснащувати направляючими. Останні можуть бути трьох видів: направляючі, зв'язані з поплавком і переміщаючись разом з ним (рис. 2.4,г); нерухомі центральні штоки, що проходять через осьові отвори поплавків (рис. 2.4,д); направляючі кільця, що закріплюються на верхній чи нижній частині поплавка (рис. 2.4,е,ж) – їх переваги – сприяють зменшенню впливу в'язкості і можливість вимірювання витрати непрозорих рідин (завдяки малому зазору між направляючими ребрами і кільцями).

Щоб досягти великих значень максимальної витрати потрібно збільшити кут конусності трубки або зменшити діаметр поплавка. Поплавки виготовляють з різних матеріалів: нержавіюча сталь, титан, сплави алюмінію, різні пластмаси. При необхідності для зниження маси поплавка його роблять пустотілим.

Другий важливий елемент ротаметра – вимірювальна конічна трубка (з конусністю 0,001-0,01). Вона виготовляється з хімічно стійкого або термостійкого боросилікатного скла. Чутливість приладу зростає із зменшенням кута нахилу конусності трубки. Інколи застосовують ротаметри із металічною конусною трубкою. В цьому випадку поплавок зв'язаний з хвостовиком-вказівником або із дистанційною передачею.



*a* — класична форма; *б* — із зменшенням циліндричної частини; *в* — у вигляді котушки; *г* — з направляючими; *д* — з нерухомими штоками; *е, ж* — з направляючими кільцями

Рисунок 2.4 – Конструктивна різноманітність поплавків

Існують певні рекомендації щодо застосування ротаметрів. Зокрема, необхідно забезпечити строго вертикальне положення конусної трубки ротаметра. Навіть при невеликому нахилі осі трубки до вертикалі виникає похибка вимірювання витрати. Одна із причин – зменшення сили, що зрівноважує дію потоку на поплавок. При нахилі трубки порушується умова симетрії обтікання поплавка. Крім цього потрібно мати прямі ділянки трубопроводу до ( $l_1 \geq 10D$ ) і після ( $l_2 \geq 5D$ ) ротаметра.

При експлуатації ротаметрів потрібно мати на увазі можливість виникнення в деяких випадках пульсації поплавків. При вимірюванні витрати поплавок під дією спільних сил інерції і сил пружності здійснює деяке коливання, котре існує до тих пір, поки він не займе нове положення рівноваги.

При вимірюванні витрати газу виникають додаткові труднощі. Вони викликаються, в основному, зміною властивостей газів в залежності від

температури і тиску. Одним із недоліків, що спостерігаються при вимірюванні витрати газових потоків, є накопичення електростатичних зарядів на поплавку ротаметра, які можуть спричинити неточність у вимірюваннях. Вони можуть навіть спричинити непрацездатність приладу із-за прилипання поплавка до корпусу вимірювальної трубки. Тому вибір матеріалів поплавка і вимірювальної конічної трубки, а також розробка способів боротьби із накопиченням електростатичних зарядів являється в даний час актуальною задачею.

### 2.3.3 Розрахунок конструктивних параметрів чутливого елемента ротаметра

Розрахунок параметрів чутливого елемента ротаметра проводимо при таких значеннях вхідних параметрів:

- 1) Найбільший діаметр ротаметричної трубки  $D_{mp.max} = 32\text{мм}$  ;
- 2) Найбільший діаметр поплавка  $d_n = 12\text{мм}$  ;
- 3) Мінімальна витрата  $Q_{min} = 10 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ , максимальна витрата  $Q_{max} = 60 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$  ;
- 4) Густина потоку  $\rho = 0,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Визначаємо площу найбільшого поперечного перерізу поплавка:

$$f_n = \frac{\pi}{4} \cdot d_n^2 = \frac{3,14}{4} \cdot 0,012^2 = 0,000113 \text{ м}^2.$$

Площа кільцевого перерізу потоку рівна:

$$f_k = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{mp}^2 - d_n^2) = \frac{3,14}{4} \cdot (0,032^2 - 0,012^2) = 0,00069 \text{ м}^2.$$

Визначаємо швидкість в кільцевому перерізі між бортиком поплавка і конічною трубкою:

$$\omega_2 = \frac{Q_{\max}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{пр. max}}^2 - f_n} = \frac{\frac{60}{3600}}{\frac{3,14}{4} \cdot 0,032^2 - 0,000113} = 23 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Обчислюємо перепад тиску на поплавку (при  $\beta = 1$ ):

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot \omega_2^2}{2} = \frac{0,7 \cdot 23^2}{2} = 185,15 \text{ Па}.$$

Розраховуємо об'єм поплавка  $V_n$ . Об'єм поплавка складається з об'ємів 3 циліндричних фігур:

$$V_1 = \frac{0,012^2 \cdot 3,14 \cdot 0,005}{4} = 0,00000056 \text{ м}^3,$$

$$V_2 = \frac{0,008^2 \cdot 3,14 \cdot 0,013}{4} = 0,000000653 \text{ м}^3,$$

$$V_3 = \frac{0,010^2 \cdot 3,14 \cdot 0,010}{4} = 0,000000785 \text{ м}^3,$$

$$V = 0,00000056 + 0,000000653 + 0,000000785 = 0,000001998 \text{ м}^3.$$

Необхідно вибрати матеріал, з якого виготовлений поплавок, тобто визначити густину матеріалу, з якого виготовлений поплавок  $\rho_n$ . Поплавок виготовлений з фторопласта-4 (ГОСТ 10007-80), даний матеріал не поглинає воду, хімічностійкий і має низький коефіцієнт тертя. Густина фторопласта-4 становить  $\rho_n = 2,19 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 2190 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  у роботі [9].

Рівняння для ваги поплавка із врахуванням виштовхувальної сили:

$$G_n = gV_n(\rho_n - \rho) = 9,8 \cdot 0,000001998 \cdot (2190 - 0,7) = 0,042 \text{ Н}.$$

По вибраному  $\rho_n$  і розрахованому  $V_n$  і розраховуємо масу поплавка:

$$M_n = V_n \cdot \rho_n = 0,000001998 \cdot 2190 = 0,0043 \text{ кг}.$$

За габаритними розмірами поплавка визначаємо його конусність. Конусність верхньої частини поплавка становить:

$$\kappa_1 = \frac{12 - 10}{3} = 0,67.$$

Конусність нижньої частини поплавка становить:

$\kappa_2 = \frac{10-6}{8} = 0,5$ . Рівняння руху поплавка в нестационарному потоці є настільки

складним, що свідомо приймають деяку ідеалізацію процесу обтікання поплавка. Приймають, що тертя потоку об поверхню поплавка і трубки відсутнє, швидкість в кільцевому

перерізі набагато перевищує значення швидкості в перерізі перед поплавком, потік нестискуваний, внутрішнє тертя відсутнє. При цих припущеннях поведінка поплавка ротаметра в нестационарному потоці може бути описане наступною системою диференціальних рівнянь:

$$V_n \rho_n \frac{d^2 x}{dt^2} - f_n \frac{\rho U^2}{2} - \frac{V_n \rho}{9} \frac{dW_k}{dt} + V_n \rho g \chi_p = 0, \quad (2.45)$$

$$U = \frac{Q}{f_k} - \frac{f_n}{f_k} \frac{dx}{dt} - \frac{dx}{dt}, \quad (2.46)$$

$$W_k = \frac{Q}{f_k} - \frac{f_n}{f_k} \frac{dx}{dt}, \quad (2.47)$$

$$f_k = f_n \left( \frac{x^2}{d_n^2} \cdot k^2 - 1 \right), \quad (2.48)$$

де  $V = v \cdot f_n \cdot l_n$  — об'єм поплавка;  $v$  — коефіцієнт форми поплавка;  $f_n$  — площа найбільшого поперечного перерізу поплавка;  $l_n$  — довжина поплавка;  $x$  — координата положення поплавка, відрахована від деякої початкової точки, в якій внутрішній діаметр трубки ротаметра рівний нулю;  $\rho_n, \rho$  — густина матеріалу поплавка і вимірюваного середовища відповідно;  $U$  — швидкість газу в кільцевому перерізі;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $\chi_p = \frac{\rho_n}{\rho} - 1$ ;  $Q$  — миттєва

витрата (в даний час);  $f_k$  — площа кільцевого перерізу між трубкою і поплавком;  $d_n$  — найбільший діаметр поплавка;  $k$  — конусність трубки ротаметра.

Підстановка рівнянь (2.46) – (2.48) в рівняння (2.45) приводить вихідну систему рівнянь до одного нелінійного диференціального рівняння вигляду:

$$A_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + A_2 \frac{dx}{dt} - A_3 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 - A_4 \frac{dQ}{dt} - A_5 Q^2 + A_6 = 0, \quad (2.49)$$

де  $A_1 = 2l_n(\vartheta(\chi_p + 1) + \bar{f})$ ;  $A_2 = 2\frac{Q}{f_k}(\bar{f}(2\bar{l}_n\bar{x}k^2 + 1) + 1)$ ;  $A_3 = \bar{f}^2(4\bar{l}_n\bar{x}k^2 + 1) + 2\bar{f} + 1$ ;

$$A_4 = 2 \cdot \frac{l_n}{f_k}; \quad A_5 = \frac{1}{f_k^2}; \quad A_6 = 2gl_n\vartheta\chi_p.$$

Величини  $\bar{f} = f_n/f_k$ ,  $\bar{l}_n = l_n/d_n$ ,  $\bar{x} = x/d_n$ , що входять у вирази для перших трьох коефіцієнтів — це безрозмірні величини відповідно площі кільцевого перерізу між стінкою труби і поплавком, довжини поплавка і координати його положення.

Розв'язок рівняння (2.49) ускладнюється тим, що коефіцієнти  $A_1$ – $A_5$  містять безрозмірну координату  $\bar{x}$  в явному і неявному вигляді  $f_k=f(x)$ , а коефіцієнт  $A_2$  ще й витрату  $Q$ . В статичному режимі ( $dQ/dt=0$ ,  $dx/dt=0$ ,  $d^2x/dt^2=0$ ) рівняння (2.49) набуває вигляду:

$$Q = f_n(\bar{x}^2k^2 - 1) \cdot \sqrt{2g\vartheta l_n\chi_p}, \quad (2.50)$$

тобто представляє собою звичайну градууювальну характеристику ротаметра при  $\beta=1$ .

Для нестационарних режимів отримати у явному вигляді аналітичну залежність між координатою положення поплавка і витратою не вдається навіть для найпростіших законів вимірювання витрати в часі. Без сумніву, що розв'язування нелінійного диференціального рівняння руху поплавка, наприклад чисельними методами з застосуванням ЕОМ, дало б повне уявлення про динамічні властивості ротаметра. Однак такий метод є трудоємким, а отримані результати будуть справедливими тільки для конкретного витратоміра, конструктивні дані якого використовуються при розрахунку. У випадках, коли математичні труднощі роблять неможливим вирішення нелінійного рівняння, проводять лінеаризацію вихідного рівняння і, розв'язуючи лінійне рівняння, отримують очікувані результати. Скористаємося цим методом і в даному випадку.

Розглянемо невелике відхилення координати положення  $\Delta x$  відносно деякої координати  $x_0$ , яке виникає під дією малих змін витрати  $\Delta Q$  відносно значення

$Q_0$ , що відповідає координаті  $x_0$ . Підставивши в рівняння (2.49) значення  $x=x_0+\Delta x$  і  $Q=Q_0+\Delta Q$ , продиференціюємо його і виключимо складові малих відхилень і їх похідні по часу. Тоді замість рівняння (2.49), яке описує процес руху поплавка в ротаметрі, отримаємо рівняння його лінійної моделі

$$B_1 \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + B_2 \frac{d \Delta x}{dt} + B_3 \Delta x = C_1 \frac{d \Delta Q}{dt} + C_2 \Delta Q, \quad (2.51)$$

з постійними коефіцієнтами:  $B_1 = f_{k0}^2 l_n (\vartheta(\chi_p + 1) + \bar{f}_0)$ ;

$$B_2 = f_{k0} Q_0 (\bar{f}_0 (2 \bar{l}_n \bar{x}_0 k^2 + 1) + 1); B_3 = 4 f_n g f_{k0} \chi_p \vartheta k^2 \bar{x}_0 \bar{l}_n; C_1 = f_{k0} l_n; C_2 = Q_0.$$

Величини  $\bar{x}_0 = x_0/d_n$  і  $\bar{f}_0 = f_n/f_{k0}$  — це безрозмірна координата початкового (вихідного) положення поплавка і відповідна площа кільцевого перерізу між стінкою трубки і поплавком.

Динамічну характеристику поплавка описує перехідна функція. Як відомо з теорії автоматичного керування, перехідну функцію можна знайти, маючи передавальну функцію досліджуваної системи. Передавальна функція ротаметра, яка відповідає рівнянню (2.51), в операторній формі запису має вигляд:

$$W(p) = \frac{C_1 p + C_2}{B_1 p^2 + B_2 p + B_3}. \quad (2.52)$$

Для знаходження перехідної функції запишемо характеристичне рівняння:

$$B_1 p^2 + B_2 p + B_3 = 0.$$

Дане рівняння має два корені:

$$p_{1,2} = -\frac{B_2}{2B_1} \pm \sqrt{\frac{B_2^2 - 4B_1 B_3}{4B_1^2}}.$$

Вигляд перехідної функції визначається за коренями характеристичного рівняння. Якщо параметри ротаметра такі, що  $B_2^2 > 4B_1 B_3$ , то корені будуть дійсними і перехідний процес буде аперіодичним. В цьому випадку перехідна функція має вигляд:  $h(t) = K_1 e^{p_1 t} + K_2 e^{p_2 t} + C_2/B_3$ .

Якщо  $B_2^2 < 4B_1 B_3$ , то корені характеристичного рівняння є комплексними, а

перехідний процес – коливальним. Перехідна функція може бути записана у вигляді:

$$h(t) = K_1 e^{-\frac{B_2}{2B_1}t} \sin\left(\sqrt{\frac{4B_1B_3 - B_2^2}{4B_1^2}}t + K_2\right) + \frac{C_2}{B_3}.$$

Сталі інтегрування  $K_1$  і  $K_2$  визначаються з таких умов:  $\Delta x=0$ ,  $d\Delta x/dt=0$ ,  $\Delta Q=1$  при  $t=0$ .

Після деяких математичних перетворень для аперіодичного перехідного процесу перехідна функція набуде вигляду:

$$h(t) = \frac{C_2}{B_3} \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2} e^{P_1 t} - \frac{P_1}{P_1 - P_2} e^{P_2 t} + 1 \right).$$

Для коливального перехідного процесу:

$$h(t) = \frac{C_2}{B_3} \left( (\alpha \cdot \sin t - \cos t) e^{\alpha t} + 1 \right), \text{ де } \alpha = -\frac{B_2}{2B_1}.$$

Коливний перехідний процес в проектуваному ротаметрі подано на рис. 2.5, відповідні вхідні дані та обчислення наведені в додатку А.

Важливим також є те, наскільки швидко поплавки ротаметра сприймає зміну витрати. Тривалість перехідного процесу тим більша, чим менші по абсолютній величині корені характеристичного рівняння (для коливного перехідного процесу – чим менше по абсолютній величині значення дійсної частини коренів). Тривалість перехідного процесу залежить від конструктивних особливостей ротаметра (коефіцієнт форми поплавка  $\nu$ , довжина поплавка  $l_n$ , конусність трубки ротаметра  $k$ ), густини матеріалу поплавка, а також середовища ( $\chi_p = \rho_n / \rho - 1$ ).

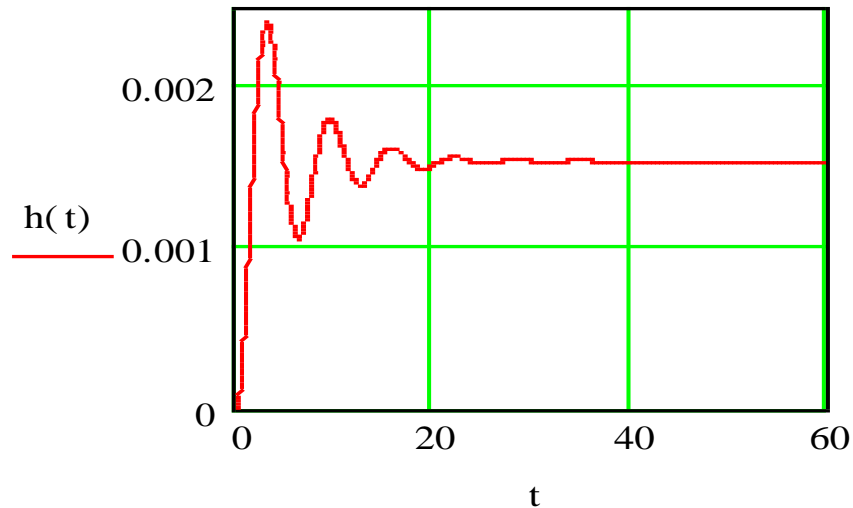


Рисунок 2.5 — Перехідний процес в ротаметрі

#### 2.3.4 Розробка електричної схеми витратоміра

Схема витратоміра складається з трьох електронних блоків: вимірювального, мікропроцесорного і блоку живлення.

До складу вимірювального блоку входять диференційний перетворювач 1DA1, типу AD698, який працює з трансформатором TV1. Мікросхема AD698 є лінійно змінним диференційним перетворювачем (ЛЗДП) підсистем формування сигналу. Вона використовується в поєднанні з диференційними перетворювачами механічного положення, однополярної або біполярної напруги постійного струму з високою ступінь точності і повторюваності. Всі автоматичні функції включений в мікросхемі. З додаванням кількох зовнішніх пасивних компонентів для встановлення частоти і підсилення, AD698 перетворює сигнал з диференціального тарнсформатора в масштабний сигнал постійного струму.

AD698 містить синусоїдальний генератор з низькими спотвореннями форми сигналу для живлення первинних кіл перетворювача. Два синхронні демодуляційні канали AD698 використовуються для детектування першої і другої напруг. В мікросхемі вихідний сигнал другого каналу ділиться на сигнал

першого і результат множиться на коефіцієнт масштабування. Це виключає похибки шкали за рахунок дрейфу в амплітуді первинного пристрою, і поліпшує температурну стабільність.

ЛЗДП є електромеханічним перетворювачем, на вході механічне зміщення стержня перетворюється у змінну напругу пропорційно зміщенню. AD698 збуджує котушки диференційного трансформатора, перетворює вихідні напруги і видає напругу постійного струму вихідний сигнал, якого пропорційно положенню сердечника. AD698 має генератор синусоїдальних коливань і потужний підсилювач для живлення давача. Два синхронні демодулятори використовуються для декодування першої і другої напруги. Декодер визначає відношення вихідних напруг до вхідної напруги давача. Фільтр і підсилювач використовуються для масштабування результуючої величини. Таким чином напруга на виводі 19 мікросхеми 1DA1 прямопропорційна переміщенню чутливого елемента ротаметра.

На мікросхемі 1DA2 типу K153УД1 виконаний тригер Шміта, який перетворює генерований давачем L1 сигнал гармонійної форми в прямокутний сигнал, тієї частоти амплітудою 5В.

В мікропроцесорному блоці використовують мікроконтролер 3DD1, типу PIC16F687, перетворювач рівнів 3DD2, типу MAX232, цифрове табло 3HG1, типу WH1601A-YYH-CTK. На вхід 2 мікросхеми 3DD1 з вимірювального блоку приходять аналоговий сигнал, який перетворюється вбудованим у мікроконтролер аналого-цифровим перетворювачем у відповідний цифровий код. На вхід 25 мікросхеми 3DD1 з вимірювального блоку приходять імпульси прямокутної форми, частота яких пропорційна швидкості двофазного потоку. В мікроконтролері при кожному зрізі імпульса генерується переривання, при цьому вміст накопичувального регістра лічильника записується в пам'ять мікроконтролера і в подальшому використовується для обчислення частоти імпульсів на вході 25. Далі в мікроконтролері здійснюється розрахунок витрати. Розраховане значення витрати відображається на табло 3HG1. Перетворювач

рівнів 3DD2 використовується для підключення мікроконтролера 3DD1 через послідовний інтерфейс RS232 з персональним комп'ютером для задавання параметрів потоку.

Блок живлення виробляє напруги +5В, +15В і -15В, які призначені для живлення електричних елементів витратоміра.

## 3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ І МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ДВОФАЗОВИХ ПОТОКІВ

Важливим аспектом в проектуванні нового пристрою є його точність. Похибка вимірювання є безпосередньою характеристикою точності вимірювання. Значення похибки вимірювання залежить від досконалості технічних засобів, які використовуються для проведення вимірювань, від методики і умов проведення експерименту і від методу обробки отриманих результатів спостережень вимірювальної величини. В даному розділі наведено результат одноразового опосередкованого вимірювання із заданою точністю і ймовірністю, здійснено аналіз похибок пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків.

### 3.1 Метрологічний аналіз пристрою

#### 3.1.1 Класифікація похибок вимірювання

Якість засобів і результатів вимірювань прийнято характеризувати їх похибками. Похибка вимірювання – це відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Оскільки характер проявлення і причини виникнення похибок як засобів, так і результатів вимірювань досить різноманітній, то на практиці встановлений поділ похибок на різновидності, за кожною із яких є визначена певна назва. Нижче наведено основні види похибок, зокрема: інструментальні, методичні, основну і додаткову, статичну і динамічну, систематичні, випадкові, абсолютну, відносну, приведену.

Інструментальними похибками засобів вимірювань називаються такі, які

належать конкретному засобу вимірювань, можуть бути визначеними при його випробуваннях і бути занесеними в паспорт на цей засіб вимірювань.

Крім інструментальних похибок при вимірюваннях ще є і такі похибки, які не можуть бути віднесеними до інструментальних даного засобу вимірювань, а є пов'язані з методикою проведення вимірювань. Такі похибки називаються методичними. Дуже часто причиною виникнення методичної похибки є те, що, організовуючи вимірювання, часто вимірюють або вимушені вимірювати не ту величину, яка в принципі повинна бути виміряна, а деяку іншу, близьку, але не рівну першій величині. Така заміна того, що дійсно підлягає вимірюванню, тим, що дещо відрізняється від необхідного, але простіше реалізується, дуже широко використовується і при розробці засобів, і в практиці організації вимірювань. Це дозволяє створити найбільш прості, надійні і універсальні прилади і методи вимірювання. Але коли вже цей метод реалізований в приладі, то похибки такого приладу повинні бути визначеними і занесеними в паспорт на цей прилад. З цього моменту незалежно від причин виникнення похибки для користувача такого засобу вимірювань всі ці похибки є інструментальними.

Відмінною особливістю методичних похибок є те, що вони можуть бути визначеними лише шляхом створення математичної моделі або імітаційним моделюванням досліджуваного об'єкта і не можуть бути знайденими навіть найбільш глибокими дослідженнями лише самого засобу вимірювань.

Основною похибкою називається похибка засобів вимірювання в умовах, які встановлено нормативно-технічними документами як нормальні для даних засобів вимірювання. Ця похибка обумовлена головним чином факторами інструментальних похибок, що є наслідком недосконалості конструкції або принципу дії засобу вимірювання.

Похибки, які виникають у засобі вимірювань в результаті зміни його показників внаслідок відхилення умов експлуатації від нормальних умов, називаються додатковими похибками. Так, додаткова похибка може бути обумовлена такими похибками:

- встановлення - тобто відхилення положення стрілочного приладу від передбаченого горизонтального або відхилення величин, які впливають, (температури, вологості тощо) від їхніх нормальних значень;

- методу, що є наслідком недосконалості теорії методу вимірювань, використання наближених формул тощо;

- особистими, обумовленими психофізіологічними особливостями експериментатора (втома, недостатня гострота зору, схильність до завищення або заниження відліку тощо).

Похибка засобу вимірювання в реальних умовах його експлуатації називається експлуатаційною і складається із його основної похибки і всіх додаткових похибок і може бути значно більшою від його основної похибки.

Статичні і динамічні похибки, які властиві як засобам вимірювань, так і результатам вимірювань, розрізняють по їх залежності від швидкості зміни вимірюваної величини в часі. Похибки, які не залежать від вказаної швидкості називаються статичними. Похибки, які є відсутніми, коли вказана швидкість практично дорівнює нулю, і збільшуються при збільшенні швидкості зміни вимірюваної величини, називаються динамічними похибками.

Систематичними називаються похибки, які змінюються з часом і є певними функціями визначених параметрів. Основна відмінна ознака систематичних похибок полягає в тому, що вони можуть бути передбаченими і завдяки цьому майже повністю виключеними шляхом введенням відповідних поправок. Значна небезпека постійних систематичних похибок полягає в тому, що їх наявність досить важко виявити.

Випадковими називають похибки, які не є передбаченими ні по знаку, ні по розміру. Випадкові похибки легко виявляються при повторних вимірюваннях у вигляді деякого розкиду отриманих результатів, їх опис може бути здійснений тільки на основі теорії ймовірностей і математичної статистики.

Абсолютна похибка  $\Delta x$  — це різниця між вимірюваною величиною  $x_{ном}$  (показником приладу  $x_n$ ) і дійсним значенням  $x$  вимірюваної величини, тобто для

вимірювання  $\Delta x = x_{ном} - x$ , а для приладу  $\Delta x = x_n - x$ .

Різниця між реальною і номінальною характеристиками при заданому значенні  $x$ , тобто  $\Delta x = x_p - x_n$ , або при заданому значенні  $y$ , тобто  $\Delta y = y_p - y_n$  є абсолютними похибками, так як вони виражаються відповідно в одиницях величин  $x$  і  $y$ . Знак абсолютної похибки приймається додатнім, якщо реальна характеристика знаходиться вище номінальної.

Абсолютна похибка не може сама по собі бути показником точності вимірювань. Для характеристики точності результатів вимірювання ввели поняття відносної похибки  $\gamma = \Delta x / x \approx \Delta y / y$ , яка виражається у відносних одиницях або у відсотках ( $x$  і  $y$  текучі значення вхідної і вихідної величини засобу вимірювань).

Однак вказана відносна похибка не завжди підходить для нормування похибки засобу вимірювань, для нормування похибки використовують приведену похибку  $\gamma_{np}$ , яка визначається як відношення абсолютної похибки, вираженої в одиницях вхідної  $\Delta x$  чи вихідної  $\Delta y$  величин, до діапазону зміни відповідної вхідної  $x_k$  чи вихідної  $y_k$  величин засобу вимірювань і виражається у відносних одиницях або у відсотках, тобто  $\gamma = \Delta x / x_k \approx \Delta y / y_k$ . Приведена похибка зручна тим, що для багато діапазонних засобів вимірювань вона має одне і те ж значення як для всіх точок кожного піддіапазону, так і для всіх його піддіапазонів, тобто є досить зручною для нормування засобів вимірювань.

Поняття абсолютної, відносної, приведені похибок існуючими стандартами встановлені тільки для засобів вимірювань, але їх зручно використовувати і для характеристики результатів вимірювань.

### 3.1.2 Методика оцінки сумарної похибки

При вимірюванні витрати двофазових потоків методом постійного перепаду тиску основними похибками є методична та інструментальна. Для визначення

числових значень кожної складової похибок треба їх проаналізувати, встановити причини їх виникнення, доцільність введення поправок внаслідок впливу систематичних похибок.

Оцінку методичної похибки будемо проводити диференційним методом за результатами одноразового опосередкованого вимірювання. До одноразових опосередкованих вимірювань відносяться такі, які базуються на прямих вимірюваннях з однократними спостереженнями. Величини, які при цьому вимірюються, називаються вимірюваними аргументами. Передбачається, що залежність опосередковано вимірюваної величини  $y$  від аргументів  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$  є відомою:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m), \quad (3.1)$$

де  $m$  — кількість аргументів від яких залежить  $y$ .

Результати вимірювання аргументів повинні бути взаємо узгодженими, тобто відповідати одному і тому ж значенню вимірюваної величини  $y$ .

Обробка даних вказаної категорії вимірювань обумовлена формою представлення результатів вимірювань аргументів та видом залежної від них вимірюваної величини  $y$ . Результат опосередкованого вимірювання – це оцінка величини  $\bar{y}$ , що знаходиться шляхом підстановки у залежність (3.1) оцінок аргументів:

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_m). \quad (3.2)$$

Для оцінки похибки результату опосередкованого вимірювання з однократними спостереженнями суттєвим є вид залежності (3.1), яка може бути як лінійною, так і нелінійною. В даному випадку залежність (3.1) є нелінійною.

Результат вимірювання будемо знаходити у вигляді:

$$y = \bar{y} \pm \Delta y, \quad (3.3)$$

при заданій ймовірності  $P=P_{зад}$ .

Після лінеаризації виразу (3.1) обробка даних проводиться по лінійній залежності вигляду:

$$y = \sum_{j=1}^m b_j x_j, \quad (3.4)$$

де  $b_1, b_2, \dots, b_m$  — часткові похідні  $\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m}$ .

При більшій кількості аргументів ( $m > 5$ ) довірча границя  $\Delta y$  похибки результату опосередкованого вимірювання буде визначатись по формулі:

$$\Delta y = k_p \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m b_j^2 \cdot \Delta x_j^2}, \quad (3.5)$$

де  $k_p$  — залежить від довірчої ймовірності  $\bar{P}$ , із таблиці [14]  $k_p = 1,1$  при  $\bar{P} = 0,95$

В даному випадку залежність опосередковано вимірної величини  $Q$  є відомою:

$$Q = \beta \cdot f_k \sqrt{2 \frac{P}{\rho}}, \quad (3.6)$$

де коефіцієнт витрати  $\beta = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 (m^2 - \xi_2)}}$ , приймає значення в межах  $0 \leq \beta \leq 1$ .

В даній формулі під густиною потоку  $\rho$  слід розуміти густину суміші двох фаз.

Густина суміші розраховується за формулою:

$$\rho = \alpha \cdot \rho_2 + (1 - \alpha) \cdot \rho_p, \quad (3.7)$$

$\alpha = A_2/A$ , де  $A$  — загальний поперечний переріз — це сума площ перерізів, зайнятих газом ( $A_2$ ) і рідиною ( $A_p$ ), тобто  $A = A_2 + A_p$ .

Всі розрахунки похибки результату вимірювання проведені в середовищі програми Mathcad і подані в додатку Б.

Похибка коефіцієнта витрати визначається за формулою:

$$\Delta \beta = k_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \mu}\right)^2 \cdot \Delta \mu^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial m}\right)^2 \cdot \Delta m^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \xi}\right)^2 \cdot \Delta \xi^2} = 0,000967, \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial \mu} &= \frac{\mu' \cdot (\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}) - \mu \cdot (\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)})'}{(\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)})^2} = \\ &= \frac{\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)} - \mu \cdot \frac{1 \cdot (-2m^2\mu + 2\mu\xi)}{2 \cdot \sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}}}{1 - \mu^2(m^2 - \xi)} = 0,667 \\ \frac{\partial \beta}{\partial m} &= -\frac{\mu}{1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}} \cdot 2\mu^2 m = \\ &= -\frac{\mu^3 m}{(1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi) \cdot \sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}} = -0,467. \\ \frac{\partial \beta}{\partial \xi} &= -\frac{\mu}{1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}} \cdot \mu^2 = -0,333. \end{aligned}$$

Значення похибки коефіцієнта звуження потоку  $\Delta\mu$  приймаємо рівним 0,1%, похибка відносної площі кільцевого перерізу потоку  $\Delta m$  становить 0,1% і похибка коефіцієнта втрат по тиску  $\Delta\xi$  рівна 0,1%.

Похибка густини двофазового потоку визначається за допомогою виразу:

$$\Delta\rho = k_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial\rho_z}\right)^2 \cdot \Delta\rho_z^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\rho_p}\right)^2 \cdot \Delta\rho_p^2} = 2,75, \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial\rho_z} = \alpha = 0,75, \quad \frac{\partial\rho}{\partial\rho_p} = (1 - \alpha) = 0,25, \quad \alpha = \frac{A_z}{A} = \frac{3}{4}, \quad \Delta\rho_z = 0,01 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \Delta\rho_p = 10 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Похибку результату вимірювання визначаємо за формулою:

$$\Delta Q = k_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \beta}\right)^2 \cdot \Delta\beta^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial f_k}\right)^2 \cdot \Delta f_k^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)^2 \cdot \Delta p^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \Delta\rho^2} = 0,26, \quad (3.10)$$

Визначаємо часткові похідні:

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta} = f_k \sqrt{2 \frac{p}{\rho}} = 36,473, \quad \frac{\partial Q}{\partial f_k} = \beta \sqrt{2 \frac{p}{\rho}} = 1,062,$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p} = \beta \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \frac{1}{2} \cdot p^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot p}} = 0,086,$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho} = \beta \cdot f_k \cdot \sqrt{2p} \cdot \left(\left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}\right)' = -\frac{1}{2} \beta \cdot f_k \cdot \sqrt{2p} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho^3}} = -\frac{1}{2} \beta \cdot f_k \cdot \frac{\sqrt{2p}}{\rho\sqrt{\rho}} = -0,064,$$

$$p = 185,15 \text{ Па}, \Delta p = 1,8 \text{ Па}, f_k = 0,000690 \text{ м}^2 \quad \Delta f_k = 0,000001 \text{ м}^2.$$

Розраховану методичну похибку за формулою (3.10) приведемо до діапазону вимірювання:

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{60 - 10}. \quad (3.11)$$

$$\delta_Q = \frac{0,26}{50} = 0,005204 = 0,5204\%.$$

До складу інструментальної похибки входять такі складові: похибка, пов'язана з формою поплавка; похибка, викликана шорсткістю поверхні поплавка і ротаметричної трубки; похибка диференціально - трансформаторної системи; похибка блоку живлення; похибка мікропроцесорного блоку; похибка турбінного вимірювача швидкості потоку; похибка перетворювача кількості обертів в електричний сигнал.

Складність форми поплавка передбачає необхідність при його виготовленні дотримання точних розмірів. Циліндричність форми основного тіла поплавка визначає, що похибка недотримання геометричних розмірів визначається пресформою для виливання. Сучасний рівень верстатобудування дає можливість забезпечити похибку не вищу 0,01% від розміру поплавка. Недотримання конусності кінцевої частини поплавка може бути в межах 0,015% [9].

Шорсткість поверхні поплавка і ротаметричної трубки впливає на форму потоку газу, а також на не ідентичність площини проходу газу між поплавком і трубкою. Для зменшення цього впливу необхідно забезпечити чистоту обробки поверхні поплавка не нижче 6,3 класу шорсткості. Оскільки ротаметрична трубка виготовлена зі скла, то шорсткість її поверхні є низькою, тому впливом даного фактору можна знехтувати. Приведена похибка складає 0,01%.

Похибка диференціально-трансформаторної системи передачі визначається гістерезисом в котушках. Для пристроїв, які серійно випускаються складає 0,5%.

Мікропроцесорний блок, виготовлений на базі мікросхеми AD698, забезпечує стабільність характеристик, похибка складає 0,05%.

Похибка високостабілізованого блоку живлення, який виготовлений на новій елементній базі є низькою і складає 0,05%. Похибка турбінного вимірювача швидкості потоку складає 0,01%, похибка перетворювача кількості обертів в електричний сигнал рівна 0,05%.

Визначаємо значення інструментальної похибки:

$$\delta_I = K \cdot \sqrt{0,01^2 + 0,015^2 + 0,01^2 + 0,5^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,01^2 + 0,05^2} = 0,559.$$

Тоді сумарна похибка пристрою для вимірювання витрати буде становити:

$$\delta = \delta_Q + \delta_I = 0,5204 + 0,559 = 1,076.$$

Приймаємо сумарну похибку пристрою рівною 1% при довірчій ймовірності  $\bar{P} = 0,95$ .

### 3.2 Метрологічне забезпечення пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків

Для встановлення відповідності ротаметрів їх технічним вимогам і придатність до застосування проводять їх повірку.

При повірці застосовують такі засоби:

- повірочні витратомірні установки, атестовані органами державної метрологічної служби, які забезпечують знаходження дійсного значення витрати з похибкою не більше однієї третьої похибки повірювального ротаметра для заданого діапазону вимірювання;

- прилади для контролю температури і тиску навколишнього середовища;

- прилади для контролю і регулювання параметрів джерела живлення (манометри для контролю тиску повітря, вольтметри для вимірювання напруги).

В якості стандартного повірювального середовища використовують водопровідну воду для ротаметрів, призначених для вимірювання витрати газів. Можна проводити повірку і на робочих середовищах, що відповідають умовам

експлуатації, але це не завжди можливо. Тому в загальному випадку рекомендується мати дві градувальні характеристики для стандартного середовища і для робочого, що відповідає умовам експлуатації.

Перед проведенням повірки потрібно виконати такі підготовчі роботи:

- ротаметр витримують в неробочому стані при температурі  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$  не менше 3 годин;
- перевіряють відсутність заклинення ходу поплавка;
- ротаметр з електричним вихідним сигналом витримують не менше 2 годин в комплекті з вторинним приладом, включеним в мережу;
- ротаметр встановлюють в лінію повірю вальної установки в робочому положенні.

Дійсне значення витрати визначають за допомогою повірювальних витратомірних установок двічі: при прямому і зворотньому ході поплавка.

Підключати ротаметр в лінію повірювальної установки в промислових умовах слід паралельно трубопроводу. Після зовнішнього огляду ротаметр випробовують на його придатність до роботи. Для цього через ротаметр пропускають потік води (газу) при витраті, що відповідає 90-100 % шкали, після чого потік зупиняють. Операцію повторюють 3 рази. При зміні витрати поплавки повинен переміщуватись вільно без перешкод. Необхідно переконатись в герметичності з'єднань, для цього потрібно перевірити відсутність видимого витікання води і за допомогою мильного розчину витікання повітря.

При повірці ротаметрів, призначених для вимірювання витрати газу, значення витрати повітря, виміряне на повірочні установці приводять до умов градуйовки за формулою:

$$Q_{np} = Q_{д} \sqrt{\frac{(B_2 - \rho_2)T_1}{(B_1 - \rho_1)T_2}}, \quad (3.12)$$

де  $Q_{д}$  — дійсне значення витрати, що відповідає повірювальні відмітці шкали;  $B_1$  — атмосферний тиск при градуйовці, Па;  $B_2$  — атмосферний тиск при повірці, Па;  $\rho_1$  — надлишковий тиск в установці при градуйовці, Па;  $\rho_2$  — надлишковий

тиск в установці при повірці, Па;  $T_1$  — температура повітря в установці при градуїовці, К;  $T_2$  — температура повітря в установці при повірці, К.

Основну похибку ротаметра, призначеного для вимірювання витрати рідини, визначають за формулою:

$$\delta = \frac{Q_G - Q_D}{Q_B} 100\%, \quad (3.13)$$

де  $Q_B$  — значення витрати, що відповідає верхній межі вимірювання;  $Q_G$  — значення витрати, що відповідає повірювальні відмітці шкали згідно градуїувальної характеристики.

Основну похибку ротаметра, призначеного для вимірювання витрати газу визначають за формулою:

$$\delta = \frac{Q_G - Q_{np}}{Q_B} 100\%. \quad (3.14)$$

Значення основної допустимої похибки ротаметра повинно відповідати стандарту на технічні вимоги ротаметрів. Варіація показів повинна визначатися згідно технічних вимог і не повинна перевищувати встановлене значення.

Після закінчення повірки здійснюють оформлення результатів. За результатами повірки складають протокол повірки. В паспорті ротаметра записують результати повірки і завіряють із нанесенням відбитку повірювального клейма. При негативних результатах повірки ротаметр не випускається з виробництва, а ті, що знаходяться в експлуатації — до застосування. В паспорті роблять запис про непридатність ротаметра.

В даний час існує доволі велика кількість витратомірних установок різної конструкції. При проектуванні повірочних витратомірних установок повинні бути виконані такі основні вимоги:

- при спрацюванні пристрою формування інтервалу усереднення витрати в лінії випробовувальної ділянки не повинні виникати гідравлічні удари і стрибки тиску;

- регулюючий пристрій повинен встановлюватись на випробовувальній

ділянці після ротаметра за напрямом руху потоку;

- довжини прямих ділянок до і після ротаметра повинні бути не менші встановлених технічними вимогами при експлуатації ротаметра;

- температура робочого середовища в випробувальній ділянці повинна вимірюватись перед ротаметром і після нього;

- надлишковий тиск в повірочній установці повинен визначатись перед ротаметром в безпосередній близькості від нього.

Однією з перспективних установок для повірки ротаметрів є газомірна установка вантажокільцевого типу. Принцип дії такої установки базується на витісненні об'єму газу рідинним поршнем із каліброваної частини обертаючого кільцевого мірника.

Основним елементом установки є кільцевий мірник 1, виготовлений у вигляді пустотілої спіралі і розділений перегородкою 5. Мірник може бути одногвинтовим або багатогвинтовим. Мірник встановлений на підшипники і приводиться в рух вантажем 2, підвішеним на гнучкій нитці через блок 3. Внутрішня область мірника 1 калібрована і розділяється на дві області I і II за допомогою гідрозатвора 4 (рідини). Области I і II з'єднані між собою газопроводом 6 через випробувальну ділянку, в котрій вмонтований ротаметр 7 і регулятор 8 витрати. Ущільнення 9 призначене для з'єднання рухомої частини газопроводу 6 з нерухомою.

При закритому регуляторі 8 перепад тиску між областями I і II зрівноважується гідростатично. При відкритому регуляторі 8 газ із одної області через випробувальну ділянку перетікає в другу область; рівновага порушується і мірник 1 під дією вантажа 2 починає обертатись. Регулятор 8 встановлює швидкість обертання мірника, яка і визначає потрібну витрату газу.

Для повірки ротаметрів застосовують і інші типи повірочних установок, але із узгодженням з органами метрологічної служби.

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу існуючих методів вимірювання витрати двофазових потоків та здійсненні порівняльної оцінки пристроїв для їх реалізації було встановлено, що метод постійного перепаду тиску є придатний для розробки на його основі пристрою для вимірювання витрати двофазового потоку з заданою точністю і в заданому діапазоні вимірювання.

Для цього проведено теоретичне обґрунтування можливості вимірювання витрати двофазових потоків за методом постійного перепаду тиску, розроблено математичну модель процесу руху поплавка під дією потоку, пов'язано параметри руху поплавка із витратами потоків рідини і газу. Проаналізовано різні можливі схеми пристрою та обґрунтовано доцільність вибору схеми для дистанційної передачі результатів вимірювання з достатньою точністю.

В даному роботі розроблено структурну схему пристрою в цілому та розраховано конструктивні параметри поплавка з метою досягнення заданих параметрів перехідного процесу.

Проведено метрологічний аналіз розробленого пристрою з метою визначення сумарної похибки вимірювання, обґрунтована методика оцінки сумарної похибки та проведено розрахунок її складових.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ротаметры /А.А. Балдин, Л.Л. Бошняк, В.М. Соловский.-Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1983.-200с.
2. Кремлевский П.П. Росходомеры и счетчики количества: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1989.-701с.
3. Райтер П.М., Середюк О.Є. Контроль складу і витрати газорідних потоків: Конспект лекцій. – Івано-Франківськ: Факел, 2004.-124с.
4. Каратаев Р.Н. Вопросы повышения общепромышленных расходомеров. -М.: Машиностроение, 1988.-40 с.
5. Каратаев Р.Н., Копырин М.А. Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры). – М.: Машиностроение, 1980.-96 с.
6. Кісіль І.С., Середюк О.Є., Витвицька Л.А. Основи вимірювальної техніки. – Івано-Франківськ: Факел, 2001.-с150.
7. Ехнохович А.С. Справочник по физике.-М.: Просвещение,1990.-384с.
8. Общетехнический справочник/ Е.А. Скороходов, В.П. Законников, А.Б. Пакнис и др.; Под общ. ред. Е.А. Скороходова. – 4-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1990.-496с.
9. Кісіль І.С. Конструювання вимірювальних приладів. – Івано-Франківськ: Факел, 2004.-327с.
10. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектрических средств.:уч.пос.для радиотехн.спец.вузов.-М.: Высшая школа. 1990.-482с.
11. Атлас конструкцій елементів приборних пристроїв/А.А. Бурцев, А.И. Еремеев, Ю.И. Кокорев и др.: Под ред. О.Ф. Тищенко.-М.: Машиностроение, 1982.-208с.
12. Справочная книга радиолюбителя-конструктора/А.А. Бокуняев, Н.М. Борисов, Р.Г. Варламов и др. Под ред. Н.И. Чистякова.-М.: Радио и связь, 1990.-624с.

13. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання: Навчальний посібник для студентів ВУЗів. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.

14. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / за ред. проф. Є.С. Поліщука.– Л.: Бескид Біт, 2003.– 544с.

## ДОДАТОК А

### Дослідження динамічних режимів в ротаметрі

$$f_k := 690 \quad l_p := 28 \quad f_p := 113 \quad V_p := 0.00019$$

$$\theta := \frac{V_p}{f_p \cdot l_p} \quad \theta = 6.005 \times 10^{-8} \quad \rho_p := 1000 \quad \rho := 0.7$$

$$f_0 := \frac{f_p}{f_k}$$

$$f_0 = 0.164 \quad k := \frac{0.032 - 0.020}{0.12} \quad \chi := \frac{\rho_p}{\rho}$$

$$x_0 := \frac{1}{k} \quad x_0 = 10 \quad k = 0.1 \quad \chi = 1.429 \times 10^3$$

$$Q := 60$$

$$B1 := f_k^2 \cdot l_p \cdot [\theta \cdot (\chi + 1) + f_0]$$

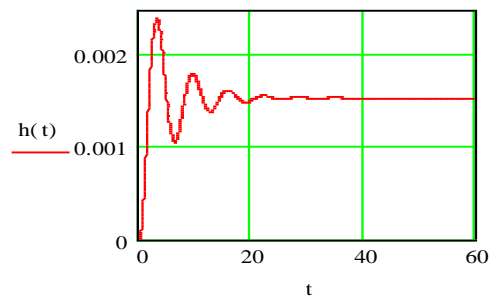
$$B2 := f_k \cdot Q \cdot [f_0 \cdot (2l_p \cdot x_0 \cdot k^2 + 1) + 1]$$

$$B3 := 4 \cdot f_p \cdot 9.8 \cdot f_k \cdot \chi \cdot \theta \cdot k^2 \cdot x_0 \cdot l_p$$

$$C1 := f_k \cdot l_p \quad C2 := Q$$

$$\alpha := \frac{-B2}{2 \cdot B1}$$

$$h(t) := \frac{C2 \cdot \left[ \left( \frac{\alpha \cdot \sin(t) - \cos(t)}{1} \right) \cdot e^{\alpha \cdot t} + 1 \right]}{B3}$$



## ДОДАТОК Б

### Розрахунок сумарної похибки витратоміра

$$\rho_h := 0.7 \quad \rho_r := 1000$$

$$\alpha := \frac{3}{4}$$

$$\rho := \alpha \cdot \rho_h + (1 - \alpha)\rho_r$$

$$\rho = 250.525$$

$$\mu := 1 \quad \xi := 0.8 \quad m := 0.7$$

$$\beta := \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 \cdot (m^2 - \xi)}}$$

$$\beta = 0.874$$

$$f := 30$$

$$p := 185.15$$

$$Q := \beta \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p}{\rho}}$$

$$Q = 31.867$$

$$K := 1.1 \quad \Delta m := 0.001 \quad \Delta \xi := 0.001 \quad \Delta \mu := 0.001$$

$$d\mu := \frac{\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)} - \mu \cdot \frac{(-2m^2 \cdot \mu + 2\mu \cdot \xi)}{2 \cdot \sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}}}{1 - \mu^2 \cdot (m^2 - \xi)}$$

$$d\mu = 0.667$$

$$dm := \frac{-\mu^3 m}{(1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi) \cdot \sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}}$$

$$dm = -0.467$$

$$d\xi := \frac{(-\mu)^3}{(1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi) \cdot 2 \cdot \sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi}}$$

$$d\xi = -0.333$$

$$\Delta \beta := K \cdot \sqrt{(d\mu)^2 \cdot \Delta \mu^2 + (dm)^2 \cdot \Delta m^2 + (d\xi)^2 \cdot \Delta \xi^2}$$

$$\Delta \beta = 9.677 \times 10^{-4}$$

$$\Delta \rho h := 0.01 \quad \Delta \rho r := 10 \quad \alpha := \frac{3}{4}$$

$$d\rho h := \alpha$$

$$d\rho h = 0.75$$

$$d\rho r := (1 - \alpha)$$

$$d\rho r = 0.25$$

$$\Delta \rho := K \cdot \sqrt{d\rho h^2 \cdot \Delta \rho h^2 + d\rho r^2 \cdot \Delta \rho r^2}$$

$$\Delta \rho = 2.75$$

$$p := 185.15 \quad \Delta p := 1.8$$

$$f := 30 \quad \Delta f := 0.01$$

$$d\beta := f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}}$$

$$d\beta = 36.473$$

$$df := \beta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}}$$

$$df = 1.062$$

$$dp := \frac{\beta \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot p}}}{2}$$

$$dp = 0.086$$

$$d\rho := \frac{-\beta \cdot f \cdot \frac{\sqrt{2p}}{\rho \cdot \sqrt{\rho}}}{2}$$

$$d\rho = -0.064$$

$$\Delta Q := K \cdot \sqrt{d\beta^2 \cdot \Delta \beta^2 + df^2 \cdot \Delta f^2 + dp^2 \cdot \Delta p^2 + d\rho^2 \cdot \Delta \rho^2}$$

$$\Delta Q = 0.26$$

$$\Delta \Delta Q := \frac{\Delta Q}{50}$$

$$\Delta \Delta Q = 5.204 \times 10^{-3}$$

$$\delta Q := \Delta \Delta Q \cdot 100$$

$$\Delta I := K \cdot \sqrt{0.01^2 + 0.015^2 + 0.01^2 + 0.5^2 + 0.05^2 + 0.05^2 + 0.01^2 + 0.05^2}$$

$$\Delta I = 0.559$$

$$\delta := \delta Q + \Delta I$$

$$\delta = 1.079$$