

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій  
Інформаційно-вимірювальних технологій

Буланцов Ілля Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.511.42

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Метрологічне дослідження вимірювання витрати газу на базі вихорового  
виратоміра  
(назва роботи)

Метрологія і вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152-Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Буланцов Ілля Віталійович

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Піндус Н.М., к.т.н., доцент

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

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

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

Рецензент

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

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ

2024

# ЗМІСТ

Стор.

Вступ .....	
1 Аналіз методів та засобів для технологічного вимірювання витрат та кількості рідин і газів .....	
1.1 Метод змінного перепаду тиску. ....	
1.2 Акустичний метод вимірювання витрати. ....	
1.3 Швидкісний метод вимірювання витрати. ....	
1.4 Вихоровий метод вимірювання витрати. ....	
1.5 Постановка задачі. ....	
2 Аналітичне дослідження характеристик вихорового витратоміра...	
2.1 Поняття про фізичну структуру газу. ....	
2.2 Стисливість газів. Швидкість розповсюдження звуку в газі. ....	
2.3 Розробка математичної моделі процесу утворення завихорень потоку при обтіканні ним тіла. ....	
2.3.1 Вихоровий потік рідини. Основні положення. ....	
2.3.2 Теоретичні основи обертово-поступального руху потоку. ....	
2.3.3 Процесу утворення завихорень потоку при обтіканні ним тіла..	
2.4 Аналіз існуючих форм тіл обтікання та видів детекторів вихорових витратомірів. ....	
2.4.1. Аналіз існуючих форм тіл обтікання. ....	
2.4.2 Аналіз існуючих видів детекторів. ....	
3 Метрологічне дослідження характеристик вихорового витратоміра. ....	

3.1 Перетворювач витрати вихоровий ИРВИС-К-300. ....	
3.2 Визначення похибки вимірювання витрати і кількості газу перетворювачем витрати ИРВИС-К-300. ....	
3.3 Обробка експериментальних даних. ....	
3.3.1 Розрахунок витрати за експериментальними даними. ....	
3.3.2 Об'єднаний програмний продукт SolidWorks+FloWorks. Основні можливості і особливості програми. ....	
3.3.3 Розрахунок витрати при моделюванні потоку засобами SolidWorks+FloWorks. ....	
Висновки.....	
Перелік посилань на джерела.....	
Додатки	

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: «Метрологічне дослідження вимірювання витрати газу на базі вихорового витратоміра» Буланцов І. В., ІФНТУНГ, 2024 , 80 с., 1 рис., 6 табл., 9 додатків, 8 джерел.

Об'єкт дослідження – потік газу при обтіканні нерухомого тіла.

Мета роботи – метрологічне дослідження вимірювання витрати на базі вихорового витратоміра засобами програмного забезпечення для CFD.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів, які мають місце при вимірюванні витрати вихоровим методом. Програмна обробка результатів вимірювання.

При обтіканні рідиною тіла, що знаходиться всередині потоку, утворюються вихори, частота яких пропорційна швидкості потоку. У даному дипломному проекті встановлені залежності для розрахунку витрати газу за частотою вихорів. Розглянуті питання вибору чутливого елемента для перетворення частоти пульсації вихорів в електричний сигнал та форми тіла обтікання.

На основі експериментальних досліджень розглянуто можливість застосування програмного забезпечення для моделюванні потоку газу, при обтіканні ним нерухомого тіла.

**ВИТРАТА, ВИТРАТОМІР, ПЕРВИННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ  
ВИТРАТИ, ВИХОР, ДОРІЖКА КАРМАНА, ТІЛО ОБТІКАННЯ.**

## ABSTRACT

Master's thesis: " Metrological study of gas flow measurement based on a vortex flow meter. " Bulantsov I. V., IFNTUNG, 2024, 80 p., 1 figure, 6 tables, 8 sources.

A research object is the gas flows around the buff-body.

Research aim - metrological studies of flow measuring by vortex flowmeter and CFD software.

A research method is a mathematical modelling of physical processes which take place at measuring of gas flow by vortex method and software processing of measurement results.

The motion of the fluid swirling around of, generates vortexes frequency of which is proportional to speed of stream appear. In this master's degree work dependences for calculation of fluid flow by vortex frequency are set. Methods for sensors and vortex generator selection are considered.

Based on experimental studies the possibility of application software for CFD in modeling the gas flow around the buff body were considered.

FLOW, FLOW measure, FLOW SENSOR, VORTEX, FLOW TRAJECTORY, BUFF BODY.

## ВСТУП

Тема магістерської роботи: «Розроблення та метрологічний аналіз способу генерування електроенергії методом перекачування газу в газопроводі».

Предмет досліджень – виробництво електроенергії шляхом перетворення енергії газу на електричну енергію.

Об'єкт дослідження – потік газу при обтіканні нерухомого тіла.

Мета роботи – метрологічне дослідження вимірювання витрати на базі вихорового витратоміра засобами програмного забезпечення для CFD.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів, які мають місце при вимірюванні витрати вихоровим методом. Програмна обробка результатів вимірювання.

Практична цінність – удосконалено та розвинуто наукові основи визначення витрати на базі вихорового методу.

Практична цінність – розроблено теоретичні засади для створення віртуального еталону вихрової витратометрії. Отримані експериментальні та аналітичні результати можуть бути використані для створення програмного забезпечення для реалізації віртуального еталону вихрової витратометрії.

Важко переоцінити значення витратомірів в народному господарстві України.

Витратоміри сприяють підвищенню якості виготовляючої продукції, усуненню браку, економії вихідних матеріалів. Зниження похибки вимірювань хоч би на 1% може забезпечити багатомільйонний економічний ефект. Роль і значення витратомірів ще більше зростає у зв'язку з необхідністю максимальної економії енергетичних і водних ресурсів України.

В даний час до витратомірів представлено багато вимог, які діляться на дві групи. До першої групи відносяться індивідуальні вимоги: висока точність,

незалежність результатів вимірювань від зміни густини речовини, швидкодія і значний діапазон вимірювання. До другої групи відносяться вимоги, які характеризують всю групу витратомірів: необхідність вимірювання витрати різноманітною номенклатури речовин, які відрізняються своїми властивостями, різних значень витрати від дуже малих до надзвичайно великих і при різних тисках і температур.

Подальший розвиток вихорової витратометрії полягає в удосконаленні метрологічних і експлуатаційних характеристик приладів, а також введення додаткового корегування стосовно зміни в'язкості і температури вимірюваного середовища з використанням мікропроцесорної техніки, а також введення інформації від додаткових датчиків температури, в'язкості, і властивостей доріжки Кармана.

З запровадженням в промисловість енергозберігаючих технологій істотно зростають вимоги, що пред'являються до засобів вимірювання витрати[3].

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ РІДИН І ГАЗІВ

Класифікаційні групи витратомірів подано в додатку 1.

Загалом варто зауважити, що є наступні види витрат[1]:

–об’ємні витрати:

$$Q_v = \frac{V}{t}, \quad (1.1)$$

де  $V$  – об’єм,  $t$  – час.

– масові витрати:

$$Q_m = \frac{M}{t}, \quad (1.2)$$

де  $M$  – маса речовини.

Зв’язок між масовою та об’ємною витратою наступна:

$$Q_m = \rho Q_v, \quad (1.3)$$

де  $\rho$  – густина речовини. Одиницями об’ємних витрат можуть бути м<sup>3</sup>/с, м<sup>3</sup>/год, л/с, а масовими – кг/с, кг/год тощо.

Прилад, що застосовується для вимірювання кількості речовини, яка протікає, отримав назву витратоміра. Пристрій, що безпосередньо реєструє витрату, вимірює її та трансформує в іншу величину для зручності вимірювання, отримав назву перетворювача витрати.

## 1.1 Метод змінного перепаду тиску

Витратоміри, що використовують змінний перепад тиску, базуються на залежності витрати від створеного пристроєм перепаду тиску, який розміщений у трубопроводі або є його складовою частиною. Структура витратоміра включає наступне: перетворювач витрати, що ініціює перепад тиску; диференціальний манометр, який вимірює цей перепад; та з’єднуючі трубки між перетворювачем і диференціальним манометром. У випадку необхідності

передачі вимірів витратоміра на велику відстань, до зазначених трьох елементів може бути доданий вторинний перетворювач. Він перетворює переміщення рухомого елемента диференціального манометра в електричний або пневматичний сигнал і передає його до вторинного вимірювального пристрою по лінії зв'язку (через дроти або трубки). У випадку, якщо первинний диференціальний манометр (або вторинний вимірювальний пристрій) обладнаний інтегратором, такий прилад вимірює не лише витрату, але і кількість пройденної речовини.

Є багато різновидів звужуючих пристроїв (додаток А). Так, на рис. А.1, *a* і *б* показані стандартні діафрагми, на рис. А.1, *в* — стандартне сопло, на рис. А.1, *г*, *д*, *е* — діафрагми для вимірювання забруднених речовин — сегментна, ексцентрична і кільцева. На наступних семи позиціях рисунку А.1 показані звужуючі пристрої, які використовуються при малих числах Рейнольдса (для речовин з великою в'язкістю); так, на рис. А.1, *ж*, *з*, *і* зображені діафрагми — подвійна, з вхідним конусом, з подвійним конусом, а на рис. А.1. *к*, *л*, *м*, *н* —сопла — півкола, четверть кола, комбіноване і циліндричне. На рис. А.1, *о* зображена діафрагма із змінною площею отвору, автоматично компенсуюча вплив зміни тиску і температури речовини. На рис. А.1, *п*, *р*, *з*, *т* приведені витратомірні труби — труба Вентурі, сопло Вентурі, труба Далла і сопло Вентурі з подвійним звуженням. Для них характерна дуже мала втрата тиску.

2. Витратоміри з гідравлічним опором засновані на залежності від витрати перепаду тиску, створюваного гідравлічним опором. Режим потоку в такому опорі прагнуть створити ламінарним, з тим щоб перепад тиску був би пропорційний витраті (рис. А.1, *у, ф*).

3. Центробіжні витратоміри створені на основі залежності від витрати перепаду тиску, що утворюється в заокругленні трубопроводу в результаті дії відцентрової сили в потоці (рис. А.1, *х, ц*). Частіше за все вони служать для вимірювання витрати води і рідше — газу.

4. Витратоміри з напірним пристроєм, в якому створюється перепад тиску залежно від витрати в результаті місцевого переходу кінетичної енергії

струменя в потенційну (рис. А.1, ч, ш, щ, є, ю).

5. Витратоміри з напірним підсилювачем мають перетворювач витрати, в якому поєднуються напірний і звужуючий пристрої. Перепад тиску в них створюється як в результаті місцевого переходу кінетичної енергії струменя в потенційний, так і часткового переходу потенційної енергії в кінетичну (рис. А.1, я, α, β).

6. Витратоміри ударно – струменеві засновані на залежності від витрати перепаду тиску, що виникає при ударі струменя.

Для визначення залежності між витратами та перепаду тиску використовують закон Бернуллі, згідно з яким в стаціонарних, вільних від тертя потоках сума кінетичне і потенціальної енергії буде величиною сталою, а

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{v_b^2}{2} \quad (1.4)$$

де  $P_a$  та  $P_b$  — тиск у перерізах, відповідно,  $A$  і  $B$  трубопроводу,  $\rho_a$  і  $\rho_b$  - густини досліджуваної речовини в перерізах  $A$  та  $B$ ;  $v_a$ ,  $v_b$  - швидкості в цих же перерізах.

Перепад тиску  $\Delta P = P_a - P_b$  з врахуванням неперерваності струменя, коли  $v_a S_a = v_b S_b$  (тут  $S_a$  та  $S_b$  - площі струменя в перерізах  $A$  і  $B$ ) і нестискуваності рідини (для цього випадку  $S_a = S_b = \rho$ ), на підставі закону Бернуллі визначиться як



$$v_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_b}{S_a}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.5)$$

Отже, швидкість потоку в перерізі  $B$  дорівнюватиме

$$v_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_b}{S_a}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.6)$$

об'ємні витрати



$$Q = v_b S_b = \frac{S_b}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_b}{S_a}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.7)$$

а масові витрати

$$Q = A S_0 \sqrt{2gH} \quad (1.8)$$

де  $S_0$  - площа звуженого отвору,  $A$  – так званий коефіцієнт витрат, який характеризує співвідношення між перерізами  $S_0$ ,  $S_a$  та  $S_b$  і визначається експериментально.

При виводі рівнянь (1.7) та (1.8) було зроблено допущення, що густина середовища при протіканні через звужуючий пристрій не змінюється. Це допущення справедливе для нестискуваних середовищ. Для газів таке допущення може привести до значної невизначеності результатів вимірювань. Тому в (1.7) та (1.8), для врахування цього, вводять поправочний множник на розширення газу  $\varepsilon$ .

Крім того, в умовах експлуатації витратовимірювальних дільниць значення параметрів, які визначають характеристику потоку, непостійні, їх невизначеність впливає на точність вимірювання. Тому у середньому теоретично гранична приведена похибка оцінюється -  $\square(1-3)$  %, а ДСТУ 3383-96 визначає її як 4%.

## 1.2 Акустичний метод вимірювання витрати

Акустичні витратоміри - це пристрої, які використовуються для вимірювання ефекту, залежного від витрати, і виникають при проходженні акустичних коливань через потік рідини або газу. Більшість практично використовуваних акустичних витратомірів працюють у високочастотному діапазоні ультразвука, тому їх часто називають ультразвуковими.

Ці витратоміри поділяються на дві основні групи: перша ґрунтується на переміщенні акустичних коливань рухливим середовищем, а друга - на ефекті Доплера, який виник пізніше. Найбільше розповсюдження отримали пристрої, які вимірюють різницю часу проходження акустичних коливань вздовж та проти напрямку потоку. Менш звичайно зустрічаються витратоміри, в яких акустичні коливання направлені перпендикулярно потоку, і вимірюється ступінь відхилення цих коливань від початкового напрямку.

Паралельно із трема видами ультразвукових витратомірів, які були описані раніше, існують також акустичні витратоміри, відомі як

довгохвильові. Вони функціонують у звуковому діапазоні частот акустичних коливань, але наразі не має достатнього досвіду з їхнім використанням.

Зазвичай ультразвукові витратоміри використовуються для вимірювання об'ємного потоку, оскільки ефекти, що виникають при проходженні акустичних коливань через потік рідини або газу, пов'язані зі швидкістю потоку. Однак додавання акустичного перетворювача, який реагує на густину вимірюваної речовини, може дозволити також вимірювати масовий потік.

Для введення акустичних коливань в потік та їхнього отримання на виході необхідні випромінювачі та приймачі коливань — це ключові компоненти первинних перетворювачів ультразвукових витратомірів. Випромінювачі використовують зворотний п'єзо ефект для перетворення змінної електричної напруги в акустичні (механічні) коливання тієї ж частоти. Приймачі працюють за прямим п'єзо ефектом, перетворюючи акустичні коливання в змінні електричні напруження.

Для отримання інтенсивних акустичних коливань треба працювати на резонансній частоті  $f_p$  п'єзоелементу:

$$f_p = \frac{c_{II}}{2\sigma} \quad (1.9)$$

де  $\sigma$  — товщина п'єзоелементу;  $c_{II} = (E_{ю} / \rho)^{0.5}$  — швидкість ультразвуку в п'єзоелементі.

У більшості випадків площини випромінюючих і приймальних п'єзоелементів розташовані під деяким кутом  $\theta$  до осі труби. Тоді акустичні коливання під кутом  $\alpha = 90^\circ - \theta$  до осі труби проходять у вимірюваній речовині шлях довжиною  $L$ . Позначимо через  $v_L$  швидкість потоку, усереднену по довжині  $L$ . Її проекція на напрям  $L$  буде  $v_L \cos \alpha$ . Звуковий промінь в бік руху потоку,  $L$  визначиться з рівняння:

$$\tau = L(c + v_L \cos \alpha) \quad (1.10)$$

де  $c$  — швидкість розповсюдження акустичних коливань в нерухомій вимірюваній речовині. При зворотному напрямі звукового променя час  $\tau_2$  проходження ним тієї ж відстані  $L$  буде більшим, як це витікає з рівняння:

$$\tau_2 = L(c - v_L \cos \alpha) \quad (1.11)$$

Надавши цим рівнянням вигляд:

$$f = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (v_c \cos \alpha), \quad (1.12)$$

$$g = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (v_c \cos \alpha), \quad (1.13)$$

і віднімаючи одне від одного, одержимо:

$$\Delta \tau = \frac{2L \cos \alpha}{v_c^2} \frac{dv_c}{dt} \quad (1.14)$$

Враховуючи, що  $v_c \cos \alpha < c$ , знайдемо:

$$\Delta \tau = 2L \cos^2 \alpha / c^2. \quad (1.15)$$

Якщо акустичні коливання направлені уздовж осі труби, то  $\cos \alpha = 1$  і  $\Delta \tau = 2L / c^2$ , де  $v_c$  — осева швидкість потоку.

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

Існують кілька методів вимірювання дуже малих значень витрат, зокрема: фазовий, який визначає різницю фазових зсувів акустичних коливань, спрямованих по потоку і проти нього (фазові витратоміри); часоімпульсний метод.

За кількістю акустичних каналів ультразвукові витратоміри поділяються на однопроменеві або одноканальні, двопроменеві або двоканальні, і багатопроменеві або багатоканальні. Перші використовують лише два п'єзоелементи, кожен із яких виконує функції випромінювання і приймання по черзі. Їхня значуща перевага полягає в відсутності просторової асиметрії акустичних каналів, залежних від різниці їх геометричних розмірів, температур і концентрацій потоку. Другі мають два випромінювачі і два приймачі, створюючи два незалежні акустичні канали, які розташовані паралельно або перехрещуються. Багатоканальні використовуються для вимірювання витрати деформованих потоків або для досягнення підвищеної точності, зокрема, при використанні ультразвукового витратоміра як еталону.

Для переважної більшості ультразвукових витратомірів, в яких акустичні коливання прямують в діаметральній площині, об'ємна витрата  $Q_0$  визначається за рівнянням:

$$Q = Dk\sqrt{4}, \quad (1.16)$$

де  $k = v_c / v_D$  — відношення середньої швидкості по перетину  $v_c$  до середньої швидкості по діаметру  $v_D$ . Підставляючи сюди значення  $v_D$  з раніше одержаних рівнянь і вважаючи  $L = D \sin \alpha$  (перетворювачі без кишень), знайдемо:

для фазових витратомірів:

$$Q = D k \omega \sqrt{4}, \quad (1.17)$$

де  $\Delta \varphi = 2\pi f t$  — фазовий зсув ультразвукових коливань,  $\omega = 2\pi f$  — кругова частота коливань,  $f$  — частота коливань;

для частотних витратомірів (з обліком лише часу проходження ультразвуку у вимірюваній речовині):

$$Q = D k \omega \sqrt{4}, \quad (1.18)$$

для часоімпульсних витратомірів:

$$Q = D k \omega \sqrt{4}. \quad (1.19)$$

Приведена похибка ультразвукових витратомірів лежить в широких межах від 0,1 до 2,5 %, але в середньому може бути оцінена цифрами 0,5 – 1 %. Значно частіше розглянуті витратоміри використовують для вимірювання витрати рідини, а не газу, внаслідок малого акустичного опору останнього і важкості отримання в ньому інтенсивних звукових коливань. Ультразвукові витратоміри придатні для труб любого діаметра, починаючи від 10 мм і більше.

### 1.3 Швидкісний метод вимірювання витрати

Тахометричні витратоміри та лічильники, які використовують рухомий елемент, зазвичай обертового типу, що рухається із швидкістю, пропорційною об'ємній витраті, класифікуються як турбінні, кульові, роторно-кульові і камерні.

Для вимірювання швидкості руху цього елемента отримуємо турбінний витратомір, а вимірюючи загальну кількість обертів чи ходів цього елемента,

отримуємо лічильник кількості (об'єму або маси) пройденої речовини. Для перетворення швидкості руху елемента в сигнал, що пропорційний витраті і зручний для вимірювань, потрібен двоступінчастий перетворювач витрати.

Перший ступінь - це турбіна, куля або інший елемент, швидкість руху якого пропорційна об'ємній витраті. Другий ступінь - це тахометричний перетворювач, що генерує вимірювальний сигнал, зазвичай частоту електричних імпульсів, яка пропорційна швидкості руху тіла.

Тахометричні витратоміри, які з'явилися пізніше, мають значні переваги, такі як швидкодія, висока точність і великий діапазон вимірювань. Помітна похибка турбінного витратоміра становить від 0,5% до 1,5%, залежно від точності використаного частотоміра.

Турбінні тахометричні витратоміри та лічильники кількості можуть бути виготовлені для труб діаметром від 4 до 750 мм, для тиску до 250 МПа і температур від -240 до +700 °С. Зазвичай вони використовуються для вимірювання витрати і кількості води, нафтопродуктів та інших рідин. Основний недолік турбінних витратомірів полягає в зношуванні опор, тому вони не підходять для речовин із механічними домішками та для дуже в'язких речовин.

Кулькові витратоміри виникли на ринку пізніше, порівняно з турбінними. Зазвичай вони використовуються для вимірювання витрати рідин, зокрема води, в трубах діаметром до 150-200 мм. Важливим плюсом цих витратомірів є їхня здатність працювати в умовах забрудненого середовища.

Роторно-кульові витратоміри, хоча з'явилися нещодавно, поки що не отримали широкого поширення.

Турбінні перетворювачі витрати можуть бути оснащені як аксіальною, так і тангенційною турбіною. У перших лопаті розташовані вздовж гвинтової лінії, а вісь співпадає з віссю потоку. У других вісь перпендикулярна напрямку потоку, а прямі лопасті розташовані радіально відносно осі. Аксіальні турбіни виявляються більш поширеними, ніж тангенціальні, які застосовуються лише при невеликих діаметрах труб,

зазвичай до 50 мм [1].

Діапазон вимірювання  $Q_{\max}/Q_{\min}$  з лінійним градуванням, яке не залежить від властивостей (в'язкості і густини) речовини, розширюється від 5—10 при невеликих діаметрах труб і низьких швидкостях до 15—20 при великих швидкостях і значних діаметрах. При зменшенні значення  $Re$  при переході від турбулентного до ламінарного руху починає виявлятися сильний вплив в'язкості, і відносна швидкість обертання турбіни падає, призводячи до нелінійного градування. Цьому сприяє і посилення впливу моменту опору. Часто в перехідній зоні від турбулентного до ламінарного руху спочатку може відбуватися навіть певне підвищення, і у відповідному місці утворюється максимум на відповідній кривій.

Порушення лінійності характеристики іноді спостерігається не лише в області малих значень числа Рейнольдса, але також в області великих значень  $Re$ .

Аксіальні турбінки вкрай чутливі до напрямку руху потоку, тому в більшості випадків їх конструкція передбачає наявність нерухомих лопаток на вході, а іноді й на виході, які направляють потік паралельно осі труби. Зміна кута нахилу хоча б однієї з цих лопаток може впливати на частоту обертання турбіни. Наявність місцевих опор призводить до необхідності уникання розміщення турбінних витратомірів поряд з ними. Пряма ділянка труби між місцевою опорою та турбінним перетворювачем, рівна  $\lambda$ , часто є достатньою для зменшення впливу місцевої опори. Застосування мілкозернистих сіток та інших турбулізаторів на вході перед турбінним перетворювачем виявляється ефективним засобом для усунення деформацій потоку, спричинених місцевими опорами.

Зміна просторової орієнтації (вертикальна або горизонтальна установка) може змінювати умови роботи підшипників і, отже, впливати на градувальну залежність, особливо при малих витратах.

Надійна робота опор має велике значення не лише для стабільності статичної характеристики турбінного перетворювача витрати, але й для забезпечення тривалого терміну його служби. Умови роботи опор важкі,

оскільки частота обертання турбінок може досягати декількох сотень обертів в секунду, і більшість випадків не передбачає подачу мастила до підшипників. Тому здатність вимірюваної речовини, яка мастила, є дуже бажаною. Проте вона повністю відсутня у сухих газах і кислотах. Зміна змазуючої здатності вимірюваної рідини може впливати на характеристику витратоміра. Важливо уникати механічних домішок, оскільки випробування показали, що при роботі на мазуті підшипники турбінних витратомірів РВН швидко виходили з ладу.

Зміна температури і тиску, супроводжуючись відповідною зміною густини і в'язкості вимірюваної речовини, впливатиме на градувальну характеристику, особливо в газах. Збільшення або зменшення густини призводить до зміни рушійного моменту турбінки, що проявляється у витратомірі, особливо при малих числах Рейнольдса. Зменшення густини призводить до зниження частоти обертання турбінки і збільшення порогу чутливості, що визначається, в основному, обернено пропорційно квадратному кореню відношення густин.

#### **1.4 Вихоровий метод вимірювання витрати**

Вихоровий метод вимірювання витрати використовує витратоміри, побудовані на основі залежності частоти коливань тиску від витрати, що виникають в потоці під час вихороутворення або коливань потоку. Ці витратоміри можна розділити на три групи, кожна з яких має свої відмінності.

Витратоміри, де первинний перетворювач має нерухоме тіло, обтікаючи яке, виникають чергування вихорів з обох його сторін, створюючи пульсації тиску.

Витратоміри, де потік в першому перетворювачі закручується і, потрапляючи потім в розширену частину труби, прецесіює, що породжує пульсації тиску.

Витратоміри, де потік в першому перетворювачі, витікаючи з

отвору, створює автоколивання та викликає пульсації тиску [7].

Перетворювачі витрати у цих витратомірах є багатоступінчатими. На першому етапі вихороутворення або осциляції струменя виникають пульсації тиску і швидкості, частота яких пропорційна об'ємній витраті. На другому етапі ці пульсації перетворюються у вихідний сигнал, зазвичай електричний. Для цього використовують перетворювачі тиску (п'єзоелементи), температури (термоанемометри), напруги (тензорезистори), ультразвукові перетворювачі швидкості і т.п.

Вихорові витратоміри мають численні переваги, такі як відсутність рухомих частин, простота і надійність перетворювача витрати, незалежність від тиску і температури, широкий діапазон вимірювання (до 15-20 у деяких випадках), лінійність шкали, висока точність (похибка  $\pm 0,5-1,5\%$ ), частотний вимірювальний сигнал, стабільність показів та проста вимірювальна схема. Важливою є можливість отримання універсального градуювання.

Однак існують певні недоліки вихорових витратомірів, такі як великі витрати тиску (30-50 кПа), обмеженість використання при малих швидкостях та обмеження щодо діаметрів труб (від 25 до 150-300 мм). Вони не підходять для вимірювань при малих швидкостях через складність вимірювання сигналу з малою частотою і виготовляються лише для певних розмірів труб. Також вони не застосовуються при низьких значеннях числа Рейнольдса ( $Re < 10^3 - 10^4$ ). Багато конструкцій вихорових витратомірів не підходять для вимірювання забруднених і агресивних речовин, які можуть вплинути на роботу перетворювачів сигналів.

Проте вплив забруднення, корозії тіла, обтікаючого або закручувального пристрою, на процес вихороутворення практично мінімальний (особливо у порівнянні, наприклад, із звужуючими пристроями). З цього випливає, що при виборі перетворювача вихідного сигналу, такого як ультразвуковий, вихорові витратоміри можуть ефективно використовуватися для вимірювання забруднених, агресивних або абразивних речовин.

Можливі перешкоди для роботи вихорових витратомірів включають акустичні та вібраційні впливи, які можуть бути створені різними джерелами, такими як насоси, компресори, місцеві опори, завихрителі та вібруючі труби. У випадку, коли частота шкідливих пульсацій відрізняється від частоти вимірювального сигналу, електричні фільтри можуть бути використані для їх ефективного усунення. Однак, якщо ці частоти співпадають, може бути складніше впоратися з цим. Іноді застосовують випрямляч струменя на вихідному патрубку перетворювача витрати. Щоб боротися з цими перешкодами, ефективно використовують два перетворювачі, такі як два п'єзоелементи, які знаходяться в протифазі в точках, де пульсації корисного сигналу, та пульсаційні перешкоди у фазі. Це дозволяє підвищити корисні сигнали та значущим чином зменшити вплив перешкод. Зазначено, що термоперетворювачі менш чутливі до перешкод, ніж перетворювачі тиску, і не піддаються впливу вібрацій на їхні показання. Принцип роботи вихорових витратомірів, які мають тіло обтікання, полягає в тому, що це тіло, будучи на шляху потоку, змінює напрямок оточуючих його струменів, що призводить до збільшення їх швидкості за рахунок зменшення тиску. По міделевому січенню тіла відбувається зворотний процес зі зменшення швидкості та збільшення тиску. На передній стороні тіла виникає підвищений тиск, а на задній - знижений. Поверхневий шар, що оточує тіло, утворює вихідний вихір, рухаючись вздовж тіла, і створює вихорову доріжку Кармана за тілом обтікання.

Частота зриву вихорів згідно критерію Струхаля:

$$f = vSh/d, \quad (1.21)$$

тобто пропорційна відношенню  $v/d$ , а відповідно, при постійному характерному розмірі  $d$  тіла пропорційна швидкості  $v$ , а значить, і об'ємній витраті  $Q_0$ . Залежність між  $Q_0$  і  $f$  задається рівнянням:

$$Q = (s d S) f, \quad (1.22)$$

де  $S$  — площа якнайменшого поперечного перетину потоку навкруги тіла обтікання.

Для забезпечення пропорційності між числом Струхаля ( $Sh$ ) та частотою ( $f$ ), важливо зберігати постійне значення  $Sh$  у значно більшому діапазоні значень числа Рейнольдса ( $Re$ ). Наприклад, для обтічного циліндра число  $Sh$  залишається незмінним в області  $103 \div 104 < Re < 2 \cdot 105$ . Таким чином, вихоровий витратомір з циліндричним тілом обтікання може мати широкий діапазон вимірювання  $Q_{max} / Q_{min} = 20$ . Зазначимо, що це можливо, лише якщо при  $Q_{min}$  швидкість потоку ( $v$ ) в трубі забезпечує стійке утворення вихорів. Вихорові витратоміри знаходять найбільше застосування для призматичних тіл, таких як прямокутні, трикутні, Т-подібні або трапецеїдальні (дельтоподібні) форми. Різноманітні способи перетворення вихорових коливань використовують періодичні коливання тиску чи швидкості струменів з обох боків тіла обтікання. Використання вихорових витратомірів з тілом обтікання для труб великого діаметру (понад 300-350) ускладнене через можливість співпадання частот вільних коливань тіла з частотою зриву вихорів, а також через обмежену ефективність процесу вихороутворення при малих та великих значеннях відносного діаметра тіла обтікання ( $d/D < 0,2-0,3$  та  $d/D > 0,3$ ). Довжина труби перед вихоровим витратоміром повинна бути прямою протягом  $l$ , залежно від швидкості потоку  $v$ , з мінімальними відношеннями, які залежать від конкретної швидкості. Витратоміри прецесією воронкоподібного вихора та осцилюючим струменем представляють собою інші типи, які детально розглядаються, і можуть використовуватися для вимірювання витрати газу, пари та рідини.

### **1.5 Постановка задачі на магістерську роботу**

Отже, аналізуючи різноманітні методи вимірювання витрати, реалізовані в різних конструкціях витратомірів, можна зробити висновок про великий потенціал використання вихорового методу. Основні переваги цього методу включають відсутність рухомих деталей усередині трубопроводу, достатню точність, лінійність шкали в значному діапазоні,

простоту та надійність перетворювача витрати, незалежність показів від тиску і температури, стабільність вимірювань, можливість створення простих імітаційних методів і засобів перевірки, низьку вартість, а також застосування їх у будь-яких галузях. Значущими перевагами цього методу порівняно з іншими є великий діапазон вимірюваних витрат (до 80000 м<sup>3</sup>/год при співвідношенні 1:50) та високі робочі тиски. При забезпеченні необхідних умов розташування витратоміра на трубопроводі похибка може бути менше 0,5 %.

Усі зазначені аспекти підтверджують ефективність використання вихорового методу для реалізації високоточних витратомірів і лічильників. Таким чином, основною метою цієї магістерської роботи є метрологічне дослідження вимірювання витрати на основі вихорового витратоміра з використанням програмного забезпечення.

Для досягнення поставлених завдань необхідно виконати наступні кроки:

1. Теоретично обґрунтувати фізичні процеси, що відбуваються під час обертково-поступального руху потоку.

2. Розробити математичну модель процесу утворення завихорень потоку при обтіканні тіла, виходячи з аналітичного дослідження фізичних явищ, що мають місце при цьому.

3. Математично обґрунтувати залежність витрати від частоти утворення завихорень, що виникають при обтіканні потоком нерухомого тіла.

4. Провести аналіз наявних типів детекторів та тіл обтікання вихорових витратомірів, щоб вибрати оптимальний тип витратоміра для подальших метрологічних досліджень.

5. Здійснити експериментальні дослідження на основі вихорового витратоміра з використанням програмного забезпечення для обчислювально-гідродинамічного моделювання (CFD).

6. Здійснити аналіз результатів експериментальних досліджень та зробити висновки про можливості використання програмного забезпечення

для CFD у дослідженні вихорових витратомірів.

7. Розробити заходи для забезпечення нормальних умов праці при експлуатації вихорового витратоміра.

8. Обґрунтувати вибір дослідження вихорового методу вимірювання витрати шляхом розрахунку економічного ефекту.

## 2 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХОРОВОГО ВИТРАТОМІРА

### 2.1 Поняття про фізичну структуру газу

Газ відрізняється тим, що між його молекулами існують значні міжмолекулярні відстані. Це можна пояснити тим, що, з одного боку, газ має тенденцію заповнювати будь-який закритий об'єм, де він перебуває, і, з іншого боку, його можна стиснути під високим тиском до дуже малого об'єму.

Навіть хоча газ досить стисливий порівняно з рідиною, при слабких перепадах тиску, невеликих швидкостях руху та відсутності значного нагріву, його можна розглядати як нестискуваний з достатньою точністю. Іншими словами, ступінь стисливості рідин і газів залежить від їхньої структури і динамічних та термодинамічних умов течії.

Властивості газу не завжди враховуються повністю; наприклад, іноді може бути проігнорована стисливість газу чи сили взаємодії між молекулами. Вибір конкретних допущень залежить від характеру вивченого процесу газу.

З точки зору молекулярної фізики, газ представляє собою сукупність хаотично рухомих найдрібніших частинок - молекул, відстані між якими значно перевищують їхні лінійні розміри.

Навіть при тому, що газове середовище є дискретним, при вивченні руху газу та його взаємодії з обтічними тілами зазвичай припускають, що газ можна розглядати як суцільне матеріальне середовище, в якому відсутні міжмолекулярні проміжки. Це припущення, відоме як гіпотеза безперервності або суцільності газового середовища, спростовується гіпотезою Ньютона, яка передбачала, що газ складається з окремих, рівних і невзаємодіючих частинок. Згідно гіпотези безперервності, навіть в малих об'ємах, порівняно з обтічними тілами, знаходиться значна кількість молекул, розміри і довжини вільних пробігів яких, у свою чергу, є дуже малими в порівнянні з вказаними об'ємами.

Використання гіпотези безперервності спрощує застосування математичного аналізу для вивчення кінематичних і динамічних характеристик рухомого газу, таких як швидкість та тиск. Важливо відзначити, що застосування теоретичних висновків, які ґрунтуються на гіпотезі безперервності газового середовища, обмежується розмірами частинок, порівнянними з молекулярними, та кількістю молекул у даному об'ємі. Таким чином, гіпотеза безперервності не є застосовною для сильно розріджених газів.

При теоретичному розв'язанні багатьох завдань гідро- і аеродинаміки часто вважають, що рідини і гази є безв'язковими. Такі рідини і гази отримали назву гідродинамічно ідеальними.

У ідеальних рідинах і газах відсутня не лише в'язкість, але і передача тепла і речовини. У відміну від ідеальних рідин, реальні рідини включають процеси теплопереносу і дифузії.

## **2.2 Стисливість газів. Швидкість розповсюдження звуку в газі**

Відмінною властивістю газів, як вже наголошувалося, є стисливість. Стисливістю називається здатність газу змінювати свій об'єм (а отже, і густину) під зовнішньою дією.

Характеристикою стисливості газового середовища може служити відношення приросту тиску  $\Delta p$  до приросту густини  $\Delta \rho$ , викликаного зміною тиску. Межа цього відношення при  $\Delta \rho \rightarrow 0$  рівна квадрату швидкості розповсюдження в середовищі малих збурень чи квадрату швидкості звуку:

$$a^2 = \lim_{\Delta \rho \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta p}{\Delta \rho} \right) = \frac{dp}{d\rho} \text{ або } a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}. \quad (2.1)$$

Отже, швидкість розповсюдження звуку в середовищі може служити мірою стисливості середовища під дією малого тиску.

У аеродинаміці часто швидкість звуку  $a$  використовується для отримання безрозмірної швидкості газу:

$$V/a = M \quad (2.2)$$

Це відношення носить назву числа Маєвського або числа Маха.

Для абсолютно нестискуваного середовища ( $a=\infty$ ) число  $M=0$ . Вплив стисливості на характеристики перебігу газу починає позначатися на швидкостях ( $M<1$ ) при  $M\approx 0,4-0,5$  і зростає із збільшенням числа  $M$ , викликаючи не тільки кількісні, але і якісні зміни характеристик течії при звукових ( $M=1$ ) і надзвукових ( $M>1$ ) швидкостях.

## **2.3 Розробка математичної моделі процесу утворення завихорень потоку при обтіканні ним тіла**

### 2.3.1 Вихоровий потік рідини. Основні положення

Теорії вихорових потоків рідини відіграють важливу роль в аеродинаміці загалом і в аналізі силової взаємодії між рідиною та твердим тілом зокрема.

Утворення вихорів навколо рухомого тіла та їх підтримка вимагають витрати певної енергії. Ця енергія походить від рухомого тіла, яке повинно подолати опір оточуючого газу (наприклад, повітря). Опір, зумовлений утворенням вихорів, називається вихоровим опором.

Згідно теореми Коши—Гельмгольца рух частинки рідини можна розкласти на три складові: поступальний рух, обертання та деформацію. Вектор миттєвої кутової швидкості визначає обертання частинки рідини навколо миттєвої осі обертання [8].

Якщо вся область рідини завихрена, можемо говорити про поле вихору, де в кожній точці простору є вектор, що представляє кутову швидкість обертання частинки рідини в даному моменті часу.

Часто течія виявляється вихоровою лише в окремих локалізованих областях потоку, в той час як в інших частинах потоку течія є потенціальною.

Так само, як лінії струму вказують на характеристики поля швидкостей, лінії вихору надають відомості про поле вихорів. Поняття вихорових ліній можна введені аналогічно до ліній струму. Однак відмінність полягає в тому,

що лінії струму будуються на основі векторів лінійної швидкості , тоді як вихорові лінії визначаються векторами кутової швидкості (або векторами вихору ).

Вихорова лінія - це така крива в потоці рідини, в якій вектор кутової швидкості  $\vec{\omega}$  (або вектор вихору швидкості  $\vec{\Omega}$ ) у кожній точці в даний момент співпадає з дотичною до лінії (рис. В.1). З течією часу вихорові лінії можуть змінювати свою форму і розташування в просторі. Вихорові лінії, в загальному випадку, не збігаються з лініями струму і можуть перетинатися з ними. Оскільки вектор кутової швидкості в кожній точці вказує на миттєву ось обертання частинки рідини, то вихорова лінія може бути розглядана як уявна криволінійна вісь обертання групи частинок, які обертаються навколо неї в даний момент часу. Таким чином, лінія струму служить огиноючою для векторів швидкості  $\vec{V}$ , тоді як вихорова лінія є огиноючою для векторів кутової швидкості  $\vec{\omega}$ . швидкість в даній точці потоку".

Згідно з теоремою Гельмгольца, основним параметром для будь-якої вихорової трубки є проекція , яка визначає інтенсивність вихору. Інтенсивність вихору тісно пов'язана із концепцією циркуляції швидкості навколо замкнутого контуру. Величина циркуляції визначає важливі характеристики потоку, який обтікає тіло.

Формальне визначення циркуляції швидкості може бути сформульоване наступним чином. Представимо собі нерухомий замкнутий контур всередині рухомої рідини. Узагальнено, цей контур може охоплювати тверде тіло, що знаходиться в потоці (див. рис. 2.2).

Циркуляція швидкості вздовж будь-якого замкнутого однозв'язного контуру дорівнює потоку вектора вихору через поверхню, яка обмежує цей контур та не виходить за межі рідини. Це також еквівалентно сумі напруг (інтенсивностей) вихорових ниток, які перетинають цю поверхню.

З теореми Стокса випливає: якщо на поверхні вихорової трубки взяти замкнутий контур, що охоплює вихорову трубку, то циркуляція швидкості навколо такого контуру дорівнює напрузі вихорової трубки; якщо взяти замкнутий контур  $L$  на поверхні вихорової трубки, який не охоплює трубку, то

циркуляція швидкості навколо цього контуру буде рівна нулю.

При русі реальних рідин і газів в потоці виникають напруги, які можна розкласти на нормальні і дотичні компоненти відносно площин, на яких вони діють. В такому потоці можна розглядати дві системи напруг:

нормальні напруги, які визначають тиск в будь-якій точці потоку;

додаткові напруги, складені з трьох нормальних і трьох дотичних компонент. Ця система напруг залежить від орієнтації площини, на якій виникають напруги в кожній точці потоку.

### 2.3.2 Теоретичні основи обертово-поступального руху потоку

Вихорові коливання виникають в потоках рідини або газу при обтіканні тіл, поміщених у вимірюване середовище, або при формуванні поступально-обертального струменя спеціальними вихоровими камерами.

Розглянемо характер розподілу швидкостей і тисків в циліндричній частині вихорової камери.

Властивості потоків, що обертаються, описуються рівнянням Нав'є - Стокса в формі Ламба - Громеки. Без врахування в'язкісних напружень рівняння у векторній формі можна записати [10]

$$-\text{grad}\left(U + \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2}\right) = 2(\bar{\omega} + \bar{v}) + \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \quad (2.41)$$

де  $U$  – прискорення руху речовини певної маси;  $p$  - тиск;  $\rho$  - густина;  $v$  - лінійна швидкість;  $\omega$  - кутова швидкість потоку.

В першій області справедливий закон:

$$v_{\tau} r = \text{const} \quad , \quad (2.42)$$

а в другій:

$$\frac{v_{\tau}}{r} = \text{const} \quad . \quad (2.43)$$

Ці залежності можна представити загальним степеневим законом:

$$v_{\tau} r^m = \text{const} \quad , \quad (2.44)$$

де  $+1 \geq m \geq -1$ .

Для кожного типу вихорової камери показник  $m$  величиною постійною.

Розподіл осьових швидкостей показаний на рис. Г.1 (Додаток Г).

Розподіл тиску в потоці, що обертається, в зовнішній і центральній областях визначається різними закономірностями.

В зовнішній області тиск безперервно зменшується при наближенні до осі потоку:

$$p - p_{\infty} = -\frac{\rho \Gamma^2}{8\pi^2 r^2}, \quad (2.45)$$

Для середовища, що стискається:

$$p - p_{\infty} = \frac{k-1}{k} \frac{\rho \Gamma^2}{8\pi^2 r^2}, \quad (2.46)$$

де  $p$  - поточне значення тиску;  $p_{\infty}$  - тиск на краю зовнішньої області потоку, що обертається;  $k$  - коефіцієнт стисливості;  $\rho$  - густина потоку;  $\Gamma$  - циркуляція.

Для розподілу тиску всередині ядра впливає співвідношення:

$$p - p_{\infty} = -\frac{\rho v_{\tau}^2}{2} (r - 2r_m^2), \quad (2.47)$$

де  $r_m$  радіус межі центральної області потоку, що обертається (ядро вихору).

Структура потоку може бути пояснена шляхом аналізу розподілу швидкостей та тисків у струмені, який обертається, а також конструктивними особливостями вихорової камери. Струми потоку, введені тангенціально в циліндр, формують струмінь, який обертається. Згідно зі співвідношенням (2.47), тиск у зовнішній області потоку зменшується пропорційно зменшенню радіусу. Однак це зменшення тиску відбувається до того моменту, поки не досягне тиску в області розширення циліндра, де обертання потоку штучно припиняється за допомогою прямолопастного струменевипрямляча.

Границя, обмежена радіусом, володіє рядом характеристик. За нею розпочинається центральна область (ядро вихору), яка відрізняється від зовнішньої області тим, що обертається згідно з законами твердого тіла. На межі спостерігається максимальне значення тангенціальної швидкості та мінімальне значення тиску. Деякі випадки можуть включати підсос середовища з області розширення циліндра через цю межу. Між зовнішньою та центральною областями потоку, що обертається, виникають максимальні

дотичні напруження, оскільки по цій поверхні відбувається взаємодія обертання центральної області.

Рівняння (2.41) і (2.47) розглядаються для ідеальних потоків, але можуть бути застосовані й до реальних в'язких потоків при великих числах Рейнольдса. Щоб пов'язати поступальну та тангенціальну складові швидкості у зовнішній частині обертового потоку, необхідно вирішити рівняння у формі Ламба-Громекі та рівняння Д'Аламбера для забезпечення стійкості обертового потоку. Результат виражений співвідношенням [11]

$$H = \frac{v_r^2}{2g} + \frac{v_z^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}, \quad (2.48)$$

де  $H$  - величина напору перед вихоровою камерою;  $v_r$  – тангенціальна складова швидкості в зовнішній частині потоку, що обертається;  $v_z$  – осьова складова швидкості в зовнішній частині потоку, що обертається;  $p_2$  – тиск за вихоровою камерою;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $\gamma$  – питома вага досліджуваного потоку.

Якщо уявити, що величина витрати  $Q_1$  у вихоровій камері, показаній на рис. 2.7, визначається перетином патрубку  $2S_0$ , то величина швидкості  $v_{z_1}$  в патрубку за відсутності закручування потоку визначається співвідношенням:

$$\frac{Q_1}{S_0} = v_{z_1}, \quad (2.49)$$

При обертанні потоку живий перетин патрубку зменшиться на величину коефіцієнта  $\varepsilon$ , і при незмінній величині напору встановиться нове значення осьової компоненти швидкості.

Середнє значення осьової компоненти швидкості  $v_{z_2}$  знаходимо з виразів для нерозривності потоку

на ділянці патрубку 2 вихорової камери :

$$Q = v_{z_2} \varepsilon \pi r_0^2, \quad (2.50)$$

і на вході в вихорову камеру:

$$Q = v_{ex} \pi r_{ex}^2. \quad (2.51)$$

З урахуванням виразу для збереження моменту кількості руху безперервного

струменя  $v_{\text{ex}} R_{\text{ex}} = v_{\tau} r$  одержимо:

$$v_{\tau} = v_{z_2} \varepsilon \left( \frac{R_{\text{ex}}}{r} \right) \left( \frac{r_0}{r_{\text{ex}}} \right)^2 ; \quad (2.52)$$

$$\frac{v_{\tau}}{v_{z_2}} = \varepsilon \left( \frac{R_{\text{ex}}}{r} \right) \left( \frac{r_0}{r_{\text{ex}}} \right)^2 = \text{tg} \varphi , \quad (2.53)$$

де  $\varphi$  - кут нахилу гвинтової лінії поступально-обертального потоку.

Величина швидкості в зовнішній області, де потік здійснює поступально-обертальний рух, визначається співвідношенням:

$$v_0 = \sqrt{v_{\tau}^2 + v_{z_2}^2} . \quad (2.54)$$

З іншого боку

$$v_0 = \varepsilon v_z ; \quad R_{\text{ex}} = R_k - r_{\text{ex}} , \quad (2.55)$$

де  $R_k$  - радіус вихорової камери.

Тангенціальна швидкість біля стінки вихорової камери  $r = r_0$

$$v_{\tau_0} = v_{z_2} \varepsilon \frac{(R_k - r_{\text{ex}}) r_0}{r_{\text{ex}}^2} . \quad (2.56)$$

Та ж швидкість на межі вихору, де немає надлишкового тиску і  $r = r_m$

$$v_{\tau_m} = v_{z_2} \varepsilon \frac{(R_k - r_{\text{ex}}) r_0^2}{r_{\text{ex}}^2 r_m} , \quad (2.57)$$

де  $r_m = r_0 \sqrt{\varepsilon - 1}$  - радіус ядра вихору.

Оптимальним слід рахувати такий режим течії у вихоровій камері, при якому для заданої витрати споживаний напір буде мінімальним.

Обертаний потік, виходячи з вихорової камери в область розширення 3 (рис. 2.7), втрачає стійкість, що проявляється у розпливчастих контурах газового шнура на зрізі виходу з вихорової камери. Якщо ядро вихору заповнене атмосферним повітрям або парами рідини, можна виявити гвинтовий рух ядра вихору, що розходитьсь по спіралі, зафіксований при миготливому світлі стробоскопа. Цей рух виявляється сателюїдним обертанням ядра вихору навколо осі вихорової камери, і кількість обертів ядра вихору пропорційна кутовій швидкості потоку. Схожі результати отримуються при імпульсному

підфарбовуванні ядра вихору.

Для пояснення цього явища розглянемо взаємодію обертового потоку в ядрі вихору з обертовим середовищем у частині вихорової камери, що розширюється. Зафіксовано, що центральна область потоку (ядра вихору), що обертається, має рух по законах твердого тіла. До цієї частини потоку, що виходить з патрубку в область вихорової камери, що розширюється, і є заповненою тим же середовищем, застосовуються закони динаміки руху сферичного твердого тіла, що має три ступені свободи [11].

Вісь потоку, що обертається, у циліндричній частині вихорової камери співпадає з віссю камери, але при виході з циліндра в область розширення відхиляється від осі. Порушення симетрії потоку в області розширення викликане ядром вихору, що веде до несиметричного розподілу тиску по контуру вихору. Швидкості в зовнішній частині контуру вихору відносно осі камери вищі, а внутрішні - нижчі. Це пояснюється додаванням швидкостей в зовнішній частині контуру вихору та супутнього потоку, а внутрішній - відніманням. Отже, тиск менший у зовнішній частині вихору, а внутрішній - вищий. Результируюча цих тисків  $P_n$  направлена від осі камери, спричиняючи гіроскопічний момент, перпендикулярний напрямку  $P_n$  і індукуючи

прецесійний рух ядра вихору з частотою.

$$\omega_1 = \frac{P_n l}{J_\varepsilon \omega}, \quad (2.58)$$

де  $J_\varepsilon = \frac{mr_m^2}{2}$  - момент інерції вихору;  $m$  - маса вихору;  $\omega$  - кутова швидкість вихору;  $l$  - відстань до точки вимірювання частоти прецесії ядра вихору.

Враховуючи, що  $P_n = \rho v \Gamma l$ , а  $v = \frac{v_m r_m}{r_{on}}$ ,  $r_{on}$  - радіус в точці знімання інформації;

$\Gamma = 2\pi r_m^2 \omega$ ;  $l = \frac{r_{on} - r_o}{\sin \Theta}$ ;  $\Theta$  - кут частини 3 вихорової камери, що розширюється;

$\frac{r_{on} - r_o}{r_{on} \sin \Theta} = k_p$  - коефіцієнт розширення, залежний від довжини області, що розширюється, по осі вихорової камери. Запишемо співвідношення, що визначає величину кутової частоти прецесії ядра вихору.

Підставляючи у формулу (2.58) приведені вирази, одержимо:

$$\omega_1 = \frac{4v_m}{r_m} k_p = 4\omega k_p \quad (2.59)$$

### 2.3.3 Процес утворення завихорень потоку при обтіканні ним тіла

Отже, як утворюються вихири після тіл обтікання [14]. В'язкість середовища, яке обтікає тіла, приводить до утворення вихорів в початково потенціальному потоці. Зміна швидкості відбувається в граничному шарі, в якому дія в'язких напружень порівняна із значенням ефекту, який викликається інерцією. Товщина граничного шару залежить від числа Рейнольдса і довжини шару  $l$

$$\delta = \frac{l}{\sqrt{Re}} \quad (2.60)$$

Під час течії, що відбувається за межами граничного шару, рідина на передній половині циліндра, між точками D і E, рухається прискорено, і тиск зменшується по мірі наближення до точки E. На задній половині циліндра, між точками E і F, спостерігається уповільнення руху, і тиск збільшується по мірі наближення до точки F.

Отже, для частинок рідини, які знаходяться у зовнішньому потоці, від D до E відбувається перетворення енергії тиску в кінетичну енергію, а від E до F - зворотне перетворення кінетичної енергії в енергію тиску. Частинки рідини всередині граничного шару, які рухаються близько до поверхні циліндра, ведуть себе інакше. Хоча поле тиску у цьому випадку таке ж, як і у зовнішньому потоці, сили тертя тут великі. Це призводить до втрати частиною кінетичної енергії частинки рідини від D до E. Залишена кінетична енергія виявляється недостатньою для подолання підвищення тиску від E до F. Таким чином, всередині граничного шару частинка рідини не може просунутися далеко в область зростаючого тиску між точками E і F, зупиняється та рухається назад під впливом розподілу тиску зовнішнього потоку.

Точка відриву граничного шару виникає, і вихор, що відривається, формує подвійний ланцюг вихорів за тілом, що поступово розсіюється. Цей ланцюг вихорів отримав назву доріжки Кармана. За тілом у сліді утворюється

хвилеподібний характер потоку, який виникає від періодичного утворення вихорів з протилежних сторін. Регулярні вихорові доріжки виникають в області чисел Рейнольдса від приблизно 60 до 50 000 для обтікання циліндра і для тіл з гострими гранями до 10 000. При числах Рейнольдса нижче 60 потік за тілом є ламінарним, а при числах вище 50000-100000 відбувається повне турбулентне перемішування [10].

Частоту утворення вихорів  $f$  можна визначити за допомогою методу розмірностей із характерних величин, що характеризують потік, навколо тіла: - швидкість потоку,  $d$  - характерний розмір тіла; - кінематична в'язкість.

$$f = Sh \frac{v}{d}, \quad (2.61)$$

де  $Sh$  - безрозмірний критерій, званий числом Струхалю.

Для кулі і циліндра під  $d$  розуміють їх діаметри. Для пластинки, що має ширину  $l$  і товщину  $b$  і стоїть під кутом атаки  $\alpha$  до потоку:

$$d = l \sin \alpha + b \cos \alpha. \quad (2.62)$$

Розташування вихорів в доріжці стійке для широкого класу збурень при умові:

$$\frac{h}{l} = 0,28, \quad (2.63)$$

де  $h$  - відстань між вихорами по ширині;  $l$  - відстань між вихорами по довжині. Величина лобового опору тіла обтікання з врахуванням процесів вихороутворення представлена виразом [10]

$$W_m = \rho l v^2 \left[ 0,7936 \frac{u}{v} - 0,3141 \left( \frac{u}{v} \right)^2 \right]. \quad (2.64)$$

Вводячи позначення

$$C_{W_m} = \frac{2l}{d} \left[ 0,7936 \frac{u}{v} - 0,3141 \left( \frac{u}{v} \right)^2 \right], \quad (2.65)$$

де  $u$  — швидкість руху вихорів в супутному потоці, одержимо:

$$W_m = \frac{\rho}{2} d v^2 C_w. \quad (2.66)$$

Використання залежності (2.61) для вимірювань стикається з рядом труднощів через його ймовірнісний характер. При обтіканні тіла обмеженої

довжини з урахуванням конфігурації обтікання в окремих точках порушується узгодженість частоти утворення вихорів на окремих ділянках тіла. Щоб покращити стабільність процесів утворення вихорів, зменшити фронтальний опір і розширити діапазон чисел Рейнольдса, при яких спостерігається регулярне утворення вихорів, в тілі обтікання використовують пристрої для відсмоктування пограничного шару. З цією метою в стінці тіла, паралельно до його осі, роблять вузьку щілину, через яку загальмована рідина, що рухається в пограничному шарі, відсмоктується всередину тіла. За достатньо сильного відсмоктування можна повністю запобігти відриву пограничного шару від стінки. Необхідну швидкість відсмоктування визначають за формулою [10]

$$v_0 = -2,18 \sqrt{-v \frac{dv}{d\delta}} . \quad (2.67)$$

Наприклад, для циліндра відсмоктування потрібно проводити з коефіцієнтом витрати рівним 3,08, при якому повністю попереджається відрив.

Проте без вихороутворення неможливо здійснювати процеси вимірювання. Дана суперечність знімається при детальному розгляді процесів. На рис. Д.1, а (Додаток Д) показаний циліндр, встановлений в трубопровід перпендикулярно осі потоку.

Експериментальні вивчення вказують на те, що при обтіканні циліндра супутнім потоком відбувається відрив пограничного шару в області кута (рис. Д.1, б). У межах вказаних кутових розмірів на поверхні циліндра роблять одне або кілька поперечних отворів. Осі цих отворів перпендикулярні напрямку потоку та осі циліндра. Допустимо, що відрив пограничного шару розпочинається з боку а та згортається в вихорову формацію. Швидкість з боку циліндра менше, ніж з боку b, тому тиск біля входу а в отвір більший, ніж біля виходу b.

Різниця тисків викликає перетікання рідини вздовж каналу в напрямку стрілок, і частина рідини всмоктується в отвір а і витікає з отвору b. Розглянемо обернену ситуацію. Утворення вихору відбувається з боку b. Тиск біля входу b більший, ніж біля виходу а. Напрямок перетікання в каналі змінюється.

Очевидно, що відсмоктування пограничного шару в точці  $b$  заважає відриву, тоді як струмінь рідини, що витікає з каналу в точці  $a$ , викликає відрив пограничного шару. Змінне перетікання рідини в каналі, викликане процесами утворення вихорів при обтіканні циліндра, створює поперемінне всмоктування і викид рідини на протилежних виходах  $a$  і  $b$ .

Узагальнено частоту перетікань рідини в каналі можна визначити за допомогою співвідношення (2.61).

Важливо відзначити, що величина коефіцієнта  $W_m$ , отримана при обтіканні циліндра без поперечних отворів, змінюється порівняно з циліндром, в якому є поперечні отвори. Ця залежність особливо помітна при обтіканні циліндра газом. Регулюючи переріз або кількість поперечних каналів, можна контролювати широкий діапазон значень коефіцієнта  $W_m$ .

Враховуючи процеси утворення вихорів при обтіканні тіл досліджуваним потоком, ми виходимо з припущення, що тіло має досить просту геометричну форму, яку можна достатньо повно охарактеризувати одним розміром. Наявність виступів, ям, різких кутів і т.д. може суттєво змінити спектр коливань. Особливо важливі є порожнини на тілі обтікання, які є резонаторами із власною частотою резонансу і коефіцієнтом загасання. Власні частоти такого резонатора визначаються його розмірами  $d$  та швидкістю пружних коливань у вимірюваному середовищі  $c$ :

$$v_s = \frac{c}{d} \psi_s \left( \frac{c}{d} h_s \right), \quad (2.68)$$

де  $\psi_s$  - коефіцієнт пропорційності .

Взаємодію вихорів з резонансною порожниною слід розглядати як нелінійну автоколивальну систему зі взаємною дією. Амплітуда коливань в точці резонансу визначається емпіричною залежністю [10]

$$p_s = \rho \frac{(v')^2}{2} \frac{v_s}{h_s} \psi_s \left( \frac{v' v_s}{d} \right), \quad (2.69)$$

де штрих біля швидкості  $v$  означає, що формула справедлива тільки для значень швидкості, при якій виникає резонанс.

## 2.4 Аналіз існуючих форм тіл обтікання та видів детекторів вихорових витратомірів

### 2.4.1 Аналіз існуючих форм тіл обтікання вихорових витратомірів

Тіло з вираженими основними розмірами, яке обтікається, стає джерелом вихорових коливань. Використовують різні конструкції, такі як пластини різної форми, циліндри, кулі і інші. Загальний аналіз найбільш поширених конструкцій тіл обтікання наведено в підрозділі 1.4. У підрозділі 2.5 даної магістерської роботи представлено аналіз циліндричних та трикутних тіл обтікання. Давайте розглянемо деякі інші конструкції тіл обтікання, які застосовуються на практиці.

В досліджуваній потік вставляють пластину, яка вбудована в трубопровід безпосередньо біля приймача-перетворювача та розташована під кутом до потоку. Така конструкція забезпечує мінімальні гідравлічні і аеродинамічні втрати. На рис. Д.2 показано вихоровий генератор з тілом обтікання. У корпусі 1 розташована пластинка 2. Вихорові коливання, що утворюються при обтіканні потоком рідини або газу, перетворюються приймачем 3 в електричні сигнали і реєструються частотоміром 4 та суматором 5.

Подальший розвиток генератора вихорових коливань з тілом обтікання у формі пластини передбачає використання тіл більш складної форми.

На рис. Д.3 представлено тіло обтікання трикутного перерізу, розташоване в трубопроводі діаметром  $d$  основою напроти потоку. Висота тіла  $h$ , осьова довжина  $l$ . Для досягнення стійкого процесу вихороутворення  $l/h$  повинно бути в межах від 1 до 2, а відношення  $h/d$  від 0,15 до 0,4. Передні кромки тіла гострі. Форма основи впливає на величину мінімальної швидкості вихороутворення. Якщо основа випукла, а відношення довжини  $t$  випуклої частини до висоти  $h$  не перевищує 0,3, то вихороутворення відбувається при мінімальних швидкостях. В іншому випадку, коли  $t$  перевищує  $0,3h$ , коливальний рух не виникає. Відношення для випуклих тіл повинно дорівнювати  $l \div 2$ , тоді отримується стійкий сигнал, значно перевищуючи шумовий фон. Для тіл з випуклою основою характерні малі втрати тиску. Тіла

обтікання у формі пластини Т-подібної або хрестоподібної форми також дають хороші результати.

Ще одне тіло обтікання представлено на рис. Д.4. Тіло 1а має трикутний переріз, до плоскої основи якого прикріплена пластина 3 за допомогою перемички 2. Тіло виконане з гострими кромками біля основи і повернене вістрям напроти потоку.

Окрім розглянутих тіл обтікання, запропоновано кілька конструктивних варіантів, таких як призма з передньою частиною у формі циліндра, паралелепіпед і затуплений трикутник. Пластина біля основи може мати направляючу, яка може виконуватися разом з пластиною у формі трикутної призми. Для вимірювань в трубопроводах великих діаметрів малорозмірне тіло обтікання встановлюють у патрубку меншого діаметру і кріплять його великому трубопроводі за допомогою розпірок.

З метою покращення точніших характеристик приладу, пропонується встановлювати тіло обтікання в патрубок, чий прохідний переріз менший, ніж переріз технологічного трубопроводу. Звуження перерізу патрубка сприяє удосконаленню форми епюри швидкостей в приладі. Оптимальне відношення діаметру патрубка ( $d$ ) до діаметру трубопроводу ( $D$ ) рекомендується обирати в межах 0,5 - 0,9. Патрубок може бути виготовлений з фланцями для монтажу в технологічний трубопровід або без них; в останньому випадку патрубок закріплюється між фланцями трубопроводу

Вихорові явища можуть виникати, якщо циліндр 1 розташований симетрично до трубопроводу (рис. Д.6). Основа циліндра вгору по потоці має обтічну форму, а вниз по потоці – плоску. Круглий диск прикріплений до центру плоскої основи за допомогою стрижня, розташованого паралельно. Відстань між диском і плоскою основою становить 0,28 - 0,6 діаметра диска.

Потік обтікає циліндр, і на плоскій основі відбувається зрив пограничного шару. Круглий диск, взаємодіючи з плоскою основою, стабілізує процес утворення вихорів і створює знакозмінне перетікання в щілині між основою і диском. Вихорові коливання перетворюються в електричний сигнал датчиком тиску або швидкості, розташованим у вихоровому сліді. Рекомендується

діаметр круглого диска робити меншим за діаметр циліндра, а його відношення до діаметра циліндра може становити 0,6. Можливе розташування циліндра, при якому його вісь не збігається з віссю трубопроводу, але залишається паралельною. Загострення передньої частини циліндра може підвищити частоту коливань, а наявність кільцевої западини або виступа біля обрізаного торця циліндра може збільшити стабільність коливань, що сприяє турбулізації потоку і лінеаризації характеристики. Направляюча може бути розміщена на диску для орієнтації коливань в потоці.

При обтіканні циліндра критична точка відокремлення вихорів може змінюватися в залежності від чисел Рейнольдса, що призводить до змін частоти вихороутворення. Для розширення діапазону вимірюваних витрат, при яких частота вихідного сигналу не залежить від числа Рейнольдса, в середній частині циліндра можна розташовувати дві паралельні площини 1, розташовані в області відокремлення пограничного шару (рис. Д.7). Гостре ребро 2 на цих площинах фіксує місце вихороутворення, незалежно від фізичних властивостей середовища. Ці площини можуть мати кут 3 між собою для регулювання чутливості приладу. Якщо потрібно збільшити гостроту ребер, площини можуть бути виконані у формі напівкілець 4. Вихідні отвори 5 розміщуються на цих площинах.

#### 2.4.2 Аналіз існуючих видів детекторів вихорових витратомірів

Чутливі елементи у вимірювальних приладах використовуються для сприйняття вимірюваної величини, перетворення її на іншу фізичну величину, а в деяких випадках — для підсилення отриманої фізичної величини.

В залежності від фізичних явищ, що виникають у чутливому елементі, виділяють такі типи чутливих елементів: механічні, пневматичні, гідравлічні, з електричним вихідним сигналом. У вихорових витратомірах, головним чином, використовуються чутливі елементи з електричним вихідним сигналом.

Вихороутворення в потоці характеризується низкою параметрів, що відрізняють їх від інших однорідних частин потоку.

На рисунку Е.1, б елемент термоанемометра розташований всередині наскрізного отвору в тілі, а на рисунку Е.1, в - в обводній трубці, розташованій ззовні трубопроводу. Кожен тиск пульсації з обох боків тіла призводить до руху через наскрізний отвір або обводну трубку, що призводить до зміни опору елементу термоанемометра. Якщо отвори з протилежних сторін тіла з'єднати перпендикулярним отвором, в якому розмістити феромагнітну кульку (рисунок Е.1, г) або мембрану, вони будуть коливатися з частотою тисків або частотою вихороутворення з обох боків тіла. Ці коливання, за допомогою індуктивного або ємнісного перетворювача, створюють вихідний сигнал.

На рисунку Е.1, д тіло обтікання трапецієподібної форми пов'язане тонкою перемичкою з диском, який сприяє посиленню і стабілізації вихороутворення. На перемичці розташовані тензорезистори, які сприймають напругу в ній, виниклу при поперечних коливаннях тіла під впливом вихороутворення, і перетворюють їх на вихідний сигнал. Замість тензорезисторів може використовуватися струнний перетворювач напруги в тілі обтікання, як це реалізовано в витратомірі фірми "Фішер і Портер".

Перетворювач вихорового витратоміра фірми "Кент" (Kent) має тіло обтікання прямокутної форми, бічні сторони якого частково по всій довжині виконані з пружних металевих мембран. Кожна з мембран разом з розташованим за нею шаром масла (діелектриком), плоским електродом і потім шаром ізоляції формує конденсатор. Коливання тиску з обох боків тіла призводять до пульсації мембран і зміни ємності конденсаторів за рахунок перетікання масла з одного шару в інший через сполучні канали. Останні, одночасно, фільтрують високочастотні коливання мембран, викликані різними перешкодами. Цей перетворювач іноді називають інтегруючим, оскільки він реагує на вихороутворення по всій довжині тіла, що сприяє підвищенню точності і неприязний до місцевих турбулентностей.

В іншому перетворювачі, що володіє інтегруючими властивостями, ззовні трубопроводу розташовані випромінювач і приймач ультразвукових коливань. Цей метод має свої переваги, але наявність твердих частинок у рідині або газових бульбашок може впливати на вихідний сигнал.

Найбільш поширеними перетворювачами вихорових коливань є перетворювачі тиску (п'єзоелементи), температури (термоанемометри), напруги (тензорезистори), ультразвукові перетворювачі швидкості і т.д.

Крім того, використовуються інші нові перетворювачі. З'явилася кількість перетворювачів витрати з оптичними датчиками для вимірювання частоти вихороутворення.

Нові електромагнітні датчики для вимірювання частотного сигналу використовують принцип вимірювання кількості частоти вихорових коливань, які виникають при обтіканні потоком нерухокої призми (турбулізатора), встановленої в діаметрі трубопроводу. Рухаючись в потоці, вихори відображають швидкість руху рідини і реєструються електродом, розташованим в полі постійного магніту. Сумарний об'єм рідини, що пройшов через трубопровід, пропорційний кількості періодів частоти, виміряної протягом контрольного часу. Частота отриманої електрорухливості, що пропорційна об'ємній витраті рідини, зафіксована електродом і перетворюється підсилювачем імпульсів в вихідний електричний сигнал.

Давайте детальніше розглянемо принцип роботи цих датчиків. У п'єзоелектричному перетворювачі використовується прямий п'єзо ефект, що базується на виникненні електричної напруги при механічній деформації кристалу. Деякі кристали, такі як кварц, титанат барію, цирконат-титанат свинцю, сульфат літію, мають цю властивість, визначаючи прямий п'єзоелектричний ефект. Основна ідея полягає в тому, що прикладена механічна сила вздовж електричної осі кристалу призводить до виникнення різноманітних зарядів на гранях, перпендикулярних до неї. Ці заряди не залежать від розмірів пластинки. Визначення величини цих зарядів здійснюється за відповідною формулою.

На практиці найчастіше використовується прямий п'єзо ефект через його незалежність від розмірів пластини. Узагальнено, працюючи відповідно до цього принципу, п'єзоелектричний перетворювач може бути використаний для вимірювання різних фізичних величин, таких як тиск, температура тощо.

$$Q_x = dF_x, \quad (2.70)$$

де  $d$  – п'єзомодуль або заряд на одиницю прикладеного тиску.

Зміна електричного опору  $R$ , який залежить від довжини  $l$ , площі поперечного січення  $S$  і питомого опору  $\rho$  провідника:

$$R = \frac{\rho l}{S} . \quad (2.71)$$

Первинним вимірювальним перетворювачем для резистивного датчика є резистор, виготовлений із провідного матеріалу, такого як метал або металевий сплав. Зміна вимірюваної фізичної величини, яка впливає на резистор, призводить до зміни його опору. Приріст опору може служити інформативним параметром для електричного ланцюга, який залежить від дії.

До резистивних перетворювачів відносяться також дротяні тензорезистори і терморезистори. Їх виготовляють у широкому асортименті, і вони часто застосовуються у вимірювальних системах. Для їхнього виготовлення використовують металеві провідникові матеріали, такі як провід, фольга, металеві плівки, що застосовують метод напилення тощо.

Тензорезистори працюють на основі тензоефекту, який полягає в зміні опору резистора (дроту) під дією зовнішньої деформаційної сили. Деформація об'єкта, на якому закріплений тензорезистор, призводить до деформації дроту тензорезистора, що змінює його довжину та поперечний перетин. Це призводить до зміни електричного опору дроту тензорезистора.

Відносна зміна опору тензорезистора, що виникає внаслідок деформації геометричних розмірів дроту, визначається за формулою [4].  $\frac{\Delta R'}{R} = \Delta l(1 + 2\mu)/l$  ,  
(2.72)

де  $\Delta l$  — зміна довжини дроту під дією деформації;  $\Delta R'$  — зміна опору тензорезистора під дією деформації;  $\mu$  — коефіцієнт Пуассона.

У зв'язку з цим ліва частина приведеної рівності (2.75) доповнюється членом:

$$\frac{\Delta R''}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} , \quad (2.73)$$

що враховує відносний приріст питомого опору  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  , який необхідно

враховувати в процесі вимірювання  $\frac{\Delta l}{l}$ , оскільки додаткова зміна опору  $\Delta R'$  зумовлює методичну похибку. Основними характеристиками тензорезистора (відповідно до ГОСТ 21 616—76) є його активний опір  $R$ , база  $L$  і коефіцієнт тензочутливості  $K$ , який визначається так:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\mu + \frac{\tau}{\varepsilon}, \quad (2.74)$$

де  $\Delta R = \Delta R' + \Delta R''$  — повна зміна опору дроту в результаті деформації;  $\tau = \frac{\Delta R'}{R}$  — відносна зміна опору давача;  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  — відносна зміна довжини давача.

Величина швидкості ультразвуку в рідинах або газах визначається рівнянням:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}}, \quad (2.75)$$

де  $\rho$  — густина рідини;  $\beta_{ad}$  — адіабатичний коефіцієнт стисливості. Причому величина акустичного опору

$$R = \rho c. \quad (2.76)$$

Коефіцієнти пропускання  $t_{12}$  і відбивання  $r_{12}$  можуть бути записані у виді:

$$t_{12} = \frac{2R_1}{R_1 + R_2}; \quad (2.77)$$

$$r_{12} = \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2}. \quad (2.78)$$

Індикація вихорових формацій в потоці може бути здійснена по відбитій ультразвуковій хвилі або по розсіюванню прямої хвилі [5].

В даному розділі проведено аналітичний опис вихорового потоку та аналіз процесу вихороутворення при обтіканні потоком тіла. Також проведено аналіз форм тіл обтікання та видів детекторів, які застосовуються у складі вихорових витратомірів. На основі проведеного аналізу, для дослідження метрологічних характеристик вимірювання витрати, вибираємо перетворювач витрати вихоровий ИРВИС-К-300, який володіє всіма перевагами, які властиві даному класу витратомірів.

Перетворювач випускається шести типорозмірів від Ду50 до Ду300. Призначений для вимірювання витрат газу в діапазоні температур навколишнього і робочого середовища від -40 до +50°C, абсолютного тиску від 0,05 до 1,7МПа, в'язкості середовища від  $6 \times 10^{-6}$  до  $35 \times 10^{-6}$  Па·с.

В процесі роботи не підлягає впливу промислових вібрацій в силу фізичного принципу використовуваного детектора вихорів. На виході перетворювача передбачений частотний вихідний сигнал, пропорційний витраті газу.

Межі допустимої основної відносної похибки ІРВІС-К-300 при перетворенні об'ємної витрати в електричний вихідний сигнал по частотному виходу рівні  $\pm 1\%$ .

### **3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХОРОВОГО ВИТРАТОМІРА**

У трубопроводі при обтіканні тіла виникають складні фізичні процеси, такі як пульсації тиску, температури, швидкості звуку і інші параметри. Навіть при розвитку чисельних методів для опису складних об'єктів, до цього моменту не існують задовільних математичних моделей для гідро- і газодинамічних процесів у вихрових витратомірах. Просторово-часовий розподіл фізичних характеристик у рухомому середовищі залишається невизначеним в залежності від швидкості, агрегатного стану і в'язкості рухомого середовища.

Тіло, яке обтікається та утворює вихори, переживає складні напружено-деформовані стани, включаючи коливання кручення та вигину. Все це відкриває простір для творчості розробників і великого обсягу експериментальних досліджень для знаходження оптимальних рішень.

Мета експериментальних досліджень, описаних у цьому розділі, полягає в порівнянні результатів вимірювань витрати газу за допомогою вихрового витратоміра ІРВИС-К-300 із результатами чисельного моделювання процесу обтікання, здійсненого за допомогою програмного забезпечення для обчислювальної гідродинаміки (CFD).

Для розробки моделі використовується діюча система, з якої отримано значення інформативних параметрів, таких як температура і тиск газу в магістралі, витрати газу, визначені еталонним витратоміром, та характеристики газу з паспорта. Еталонним засобом вимірювання витрати є робочий еталон об'єму газу типорозміру G250 (роторний лічильник) з відповідними показниками витрат. Температуру вимірює термометр опору RMG (П100) з діапазоном від -10 до +60°C.

Для вимірювання тиску у системі використовується перетворювач Метран-45 ДИ, який має діапазон вимірювання тиску від 0,1 кПа до 60 МПа та границі основної похибки  $\pm 0,25\%$ . Давачі обладнані стандартним струмовим вихідом від 4 до 20 мА. Отримані дані передаються на пульт керування та

персональний електронно-обчислювальний модуль (ПЕОМ).

Для вимірювання частоти використовується електронно-лічильний частотомір ЧЗ-45.

### **3.1 Перетворювач витрати вихоровий ИРВИС-К-300**

Перетворювачі витрати газу вихорові ИРВИС-К-300 розроблені для перетворення об'ємної витрати неагресивних горючих і інертних газів в електричний вихідний сигнал. Вони використовуються у складі систем комерційного і технологічного обліку газу на комунальних і промислових підприємствах для вимірювання об'єму неагресивних горючих і інертних газів, приведеного до нормальних умов (760 мм.рт.ст. і +20 оС)

Структура ИРВИС-К-300 включає первинний перетворювач витрати (ПП), блок інтерфейсу і живлення (БИП), та сполучний кабель (СК). ПП включає вихровий перетворювач об'ємної витрати (ВІП) та блок попереднього підсилення і обробки сигналу (БПУ). ВІП представляє собою тіло обтікання з вбудованим чутливим елементом термоанометра. БПУ є електронним пристроєм, який реєструє частоту вихороутворення, обробляє її і формує вихідний частотний сигнал.

Основні характеристики вихрових перетворювачів витрати газу ИРВИС-К-300:

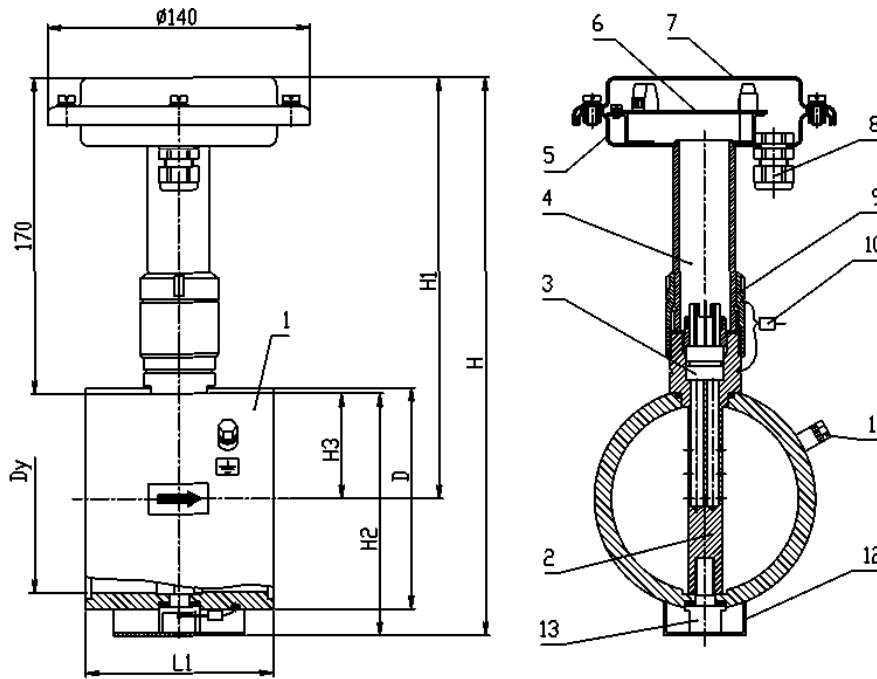
Вимірюване середовище:

Робочий газ: природний газ (згідно з ГОСТ 5542), інші горючі гази, повітря, інертні гази.

Температура: від -40 до +50 °С.

Абсолютний тиск: від 0,05 до 1,7 МПа.

Динамічна в'язкість: від  $6 \times 10^{-6}$  до  $35 \times 10^{-6}$  Па·с.



1-корпус ПП; 2-тіло обтікання; 3-детектор вихорів; 4,5-штанга з корпусом БПУ; 6-плата БПУ; 7-кришка; 8-кабельний ввід; 9-гайка штанги; 10-пломба; 11-гвинт заземлення; 12-опорна скоба; 13-спецболт.

Рисунок 1 - Конструкція ПП ИРВИС-К-300

Діапазони вимірювань:

Відповідають значенням, вказаним в Додатку Ж.

Умови експлуатації:

Температура:

Первинний перетворювач від -40 до +50 °С.

Блок інтерфейсу і живлення від -10 до +50 °С.

Вологість: 95±3% при температурі 35 °С.

Барометричний тиск: від 84 до 106,7 кПа.

Межі допустимої похибки:

Основна відносна похибка по частотному виходу: ±1%.

Додаткова похибка від параметрів живлення: не більше 0,5 меж допустимої основної відносної похибки.

Додаткова похибка від зміни температури навколишнього середовища: не більше 0,2 меж допустимої основної відносної похибки.

Додаткова похибка від зміни в'язкості робочого газу: не більше 0,5 меж допустимої основної відносної похибки.

З'єднання:

З'єднання первинного перетворювача з трубопроводом повинне бути типу «сендвіч».

ИРВИС-К-300 працює на основі ефекту утворення вихорів за тілом обтікання, відомого як вихорова доріжка Кармана. Частота утворення цих вихорів пропорційна об'ємній витраті середовища і фіксується чутливим елементом термоанемометра, розташованим в каналі перетікання тіла обтікання.

Основні принципи дії:

Формування вихорів: Вихори утворюються в сліді за тілом обтікання, і їх частота пропорційна об'ємній витраті середовища.

Фіксація частоти зриву вихорів: Чутливий елемент термоанемометра реєструє частоту вихороутворення і фіксує зрив вихорів.

Універсальність гідродинамічної подібності: Співвідношення між числом Рейнольдса та числом Струхала є універсальним для різних середовищ і параметрів.

Характеристики тіла обтікання (ВІР):

Тіло обтікання (ВІР) має циліндричну форму з вифрезерованими майданчиками.

Канал перетікання у тілі обтікання має спеціальну форму і проходить через корпус детектора вихорів.

Детектор вихорів:

Розташований у подовжньому отворі тіла обтікання.

Містить чутливий елемент термоанемометра (терморезистор із вольфрамового дроту).

Корпус БПУ:

Містить плату БПУ з клемними колодками для підключення детектора вихорів і сполучного кабелю (СК).

Закритий кришкою, де розташована маркувальна табличка.

Кабельне введення:

Забезпечує герметичне підведення СК до клемної колодки.

Різьбовий отвір і стрілка:

На поверхні корпусу вказує напрям потоку.

Є різьбовий отвір для гвинта заземлення.

Цей перетворювач використовується для вимірювання об'ємної витрати газу на основі утворення вихорів та їхнього детектування.

Для захисту від несанкціонованого доступу до системи, кришка БПУ, кріплення штанги БПУ, опорна скоба і пристрій введення СК обладнуються пломбами. У разі наявності витрати робочого газу через ПП, ВПР формує частотний сигнал, пропорційний об'ємній витраті газу за робочих умов.

Сигнали від ВПР, після обробки та підсилення БПУ, подаються на бар'єр іскрозахисту (ИЗ) БИП. З бар'єру іскрозахисту сигнали надходять на клемні колодки для підключення кабелю інтерфейсу, через які вони передаються на вторинну апаратуру. Такі заходи забезпечують не лише вимір об'ємної витрати газу, але й захист від неправомірного доступу до системи і збереження надійності вимірювань.

Об'єм робочого газу, приведений до нормальних умов, обчислюється за формулою:

$$Q_c = \int_t K_{Q\eta} F_{св20} d_{20} K_T K_\varepsilon f \frac{P T_c}{P_c T K} dt \quad (3.1)$$

де:  $P$  - абсолютний тиск робочого газу, Па;

$T$  - абсолютна температура робочого газу, К;

$T_c$  – абсолютна температура робочого газу за стандартних умов 293,15 К;

$P_c$  – абсолютний тиск робочого газу за стандартних умов 101325 Па;

$K$  - коефіцієнт стисливості робочого газу.

$f$  – частота вихідного сигналу ИРВИС-К-300, Гц;

- поправочний коефіцієнт, що враховує в'язкість газу;

$F_{св20}$  - площа прохідного перетину ПП за нормальних умов;

$d_{20}$  - характерний розмір (діаметр) тіла обтікання за нормальних умов;

$K_T$  - поправочний коефіцієнт на зміну розмірів елементів конструкції ПП ИРВИС-К-300;

$K_{\square}$  - поправочний коефіцієнт на вплив розширення газу за тілом обтікання.

Значення  $\rho_{св20}$ ,  $d_{20}$ ,  $K_T$  вказуються в паспорті ИРВИС-К-300.

Для вимірювання тиску використовується перетворювач тиску (ППД), який розташований на прямих ділянках трубопроводів на відстані 1–3 діаметрів трубопроводу вниз по потоці від перетворювача витрати (ПП). Для вимірювання температури використовуються перетворювачі температури (ППТ), розташовані на прямих ділянках трубопроводів на відстані 3–5 діаметрів трубопроводу вниз по потоці від перетворювача витрати.

Для автоматизованих розрахунків об'єму робочого газу, приведеного до нормальних умов, використовуються зовнішні обчислювальні пристрої, які мають відповідні технічні характеристики і програмування для взаємодії з перетворювачами витрати газу ИРВИС-К-300. Ці пристрої використовуються для автоматичного обчислення об'єму газу відповідно до вимог і технічних параметрів, встановлених для перетворювачів витрати газу.

### **3.2 Визначення похибки вимірювання витрати і кількості газу перетворювачем витрати ИРВИС-К-300.**

Вимірювання кількості газу за допомогою вихорових перетворювачів витрат відноситься до опосередкованого методу вимірювань, який включає в себе вимірювальний комплекс. Цей комплекс складається з вихорового перетворювача витрати, пристроїв прямого вимірювання параметрів газу (тиск, температура), і засобу для обробки результатів вимірювань. Всі ці засоби мають нормовані похибки.

Для розрахунку загальної похибки визначення кількості газу використовують обрані метрологічні характеристики вживаних засобів вимірювань. При цьому припускається, що всі засоби вимірювань мають дійсні свідоцтва про повірку, і для них встановлені нормовані межі допустимих значень основної похибки.

Такий підхід гарантує визначення кількості газу з високою точністю, оскільки усі елементи вимірювального комплексу відповідають визначеним метрологічним стандартам і нормам.

Результат вимірювань кількості  $V_c$  за звітний період часу повинен бути представлений відповідно до МІ 1317 в наступному вигляді:

$V_c ; \delta V_c$ ,

де:  $V_c$  - об'єм газу, приведений до стандартних умов;

$\delta V_c$  – відносна похибка вимірювання об'єму при довірчій ймовірності 0,95.

Враховуючи техніко-економічну доцільність, зацікавлені сторони узгоджують використання конкретної норми для визначення похибки. Межі складової відносної похибки вимірювань параметра "у" розраховуються у відсотках за допомогою наступних формул:

- у разі нормування у вимірювача параметра «у» основної абсолютної похибки:

$$\delta_{oy} = \frac{\Delta y}{y} 100; \quad (3.2)$$

- у разі нормування у вимірювача параметра «у» основної приведеної похибки, якщо нормуюче значення рівне діапазону вимірювань:

$$\delta_{oy} = \delta_o \frac{y_B - y_H}{y}; \quad (3.3)$$

де  $\delta_o$  - основна похибка засобу вимірювання;

- у разі нормування у вимірювача параметра «у» основної приведеної похибки, якщо нормуюче значення рівне верхній межі вимірювань:

$$\delta_{oy} = \delta_o \frac{y_B}{y}; \quad (3.4)$$

Формули для розрахунку похибки вимірювань кількості газу[7]. Для оцінки похибки визначення кількості газу, приведеного до стандартних умов, застосовують розрахунковий підхід. При цьому використовують спрощуючі допущення, що стосуються малості похибок величин, які впливають на результат вимірювань. Також приймають, що ці похибки розподілені згідно з нормальним законом розподілу і є незалежними одна від одної.

При визначенні об'єму газу, приведенного до стандартних умов, у разі роздільного вимірювання параметрів газу з обчислювачем, похибка якого задана з урахуванням похибок вимірювальних каналів:

$$\delta_{V_c} = \left\{ \delta_{\text{впр}}^2 + \delta_B^2 + \delta_K^2 \right\}^{0.5}; \quad (3.5)$$

При визначенні об'єму газу, приведенного до стандартних умов, у разі роздільного вимірювання параметрів газу з обчислювачем, похибка якого задана без урахування похибок вимірювальних каналів:

$$\delta_{V_c} = \left\{ \delta_{\text{впр}}^2 + \delta_B^2 + \delta_P^2 + \delta_T^2 + \delta_K^2 \right\}^{0.5}; \quad (3.6)$$

де:  $\delta_{\text{впр}}$  - похибка вихрового перетворювача витрати;  $\delta_B$  - похибка обчислювача;  $\delta_P$  - похибка вимірювання абсолютного тиску;  $\delta_T$  - похибка вимірювання температури;  $\delta_K$  - похибка розрахунку коефіцієнта стисливості.

Складові похибки.

Похибка  $\delta_{\text{впр}}$  визначається по формулі:

$$\delta_{\text{впр}} = \left\{ \delta_{K_{\text{ов}}}^2 + \delta_{F_{\alpha 20}}^2 + \delta_{d_{20}}^2 + \delta_{K_T}^2 + \delta_{K_\epsilon}^2 \right\}^{0.5}; \quad (3.7)$$

Похибку  $\delta_{d_{20}}$  приймають рівною 0,066%. Похибку  $\delta_{F_{20}}$  приймають рівною 0,14 %.

Похибка  $\delta_{K_{Q\eta}}^2$  розраховується по виразу:

$$\delta_{K_{Q\eta}}^2 = \left\{ \delta_o^2 + \Theta^2_{\text{Re}_f / \text{Re}_f^{\text{ном}}} \delta_{\text{Re}_f / \text{Re}_f^{\text{ном}}}^2 \right\}^{0.5}; \quad (3.8)$$

Основна відносна похибка вихрового перетворювача витрати  $\delta_o$  указується в паспорті вихрового перетворювача витрати.

Коефіцієнт впливу відношення чисел Рейнольдса залежить від способу нормування градувальної залежності вихрового перетворювача витрати і указується в його технічній документації.

Похибка визначення відношення чисел Рейнольдса визначається по виразу:

$$\delta_{\text{Re}_f / \text{Re}_f^{\text{ном}}} = \left\{ 4\delta_{d_{20}}^2 + \delta_f^2 + \delta_\rho^2 + \delta_\eta^2 \right\}^{0.5}; \quad (3.9)$$

Похибка вимірювання частоти вихідного сигналу  $\delta f$  рівна похибці вхідного частотного каналу обчислювача і встановлюється по його технічній документації.

Похибка визначення густини  $\delta \rho$  і динамічної в'язкості  $\delta \eta$  газу визначають згідно методикам. За відсутності стандартних методик похибка приймається рівна величині, відповідній половині розряду останньої значущої цифри в числі, що виражає дану величину.

Похибка визначення густини за робочих умов  $\delta \rho$  в загальному випадку визначають по формулі:

$$\delta_{\rho} = \left\{ \delta_{\rho_c}^2 + \delta_P^2 + \delta_T^2 + \delta_K^2 + \sum \Theta^2 X_i \delta_{X_i}^2 \right\}, \quad (3.10)$$

де:  $\delta_{X_i}^2$  - похибка визначення компонентного складу газу;

$\Theta$  - коефіцієнт впливу відповідного параметра.

Похибка густини за стандартних умов  $\delta \rho_c$  і  $\delta X_i$  визначають по нормативному документу, що регламентує метод непрямих вимірювань.

Похибку визначення в'язкості газу  $\delta \eta$  визначають по нормативному документу, що регламентує метод непрямих вимірювань. У загальному випадку похибка визначення в'язкості газу визначається по формулі:

$$\delta_{\eta} = \left\{ \delta_{\eta_{мет}}^2 + \Theta^2_P \delta_P^2 + \Theta^2_T \delta_T^2 + \delta_{\rho_c}^2 + \sum \Theta^2 X_i \delta_{X_i}^2 \right\}, \quad (3.11)$$

де:  $\delta \eta_{мет}$  - методична похибка методу непрямих вимірювань;  $\Theta$  - коефіцієнт впливу відповідного параметра.

У разі відсутності довідкових даних  $\Theta$  значення  $\Theta$  при застосуванні того або іншого методу непрямих вимірювань в'язкості для технічно важливих газів, природного газу  $\Theta_P$  приймають рівним 0,1,  $\Theta_T$  приймають рівним 1.

Для вихорових перетворювачів витрати з металевими частинами проточної частини похибка  $\delta_{КТ}$  регламентується складає  $\pm 0,012\%$  при довірчій вірогідності 0,95.

Похибка поправочного коефіцієнта на вплив розширення газу за тілом обтікання  $\delta_{К\epsilon}$  складає  $\pm 0,04\%$  при довірчій вірогідності 0,95.

Похибка вимірювань абсолютного тиску.

Похибка вимірювань абсолютного тиску при застосуванні перетворювачів абсолютного тиску розраховують по формулі:

$$\delta_P = \{\delta_{\Delta P}\}^{0.5} \quad (3.12)$$

де  $\delta_{\Delta P}$  - основна похибка вимірювального перетворювача тиску з урахуванням способу нормування.

Похибка вимірювань абсолютного тиску при застосуванні перетворювачів надлишкового тиску розраховують по формулі:

$$\delta_P = \left\{ \left( \frac{P_u}{P} \right)^2 \delta_{P_u}^2 + \left( \frac{P_{\varepsilon}}{P} \right)^2 \delta_{P_{\varepsilon}}^2 \right\}^{0.5} \quad (3.13)$$

де:  $\delta_{P_u}$  - основна похибка перетворювача надлишкового тиску;

$\delta_{P_{\varepsilon}}$  - похибка вимірювання барометричного тиску.

Похибка вимірювань температури газу у разі нормування абсолютної похибки вимірювального перетворювача розраховують по формулі:

$$\delta_T = \frac{100(t_B - t_H)}{273,15 + t} \left\{ \left[ \frac{\Delta y}{y_B - y_H} \right]^2 \right\}^{0.5}; \quad (3.14)$$

де  $\Delta y$  - абсолютна похибка вимірювального перетворювача.

Похибка коефіцієнта стисливості визначається згідно методу, що регламентує розрахунок.

У разі використання табличних даних похибка приймається рівна половині розряду останньої значущої цифри.

Похибка обчислювача приймається відповідно до його технічної документації.

В процесі проведення експерименту вимірювали витрату за допомогою робочого еталону, одночасно фіксуючи частоту вихідного сигналу перетворювача витрати ІРВІС-К-300, який пропорційний об'ємній витраті газу. Результати цього експерименту представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Результати експерименту

Покази робочого еталону $Q_e$ , м <sup>3</sup> /год	Покази частотоміра $f$ , Гц
71	63,3
84	62,4
92,3	68,3
98	71

### 3.3.1 Розрахунок витрати за експериментальними даними

На першому етапі досліджень згідно отриманих значень частоти  $f$  розрахуємо значення витрати  $Q_p$  (покази перетворювача витрати).

Дані з паспорта ІРВІС-К-300[8]:

Похибка  $\pm 1\%$ ;

$d_{20}=0,023166\text{м}$  – характерний розмір тіла обтікання;

$D_{20}=0,100008\text{м}$  – діаметр ППІ;

$F_{св20}=5,55877\text{Е-}03\text{м}^2$  – площа поперечного перетину ІРВІС-К-300 в місці встановлення тіла обтікання

Таблиця 3.2 Поправочний коефіцієнт, що враховує в'язкість газу

Ref	1400	3500	6500	12500	20000	30000	35700
KQ $\eta$	2,76962	2,83561	2,87559	2,91843	2,94962	2,97679	2,98852

Дані про газ:

$\rho_{ст}=0,6732\text{кг/м}^3$  – густина газу при стандартних умовах;

$\eta=11,01 \cdot 10\text{Е-}06$  – динамічна в'язкість газу;

$K=0,98$  – коефіцієнт стисливості;

$T=291,75\text{К}$  – температура газу;

$P=361,4\text{кПа}$  – тиск газу.

Визначимо густину газу при робочих умовах згідно формули:

$$\rho = \rho_{ст} \frac{P}{P_{ст}} \frac{T_{ст}}{T} \frac{1}{K} \quad (3.15)$$

Отже,  $\rho=2,28\text{кг/м}^3$

Розрахунок витрати за експериментальними даними [6]:

1.  $Q_e=98\text{м}^3/\text{год}$  при  $f=71\text{Гц}$ .

Визначаємо модифіковане число Рейнольдса згідно формули:

$$Re_f = \frac{d_{20}^2 \cdot \rho \cdot f}{\eta} \quad (3.16)$$

Отже,  $Re_f=7891$

За таблицею 3.2 визначаємо поправочний коефіцієнт, що враховує в'язкість газу  $KQ\eta=2,883$

Коефіцієнт перетворення:

$$K_{пр} = 3600K_{Q\eta}F_{св20}d_{20} \quad (3.17)$$

$K_{пр}=1,343$

Об'ємна витрата:

$$Q_p = K_{пр} \cdot f \quad (3.18)$$

$Q_p=95,4\text{м}^3/\text{год}$ .

Аналогічно розраховуємо витрати при інших частотах.

2.  $Q_e=92,3\text{м}^3/\text{год}$  при  $f=68,3\text{Гц}$ .

$Re_f=7590$ ;  $KQ\eta=2,882$ ;  $K_{пр}=1,341$ ;  $Q_p=91,6\text{м}^3/\text{год}$ .

3.  $Q_e=84\text{м}^3/\text{год}$  при  $f=62,4\text{Гц}$ .

$Re_f=6935$ ;  $KQ\eta=2,876$ ;  $K_{пр}=1,34$ ;  $Q_p=83,6\text{м}^3/\text{год}$ .

4.  $Q_e=71\text{м}^3/\text{год}$  при  $f=63,3\text{Гц}$ .

$Re_f=7035$ ;  $KQ\eta=2,876$ ;  $K_{пр}=1,34$ ;  $Q_p=84,8\text{м}^3/\text{год}$ .

З розрахунків помітно, що розрахункові значення витрати  $Q_p$  відрізняються від значень  $Q_e$ . Це в основному зумовлено наявністю похибки досліджуваного перетворювача витрати.

В якості програмного забезпечення використовуємо об'єднаний програмний продукт SolidWorks+FloWorks.

### 3.3.2 Об'єднаний програмний продукт SolidWorks+FloWorks. Основні можливості і особливості програми

Об'єднаний програмний продукт SolidWorks+FloWorks представляє собою поєднання повної версії системи SolidWorks, яка є графічним середовищем для проектування, і гідрогазодинамічного вирішувача COSMOSFloWorks. Препроцесор COSMOSFloWorks надає можливість автоматизованої або ручної конструкції розрахункової сітки.

В процесі роботи спочатку створюється тривимірна параметрична геометрична модель об'єкта в САD-програмі SolidWorks. Потім у САЕ-програмі FloWorks визначаються властивості середовища, граничні умови, точність рішення, геометричні розміри розрахункової зони і виконується чисельне рішення задачі.

Цей програмний пакет дозволяє вирішувати різноманітні задачі механіки рідин і газів, такі як стаціонарні та нестаціонарні течії, ламінарні і турбулентні течії, теплоперенос, нестискувані і стискувані течії, течії через пористі середовища, гвинтові потоки тощо. Програма автоматично аналізує геометрію тіла і формує розрахункову сітку для обчислення.

Під час вирішення завдань гідродинаміки використовується метод кінцевих об'ємів та рівняння Нав'є-Стокса для нестаціонарних умов, включаючи теплопередачу. В областях з великими градієнтами параметрів використовується подрібнена сітка (Solution-Adaptive Meshing).

Об'єкт, що перешкоджає руху рідини, виключається з розрахункової області, і на його поверхні задаються відповідні граничні умови. Для внутрішнього обтікання тіла використовуються умови прилипання для в'язкої рідини і умови непротікання для ідеальної рідини. Зовнішні межі домена враховуються як площина або вісь симетрії та відкрита межа домена. У першому випадку за умовою непротікання нормальна компонента швидкості змінює знак, а у другому може відбуватися витік або витік рідини через відкриті межі.

Для чисельного розв'язання використовується метод кінцевих об'ємів, а дискретизація рівнянь проводиться в консервативній формі. Часткові похідні апроксимуються з другим порядком точності, а похідні за часом обчислюються за неявною схемою Ейлера першого порядку. Для стаціонарних рішень використовується метод багаторазового вирішення нестаціонарних рівнянь у часі.

Щоб ефективно завершити послідовний процес наближень у випадку стаціонарного завдання та прискорити обчислення, користувач повинен визначити одну або декілька цільових функцій (наприклад, тиск, сила,

коефіцієнт опору, температура, число Маха і т.д.) як критерій збіжності процесу. Цей вибір залежить від типу задачі. Протягом обчислень можливий контроль швидкості збіжності, а користувач може призупинити процес рішення, якщо поточні дані показують невиправданість подальших обчислень.

В області малих геометричних елементів, розміри яких значно менше характерного розміру досліджуваного тіла, можливе зменшення розміру сітки до необхідного рівня. Просте управління мінімальним розміром сітки досягається за допомогою встановлення рівня кінцевої роздільної здатності (Result Resolution). Цей рівень керує як критерієм збіжності, так і початковим розміром сітки: перший рівень дозволяє швидко розв'язати задачу на грубій сітці; восьмий (найвищий) рівень забезпечує найточніше рішення, але вимагає значних витрат часу. При потребі вирішення серії подібних завдань, об'єднаних в один проект, можлива автоматична послідовна обробка результатів попередньої задачі для наступних завдань.

Програма володіє різноманітними інструментами для візуалізації та обробки результатів обчислень у середовищі SolidWorks, такими як векторні лінії, ізолінії, колірні контурні заливки, ізоповерхні, перетин, трасування частинок та лінії струму. Крім того, є можливість представлення результатів у вигляді графіків і таблиць Excel або у формі автоматично формуючихся звітів стандартної форми.

У роботі [5] проведено попередню оцінку можливостей комплексу CAD/CAE-програм для розв'язання гідрогазодинамічних задач з областями відриву складної форми. Аналіз точності отриманих результатів та функціоналів програмного забезпечення для візуалізації дозволяє виявити характерні особливості фізичної картини течії.

На першому етапі роботи вирішено ряд класичних завдань, таких як поперечне обтікання циліндра нескінченного розмаху та обтікання кулі нестискуваним потоком. Здійснено аналіз достовірності отриманих результатів і їх порівняння з даними експериментів для обґрунтування можливості вивчення відривних течій за допомогою програм SolidWorks + FloWorks.

На другому етапі оцінювалися можливості CAE-програми для вирішення

завдань обтікання тіл з відривом потоку в широкому діапазоні зміни чисел Маха, чисел Рейнольдса, з урахуванням ступеня турбулентності потоку та величини шорсткості поверхні тіл. Досліджувалися задачі тривимірного обтікання ряду канонічних тіл з відривом потоку, таких як циліндр кінцевого розмаху, куля та паралелепіпед, для яких наявні експериментальні дані. Аналіз параметрів обтікання показав, що розрахункові значення характерних параметрів відносно добре кореспондують із відомими експериментальними даними.

### 3.3.3 Розрахунку витрати при моделюванні потоку засобами SolidWorks + FloWorks

Як уже було сказано в підрозділі 1.4, при постійності числа  $Sh$  частота зриву вихорів газу  $f$  пропорційна швидкості потоку. Тому, вимірюючи цю частоту, можна судити про швидкість  $v$ , а значить, і про об'ємну витрату потоку  $Q_0$ .

Залежність між  $Q_0$  і  $f$  задається рівнянням (1.22)

За допомогою об'єднаного програмного продукту SolidWorks+FloWorks моделюється потік газу при обтіканні тіла, геометрія і характерний розмір якого такі ж як у ІРВІС-К-300. Як видно з рисунків, позаду цього тіла утворюються вихори. Знаючи витрату і площу поперечного перерізу труби, для того щоб визначити частоту  $f$ , необхідно знайти відстані між центрами вихорів. Оскільки вихори мають кругоподібну форму то їх можна описати геометрично за допомогою рівнянь кривих другого порядку.

Криві другого порядку визначаються рівняннями другого степеня відносно декартових прямокутних координат[27].

Загальне рівняння другої степені відносно  $x$  і  $y$  має вигляд:

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0, \quad (3.19)$$

де  $a_{ik} = a_{ki}$  ( $i, k=1, 2, 3$ ).

Для того, щоб знайти відстані між центрами сусідніх вихорів, необхідно спершу знайти координати цих центрів, тобто координати центрів кривих другого порядку, які описують відповідні вихори.

Координати центра  $(x_0, y_0)$  визначаються рівняннями:

$$a_{11}x_0 + a_{12}y_0 + a_{13} = 0, \quad a_{21}x_0 + a_{22}y_0 + a_{23} = 0, \quad (3.20)$$

звідки випливає, що:

$$x_0 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} a_{13} & a_{12} \\ a_{23} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad y_0 = -\frac{1}{D} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{vmatrix} \quad (D \neq 0), \quad (3.21)$$

$$\text{де } D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}.$$

Крива другого порядку цілком визначається п'ятьма своїми точками, якщо жодні чотири з них не лежать на одній прямій[27]. Рівняння кривої другого порядку, що проходить через п'ять точок  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $(x_4, y_4)$ ,  $(x_5, y_5)$ :

$$\begin{vmatrix} x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (3.22)$$

Таким чином, взявши 5 точок на поверхні вихорів з відомими координатами і підставивши ці координати у (3.22) знаходимо коефіцієнти  $a_{ik}$  рівняння (3.19). Знаючи коефіцієнти  $a_{ik}$  визначаємо координати центрів відповідних вихорів. Знайшовши координати центрів можемо визначити відстані між центрами сусідніх вихорів, а отже і частоту  $f$ .

Розрахунок проводимо за допомогою програми MathCAD (Додаток Л).

Дані розрахунку приведені в таблиці 4.3

Таблиця 4.3 Розрахунок частоти зриву вихорів

Покази робочого еталону $Q_e$ , м <sup>3</sup> /год	Розрахована частота $f_m$ , Гц
71	43
84	64
92,3	66
98	70

Розрахунок витрати при моделюванні потоку за допомогою програмного продукту SolidWorks+FloWorks проводимо аналогічно як у підрозділі 3.3.1:

1.  $f_m = 70 \text{ Гц}$  при  $Q_e = 98 \text{ мЗ/год}$

$Ref = 7779$ ;  $KQ_\eta = 2,883$ ;  $K_{пр} = 1,343$ ;  $Q_m = 94 \text{ мЗ/год}$

2.  $f_m = 66 \text{ Гц}$  при  $Q_e = 92,3 \text{ мЗ/год}$

$Ref = 7335$ ;  $KQ_\eta = 2,882$ ;  $K_{пр} = 1,342$ ;  $Q_m = 88,6 \text{ мЗ/год}$

3.  $f_m = 64 \text{ Гц}$  при  $Q_e = 84 \text{ мЗ/год}$

$Ref = 7113$ ;  $KQ_\eta = 2,88$ ;  $K_{пр} = 1,341$ ;  $Q_m = 85,8 \text{ мЗ/год}$

4.  $f_m = 43 \text{ Гц}$  при  $Q_e = 71 \text{ мЗ/год}$

$Ref = 4780$ ;  $KQ_\eta = 2,85$ ;  $K_{пр} = 1,328$ ;  $Q_m = 57,1 \text{ мЗ/год}$

З розрахунків помітно, що розрахункові значення витрати  $Q_m$  відрізняються від значень  $Q_e$ . Це зумовлено неточністю виявлення центрів вихорів, а також значними спрощеннями при розрахунку витрати .

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі обґрунтовано вибір метрологічного дослідження витрати на базі вихорового витратоміра на основі проведено аналізу методів вимірювання витрати.

Теоретично обґрунтовано фізичні процеси при обертово-поступальному русі потоку. Розроблено математичну модель процесу утворення завихрень потоку при обтіканні ним тіла на основі аналітичного дослідження фізичних явищ, що відбуваються при цьому. Математично обґрунтовано залежність витрати від частоти завихрень, що утворюються при обтіканні потоком нерухомого тіла. Досліджено вплив різних зовнішніх факторів на процес утворення завихрень. Проаналізовано існуючі форми тіл обтікання та види детекторів вихорів, на основі якого для дослідження вибрано перетворювач витрати ІРВИС-К-300, який володіє всіма перевагами, властивими для даного типу перетворювачів.

На базі діючої еталонної установки було проведено експериментальні дослідження вимірювання витрати природного газу. Згідно отриманих експериментальних даних за допомогою програмного забезпечення SolidWorks+FloWorks було змодельовано потік газу при обтіканні тіла і розраховано частоту зриву вихорів. З результатів розрахованих даних видно, що вони досить добре співпадають з показами робочого еталона (відхилення складає близько 3%).

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. М.І.Гончарук, М.Д.Середюк Довідник газопостачання населених пунктів України.- Івано-Франківськ,2006
2. СТП 320 .30019801.013-2000 Вимірювальний мікропроцесорний комплекс Superflo-II Інструкція з експлуатації,-Київ,2000
3. Н.М.Піндус Технологічні вимірювання та прилади Конспект лекцій-Івано-Франківськ,2005
4. Комплекси вимірювально-керуючі ”Флоутек-ТМ Інструкція з експлуатації”,-Київ.2005.
5. 2Прилади для вимірювання SiemensFI 012001/2002,Інструкція з експлуатації,2002
6. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка.- Львів: Бескид Біт, 2003.
7. В.В.Колодяжний,О.В. Пітірімов Автоматизація об’єктів газотранспортної системи,Київ,2004
8. Ціделко В. Д., Яремчук Н. А. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання: Монографія. – К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка” ” , 2002. – 176 с.