

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

**Факультет автоматизації та енергетики**

**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного  
менеджменту**

Сорочин Роман Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121.089

(індекс)

## **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**Розроблення багатопроменевого акустичного витратоміра газу**

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

**175 – “Інформаційно-вимірювальні технології”**

(шифр і назва спеціальності)

Р.Б. Сорочин

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Клочко Наталія Богданівна, к.т.н, доц

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

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

В. С. Цих

(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, 2025 р.

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 175 – “Інформаційно-вимірювальні технології”

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІВТЕМ**

**В.С. Цих**

«    »                                  2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

**Сорочин Роман Богданович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення багатопроменового акустичного витратоміра газу

керівник роботи Клочко Наталія Богданівна, к.т.н., доц.,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “05” 12 2025 року № 752/7

2. Строк подання студентом роботи 30.12.2025

3. Вихідні дані до роботи тип досліджуваних лічильників газу – ультразвукові; робоче середовище – природний газ; умови функціонування – робочий тиск до 0,25МПа, діапазон вимірюваних витрат – до 1600м<sup>3</sup> / год, умовні діаметри трубопроводу - 80, 100, 150мм, метод формування акустичних каналів – хордовий на прямих траєкторіях.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз методів вимірювання витрати природного газу

2. Розробка багатопроменового акустичного витратоміра

3. Експериментальні і метрологічні дослідження акустичного витратоміра

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)           

1. Моделювання впливу параметрів природного газу на роботу витратоміра

2. Схема розташування п'єзоелектричних перетворювачів в ультразвуковому лічильнику

3. Схема розташування п'єзоелектричних перетворювачів при визначенні розподілу швидкостей потоку в перерізі трубопроводу

4. Дослідження розподілу швидкостей по перерізу трубопроводу

5. Метрологічні дослідження лічильника газу

6. Схема вузла обліку з багатопроменовим ультразвуковим лічильником

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ               | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|----------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                      |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>нормоконтроль</i> | <i>доц. Чуйко М.М.</i>                    |                |                  |
|                      |                                           |                |                  |
|                      |                                           |                |                  |
|                      |                                           |                |                  |
|                      |                                           |                |                  |
|                      |                                           |                |                  |
|                      |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи                                      | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1.    | <i>Аналіз методів вимірювання витрати природного газу</i>              | <i>10.12.2025</i>              |          |
| 2.    | <i>Теоретичне обґрунтування і розробка акустичного витратоміра</i>     | <i>15.12.2025</i>              |          |
| 3.    | <i>Дослідження розподілу швидкостей потоку по перерізу витратоміра</i> | <i>25.12.2025</i>              |          |
| 4.    | <i>Оформлення магістерської роботи</i>                                 | <i>25.12.2025</i>              |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |
|       |                                                                        |                                |          |

Студент \_\_\_\_\_ Сорочин Р.Б.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Клочко Н.Б.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота 83 с., 31 рис., 14 табл., 24 джерел.

Об'єкт дослідження — багатопроменевий акустичний витратомір природного газу.

Мета роботи — вивчення різних методів вимірювання витрати природного газу і розробка багатопроменевого акустичного витратоміра природного газу.

Метод дослідження — теоретико-експериментальний з використанням основ ультразвукового методу вимірювання витрати природного газу.

В даній магістерській роботі проведено аналіз відомих методів вимірювання витрати газу. Здійснено обґрунтування необхідності розробки багатопроменевого акустичного витратоміра природного газу. Розроблено багатопроменевий акустичний витратомір природного газу. Проведені експериментальні дослідження впливу профілю потоку газу на результати вимірювання витрати і розроблено метрологічне забезпечення витратоміра.

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ВИТРАТОМІР, ЛІЧИЛЬНИК, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, ПРОФІЛЬ ПОТОКУ, БАГАТОКАНАЛЬНІСТЬ, ПОХИБКА.

## **ABSTRACT**

Diploma project of 83 p., 31 rice., 14 tabs., 24 sources.

A research object is multi-beam acoustic flowmeter of natural gas.

A purpose of work is study of different methods of measuring the flow of natural gas and the development of a multi-beam acoustic flowmeter of natural gas.

Research method – theoretic-experimental with the use of bases ultrasonic flow measurement of natural gas.

In this diploma project analyzed the known methods of measuring gas flow. Done rationale for the development of multi-beam acoustic flowmeter of natural gas. Developed multi-beam acoustic flowmeter of natural gas. Experimental study of the effect of gas flow profile results flow measurement and metrology software developed

ULTRASONIC FLOWMETER, FLOWMETER, NATURAL GAS, PROFILE OF FLOW, MULTI-BEAM, ERROR.

## Зміст

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ                                                                                  | 7  |
| 1 Аналіз методів вимірювання витрати природного газу                                   | 8  |
| 1.1 Огляд методів та пристроїв вимірювання витрати                                     | 8  |
| 1.1.1 Вихорові витратоміри                                                             | 8  |
| 1.1.2 Теплові витратоміри                                                              | 10 |
| 1.1.3 Витратоміри змінного перепаду тиску                                              | 12 |
| 1.1.4 Ультразвукові витратоміри                                                        | 18 |
| 1.1.5 Швидкісні витратоміри з тангенційною і<br>аксіальною турбінкою                   | 22 |
| 1.1.6 Витратоміри обтікання (ротаметри)                                                | 25 |
| 1.2 Порівняльний аналіз методів вимірювання витрати                                    | 27 |
| 1.3 Постановка задачі на магістерську роботу                                           | 29 |
| 2 Розробка багатопроміневого акустичного витратоміра                                   | 30 |
| 2.1 Розробка математичної моделі акустичного витратоміра                               | 30 |
| 2.2 Моделювання впливу параметрів природного газу<br>на роботу акустичного витратоміра | 32 |
| 2.3 Розробка принципів схемних рішень побудови<br>акустичних витратомірів              | 33 |
| 2.4 Розрахунок конструктивних параметрів акустичного<br>витратоміра                    | 37 |
| 2.5 Розробка схеми вузла обліку з акустичним витратоміром                              | 38 |
| 3 Експериментальні і метрологічні дослідження акустичного<br>витратоміра               | 40 |
| 3.1 Аналіз еталонних установок для метрологічних<br>досліджень витратомірів            | 40 |
| 3.1.1 Еталонні установки дзвонового типу                                               | 40 |
| 3.1.2 Еталонні установки із робочими еталонами                                         | 42 |
| 3.1.3 Еталонні установки трубопоршневого типу                                          | 44 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 Дослідження впливу розподілу швидкостей потоку<br>в трубопроводі на похибку витратоміра | 50 |
| 3.3 Розробка метрологічного забезпечення для<br>акустичного витратоміра                     | 67 |
| Висновки                                                                                    | 79 |
| Перелік посилань на джерела                                                                 | 80 |

## ВСТУП

Природний газ є основним енергоносієм в народному господарстві України, частка якого в первинному енергоспоживанні наближається до 45%, що приблизно вдвічі перевищує аналогічний середньоєвропейський показник. І це при тому, що в останні роки хоча і спостерігається тенденція до деякого скорочення споживання природного газу, але в цілому вона змінюється несуттєво. Наприклад, впродовж 2020 р. споживачами України використано 48,77 млрд. куб. м природного газу, що майже на 10 млрд. куб. менше, ніж за 2010 р. Тому одним із шляхів досягнення енергетичної безпеки країни є впровадження сучасних засобів і методів вимірювання об'єму і витрати природного газу. Це можливо за умови вдосконалення існуючої національної еталонної бази та створення нових засобів вимірювальної техніки.

Сфера транспортування, видобування та зберігання газу неможлива без застосування витратовимірювальних пристроїв. У більшості країн Європи для цих потреб використовуються лічильники газу з відносною похибкою від 0,5 до 1%. Найбільш сучасними й відповідними даним вимогам являються лічильники газу, в яких застосовано ультразвуковий метод. Це підтверджує актуальність виконання магістерської роботи.

Об'єкт дослідження – багатопроменевий акустичний витратомір природного газу.

Мета роботи – вивчення різних методів вимірювання витрати природного газу і розробка багатопроменевого акустичного витратоміра природного газу.

Метод дослідження – теоретико-експериментальний з використанням основ ультразвукового методу вимірювання витрати природного газу.

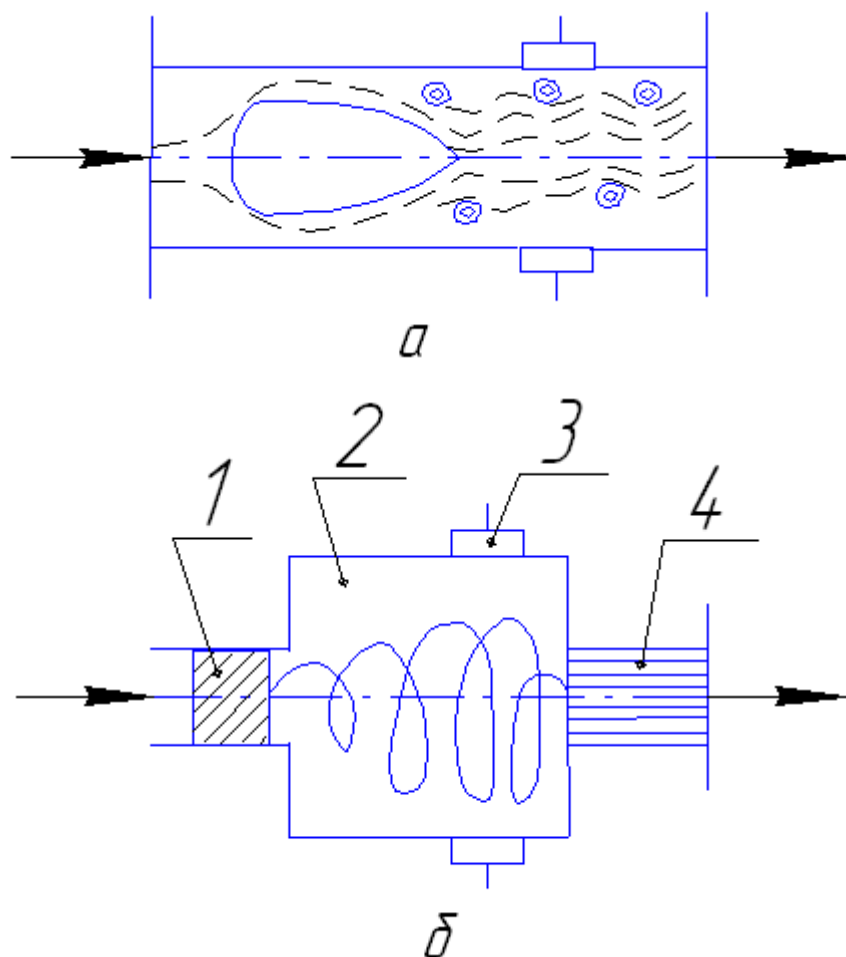
# **1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

## **1.1 Огляд методів та пристроїв вимірювання витрати**

### **1.1.1 Вихорові витратоміри**

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

Суттєвими недоліками у вихорових витратомірах є паразитні пульсації, які створюються насосами або компресорами, різними місцевими опорами, а також пульсації, які виникають внаслідок вібрацій трубопроводів. Для виключення впливу цих перешкод рекомендується на протилежних кінцях якого-небудь діаметра в розширеній камері 2, встановлювати два п'єзоперетворювачі. При цьому сигнали, що виникають від паразитних пульсацій, будуть ліквідовані, а корисні сигнали, навпаки, підсилені, бо внаслідок прецесії ядра вихору, ці сигнали знаходяться в протифазі. Термоперетворювачі менш чутливі до різних шкідливих перешкод [1].



1 - направляючі лопатки; 2 – камера; 3 – перетворювач; 4 -  
потоковипрямляч

а) схема утворення вихорів при обтіканні перешкоди

б) конструкція вихорового витратоміра

Рисунок 1.1 - Метод вихорової витратометрії

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

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

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

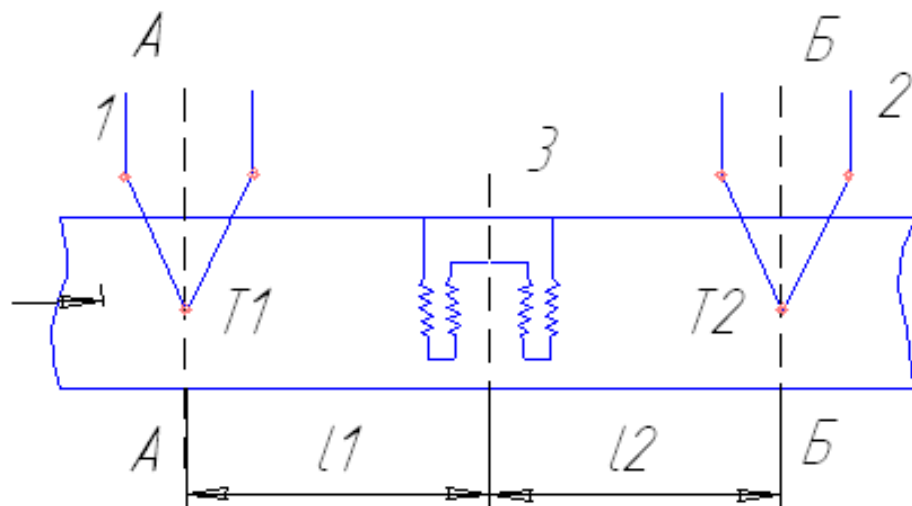
### **1.1.2 Теплові витратоміри**

Тепловими називаються витратоміри, принцип роботи яких базується на вимірюванні залежного від витрати ефекту теплової дії на потік чи тіло, яке контактує з потоком. Вони використовуються для вимірювання витрати газу і рідше для вимірювання витрати рідини. Існує багато різновидностей теплових витратомірів, які відрізняються способом нагріву, розташуванням нагрівача і характером функціональної залежності між витратою і вихідним сигналом [13].

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

Принцип роботи калориметричних витратомірів базуються на залежності середньомасової різниці температур потоку від потужності нагріву. Калориметричний витратомір складається з нагрівача 3 (рисунок 1.2), розташованого всередині трубопроводу і двох термоперетворювачів 1 і 2 для вимірювання температур до  $T_1$  і після  $T_2$  нагрівача [13].

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



1,2 – термоперетворювачі; 3 - нагрівач

Рисунок 1.2 - Принципова схем калориметричного витратоміра

Величина витрати визначається за формулою [13]:

$$Q_M = \frac{W}{k c_p \Delta T}, \quad (1.1)$$

де  $W$  - потужність нагріву;  $k$  - поправочний коефіцієнт, який враховує втрату тепла в навколишнє середовище, похибку вимірювання  $\Delta T$  із-за нерівномірності розподілу температур по перерізу трубопроводу і можливість підвищення  $T_1$  за рахунок теплопередачі від нагрівача;  $c_p$  - теплоємність при температурі  $\frac{T_2 - T_1}{2}$ .

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

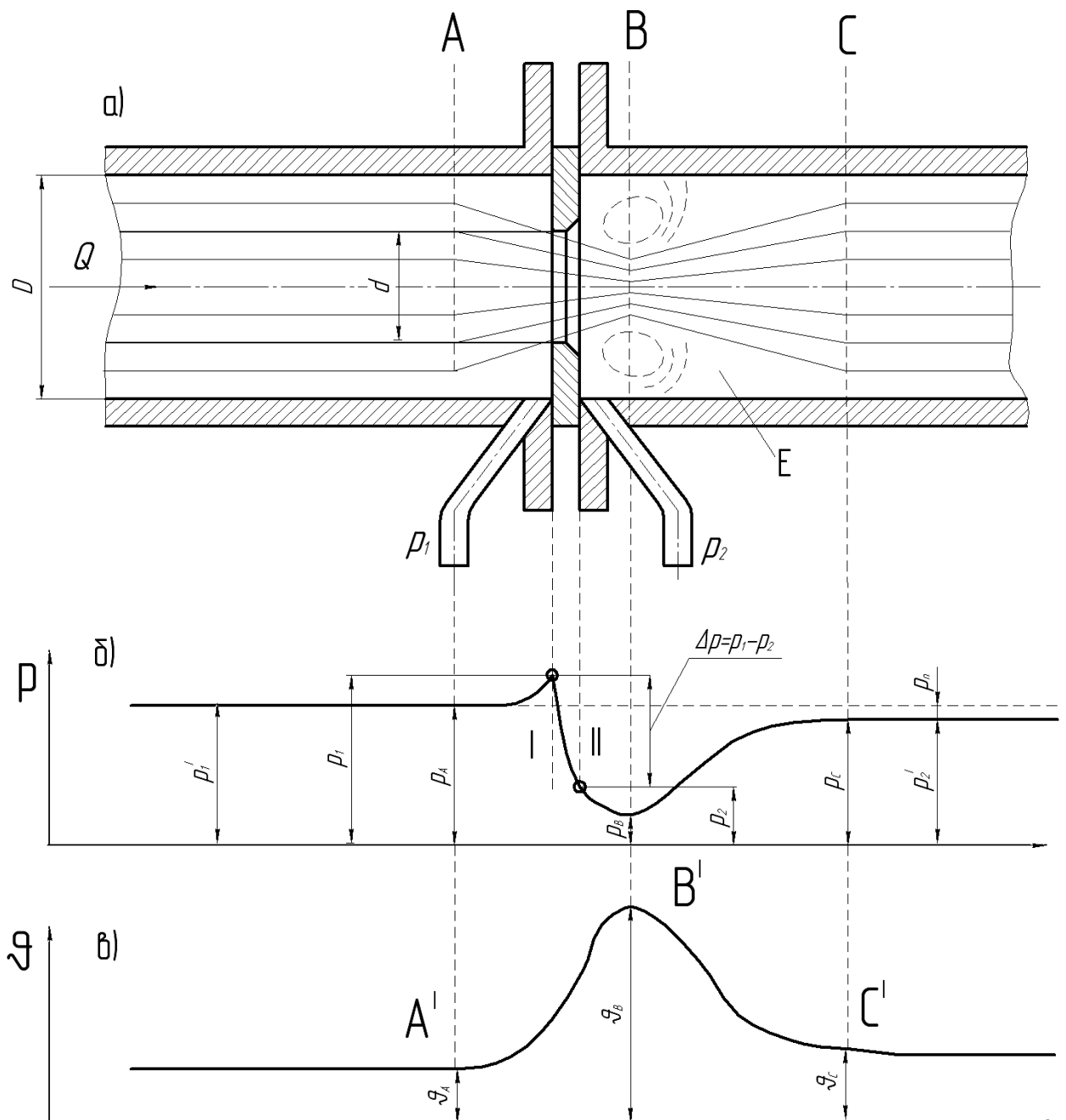
Калориметричні і термоконвективні витратоміри вимірюють масову витрату при умові незмінності теплоємності вимірюваної рідини, що являється їх перевагами. Друга перевага термоконвективних витратомірів – відсутність контакту з вимірюваною речовиною. Недолік – велика інерційність. Приведена похибка термоконвективних витратомірів лежить в межах  $\pm(1,5 - 3) \%$ . В калориметричних витратомірах вона менша і становить  $\pm(0,3 - 1) \%$  [4].

### 1.1.3 Витратоміри змінного перепаду тиску

Робочими еталонами змінного перепаду тиску [12] називаються РЕ, принцип роботи яких базується на залежності витрати від перепаду тиску, який створюється на установленому у трубопроводі нерухомому пристрої (пневмоопір) або самим елементом трубопроводу [14].

Конструктивно такі РЕ здебільшого складаються з трьох частин (рис 1.3):

– перетворювач витрати, який створює перепад тиску залежно від витрати;



а – звужуючий пристрій (діафрагма);

б – зміна тиску при проходженні газу через діафрагму;

в – середня швидкість потоку.

Рисунок 1.3 – Зміна тиску  $p$  та швидкості  $v$  потоку у трубопроводі при установці звужуючого пристрою (діафрагми)

– з'єднувальний пристрій, який передає перепад тиску від перетворювача до вимірювального приладу;

– диференційний манометр, який вимірює перепад тиску, утворений перетворювачем витрати, і градуйований зазвичай в одиницях витрати [3].

Найчастіше у таких РЕ для створення перепаду тиску як інформативного параметра використовують спеціальний звужуючий пристрій, який встановлюють у трубопроводі на шляху потоку. Таким пристроєм найчастіше є діафрагма (тонкий диск з круглим циліндричним отвором у центрі) та сопло. Потік газу, який протікає через звужуючий пристрій створює перепад тиску. Вимірюючи перепад тиску дифманометром, можна визначити витрату газу за відомою між ними залежністю. Характер такої залежності ілюструється на рис. 1.3 [3].

При протіканні газу через звужуючий пристрій (діафрагму) (рис. 1.3, а) внаслідок переходу частини потенціальної енергії в кінетичну середня швидкість потоку у звуженні збільшується. В результаті цього статичний тиск потоку після діафрагми ( $p_2$ ) стає меншим, ніж перед нею ( $p_1$ ).

На рис. 1.3, б зображена зміна тиску при проходженні газу через діафрагму. Позначимо через А-А' той переріз трубопроводу, починаючи з якого буде відчутним вплив діафрагми на характер потоку. В цьому перерізі потік починає звужуватися, відриватися від стінок трубопроводу, і як наслідок середня швидкість потоку  $v$  (рис. 1.3, в) почне збільшуватись. Внаслідок інерції струмין продовжує звужуватися і на деякій відстані після діафрагми. Тому місце найбільшого звуження струменя буде знаходитися в перерізі В-В'. Відстань від перерізу А-А' до діафрагми не перевищує діаметра трубопроводу  $D$ , а відстань від перерізу В-В' до заднього торця діафрагми приблизно дорівнює  $0,5D$  [1].

На ділянці від перерізу А-А' до перерізу В-В' середня швидкість потоку зростає від  $v_A$  до  $v_B$ . Відповідно зростає і кінетична енергія струменя. Це збільшення швидкості кінетичної енергії може здійснюватися тільки за рахунок зменшення потенціальної енергії і, як наслідок, спаду тиску від  $p_A$

до  $p_B$ . Відтак струмінь починає поступово розширюватися і в перерізі С-С' знову досягає стінок трубопроводу. Цей процес буде супроводжуватися поступовим зменшенням швидкості потоку і частковим відновленням початкового тиску [2].

В перерізі С-С' швидкість  $v_C$  стане рівною початковій  $v_A$ , якщо вважати, що густина середовища  $\rho$  не змінилась, але тиск  $p_C$  буде меншим, ніж  $p_A$ , внаслідок значної втрати енергії в застійних зонах  $E$ , що знаходяться за діафрагмою. Струмінь, що рухається з високою швидкістю буде захоплювати прилеглі частинки із застійних зон  $E$  і викликати деякий спад тиску в цих зонах. Це потягне за собою частковий зворотний рух середовища від перерізу С-С' до перерізу В-В'. В застійних зонах виникають сильні вихроутворення і втрати енергії. Залишкові втрати тиску  $(p_A - p_C)$  становлять для діафрагм від 40 до 90% від перепаду тиску  $(p_A - p_B)$  і зменшуються зі збільшенням відносного перерізу отвору діафрагми  $(d/D)^2$ . Зауважимо, що безпосередньо в отворі діафрагми втрати енергії на тертя і удари складають не більше 2% від перепаду тиску  $(p_A - p_B)$  [14].

Шукана залежність між масовою  $Q_M$  (чи об'ємною  $Q_{об}$ ) витратою і перепадом тиску  $(p_1 - p_2)$ , який в загальному випадку може змінюватися в перерізах, відмінних від А-А' і В-В', може бути отримана зі спільного розв'язку рівняння для закону збереження енергії

$$\int v dv = - \int \frac{d\rho}{\rho} \quad (1.2)$$

і рівняння нерозривності струменя

$$Q_M = \rho v F = const, \quad (1.3)$$

де:  $dv$  і  $d\rho$  — відповідні зміни швидкості і густини середовища, що протікає в перерізі потоку при його звуженні і розширенні;  $F$  — площа перерізу потоку в довільно вибраному перерізі трубопроводу. При цьому вважаємо, що трубопровід горизонтальний [14].

Відношення найменшої площі (горла) струменя  $P_B$  до площі отвору діафрагми  $P_0$  називають коефіцієнтом звуження струменя і зазвичай позначають через  $\mu$ . Звідси

$$F_M = \mu F_0. \quad (1.4)$$

Коефіцієнт  $\mu$  вказує ступінь додаткового звуження потоку, що відбувається під впливом сил інерції, на виході із звужуючого пристрою. Для діафрагм  $\mu$  знаходиться в межах 0,6-0,78. Для сопла, що має плавний вхід,  $\mu = 1$ .

Відношення площі отвору звужуючого пристрою  $F_0$  до площі поперечного перерізу трубопроводу  $F_A$  називається відносною площею  $m$  і визначається відношенням

$$m = \frac{F_0}{F_M} \quad (1.5)$$

(Принагідне зауважимо, що у відповідних ГОСТах колишнього Радянського Союзу ця величина мала назву «модуль звужуючого пристрою»).

Із врахуванням рівнянь випливає, що

$$v_A = v_B \cdot \mu \cdot m \quad (1.6)$$

При вимірюванні витрати газу його густина  $\rho$  зменшується при проходженні через звужуючий пристрій внаслідок зниження тиску, в результаті чого масова  $Q_M$  (чи об'ємна  $Q_{об}$ ) витрата, характерна для початкової швидкості, трохи збільшиться. Для врахування цього вводять поправочний множник на розширення газу  $\epsilon$ , менший за одиницю [3].

В такому випадку рівняння для визначення масової і об'ємної витрати набувають вигляду

$$Q_M = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (1.7)$$

$$Q_{об} = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)} \quad (1.8)$$

Ці рівняння є основними залежностями між витратою газу і перепадом тиску на звужуючому пристрої.

Залежність густини газу  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) в робочих умовах від температури і тиску визначається за формулою

$$\rho = \frac{\rho_c p_1 T_c}{p_c T_1 K}, \quad (1.9)$$

де:  $\rho_c$  — густина сухого газу в стандартних умовах, тобто при тиску  $p_c = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$  і температурі  $T_c = 293,15 \text{ К}$ ;  $p_c, T_c$  — тиск газу та температура при стандартних умовах відповідно;  $p_1, T_1$  — абсолютний тиск газу та температура перед звужуючим пристроєм відповідно;  $K$  — коефіцієнт стисливості газу [3].

Підставивши в формулу (1.9) цифрові значення густини  $\rho_c$  і температури  $T_c$  за стандартних умов, отримаємо формулу, яка часто використовується на практиці для визначення густини газу в робочих умовах [4]

$$\rho = \frac{283,73 \rho_c p_1}{T_1 K} \quad (1.10)$$

Абсолютний тиск середовища  $p_1$  дорівнює сумі надлишкового тиску  $p_{1H}$  щовимірюється перетворювачем тиску чи манометром, і атмосферного тиску  $p_B$ , тобто

$$p_1 = p_{1H} + p_B \quad (1.11)$$

З формули (1.9) видно, що із збільшенням абсолютного тиску  $p_1$  і зниженням фактичної температури газу  $T_1$  густина газу  $\rho$  за робочих умов збільшується, а при зменшенні тиску і підвищенні температури — зменшується.

Коефіцієнт стисливості газу  $K$  характеризує непропорційність зміни об'єму газу зі зміною тиску і температури. Вплив коефіцієнта  $K$  на густину газу при різних тисках і температурах досить сильний. Так, для природного газу значення  $K$  може змінюватися від  $K = 1$  (при  $p_c = 0,1 \text{ МПа}$  і  $T_c = 293,15 \text{ К}$ ) до  $K = 0,5$  (при  $p_1 = 10 \text{ МПа}$  і  $T_1 = 223,15 \text{ К}$ ) [2].

Рівняння, що пов'язує витрату газу, приведену до стандартних умов, з витратою газу в робочих умовах, має вигляд

$$Q_C = \frac{Q_{OB} \rho}{\rho_C} \quad (1.12)$$

Підставивши в це рівняння значення фактичної густини газу із виразу (1.9) і значення об'ємної витрати  $Q_{OB}$ , отримаємо формулу об'ємної витрати газу, приведеної до стандартних умов [14]

$$Q_C = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{(p_1 - p_2) p_1 T_C}{\rho_C p_C T_1 K}} \quad (1.13)$$

де  $Q_C$  — об'ємна витрата газу, приведена до стандартних умов,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Деколи облік газу та визначення основних параметрів здійснюється у позасистемних одиницях. Тоді витрата газу  $Q_H$  за стандартних умов виражається в кубічних метрах за годину, діаметр отвору діафрагми  $d$  в міліметрах, перепад тиску  $\Delta p = p_1 - p_2$  — в кілограм-силах на квадратний метр, тиск  $p_1$  — в кілограм-силах на квадратний сантиметр. В цьому випадку формула (1.16) при  $p_C = 1,0332 \text{ кгс/см}^2$  і  $T_C = 293,15 \text{ К}$  набуде вигляду

$$Q_C = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{(p_1 - p_2) p_1}{\rho_C T_1 K}} \quad (1.14)$$

#### 1.1.4 Ультразвукові витратоміри

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

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

Перетворювач ультразвукового витратоміра складається із відрізка труби, на якому установлені два чи чотири п'єзоелементи. В більшості випадків площини випромінюючих і приймальних п'єзоелементів розміщені під певним кутом  $\theta$  до осі труби. Тоді акустичні коливання під кутом  $\alpha = 90 - \theta$  до осі труби проходять шлях у випромінювальній речовині довжиною  $L$ . Позначивши через  $v_L$  швидкість потоку, усереднену по довжині  $L$ , її проекція на напрям  $L$  буде рівна  $v_L \cos \alpha$ . Якщо звуковий промінь напрямлений в сторону руху потоку, то час  $\tau_1$  проходження ним відстані  $L$  визначиться згідно формули [5]:

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

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

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

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

Віднявши рівняння від одне від одного отримаємо:

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

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

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

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

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

де  $v_c$  – осьова швидкість потоку.

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

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

Частотними називають ультразвукові витратоміри, які працюють за принципом залежності різниць частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань від різниці часу  $\Delta\tau$  проходження цими коливаннями одної і тої ж відстані  $L$  за потоком рухомої рідини або газу і проти нього. В залежності від того, чи вимірюється різниця частот пакетів ультразвукових коливань або коротких імпульсів, що проходять через рідину, називають частотно-пакетними або частотно-імпульсним [19].

Принципова схема частотно-пакетного двохканального витратоміра зображена на рисунку 1.4. Генератор створює коливання високої частоти ( $\approx 10$  МГц), які після проходження через модулятор 1 і модулятор 2 надходять до випромінювальних п'єзоелементів ВПП1 і ВПП2, які посиляють ультразвукові коливання під кутом  $\alpha$  до напрямку швидкості потоку. Час  $\tau_1$  проходження акустичних коливань між випромінювальним п'єзоелементом ВПП1 і приймальним ПП1 визначається згідно формули (1.15), а час  $\tau_2$  проходження між п'єзоелементами ВПП2 і ПП2 визначається згідно формули (1.16).

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

коливання перших пакетів досягнуть приймальних п'єзоелементів ПП1 і ПП2, і потрапляння електричних коливань до модуляторів припиняться.

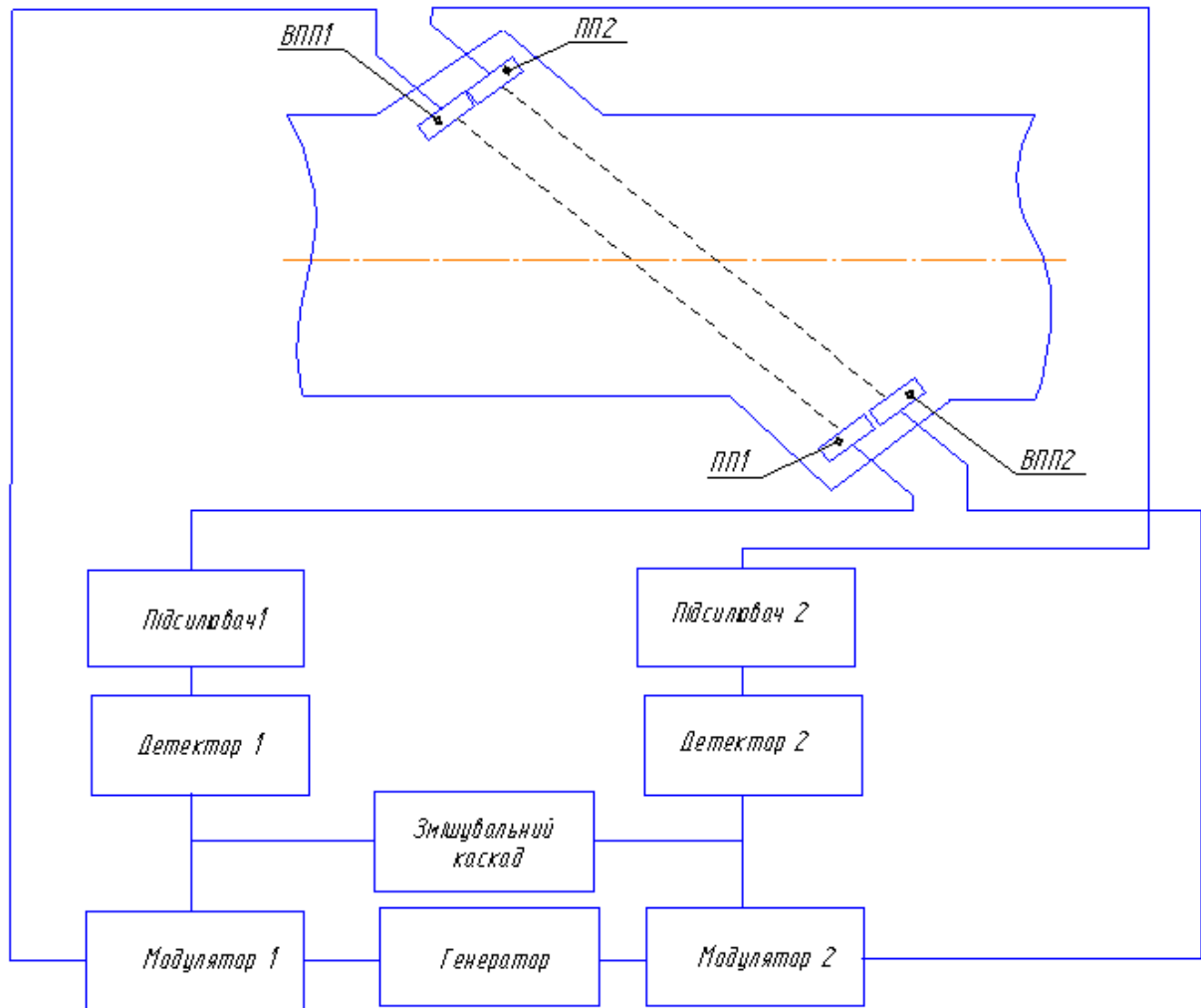


Рисунок 1.4 - Частотно-пакетний двохкаскадний ультразвуковий витратомір

Тому між п'єзоелементами ВПП1 і ПП1 будуть проходити пакети акустичних коливань з періодом повторення  $2\tau_1$ , а між п'єзоелементами ВПП2 і ПП2 – з періодом повторення  $2\tau_2$ . Частота повторення перших пакетів  $f_1 = \frac{1}{2}\tau_1$ , а других -  $f_2 = \frac{1}{2}\tau_2$ .

Прилад, що під'єднано до змішувального каскаду, буде вимірювати різницю частот:

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

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

До переваг акустичних витратомірів слід віднести: відсутність перепаду тиску на первинному перетворювачі, висока швидкодія, що дозволяє вимірювати пульсуючі потоки з великою частотою пульсації; можливість працювати на рідинах з будь-якою в'язкістю, а також на електропровідній рідині; безконтактне вимірювання витрати; досить висока точність приладів при їх індивідуальному градуюванні та використанні спеціальних засобів автокомпенсації найбільш суттєвих завад, висока надійність чутливих елементів [19].

Недоліками акустичною методу є: залежність власної швидкості ультразвукових коливань від фізико-хімічних властивостей вимірюваного середовища (температура, тиск, концентраційний склад); залежність результату вимірювання швидкості середовища від числа Рейнольдса; швидкість розповсюдження ультразвукових коливань є набагато більшою швидкості руху вимірюваною середовища; складність вимірювальної апаратури.

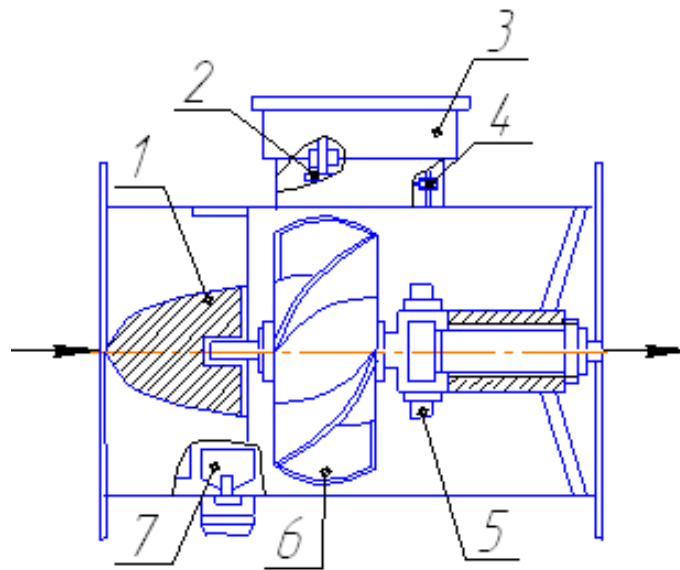
Приведена похибка ультразвукових витратомірів лежать в межах від 0,1 до 2,5%, але в середньому випадку може бути оцінена цифрами 0,5-1%. Ультразвукові витратоміри призначені для труб будь-якого діаметру, починаючи від 10 мм і більше.

### **1.1.5 Швидкісні витратоміри з тангенційною і аксіальною турбінкою**

Швидкісні витратоміри не мають вимірювальних камер і здійснюють опосередковані вимірювання в об'ємних одиницях. Принцип дії базується на залежності частоти обертів турбінки від швидкості потоку, що омиває турбінку. Вимірюючи сумарну кількість обертів турбінки при допомозі лічильного механізму, можна отримати інформацію про об'ємну кількість речовини. Швидкісні витратоміри бувають двох типів: з аксіальною

турбінкою, вісь якої збігається з напрямком досліджуваного потоку і з'єднана передачею з лічильником обертів, і з вертикальною турбінкою – вісь якої безпосередньо зв'язана з лічильником обертів [13].

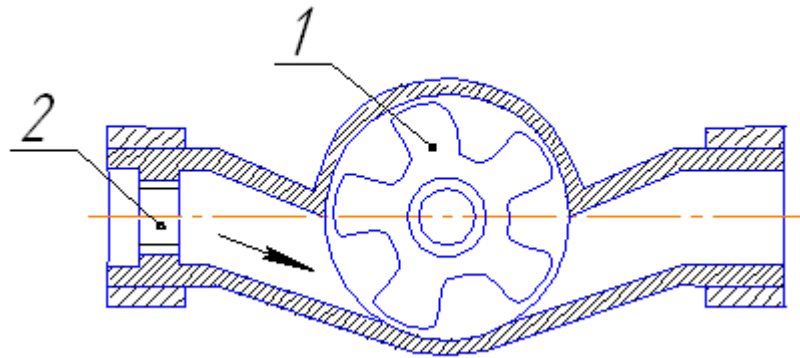
Всередині корпусу швидкісного витратоміра з аксіальною турбінкою (рисунок 1.5) розміщена горизонтально вздовж напрямку вимірюваного потоку рідини турбінка 6, яка виконана у вигляді багатозахідного гвинта. Перед турбінкою встановлений струмовипрямляч 1, призначений для згладжування збурень потоку на вході. Обертання турбіни через черв'ячну пару 5 і кінематичний механізм 2 в камері 4 передається лічильному пристрою 3. Для регулювання швидкості обертання турбіни передбачено вузол 7, який дозволяє повертати одну з радіальних перетинок струмовипрямляча відносно напрямку потоку. Для вимірювання кількості рідини при малих витратах використовуються витратоміри з тангенційними турбінками (рисунок 1.6) [13].



1 – струмовипрямляч; 2 – кінематичний механізм; 3 – лічильний пристрій;

4 – камера; 5 – черв'ячна пара; 6 – турбінка; 7 – вузол для регулювання швидкості обертання турбіни

Рисунок 1.5 — Швидкісний витратомір з аксіальною турбінкою



1 – турбінка; 2 - фільтр

Рисунок 1.6 — Швидкісний витратомір з тангенційною турбінкою

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

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

При вимірюванні малих витрат швидкісними витратомірами з механічною передачею вимірювальної інформації виникають значні похибки, викликані механічним тертям. Ці похибки значно менші в індуктивних витратомірах турбінкового типу. Одним з різновидів таких витратомірів є витратомір з корпусом із не феромагнітного матеріалу, а в одну з лопаток турбіни вмонтований постійний магніт. При обертанні турбіни магніт індукує у вимірювальній обмотці, розміщеній у зовнішній частині корпуса, імпульси напруги, частота яких пропорційна кількості обертів турбіни [2].

### 1.1.6 Витратоміри обтікання (ротаметри)

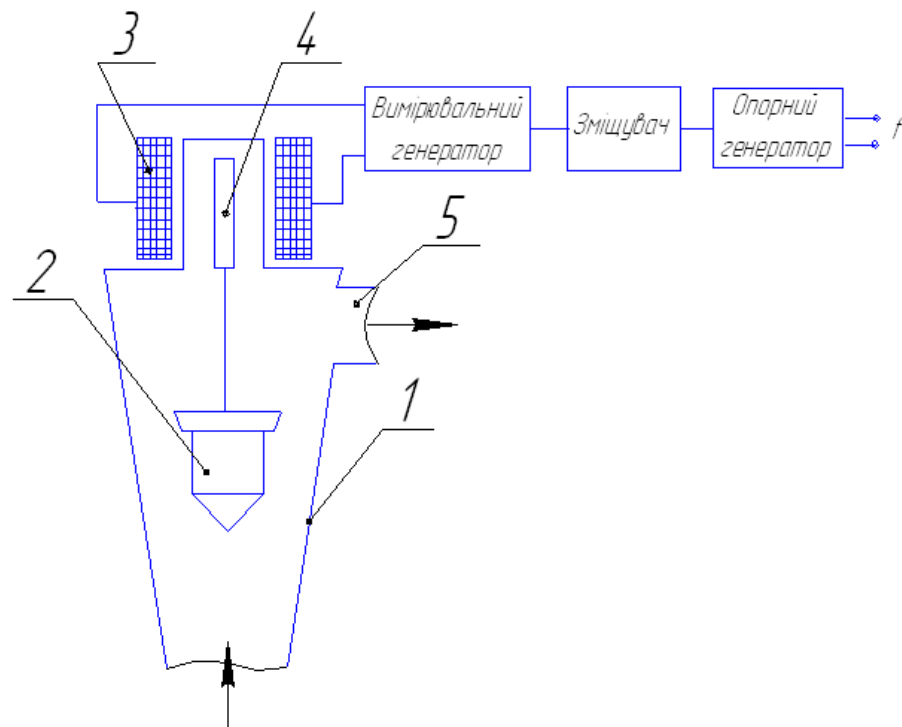
Серед витратомірів сталого перепаду тиску для вимірювання малих витрат рідини ( $0,01 \dots 16 \text{ м}^3/\text{год}$ ) та газів ( $0,01 \dots 40 \text{ м}^3/\text{год}$ ) у вертикальних трубопроводах найпоширенішими є ротаметри. Ротаметр складається з конічної (зазвичай скляної) трубки, всередині якої переміщується поплавков, шкала наноситься безпосередньо на скляну трубку. Її довжина знаходиться в межах від 70 до 600 мм, а діаметр від 1,5 до 100 мм. Поплавок зазвичай має циліндричну форму з нижньою конічною частиною та верхнім бортиком. Під дією струменя досліджуваної речовини поплавок піднімається вгору. В міру підняття поплавок площа кільцевого проміжку між ним і внутрішньою поверхнею труби збільшуватиметься до положення, при якому підйомна сила, що діє на поплавок, зрівноважиться силою тяжіння поплавка. Отже, певним витратам відповідатиме певна площа кільцевого проміжку, тобто певна висота підняття поплавка [4].

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

В ротаметрах з дистанційним вимірюванням використовують безконтактні вторинні перетворювачі переміщення поплавка в електричний або пневматичний сигнал. На рисунку 1.7 показано ротаметр з котушкою індуктивності, на виході отримують частотний сигнал. Зверху вимірювальної трубки 1 розташована котушка індуктивності 3, яка входить в схему вимірювального генератора, утворює паралельний коливальний контур [13].

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

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



- 1 – конусна трубка; 2 – поплавок; 3 – котушка індуктивності;  
4 – феромагнітний стержень; 5 – вихідний патрубок

Рисунок 1.7 - Ротаметр з вторинним перетворювачем

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

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

## 1.2 Порівняльний аналіз методів вимірювання витрати

Для визначення придатності певного методу витратометрії при вимірюванні витрати газу здійснимо порівняльну оцінку різних методів, результати яких зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика розглянутих витратомірів.

| Метод вимірювання | Діапазон вимірювання                   | Точність % | Умови використання                                                                                                | Складність виготовлення                                                                                                           | Вимоги монтажу                                     | Умови отримання, передачі на відстань результатів                                                                        | Можливість вимірювання витрати двофазових потоків |
|-------------------|----------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1                 | 2                                      | 3          | 4                                                                                                                 | 5                                                                                                                                 | 6                                                  | 7                                                                                                                        | 8                                                 |
| Вихоривий         | 3-300 м <sup>3</sup> /год - для рідини | 0,5; 1,5   | Не застосовують при малих швидкостях, використовують для вимірювання забруднених, агресивних і абразивних речовин | Вплив геометричних розмірів тіла обтікання на утворення вихорів, для підсилення вихідного сигналу застосовують два тіла обтікання | Використовують для труб діаметром від 150 до 300мм | Вимірюють частоту вихорових коливань, частоту пульсації тиску або частоту зриву вихорів із обидвох сторін тіла обтікання | Ні                                                |

Продовження таблиці 1.1

| 1                                                                                                    | 2                                                                                                                        | 3                     | 4                                                                                                                           | 5                                                                                                            | 6                                                                                                                                                                              | 7                                                                                                                                                                                              | 8   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Тепловий                                                                                             | до 6500<br>м <sup>3</sup> /год                                                                                           | 1,5; 3                | Для<br>вимірювання<br>витрати<br>потоків з<br>високою<br>теплопровід-<br>ністю                                              | Складність<br>градування                                                                                     | Тепло-<br>перство-<br>рювачі<br>розта-<br>шовуют<br>ь на<br>рівних<br>відста-<br>ннях від<br>нагрівач<br>а                                                                     | Теплова дія<br>на потік                                                                                                                                                                        | Так |
| Ультразвуковий                                                                                       | до 30-<br>300<br>м <sup>3</sup> /год -<br>для<br>рідини                                                                  | 0,5; 1                | Відсутність<br>твердих<br>домішок                                                                                           | Строго<br>симетрія<br>акустичних<br>каналів                                                                  | Розміще-<br>ння<br>акустич-<br>них<br>каналів<br>якнай-<br>ближче<br>один до<br>одного                                                                                         | Безконтак-<br>тне<br>вимірюва-<br>ння<br>витрати                                                                                                                                               | Ні  |
| Швидкіс-<br>ний:<br>з аксіаль-<br>ною<br>турбінко<br>ю<br><br>з<br>тангенцій<br>ною<br>турбінко<br>ю | 8,1·10 <sup>-4</sup><br>до<br>3640·10 <sup>-4</sup><br>м <sup>3</sup> /с<br><br>56·10 <sup>-4</sup><br>м <sup>3</sup> /с | 1; 1,5; 2<br><br>2; 3 | Обов'язкове<br>випрямлення<br>потoku                                                                                        | Центруванн<br>я турбінки<br>по осі<br>трубопро-<br>воду                                                      | Відсут-<br>ність<br>завих-<br>рень у<br>потоці<br><br>Для<br>труб від<br>15 до 50<br>мм                                                                                        | Залежність<br>обертів<br>турбінки<br>від<br>швидкості<br>потoku                                                                                                                                | Так |
| Метод<br>постій-<br>ного<br>перепаду<br>тиску                                                        | 0,01-<br>16м <sup>3</sup> /год<br>для<br>рідини<br>0,01-<br>40м <sup>3</sup> /год<br>для газу                            | 1,5; 2,5              | Простота<br>експлуатації<br>і ремонту,<br>стійкість при<br>вимірюванні<br>агресивних і<br>вибухонебез-<br>печних<br>речовин | Простота<br>конструкції,<br>уніфікована<br>конічна<br>трубка,<br>велика<br>різноманіт-<br>ність<br>поплавків | Строго<br>вертика-<br>льне<br>положе-<br>ння<br>трубки,<br>прямі<br>ділянки<br>трубо-<br>проводу<br>до<br>( $l_1 \geq 10D$ )<br>і після<br>( $l_2 \geq 5D$ )<br>рота-<br>метра | Зміна<br>положення<br>поплавка<br>при зміні<br>витрати,<br>перетворе-<br>ння<br>переміщу-<br>ння<br>поплавка в<br>електрич-<br>ний сигнал,<br>можливість<br>передачі<br>показів на<br>відстань | Так |

### 1.3 Постановка задачі на магістерську роботу

Ідеальний багатопроменевий акустичний витратомір повинен мати здатність вимірювати з необхідною точністю в повному діапазоні зміни витрат. Він крім того повинен мати додаткові атрибути, зокрема такі, як:

- надійність, потреба в мінімальному технічному обслуговуванні;
- мала чутливість до зміни умов навколишнього середовища, перш за все, температури;
- здатність функціонувати в широких межах зміни параметрів потоку.

Ще один важливий фактор, який обов'язково розглядається при проектуванні витратомірного пристрою - вартість. Незважаючи на поліпшення технічних характеристик, багатопроменеві акустичні витратоміри не можуть бути широко застосовані на практиці, якщо ціни не будуть відповідати ринковим і спів розмірними з цінами конкурентів.

Розробку пристрою для вимірювання витрати газу будемо здійснювати на основі ультразвукового часо-імпульсного методу. Проектований пристрій повинен забезпечувати вимірювання витрати із можливістю дистанційної реєстрації результатів вимірювання з досить високою точністю, відповідати світовому технічному рівню і бути конкурентоспроможним на ринку і, одночасно, бути недорогим в обслуговуванні і експлуатації.

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

- провести аналіз методів вимірювання витрати природного газу;
- здійснити теоретичне обґрунтування доцільності розробки багатоканального акустичного витратоміра;
- розробити основні конструктивні рішення при проектуванні витратоміра;
- виконати дослідження впливу розподілу швидкостей потоку в трубопроводі на похибку витратоміра;
- розробити метрологічне забезпечення для акустичного витратоміра.

## 2 РОЗРОБКА БАГАТОПРОМЕНЕВОГО АКУСТИЧНОГО ВИТРАТОМІРА

### 2.1 Розробка математичної моделі акустичного витратоміра

У лічильнику реалізований ультразвуковий імпульсний метод вимірювання витрати газу. Принцип дії лічильників оснований на вимірюванні різниці часу проходження ультразвукових коливань по прямому та зворотному (відносно потоку газу) напрямках [1].

Ультразвукові коливання генеруються та приймаються п'єзоелектричними перетворювачами. За допомогою комутатора п'єзоелектричних перетворювачів у кожному циклі виміру змінюється напрямок поширення ультразвукового імпульсу. Час поширення ультразвукових коливань залежить від швидкості ультразвуку в газі і швидкості потоку газу. Отримані з п'єзоелектричних перетворювачів електричні сигнали обробляються вимірювально-обчислювальним блоком за заданим алгоритмом [1].

При наявності витрати газу в трубопроводі відбувається, залежно від середньої по перетину трубопроводу швидкості потоку газу, зміна часу поширення ультразвукових імпульсів між п'єзоелектричними перетворювачами [2].

Час поширення ультразвукового імпульсу проти потоку газу  $t_1$  зі збільшенням швидкості потоку газу зростає, а час поширення ультразвукового імпульсу по напрямку потоку  $t_2$ , відповідно, зменшується. У вимірювально-обчислювальному блоці здійснюється вимірювання часу поширення  $t_1$  і  $t_2$  і обчислення по заданому алгоритму середньої швидкості потоку  $V_c$ , значення миттєвої витрати  $q_{v\ tp}$  і швидкості ультразвуку  $C$  по формулах (2.1), (2.2) [18]:

$$t_1 = \frac{L}{(C - V_c \cos \alpha)}, \quad (2.1)$$

$$t_2 = \frac{L}{(C + V_c \cos \alpha)}; \quad (2.2)$$

Віднявши рівняння від одне від одного отримаємо:

$$\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{2L}{C^2} \cdot \frac{V_c \cos \alpha}{1 - \left( V_c \frac{\cos \alpha}{C} \right)^2} \quad (2.3)$$

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

$$\Delta \tau = \frac{2LV_c \cos \alpha}{C^2}, \quad (2.4)$$

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

$$\Delta \tau = \frac{2LV_{oc}}{C^2} \quad (2.5)$$

де  $V_{oc}$  – усереднена осьова швидкість потоку.

Таким чином, різниця часу  $\Delta \tau$  прямо пропорційна швидкості  $V_{oc}$  або  $V_c$ .

На основі введених в пам'ять витратоміра значень геометричних розмірів (базова відстань  $L$  між випромінюючими поверхнями п'єзоелектричних перетворювачів, діаметр вимірювальної ділянки –  $D$ ) обчислюються значення швидкості ультразвуку  $C$  (м/с) при даній температурі і швидкості потоку  $V_c$  (м/с) (2.6), (2.7):

$$C = \frac{L}{2} \left[ \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_1} \right], \quad (2.6)$$

$$V_c = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left[ \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right], \quad (2.7)$$

де  $L$  – базова відстань між випромінюючими поверхнями п'єзоелектричних перетворювачів;  $\alpha$  – кут нахилу вісі п'єзоелектричних перетворювачів до вісі трубопроводу.

## 2.2 Моделювання впливу параметрів природного газу на роботу акустичного витратоміра

Моделювання впливу параметрів природного газу покажемо при дослідженні математичної моделі побудови ультразвукового витратоміра (рис.2.1).

Запишемо рівняння для швидкості газу по та проти потоку, використовуючи швидкість ультразвуку  $C$ :

$$V_1 = C - V_c \cdot \cos \alpha + \Delta V_T + \Delta V_P + \Delta V_\rho \quad (2.8)$$

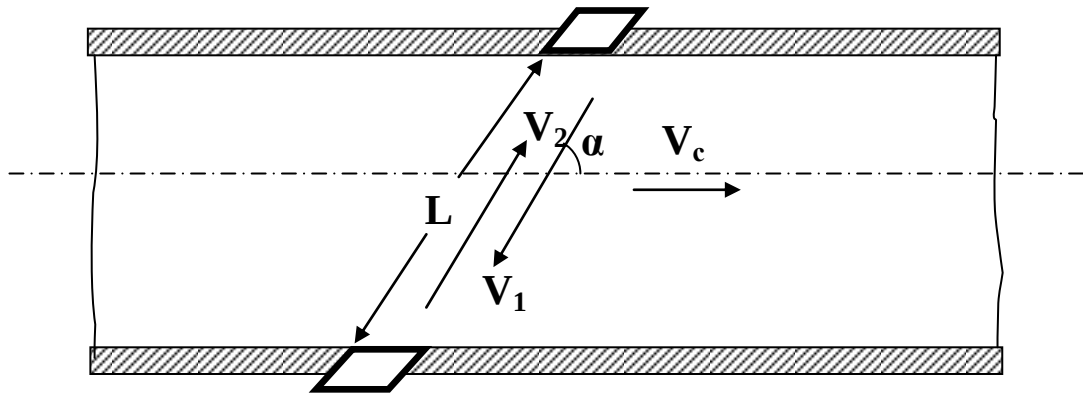
$$V_2 = C + V_c \cdot \cos \alpha + \Delta V_T + \Delta V_P + \Delta V_\rho \quad (2.9)$$

Віднімемо від (2.9) рівняння (2.8) і отримаємо:

$$V_2 - V_1 = C - C + V_c \cdot \cos \alpha - (-V_c \cdot \cos \alpha) + \Delta V_T + \Delta V_P + \Delta V_\rho - \Delta V_T - \Delta V_P - \Delta V_\rho$$

$$V_2 - V_1 = 2V_c \cdot \cos \alpha$$

$$V_c = \frac{V_2 - V_1}{2 \cos \alpha} \quad (2.10)$$



$V_1$  - визначена швидкість газу проти потоку;  $V_2$  - визначена швидкість газу по потоку;  $V_c$  - середня швидкість потоку газу;  $L$  - базова відстань між випромінюючими поверхнями п'єзоелектричних перетворювачів;  $\alpha$  - кут нахилу вісі п'єзоелектричних перетворювачів до вісі трубопроводу.

Рисунок 2.1 – Схема роботи ультразвукового витратоміра

Підставив  $V_1 = \frac{L}{t_1}$ ;  $V_2 = \frac{L}{t_2}$  в рівняння (2.10) отримаємо:

$$V_c = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right) \quad (2.11)$$

З рівняння (2.11) видно, що додаткові похибки, які виникають внаслідок впливу параметрів природного газу (температура, тиск, густина), при розв'язанні рівняння взаємно компенсуються та в кінцевому результаті відсутні. Це значить, що при реалізації ультразвукового імпульсного методу, на якому побудована робота ультразвукового витратоміра, вплив параметрів природного газу відсутній. Це є одна з найбільших переваг ультразвукових витратомірів.

### **2.3 Розробка принципів схемних рішень побудови акустичних витратомірів**

При детальному огляді ультразвукового методу вимірювання витрати газу різними ультразвуковими витратомірами можна виділити два способи розташування п'єзоелектричних перетворювачів: аксіальне розташування і похиле розташування.

При аксіальному розташуванні п'єзоелектричні перетворювачі встановлюються один навпроти одного вздовж вісі трубопроводу (рис. 2.2).

До переваг такого розташування можна віднести наступне:

- здійснюється вимірювання швидкості потоку, а не її проекцію;
- можливість точного вимірювання швидкості при не великих базових відстанях між п'єзоелектричними перетворювачами.

Недоліком такого розташування є те, що п'єзоелектричні перетворювачі знаходяться всередині потоку і впливають на його структуру. Також, на великих швидкостях потоку за п'єзоелектричним перетворювачем, який стоїть першим, виникає зона нестабільного напрямку потоку, в якій результуючий вектор швидкості постійно змінює свій напрямок. Чим вище швидкість потоку, тим більше ця зона не стабільності. Для боротьби з цим

недоліком потрібно збільшувати базову відстань між п'єзоелектричними перетворювачами, а отже – збільшувати геометричні розміри витратоміра [2].

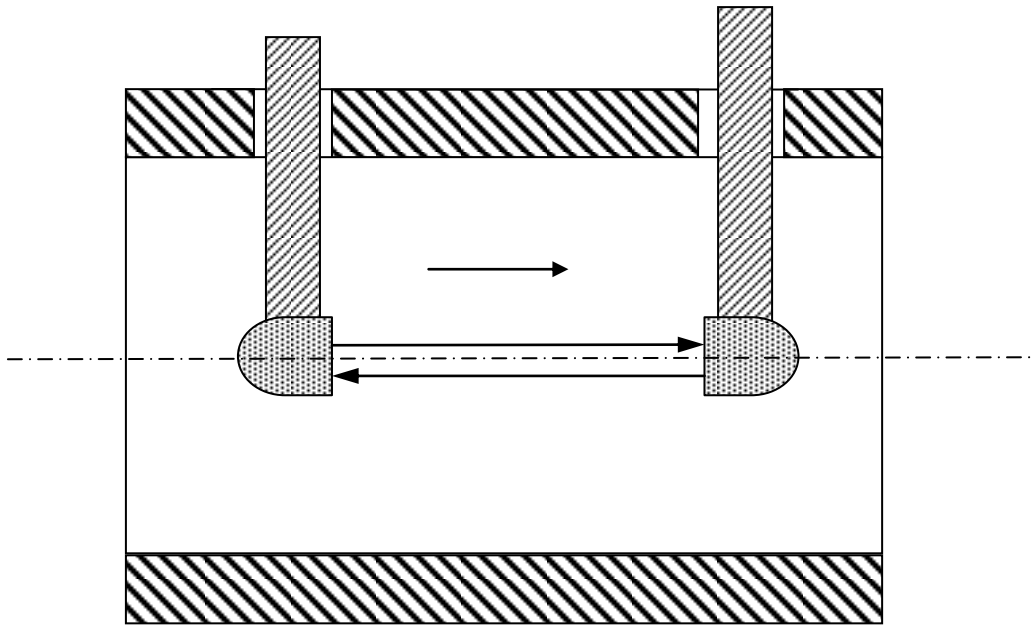


Рисунок 2.2 – Аксіальне розташування п'єзоелектричних перетворювачів

У зв'язку з цим можна сказати, що використання витратомірів з таким розташуванням п'єзоелектричних перетворювачів буде ефективним для роботи на низьких швидкостях потоку і малих тисках.

При похилому розташуванні п'єзоелектричних перетворювачів можливе встановлення їх на прямих траєкторіях та для роботи на відбиття.

При використанні методу роботи на відбиттях п'єзоелектричні перетворювачі встановлюються в стінці трубопроводу і використовується відбиття від протилежної стінки (рис. 2.3).

До переваг такого розташування можна віднести, що при близькому розташуванні п'єзоелектричних перетворювачів базова відстань між ними може бути великою, що дозволяє з високою точністю вимірювати час проходження сигналу. Недоліком цього методу встановлення п'єзоелектричних перетворювачів є те, що при проходженні відбиття сигнали спотворюються; згасання при проходженні пристінкових шарів достатньо велике, що потребує застосування особливих сигналів (частотно-модульованих, фазо-модульованих) або треба збільшувати потужність

випромінювання, що несе за собою збільшення енергозатрат. Окрім цього, пред'являються високі вимоги до відбиваючої поверхні – не повинно бути ніякого бруду, парафіну і т.д. Саме цьому застосування такого методу розташування п'єзоелектричних перетворювачів буде ефективним тільки на дуже чистих газах, а також при температурах більше нуля, так як при низьких температурах можливе випадання інею на відбиваючій стінці [4].

При розташуванні п'єзоелектричних перетворювачів для роботи на прямих траєкторіях (рис. 2.4) можна виділити наступні переваги:

- використання простих сигналів;
- не висока потужність;
- низьке енергоспоживання;
- високий рівень вибухозахисту.

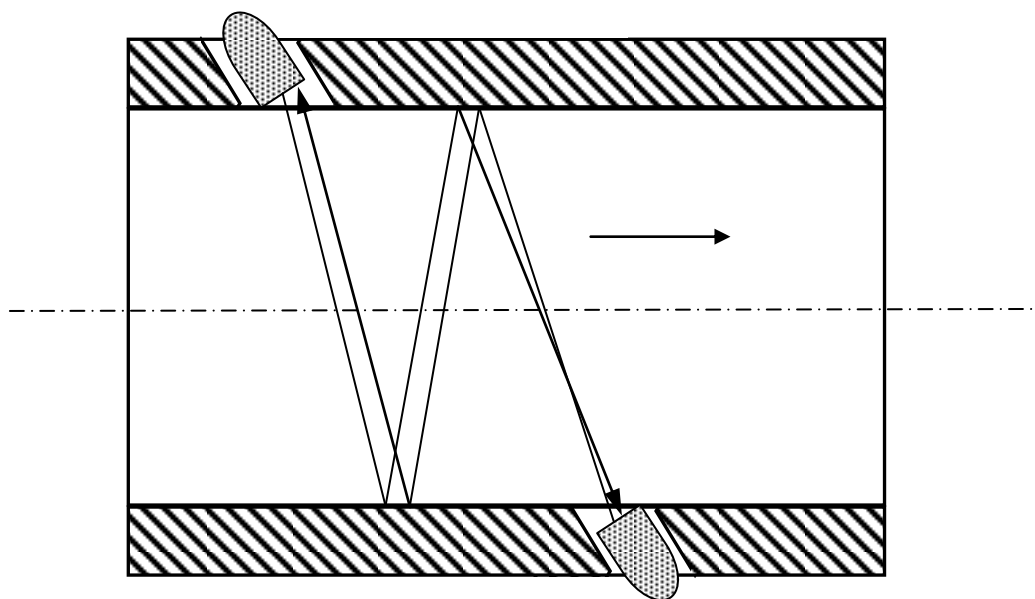


Рисунок 2.3 – Похиле розташування п'єзоелектричних перетворювачів для роботи на відбиттях

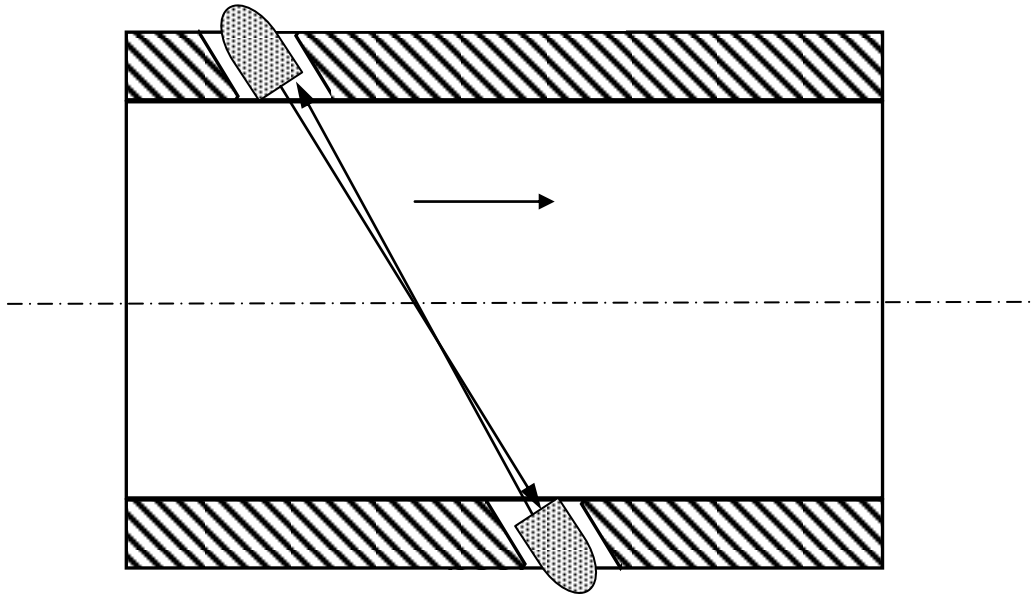


Рисунок 2.4 – Похиле розташування п'єзоелектричних перетворювачів для роботи на прямих траєкторіях

Недоліком цього способу розташування п'єзоелектричних перетворювачів є те, що використовуються малі базові відстані. Через це неможливо використовувати таке розташування на трубопроводах малого діаметру.

Сьогоднішня елементна база дозволяє вимірювати час з високою точністю, що дозволяє використовувати таке розташування п'єзоелектричних перетворювачів на трубопроводах діаметром 80 та вище.

Враховуючи сказане вище, при розробці витратоміра обрано саме розташування п'єзоелектричних перетворювачів на прямих траєкторіях. Конструктивно витратомір буде складатися з котушки з приєднувальними фланцями, в стінки якої врізаються п'єзоелектричні перетворювачі. Формування і обробка акустичних сигналів здійснюється в окремому блоці обробки інформації, живлення якого у зв'язку з низьким енергоспоживанням, можливо організувати від батареї.

В зв'язку з тим, що похиле розташування п'єзоелектричних перетворювачів дає можливість застосовувати багатоканальність,

розроблюваний витратомір буде багатоканальним, в якому п'єзоелектричні перетворювачі розташовані на хордах. Обґрунтування вибору місць встановлення п'єзоелектричних перетворювачів досліджується в розділі 3.

## 2.4 Розрахунок конструктивних параметрів акустичного витратоміра

Одними з основних параметрів акустичного витратоміра є базова відстань  $L$  між п'єзоелектричними перетворювачами і  $\cos$  кута нахилу вісі п'єзоелектричних перетворювачів до вісі трубопроводу. Для розрахунку оберемо витрату 0,16 м/с. Швидкість ультразвуку в газі становить 420 м/с.

$$V_c = 420 \text{ м/с}; V_{\pi} = 0,16 \text{ м/с}; \Delta t = 10^{-6}$$

Різницю часу позначимо  $\Delta t$ :

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (2.12)$$

Розпишемо час  $t_1$  і час  $t_2$ :

$$t_1 = \frac{L}{V_c - V_{\pi}}; t_2 = \frac{L}{V_c + V_{\pi}} \quad (2.13)$$

Підставимо значення (2.12) у рівняння (2.12) і отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta t &= L \left( \frac{1}{V_c - V_{\pi}} - \frac{1}{V_c + V_{\pi}} \right) \\ \Delta t &= L \left( \frac{1}{420 - 0,16} - \frac{1}{420 + 0,16} \right) = L \left( \frac{1}{419,84} - \frac{1}{420,16} \right) = \\ &= L(0,002382 - 0,002380) = L \cdot 0,000002 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot L \end{aligned}$$

Так як за умовою  $\Delta t$  не повинно перевищувати  $10^{-6}$ , то тоді щоб виконувалася умова -  $L = 0,5$ .

Також одним з основних параметрів, який повинно розрахувати є  $\cos$  кута нахилу вісі п'єзоелектричних перетворювачів до вісі трубопроводу. Розрахуємо  $\cos$  для трубопроводів діаметром 100 мм та 150 мм.

$$D = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$$

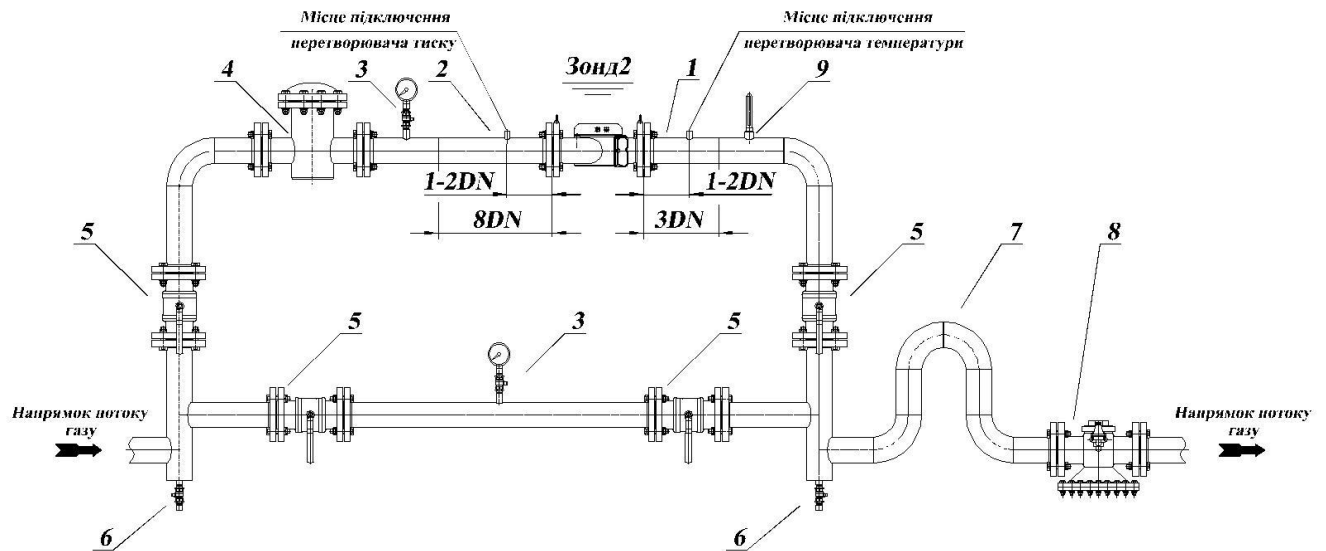
$$D = 150 \text{ мм} = 0,15 \text{ м}$$

$$\cos \alpha = \frac{D}{L} = \frac{0,1}{0,5} = 0,2$$

$$\cos \alpha = \frac{D}{L} = \frac{0,15}{0,5} = 0,3$$

## 2.5 Розробка схеми вузла обліку з акустичним витратоміром

На розробленій схемі (рис. 2.5) показана реалізація з застосуванням багатопроменевого акустичного витратоміра на вузлі обліку газу. Газ потрапляє до системи зліва направо, як позначено на схемі «Напрямок потоку газу». При закритій байпасній лінії, газ потрапляє на фільтр, який повинен обов'язково встановлюватись на вузлі обліку. Після очищення на фільтрі 4 газ потрапляє до витратоміра «Зонд-2», перед яким знаходиться пряма ділянка довжиною 8 ДУ і встановлений давач відбору тиску. Після проходження газу через лічильник, його кількість, яка була поражена лічильником, передається на коректор (входить в комплект витратоміра), де значення приводяться до стандартних умов. На цій схемі також показано редуктор 8, через наявність якого повинно бути чотири повороти трубопроводу 7 до лічильника, щоб акустичний сигнал не забивався шумом роботи редуктора. З виходу редуктора газ далі подається до магістрального трубопроводу. Якщо потрібно зняти витратомір на перевірку або на ремонт, за допомогою закриття двох засувок 5 у вимірювальній лінії закривається лінія з витратоміром і шляхом відкриття двох засувок 5 у байпасній лінії газ іде через неї, завдяки чому не відбувається припинення газопостачання.



- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1- пряма ділянка трубопроводу 3 DN; | 5- засувка;                     |
| 2- пряма ділянка трубопроводу 8 DN; | 6- випуск бруду;                |
| 3- манометр;                        | 7- чотири повороти трубопроводу |
| 4- фільтр;                          | 8- редуктор;                    |
|                                     | 9- термометр.                   |

Рисунок 2.5 – Схема вузла обліку газу на базі багатопроменевого акустичного витратоміра

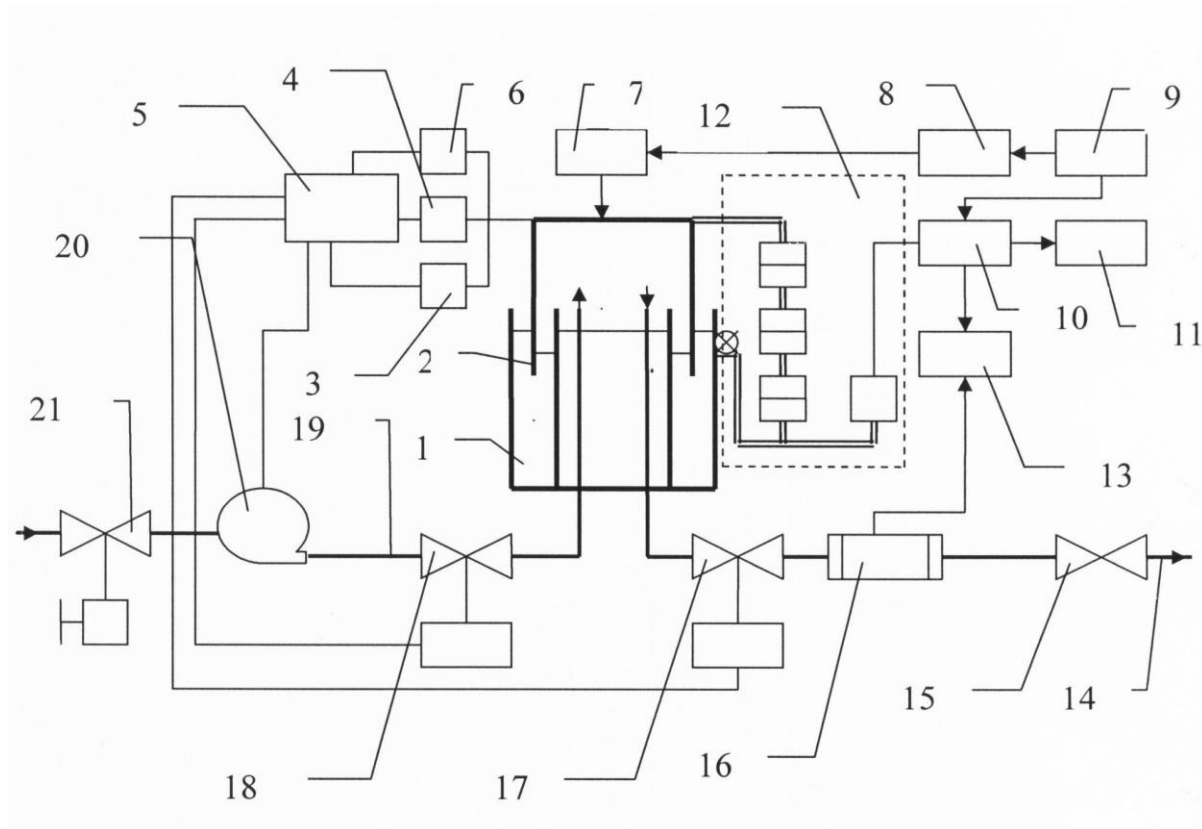
## **З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНОГО ВИТРАТОМІРА**

### **3.1 Аналіз еталонних установок для метрологічних досліджень витратомірів**

#### **3.1.1 Еталонні установки дзвонового типу**

Установка складається з дзвону 2 (рис. 3.1), який своєю нижньою частиною занурюється в резервуар з рідиною 1, що називається витіснювачем. В початковий період випробувань лічильників чи витратомірів здійснюється подача газу (повітря) під дзвін при відкритому запірному органі 18 від стороннього джерела витрати 20, завдяки чому дзвін піднімається [6]. По закінченні наповнення мірника до необхідного об'єму запірний орган в трубопроводі подачі газу закривають, далі дзвоновий мірник витримують в такому положенні для стабілізації характеристик робочого середовища. При відкритті запірного органу 17 в трубопроводі, що з'єднує піддзвоновий простір з приладом 16, що повіряється, починається витіснення газу з-під дзвону через цей прилад. Об'єм витісненого газу відраховується за контрольною лінійкою 12. Після цього запірний орган 17 закривають. За різницею показів відлікового пристрою приладу та відомим значенням контрольного об'єму, що пройшов через прилад, визначають похибку приладу. При випробуванні витратомірів пропущений об'єм газу осереднюють за час його витіснення і зрівнюють з показами витратоміра [1]. Основним недоліком дзвонових установок є те, що з їхнього вимірювального циклу не вилучений неусталений режим роботи як засобу вимірювальної техніки (ЗВТ), що повіряється, так і самої дзвонової установки. З метою зменшення впливу даного фактора на точність таких установок приходиться збільшувати протяжність вимірювального циклу. Це, в свою чергу, вимагає створення громіздких і дорогих за ціною установок із значним об'ємом

мірника, до 60 м. Тому в останній час дзвонові установки знаходять застосування тільки для калібрування витратомірів і лічильників газу на порівняно невеликих витратах, в тому числі при градуюванні та калібруванні побутових лічильників газу [6].



1- витіснювач; 2- дзвоновий мірник; 3 - 9 - засоби контролю та пристрої керування роботою; 10, 11, 13 - система обробки даних; 12 - пристрій індикації лінійного переміщення дзвонового мірника; 16 - пристрій, що атестується; 15, 17, 18, 21 - регулювальні засувки; 14, 19 - трубопроводи; 20 - нагнітальний пристрій.

Рисунок 3.1 - Схема еталонної установки дзвонового типу

Особливістю дзвонових установок є: робота по дискретно-динамічному методу; підвищена точність; широкий діапазон відтворюваних об'ємів та об'ємних витрат газу (до 1:1000) [6].

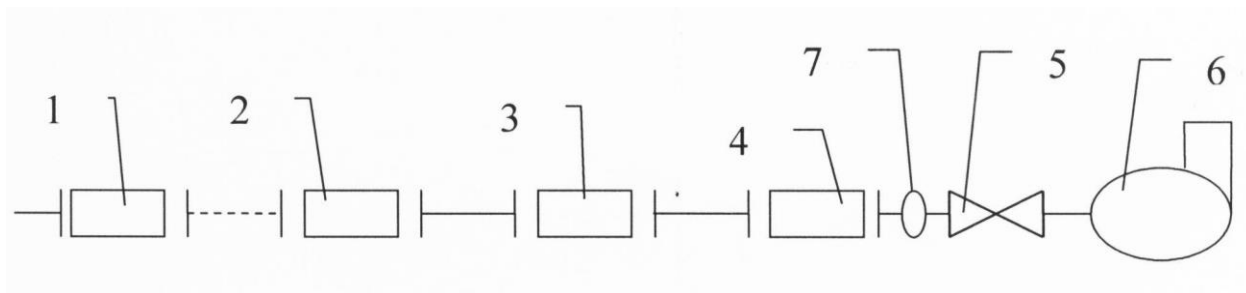
### 3.1.2 Еталонні установки із робочими еталонами

Принцип дії еталонних установок з обертовими взірцевими пристроями полягає у виділенні із потоку газу (повітря), що задається ротаційним генератором витрати 6, за допомогою зразкового пристрою 4, контрольного об'єму газу (рис. 3.2). При передачі одиниці об'єму та об'ємної витрати здійснюється збір інформації з приладів 1,2,3, що випробовуються, та зразкового пристрою 4, а також значення температур та тисків робочого середовища на кожному з досліджуваних пристроїв [8].

При цьому вимірюваний контрольний об'єм газу визначається як об'єм, що пройшов через взірцевий пристрій. За різницею показів відлікових пристроїв 1-3 та 4 з врахуванням відповідних поправок щодо температури та тиску визначають похибки пристроїв, які калібруються [8].

Застосовуються два типи установок для калібрування з використанням зразкових лічильників газу:

- установки, в яких зразковий пристрій знаходиться після пристроїв, що випробовуються чи калібруються;
- установки, в яких зразковий пристрій знаходиться перед пристроями, що випробовуються чи калібруються.



1, 2, 3 - пристрій, що калібрується; 4 - зразковий пристрій; 5 - регулювальний клапан; 6 - джерело витрати; 7 - дросель

Рисунок 3.2 - Схема еталонної установки з робочими еталонами

До зразкових пристроїв належать особливим способом відібрані роторні та барабанні лічильники газу, що випускаються як робочі засоби вимірювань, але спеціально підготовані та атестовані до використання як зразкові [20].

Для покращення умов та впровадження автоматизації процесу калібрування вони забезпечуються спеціальними відліковими пристроями і (або) перетворювачами об'ємів, що протікають через них, в електричні імпульсні сигнали. Діапазон вимірювань таких лічильників залежить від характеру зміни кривої похибок від витрати. Похибка вимірювань зразкових лічильників в більшості випадків не перевищують  $\pm 0,5\%$  [2].

Похибка, як правило, зумовлена перетоками в щілинах між роторами та між роторами і корпусом. Значною мірою на похибку вимірювань роторних лічильників газу має вплив тертя в синхронізуючих шестернях та в підшипниках. Це особливо позначається на мінімальних витратах. Зі збільшенням витрат крива залежності похибки роторних лічильників від витрати зростає до витрат  $(0,2-0,5) Q_{\max}$  і стабілізується в діапазоні витрат від  $0,5 Q_{\max}$  до  $Q_{\max}$ . Зміна кривої похибок пояснюється тим, що, з одного боку, перетоки повітря в щілинах непостійні і зростають внаслідок збільшення різниці тиску в них при зростанні витрат, а з другого, потік в щілинах при збільшенні швидкості обертання роторів все більше залежить від відносної швидкості обертання їх відносно корпусу. За рахунок цього частина вимірюваного повітря повертається на вхід лічильника і вимірюється повторно. Величина витрат в щілинах та кількість повітря, що повертається на вхід лічильника, значною мірою залежить від величини щілини, густини вимірюваного середовища та характеру потоку в щілині (ламінарний чи турбулентний) [1].

Недоліком таких установок є невисока точність відтворення об'єму та об'ємних витрат.

Особливістю установок із робочими еталонами є: 1) широкий діапазон відтворюваних об'ємів та об'ємних витрат газу; 2) можливість оптимізації градууювально-калібрувального циклу.

### **3.1.3 Еталонні установки трубопоршневого типу**

Для калібрування лічильників газу можна використовувати також трубопоршнєві установки, які можуть бути стаціонарними або пересувними. Пересувні установки з успіхом використовуються для калібрування лічильників та витратомірів газу на місці їх встановлення без демонтажу і без перерви в подачі вимірюваної речовини. Для цього на трубопроводі (рисунок 3.3), де встановлюється прилад 1, що підлягає калібруванню, повинна бути запірна засувка 3 і з обох її сторін два відводи, що служать для приєднання трубопоршневої установки і закриваються своїми засувками 2 і 4 [7].

Установка для калібрування складається з ділянки труби 7 довжиною декілька метрів, внутрішня поверхня якої повинна бути добре обробленою для того, щоб була забезпечена постійність площі січення по всій довжині труби. На обох кінцях вимірювальної ділянки труби встановлені шляхові давачі 6 і 10 (контактного чи безконтактного типу), які дають електричний сигнал в момент проходження повз них в середині труби поршня 9, або кулі, що переміщується під тиском вимірюваної речовини. Застосовують як поршні, оснащені ущільнюючими манжетами, так і поршні, які рухаються вільно.

В останньому випадку зазор між внутрішньою поверхнею труби і рухомим поршнем чи парою повинен бути мінімальним. Об'єм вимірюваної ділянки труби визначають з максимально можливою точністю. При проведенні калібрування, до лічильника необхідно приєднати тахометричний генератор імпульсів, наприклад обтюраторний диск з прорізами, фотоелементом і освітлювачем.

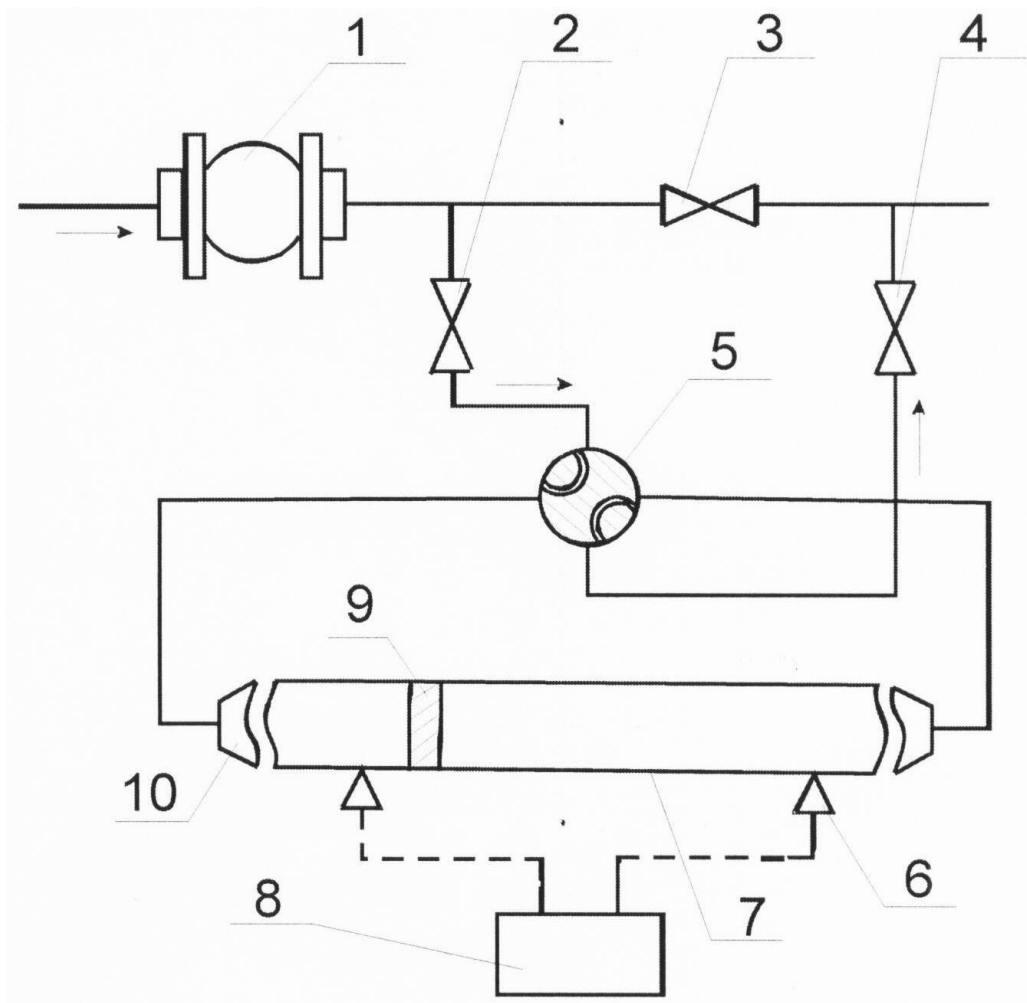
Імпульси підраховуються електричним лічильником 8 тільки в період проходження поршнем вимірювальної ділянки труби. Лічильник за допомогою електричного реле під'єднують до генератора імпульсів в момент спрацювання першого шляхового давача і від'єднують в момент спрацювання другого давача. Чотирьохходовий кран 5 служить для забезпечення переміщення поршня в обох напрямках.

Висока точність вимірювань забезпечується високою точністю внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, завдяки чому досягається рівномірний рух поршня, та використанням безконтактних детекторів його положення.

Весь процес калібрування автоматизований, збір та обробка інформації проводиться за допомогою ЕОМ. Замість повітря в установках такого типу можуть використовуватися реальні гази. Відносна похибка відтворення об'ємних витрат даною установкою становить 0,1-0,2%. Головна перевага трубопоршневих установок в мінімальній межі діапазону відтворених витрат, а також можливість калібрування засобів вимірювальної техніки при високих тисках до 10 МПа. До переваг рідинних установок можна віднести відсутність поршневого розділювача, що механічно переміщується [20].

Недоліками таких установок є вузький діапазон витрат газу, а також незгладжувані пульсації тиску та його великі втрати на поршнях, що приводить до нерівномірності ходу, що відповідно впливає на стабільність відтворення витрати. Іншим недоліком таких установок є низька ефективність використання об'єму каліброваного резервуара, а також необхідність застосування спеціальних пристроїв для виключення розчинення газу в рідині.

Особливістю установок трубопоршневого типу є: робота за дискретно-динамічним методом; підвищена точність; широкий діапазон відтворюваних об'ємів та об'ємних витрат газу (1:500); можливість оптимізації градууювально-калібрувального циклу шляхом використання реверсивності установки; можливість функціонування на природному газі [1].



1 - прилад, що підлягає калібруванню; 2 - 4 - засувки; 5 - чотирьохходовий кран; 6, 10 - шляхові давачі; 7 - труба; 8 - електричний лічильник імпульсів; 9 - поршень.

Рисунок 3.3 – Схема трубопоршневої калібрувальної установки

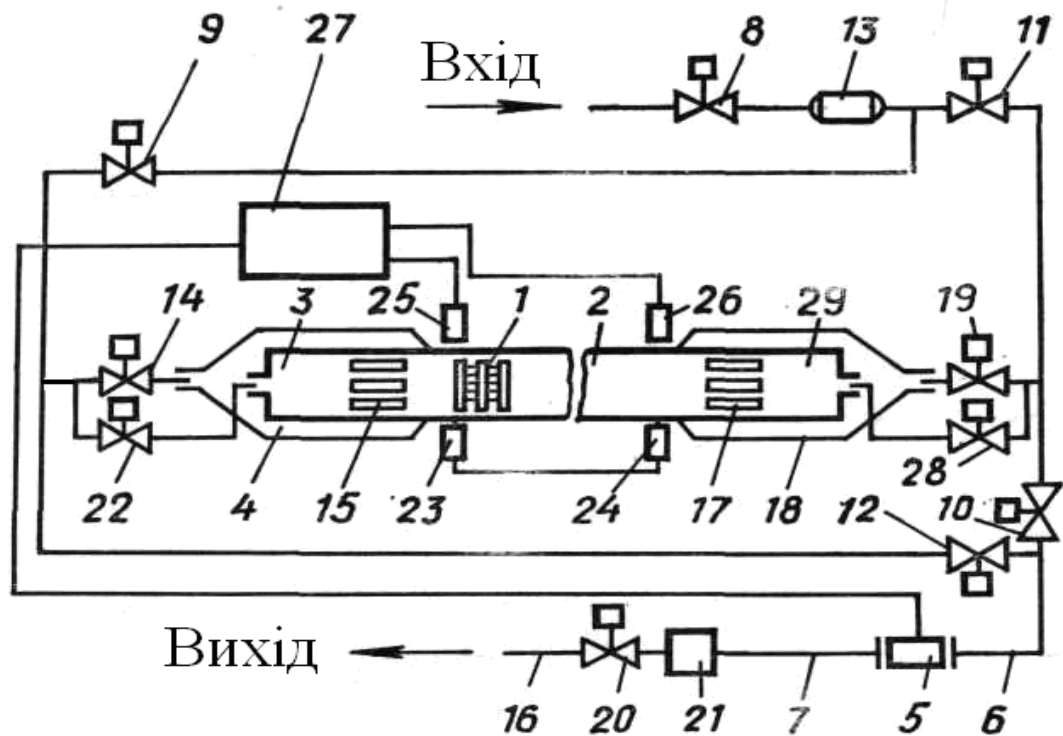
В СРСР в кінці 80-х років також приділялася увага дослідженню роботи витратомірів і лічильників газу на реальному природному газі і з цією метою галузевою лабораторією метрологічного забезпечення вимірювань витрати газу Івано-Франківського інституту нафти і газу спільно з УГГ «Дніпрогаз» створена поршнева витратовимірювальна дискретно-динамічна установка вищої точності РПДУ-41пг [7]. Вона призначена для точного відтворення і вимірювання витрати газу під високим тиском в процесі

градування і перевірки прямим методом промислових витратомірів, в першу чергу витратомірів змінного перепаду тиску із звужуючим пристроєм.

Основні вузли установки: вимірювальний трубопровід, поршневий неушільнений розділювач типу «дисковий пакет», запускаючі пристрої, система збору і обробки вимірювальної інформації. Принцип дії установки РПДУ-41ПГ (рис. 3.4) полягає в наступному. У початковому стані поршневий розділювач 1 виведений з вимірювального трубопроводу 2 і знаходиться в камері лівого пуско-приймального пристрою 4. Після монтажу і герметичного приєднання до установки випробовуваного приладу 5 з його власними прямолінійними ділянками 6 і 7 відкриваються дистанційно керовані засувки 8, 9, 10 (засувки 11, 12, 22, 28 закриті). Потік газу під високим статичним тиском з газопроводу поступає в витратовимірювальну установку через засувку 8 і далі через фільтр 13, засувку, осередну засувку — в кільцевий канал між камерою і корпусом лівого пуско-приймального пристрою, а звідти через подовжні прорізи 15 в камері — у вимірювальний трубопровід. Пройшовши трубопровід, потік через подовжні щілини 17 правого запускаючого пристрою, засувки поступає до випробовуваного приладу 5, а через регулятор тиску і засувку 20 — в газопровід низького тиску [7].

За допомогою регулятора 21 і засувки 20 задається необхідне значення витрати газу і забезпечується такий же тиск на виході з калібрувальної системи. Запуск поршневого роздільника в трубопровід 2 здійснюють відкриттям засувки 22 малого діаметру після досягнення в системі сталого режиму роботи. Під дією перепаду тиску, що виникає на засувці 14, розділювач, що знаходиться в камері 3, виштовхується з неї і захоплюється потоком газу у вимірювальний трубопровід. Тут він в потоці газу проходить мимо оптичних лазерних детекторів. Під час короткочасного затінювання фотоприймачів об'єму газу. Сюди ж подається інформація від випробовуваного приладу 5. Потім роздільник уловлюється в правому пуско-приймальному пристрої 18. Після цього алгоритм роботи установки

повторюється за умови зворотного напрямку руху поршневого розділювача і при цьому напрям потоку газу через випробувальний прилад не змінюється [21].



1 – поршневий розділювач; 2 – вимірювальний трубопровід; 3, 29 – камери запускаючого пристрою відповідно ліві і праві; 4, 18 – пуско-приймальні пристрої відповідно лівий і правий; 5 – випробовуваний прилад; 6, 7 – прямолінійні ділянки трубопроводу до і після випробовуваного приладу; 8, 9, 10 – дистанційно керуючі засувки; 11, 12, 14, 19, 20, 22, 28 – засувки; 13 – фільтр; 15, 17 – подовжні прорізи лівого і правого пуско-електричні імпульси поступають в систему збору і обробки вимірювальної інформації 27, які формують команди початку і кінця відліку контрольного приймального пристрою; 16 – газопровід низького тиску; 21 – регулятор витрати; 23, 24 – газові лазери; 25, 26 – фотоприймачі газових лазерів; 27 – система збору і обробки вимірювальної інформації.

Рисунок 3.4 – Схема поршневої дискретно-динамічної установки з неущільненим поршневим розділювачем

Про похибку випробовуваного приладу (витратоміра) судять по різниці показів випробовуваного приладу і витратовимірювальної установки як зразкового засобу вимірювання.

В установці передбачені два режими роботи — автоматичний і ручний, а також можливість виведення вимірювальної інформації на пристрій друкування.

Для вимірювання і сигналізації стабільності витрати основного потоку установка забезпечена флуктуометром витрати, який встановлений на її виході перед випробовуваним приладом. Нижче в таблиці 3.1 подаються технічні характеристики установки РПДУ-41ПГ.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики установки РПДУ-41ПГ

| Найменування параметра                                                                              | Значення параметра           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Метод вимірювання                                                                                   | дискретно-динамічний         |
| Робоче середовище                                                                                   | природний газ                |
| Межі вимірювання (за умови приведення до стандартних умов), м <sup>3</sup> /с (м <sup>3</sup> /год) | 0,14...41,66 (500...150 000) |
| Контрольний об'єм, м <sup>3</sup>                                                                   | 8,997                        |
| Робочий тиск, Мпа                                                                                   | не більше 1,5                |
| Тривалість вимірювального циклу, с                                                                  |                              |
| при витраті:                                                                                        |                              |
| максимальній                                                                                        | 4                            |
| мінімальній                                                                                         | 40                           |
| Похибка для режимів вимірювання, %                                                                  |                              |
| об'єму газу (за робочих умов)                                                                       | ±0,25                        |
| витрати газу (за робочих умов)                                                                      | ±0,3                         |
| Габаритні розміри, м                                                                                | 32×15×4,5                    |
| Маса, кг                                                                                            | 150 000                      |

Аналогів цієї установці і понині немає в світовій практиці і метрологічна атестація підтвердила її працездатність. Однак з плином років вона потребує технічного переоснащення технологічного обладнання і фінансування зі сторони зацікавлених державних чи акціонерних організацій на її модернізацію та метрологічну атестацію. Реконструкція цієї установки дозволила би здійснювати метрологічну атестацію і повірку робочих еталонів на природному газі [21].

### **3.2 Дослідження впливу розподілу швидкостей потоку в трубопроводі на похибку витратоміра**

Згідно існуючій теорії розподіл швидкостей при обліку газу в трубопроводах відповідає основним положенням теорії гідродинаміки і може характеризуватись ламінарним або турбулентним режимом (рис. 3.1). В реальних вузлах обліку підготовлений потік, який показаний на рис. 3.1(а) забезпечити дуже складно через наявність поблизу витратоміра поворотів, засувок, фільтрів і т.д. Тому при визначенні середньої швидкості потоку за малих витрат, що безумовно має місце при розширенні діапазону вимірювання витратомірів в сторону до мінімальних значень, в трубопроводі звичайно береться розподіл швидкостей, показаних на рис. 3.1(б).

Метою дослідницької частини дипломного проекту була побудова реального розподілу швидкостей в трубопроводах діаметром 80, 100, 150 мм. Вимірювання швидкостей проводились при розміщенні п'єзоелектричних перетворювачів в трубопроводі на хордах і діаметрі на установці УПЛГ-2500 з входної прямою ділянкою 8 ДУ, що відповідає основним вимогам до вузлів обліку з ультразвуковими витратомірами. Установка УПЛГ-2500 розроблена Івано-Франківським СКБ засобів автоматизації (м. Івано-Франківськ) і призначена для повірки лічильників газу на діапазони витрат до 2500 м/год з використанням повітря як робочого середовища. П'єзоелектричні

перетворювачі для діаметрів 80 мм, 100 мм встановлюються як показано на рис. 3.2, а для діаметру 150 мм – як показано на рис. 3.3.

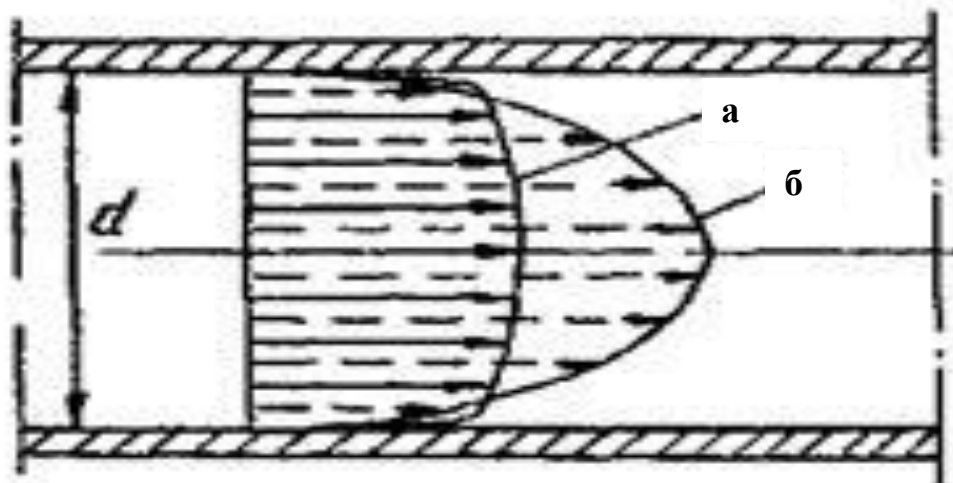


Рисунок 3.1 – Епюра швидкостей всередині трубопроводу для турбулентного (а) і ламінарного (б) потоків

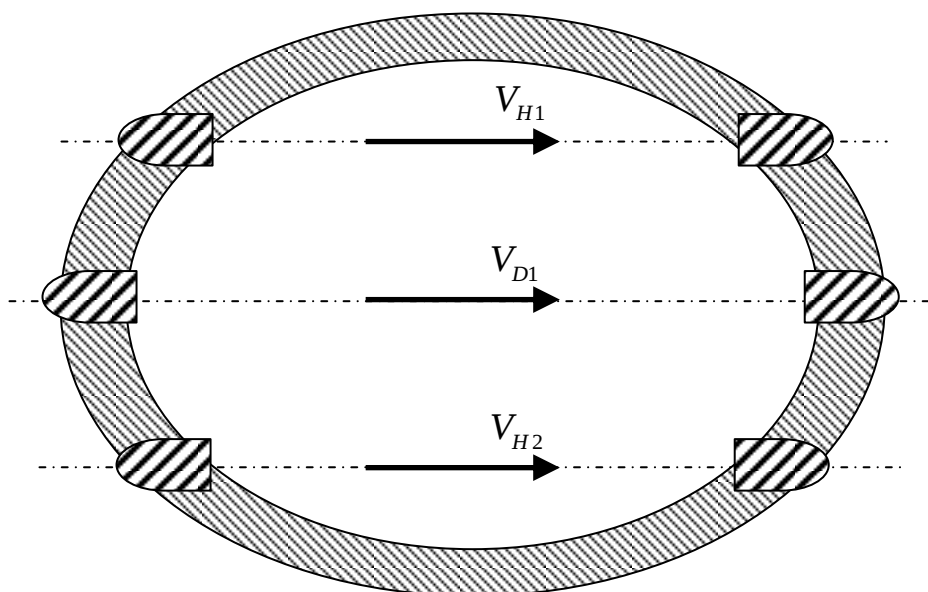


Рисунок 3.2 – Схема розташування п'єзоелектричних перетворювачів для діаметрів трубопроводу 80 мм та 100 мм

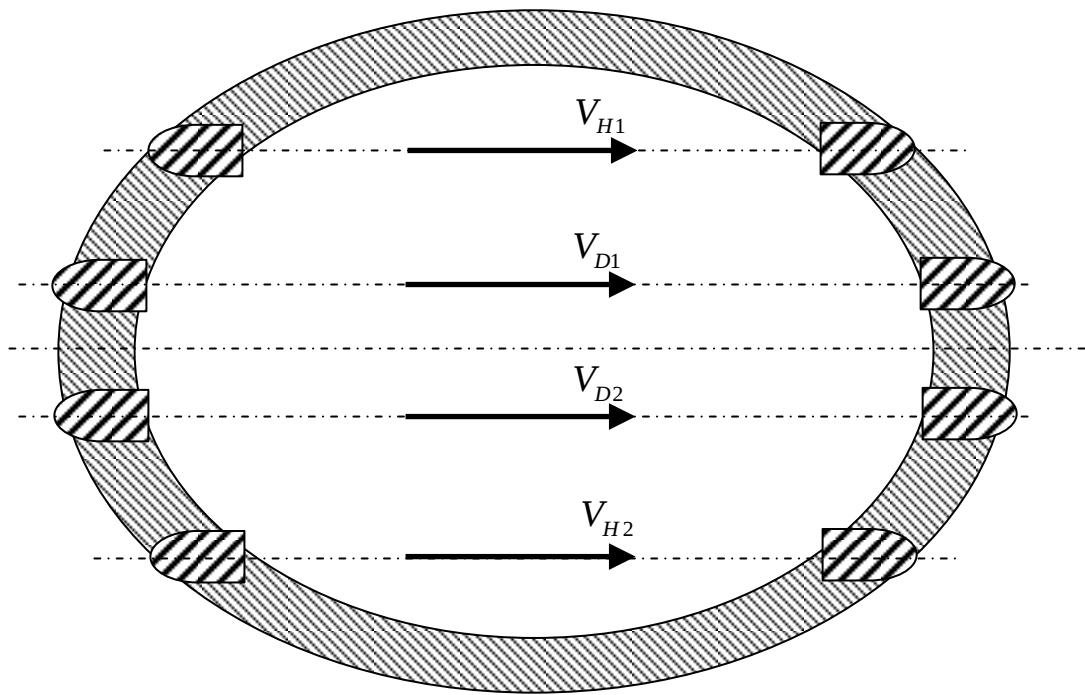


Рисунок 3.3 – Схема розташування п'єзоелектричних перетворювачів для діаметра трубопроводу 150 мм

Результати вимірювань на трубопроводах діаметром 80, 100, 150 мм наведені в таблицях і графіках, які подані нижче, і стосуються двох значень витрат  $Q_{\max}$  і  $0,7Q_{\max}$ , які конкретизовані в назві таблиць. Значення швидкостей приведені усередненими за 2 секунди. Окрім вимірних значень, в таблицях і графіках наведені обчислені значення середніх швидкостей на хордах  $V_{\text{Hсер}}$  і на діаметрі  $V_{\text{Dсер}}$ , а також середня швидкість по перерізу трубопроводу  $V_{\text{HD}}$  (рис. 3.2, 3.3).

Таблиця 3.1 – Значення швидкостей в трубопроводі діаметром 80 мм при витраті  $250 \text{ м}^3/\text{год}$

| Час | $V_{H1}$ | $V_{H2}$ | $V_{Hcep}$ | $V_{D1}$ | $V_{Dcep}$ | $V_{HD}$ |
|-----|----------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 2   | 16,66    | 15,98    | 16,32      | 15,95    | 15,95      | 16,14    |
| 4   | 16,62    | 15,85    | 16,24      | 15,87    | 15,87      | 16,05    |
| 6   | 16,69    | 15,8     | 16,25      | 15,80    | 15,80      | 16,02    |
| 8   | 16,78    | 15,69    | 16,24      | 15,66    | 15,66      | 15,95    |
| 10  | 16,91    | 15,57    | 16,24      | 15,65    | 15,65      | 15,95    |
| 12  | 17,07    | 16,15    | 16,61      | 15,84    | 15,84      | 16,23    |
| 14  | 16,86    | 16,35    | 16,61      | 15,84    | 15,84      | 16,22    |
| 16  | 16,47    | 16,74    | 16,61      | 15,83    | 15,83      | 16,22    |
| 18  | 16,37    | 16,9     | 16,64      | 15,92    | 15,92      | 16,28    |
| 20  | 16,34    | 16,76    | 16,55      | 16,11    | 16,11      | 16,33    |
| 22  | 16,38    | 16,51    | 16,45      | 15,98    | 15,98      | 16,21    |
| 24  | 16,43    | 16,54    | 16,49      | 15,93    | 15,93      | 16,21    |
| 26  | 16,36    | 16,44    | 16,40      | 15,98    | 15,98      | 16,19    |
| 28  | 16,47    | 16,3     | 16,39      | 15,84    | 15,84      | 16,11    |
| 30  | 16,37    | 16,17    | 16,27      | 15,89    | 15,89      | 16,08    |
| 32  | 16,14    | 16,19    | 16,17      | 16,01    | 16,01      | 16,09    |
| 34  | 16,17    | 16,14    | 16,16      | 16,18    | 16,18      | 16,17    |
| 36  | 16,33    | 16,03    | 16,18      | 16,23    | 16,23      | 16,21    |
| 38  | 16,44    | 15,99    | 16,22      | 16,36    | 16,36      | 16,29    |
| 40  | 16,54    | 15,92    | 16,23      | 16,31    | 16,31      | 16,27    |
| 42  | 16,88    | 15,79    | 16,34      | 16,28    | 16,28      | 16,31    |
| 44  | 16,87    | 15,86    | 16,37      | 16,06    | 16,06      | 16,21    |
| 46  | 16,97    | 15,82    | 16,40      | 16,06    | 16,06      | 16,23    |
| 48  | 16,94    | 15,75    | 16,35      | 15,86    | 15,86      | 16,10    |
| 50  | 17,04    | 15,63    | 16,34      | 15,83    | 15,83      | 16,08    |
| 52  | 17,11    | 15,63    | 16,37      | 15,91    | 15,91      | 16,14    |
| 54  | 17,05    | 15,4     | 16,23      | 15,94    | 15,94      | 16,08    |
| 56  | 16,98    | 15,37    | 16,18      | 15,95    | 15,95      | 16,06    |
| 58  | 16,92    | 15,44    | 16,18      | 15,96    | 15,96      | 16,07    |
| 60  | 17       | 15,63    | 16,32      | 15,86    | 15,86      | 16,09    |
| 62  | 17,04    | 15,62    | 16,33      | 15,80    | 15,80      | 16,07    |
| 64  | 17,15    | 15,55    | 16,35      | 15,85    | 15,85      | 16,10    |
| 66  | 16,94    | 15,61    | 16,28      | 15,93    | 15,93      | 16,10    |
| 68  | 16,8     | 15,64    | 16,22      | 16,04    | 16,04      | 16,13    |
| 70  | 16,56    | 15,65    | 16,11      | 16,06    | 16,06      | 16,08    |
| 72  | 16,34    | 15,62    | 15,98      | 16,12    | 16,12      | 16,05    |
| 74  | 16,34    | 15,64    | 15,99      | 16,07    | 16,07      | 16,03    |
| 76  | 16,47    | 15,53    | 16,00      | 15,98    | 15,98      | 15,99    |
| 78  | 16,54    | 15,51    | 16,03      | 15,96    | 15,96      | 15,99    |
| 80  | 16,68    | 15,39    | 16,04      | 15,97    | 15,97      | 16,00    |
| 82  | 16,71    | 15,39    | 16,05      | 16,08    | 16,08      | 16,07    |
| 84  | 16,73    | 15,4     | 16,07      | 16,12    | 16,12      | 16,09    |

|     |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 86  | 17,07 | 15,47 | 16,27 | 15,97 | 15,97 | 16,12 |
| 88  | 17,21 | 15,42 | 16,32 | 15,83 | 15,83 | 16,07 |
| 90  | 17,27 | 15,51 | 16,39 | 15,91 | 15,91 | 16,15 |
| 92  | 17,13 | 15,63 | 16,38 | 15,56 | 15,56 | 15,97 |
| 94  | 16,83 | 15,84 | 16,34 | 15,69 | 15,69 | 16,01 |
| 96  | 16,41 | 15,85 | 16,13 | 15,80 | 15,80 | 15,97 |
| 98  | 16,44 | 16,02 | 16,23 | 15,79 | 15,79 | 16,01 |
| 100 | 16,42 | 15,93 | 16,18 | 15,65 | 15,65 | 15,91 |
| 102 | 16,63 | 15,8  | 16,22 | 15,99 | 15,99 | 16,10 |
| 104 | 16,98 | 15,53 | 16,26 | 15,84 | 15,84 | 16,05 |
| 106 | 17,35 | 15,46 | 16,41 | 15,69 | 15,69 | 16,05 |
| 108 | 17,19 | 15,42 | 16,31 | 15,88 | 15,88 | 16,09 |
| 110 | 17    | 15,45 | 16,23 | 16,06 | 16,06 | 16,14 |
| 112 | 17,05 | 15,4  | 16,23 | 16,00 | 16,00 | 16,11 |
| 114 | 16,9  | 15,54 | 16,22 | 16,14 | 16,14 | 16,18 |
| 116 | 16,66 | 15,44 | 16,05 | 16,18 | 16,18 | 16,12 |
| 118 | 16,81 | 15,25 | 16,03 | 16,02 | 16,02 | 16,03 |
| 120 | 17,15 | 15,2  | 16,18 | 15,97 | 15,97 | 16,07 |

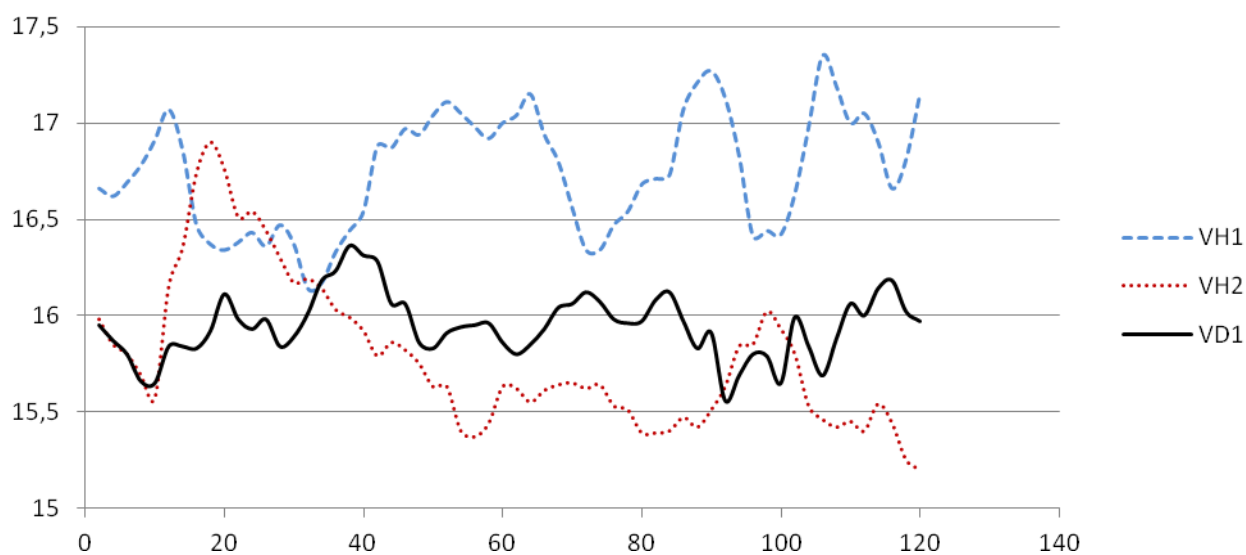


Рисунок 3.4 – Графік змінювання швидкості потоку на хордах і діаметрі в трубопроводі діаметром 80 мм при витраті 250 м³/год

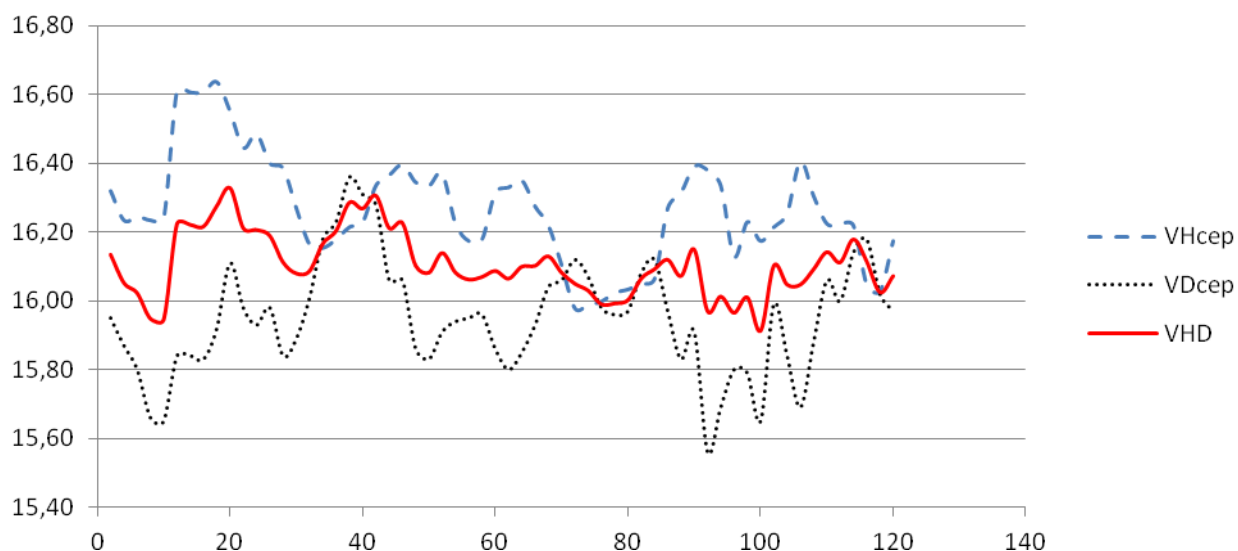


Рисунок 3.5 – Графік змінювання середньої швидкості потоку в трубопроводі діаметром 80 мм при витраті 250 м³/год

Таблиця 3.2 – Значення швидкостей в трубопроводі діаметром 80 мм при витраті 175 м³/год

| Час | V <sub>H1</sub> | V <sub>H2</sub> | V <sub>НСер</sub> | V <sub>D1</sub> | V <sub>Dсер</sub> | V <sub>HD</sub> |
|-----|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 2   | 12,16           | 10,89           | 11,53             | 11,08           | 11,08             | 11,30           |
| 4   | 12,44           | 10,68           | 11,56             | 11,06           | 11,06             | 11,31           |
| 6   | 12,47           | 10,79           | 11,63             | 11,04           | 11,04             | 11,34           |
| 8   | 12,5            | 10,91           | 11,71             | 11,14           | 11,14             | 11,42           |
| 10  | 12,53           | 10,91           | 11,72             | 11,08           | 11,08             | 11,40           |
| 12  | 12,5            | 11,07           | 11,79             | 11,12           | 11,12             | 11,45           |
| 14  | 12,55           | 11,12           | 11,84             | 11,07           | 11,07             | 11,45           |
| 16  | 12,38           | 11,09           | 11,74             | 11,15           | 11,15             | 11,44           |
| 18  | 12,29           | 11,01           | 11,65             | 11,18           | 11,18             | 11,42           |
| 20  | 12,24           | 11,09           | 11,67             | 11,28           | 11,28             | 11,47           |
| 22  | 12,35           | 10,9            | 11,63             | 11,28           | 11,28             | 11,45           |
| 24  | 12,27           | 10,9            | 11,59             | 11,30           | 11,30             | 11,44           |
| 26  | 12,3            | 10,86           | 11,58             | 11,34           | 11,34             | 11,46           |
| 28  | 12,24           | 10,72           | 11,48             | 11,35           | 11,35             | 11,42           |
| 30  | 12,2            | 10,7            | 11,45             | 11,44           | 11,44             | 11,45           |
| 32  | 11,83           | 10,82           | 11,33             | 11,48           | 11,48             | 11,40           |
| 34  | 11,62           | 10,87           | 11,25             | 11,56           | 11,56             | 11,40           |
| 36  | 11,69           | 10,99           | 11,34             | 11,39           | 11,39             | 11,37           |
| 38  | 11,75           | 11,14           | 11,45             | 11,25           | 11,25             | 11,35           |
| 40  | 11,76           | 11,16           | 11,46             | 11,13           | 11,13             | 11,30           |

|     |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 42  | 11,94 | 11,3  | 11,62 | 11,13 | 11,13 | 11,38 |
| 44  | 12,08 | 11,37 | 11,73 | 11,06 | 11,06 | 11,39 |
| 46  | 11,99 | 11,23 | 11,61 | 11,16 | 11,16 | 11,39 |
| 48  | 11,9  | 11,22 | 11,56 | 11,31 | 11,31 | 11,44 |
| 50  | 11,67 | 11,44 | 11,56 | 11,29 | 11,29 | 11,42 |
| 52  | 11,51 | 11,42 | 11,47 | 11,36 | 11,36 | 11,41 |
| 54  | 11,48 | 11,34 | 11,41 | 11,38 | 11,38 | 11,40 |
| 56  | 11,52 | 11,29 | 11,41 | 11,49 | 11,49 | 11,45 |
| 58  | 11,57 | 11,34 | 11,46 | 11,53 | 11,53 | 11,49 |
| 60  | 11,74 | 11,03 | 11,39 | 11,59 | 11,59 | 11,49 |
| 62  | 11,85 | 11,02 | 11,44 | 11,62 | 11,62 | 11,53 |
| 64  | 11,93 | 11,08 | 11,51 | 11,71 | 11,71 | 11,61 |
| 66  | 11,8  | 11,22 | 11,51 | 11,60 | 11,60 | 11,56 |
| 68  | 11,77 | 11,24 | 11,51 | 11,58 | 11,58 | 11,54 |
| 70  | 11,93 | 11,29 | 11,61 | 11,64 | 11,64 | 11,63 |
| 72  | 11,94 | 11,23 | 11,59 | 11,55 | 11,55 | 11,57 |
| 74  | 11,91 | 11,24 | 11,58 | 11,43 | 11,43 | 11,50 |
| 76  | 11,99 | 11,13 | 11,56 | 11,57 | 11,57 | 11,57 |
| 78  | 12,13 | 11,11 | 11,62 | 11,52 | 11,52 | 11,57 |
| 80  | 12,14 | 11,15 | 11,65 | 11,42 | 11,42 | 11,53 |
| 82  | 12,32 | 11,02 | 11,67 | 11,41 | 11,41 | 11,54 |
| 84  | 12,32 | 10,91 | 11,62 | 11,48 | 11,48 | 11,55 |
| 86  | 12,36 | 11,04 | 11,70 | 11,42 | 11,42 | 11,56 |
| 88  | 12,2  | 11,03 | 11,62 | 11,42 | 11,42 | 11,52 |
| 90  | 12,1  | 11,11 | 11,61 | 11,49 | 11,49 | 11,55 |
| 92  | 11,85 | 11,4  | 11,63 | 11,56 | 11,56 | 11,59 |
| 94  | 11,89 | 11,34 | 11,62 | 11,50 | 11,50 | 11,56 |
| 96  | 11,91 | 11,25 | 11,58 | 11,41 | 11,41 | 11,50 |
| 98  | 12,13 | 11,23 | 11,68 | 11,26 | 11,26 | 11,47 |
| 100 | 12,21 | 11,16 | 11,69 | 11,13 | 11,13 | 11,41 |
| 102 | 12,25 | 11,1  | 11,68 | 11,11 | 11,11 | 11,39 |
| 104 | 12,23 | 11,2  | 11,72 | 11,17 | 11,17 | 11,44 |
| 106 | 12,24 | 11,16 | 11,70 | 11,27 | 11,27 | 11,49 |
| 108 | 11,92 | 11,28 | 11,60 | 11,43 | 11,43 | 11,52 |
| 110 | 11,85 | 11,33 | 11,59 | 11,52 | 11,52 | 11,56 |
| 112 | 11,83 | 11,18 | 11,51 | 11,45 | 11,45 | 11,48 |
| 114 | 11,82 | 11,19 | 11,51 | 11,51 | 11,51 | 11,51 |
| 116 | 11,8  | 11,11 | 11,46 | 11,48 | 11,48 | 11,47 |
| 118 | 11,96 | 11,07 | 11,52 | 11,47 | 11,47 | 11,49 |
| 120 | 11,97 | 11    | 11,49 | 11,57 | 11,57 | 11,53 |
| 122 | 12,02 | 11    | 11,51 | 11,61 | 11,61 | 11,56 |
| 124 | 12,1  | 11,13 | 11,62 | 11,53 | 11,53 | 11,57 |
| 126 | 12,01 | 11,38 | 11,70 | 11,47 | 11,47 | 11,58 |

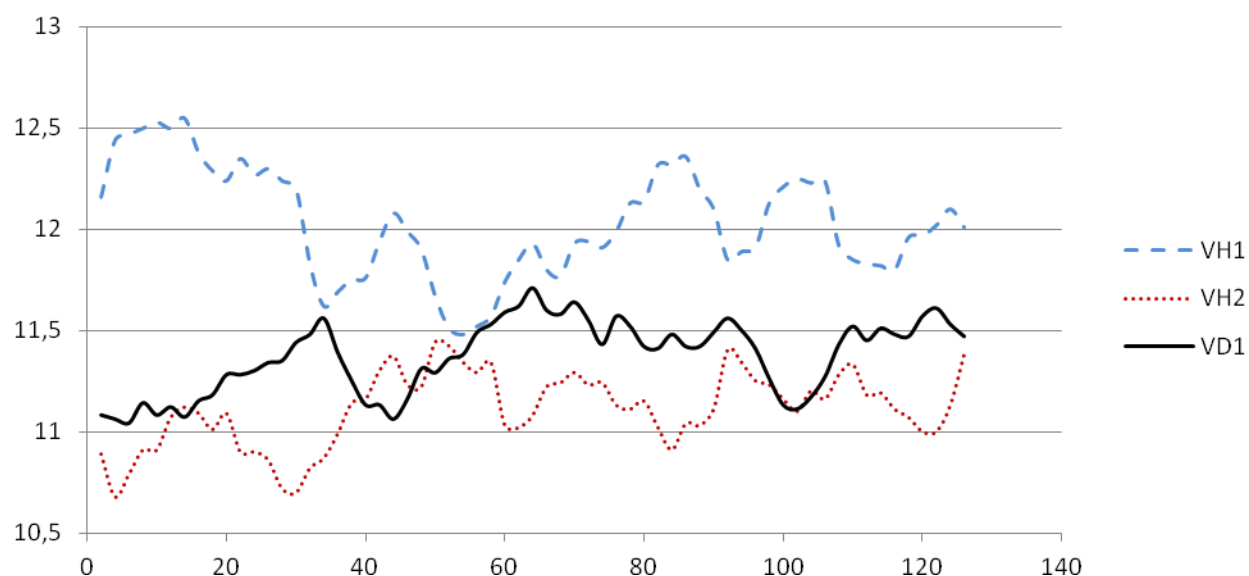


Рисунок 3.6 – Графік змінювання швидкості потоку на хордах і діаметрі в трубопроводі діаметром 80 мм при витраті 175 м³/год

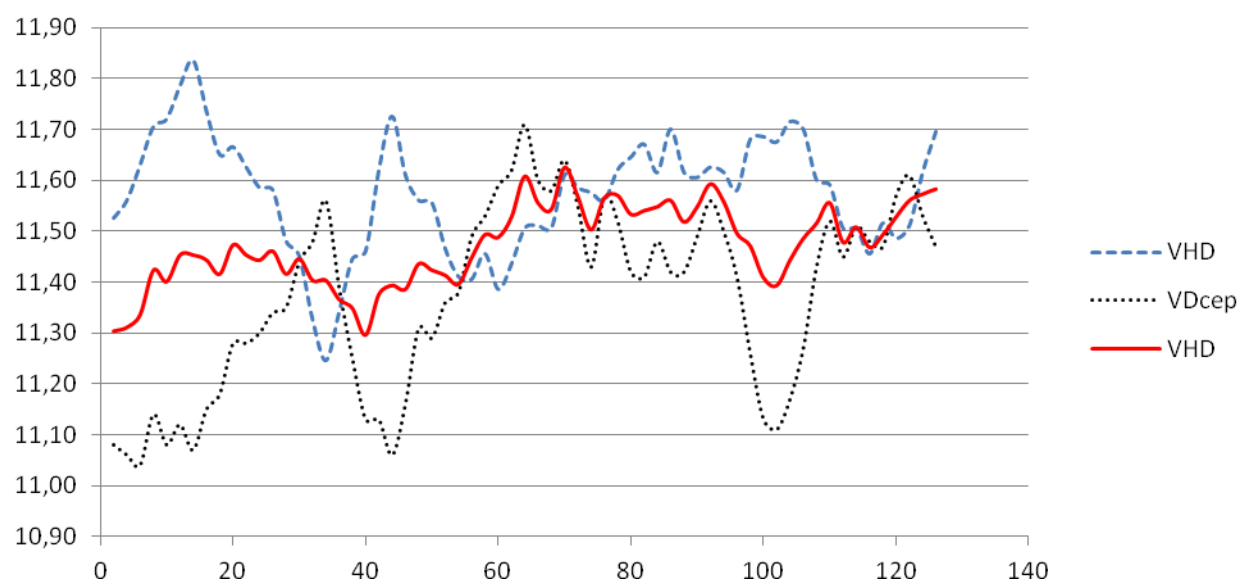


Рисунок 3.7 – Графік змінювання середньої швидкості потоку в трубопроводі діаметром 80 мм при витраті 175 м³/год

Таблиця 3.3 – Значення швидкостей в трубопроводі діаметром 100 мм при витраті  $650 \text{ м}^3/\text{год}$

| Час | $V_{H1}$ | $V_{H2}$ | $V_{Hcep}$ | $V_{D1}$ | $V_{Dcep}$ | $V_{HD}$ |
|-----|----------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 2   | 22,26    | 23,11    | 22,69      | 24,22    | 24,22      | 23,45    |
| 4   | 21,96    | 23,23    | 22,60      | 24,09    | 24,09      | 23,34    |
| 6   | 21,67    | 22,9     | 22,29      | 24,33    | 24,33      | 23,31    |
| 8   | 21,67    | 22,97    | 22,32      | 24,19    | 24,19      | 23,26    |
| 10  | 21,58    | 22,94    | 22,26      | 23,83    | 23,83      | 23,05    |
| 12  | 21,93    | 23,25    | 22,59      | 23,59    | 23,59      | 23,09    |
| 14  | 22,49    | 22,95    | 22,72      | 23,45    | 23,45      | 23,09    |
| 16  | 22,71    | 22,92    | 22,82      | 23,28    | 23,28      | 23,05    |
| 18  | 22,76    | 22,96    | 22,86      | 23,61    | 23,61      | 23,24    |
| 20  | 22,77    | 22,82    | 22,80      | 23,7     | 23,70      | 23,25    |
| 22  | 23       | 22,38    | 22,69      | 23,61    | 23,61      | 23,15    |
| 24  | 22,57    | 22,58    | 22,58      | 23,87    | 23,87      | 23,22    |
| 26  | 22,35    | 22,45    | 22,40      | 23,98    | 23,98      | 23,19    |
| 28  | 22,36    | 22,21    | 22,29      | 23,69    | 23,69      | 22,99    |
| 30  | 22,55    | 22,15    | 22,35      | 23,56    | 23,56      | 22,96    |
| 32  | 22,44    | 22,14    | 22,29      | 23,52    | 23,52      | 22,91    |
| 34  | 22,81    | 22,16    | 22,49      | 23,36    | 23,36      | 22,92    |
| 36  | 22,84    | 21,93    | 22,39      | 23,29    | 23,29      | 22,84    |
| 38  | 22,62    | 21,73    | 22,18      | 23,37    | 23,37      | 22,77    |
| 40  | 22,72    | 21,76    | 22,24      | 23,38    | 23,38      | 22,81    |
| 42  | 22,8     | 21,93    | 22,37      | 23,48    | 23,48      | 22,92    |
| 44  | 22,67    | 22,09    | 22,38      | 23,55    | 23,55      | 22,97    |
| 46  | 22,84    | 22,62    | 22,73      | 23,67    | 23,67      | 23,20    |
| 48  | 23,01    | 23,32    | 23,17      | 23,65    | 23,65      | 23,41    |
| 50  | 22,83    | 23,6     | 23,22      | 24,02    | 24,02      | 23,62    |
| 52  | 22,6     | 23,37    | 22,99      | 23,97    | 23,97      | 23,48    |
| 54  | 22,17    | 23,4     | 22,79      | 23,93    | 23,93      | 23,36    |
| 56  | 21,97    | 23,24    | 22,61      | 23,65    | 23,65      | 23,13    |
| 58  | 21,9     | 22,88    | 22,39      | 23,65    | 23,65      | 23,02    |
| 60  | 21,86    | 22,97    | 22,42      | 23,4     | 23,40      | 22,91    |
| 62  | 22,05    | 23,24    | 22,65      | 23,47    | 23,47      | 23,06    |
| 64  | 22,27    | 23,14    | 22,71      | 23,35    | 23,35      | 23,03    |
| 66  | 22,11    | 23,21    | 22,66      | 23,24    | 23,24      | 22,95    |
| 68  | 22,07    | 23,22    | 22,65      | 23,32    | 23,32      | 22,98    |
| 70  | 22,13    | 23,83    | 22,98      | 23,37    | 23,37      | 23,18    |
| 72  | 22,08    | 22,7     | 22,39      | 23,6     | 23,60      | 23,00    |
| 74  | 21,65    | 22,89    | 22,27      | 24,1     | 24,10      | 23,19    |
| 76  | 21,93    | 22,65    | 22,29      | 24,25    | 24,25      | 23,27    |
| 78  | 21,97    | 22,74    | 22,36      | 24,23    | 24,23      | 23,29    |
| 80  | 21,83    | 22,71    | 22,27      | 24,2     | 24,20      | 23,24    |

|            |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>82</b>  | 21,66 | 22,42 | 22,04 | 23,93 | 23,93 | 22,99 |
| <b>84</b>  | 22,13 | 22,22 | 22,18 | 23,63 | 23,63 | 22,90 |
| <b>86</b>  | 22,02 | 22,34 | 22,18 | 23,71 | 23,71 | 22,95 |
| <b>88</b>  | 22,03 | 22,14 | 22,09 | 23,34 | 23,34 | 22,71 |
| <b>90</b>  | 22,16 | 22,32 | 22,24 | 23,49 | 23,49 | 22,87 |
| <b>92</b>  | 22,4  | 22,34 | 22,37 | 23,3  | 23,30 | 22,84 |
| <b>94</b>  | 22,34 | 22,61 | 22,48 | 23,4  | 23,40 | 22,94 |
| <b>96</b>  | 22,19 | 22,61 | 22,40 | 23,49 | 23,49 | 22,95 |
| <b>98</b>  | 22,15 | 23,23 | 22,69 | 23,74 | 23,74 | 23,22 |
| <b>100</b> | 22,07 | 23,34 | 22,71 | 23,64 | 23,64 | 23,17 |
| <b>102</b> | 21,82 | 23,54 | 22,68 | 23,97 | 23,97 | 23,33 |
| <b>104</b> | 21,69 | 23,91 | 22,80 | 23,84 | 23,84 | 23,32 |
| <b>106</b> | 21,63 | 23,62 | 22,63 | 23,59 | 23,59 | 23,11 |
| <b>108</b> | 21,62 | 23,14 | 22,38 | 23,46 | 23,46 | 22,92 |
| <b>110</b> | 21,97 | 23,27 | 22,62 | 23,44 | 23,44 | 23,03 |
| <b>112</b> | 22,62 | 23,02 | 22,82 | 23,31 | 23,31 | 23,07 |

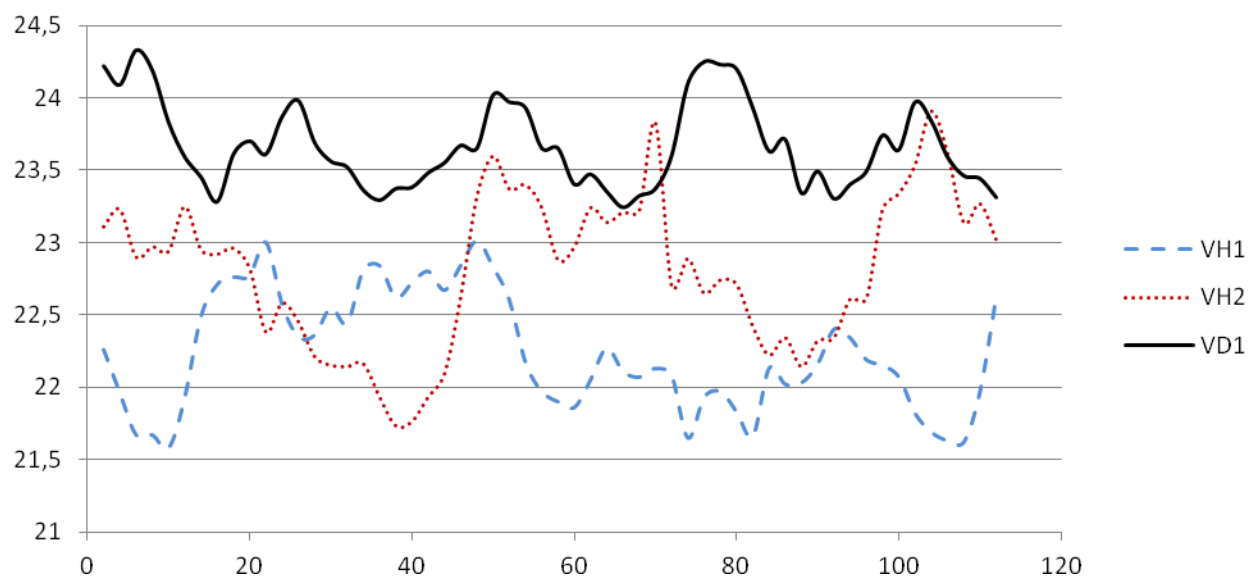


Рисунок 3.8 – Графік змінювання швидкості потоку на хордах і діаметрі в трубопроводі діаметром 100 мм при витраті 650 м³/год

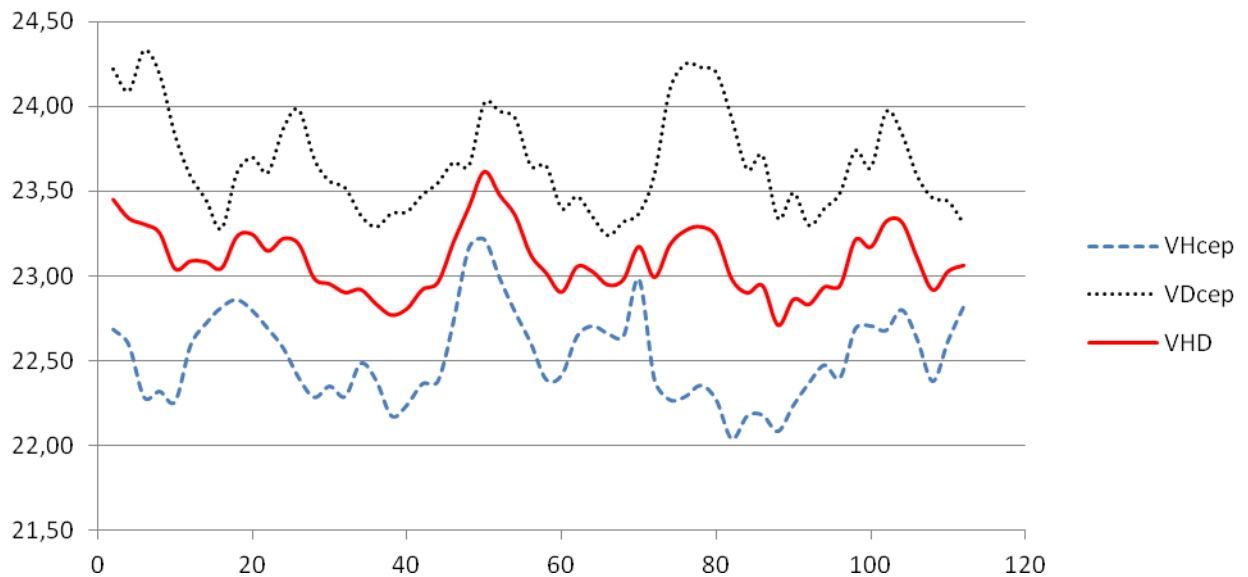


Рисунок 3.9 – Графік змінювання середньої швидкості потоку в трубопроводі діаметром 100 мм при витраті 650 м³/год

Таблиця 3.4 – Значення швидкостей в трубопроводі діаметром 100 мм при витраті 455 м³/год

| Час | V <sub>H1</sub> | V <sub>H2</sub> | V <sub>НСер</sub> | V <sub>D1</sub> | V <sub>Dсер</sub> | V <sub>HD</sub> |
|-----|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 2   | 15,8            | 16,16           | 15,98             | 16,72           | 16,72             | 16,35           |
| 4   | 16,08           | 16,48           | 16,28             | 16,54           | 16,54             | 16,41           |
| 6   | 16,02           | 16,28           | 16,15             | 16,54           | 16,54             | 16,35           |
| 8   | 15,92           | 16,48           | 16,20             | 16,82           | 16,82             | 16,51           |
| 10  | 15,72           | 16,54           | 16,13             | 16,82           | 16,82             | 16,48           |
| 12  | 15,8            | 16,95           | 16,38             | 16,82           | 16,82             | 16,60           |
| 14  | 15,45           | 16,79           | 16,12             | 16,91           | 16,91             | 16,52           |
| 16  | 15,4            | 17,04           | 16,22             | 16,8            | 16,80             | 16,51           |
| 18  | 15,47           | 17,1            | 16,29             | 16,57           | 16,57             | 16,43           |
| 20  | 15,75           | 17,1            | 16,43             | 16,65           | 16,65             | 16,54           |
| 22  | 15,79           | 16,66           | 16,23             | 16,52           | 16,52             | 16,37           |
| 24  | 15,95           | 16,59           | 16,27             | 16,73           | 16,73             | 16,50           |
| 26  | 16,11           | 16,15           | 16,13             | 16,81           | 16,81             | 16,47           |
| 28  | 16,35           | 15,93           | 16,14             | 16,85           | 16,85             | 16,50           |
| 30  | 16,14           | 15,82           | 15,98             | 16,96           | 16,96             | 16,47           |
| 32  | 15,93           | 15,92           | 15,93             | 17,14           | 17,14             | 16,53           |
| 34  | 15,98           | 16,34           | 16,16             | 17,03           | 17,03             | 16,60           |
| 36  | 15,66           | 16,59           | 16,13             | 17,1            | 17,10             | 16,61           |
| 38  | 15,45           | 16,53           | 15,99             | 17,19           | 17,19             | 16,59           |

|    |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 40 | 15,56 | 16,67 | 16,12 | 17,1  | 17,10 | 16,61 |
| 42 | 16,05 | 16,5  | 16,28 | 16,93 | 16,93 | 16,60 |
| 44 | 16,08 | 16,53 | 16,31 | 16,8  | 16,80 | 16,55 |
| 46 | 16,37 | 16,41 | 16,39 | 16,72 | 16,72 | 16,56 |
| 48 | 16,51 | 16,35 | 16,43 | 16,59 | 16,59 | 16,51 |
| 50 | 16,44 | 16,24 | 16,34 | 16,49 | 16,49 | 16,42 |
| 52 | 16,06 | 16,43 | 16,25 | 16,53 | 16,53 | 16,39 |
| 54 | 16,18 | 16,15 | 16,17 | 16,63 | 16,63 | 16,40 |
| 56 | 16,18 | 16,41 | 16,30 | 16,73 | 16,73 | 16,51 |
| 58 | 16,08 | 16,56 | 16,32 | 16,91 | 16,91 | 16,62 |
| 60 | 16,4  | 16,67 | 16,54 | 17,02 | 17,02 | 16,78 |
| 62 | 16,48 | 16,4  | 16,44 | 17,05 | 17,05 | 16,75 |
| 64 | 16,42 | 16,4  | 16,41 | 16,9  | 16,90 | 16,66 |
| 66 | 16,54 | 16,2  | 16,37 | 16,9  | 16,90 | 16,64 |
| 68 | 16,5  | 15,98 | 16,24 | 16,88 | 16,88 | 16,56 |
| 70 | 16,31 | 15,94 | 16,13 | 16,9  | 16,90 | 16,51 |
| 72 | 16,14 | 15,98 | 16,06 | 17,03 | 17,03 | 16,55 |
| 74 | 16,13 | 15,95 | 16,04 | 16,99 | 16,99 | 16,52 |
| 76 | 16,37 | 15,95 | 16,16 | 17,09 | 17,09 | 16,63 |
| 78 | 16,7  | 15,9  | 16,30 | 16,94 | 16,94 | 16,62 |
| 80 | 16,9  | 15,77 | 16,34 | 16,81 | 16,81 | 16,57 |
| 82 | 16,81 | 16,02 | 16,42 | 16,82 | 16,82 | 16,62 |
| 84 | 16,36 | 15,84 | 16,10 | 16,9  | 16,90 | 16,50 |
| 86 | 16,17 | 16,16 | 16,17 | 16,94 | 16,94 | 16,55 |
| 88 | 16    | 16,1  | 16,05 | 16,94 | 16,94 | 16,50 |

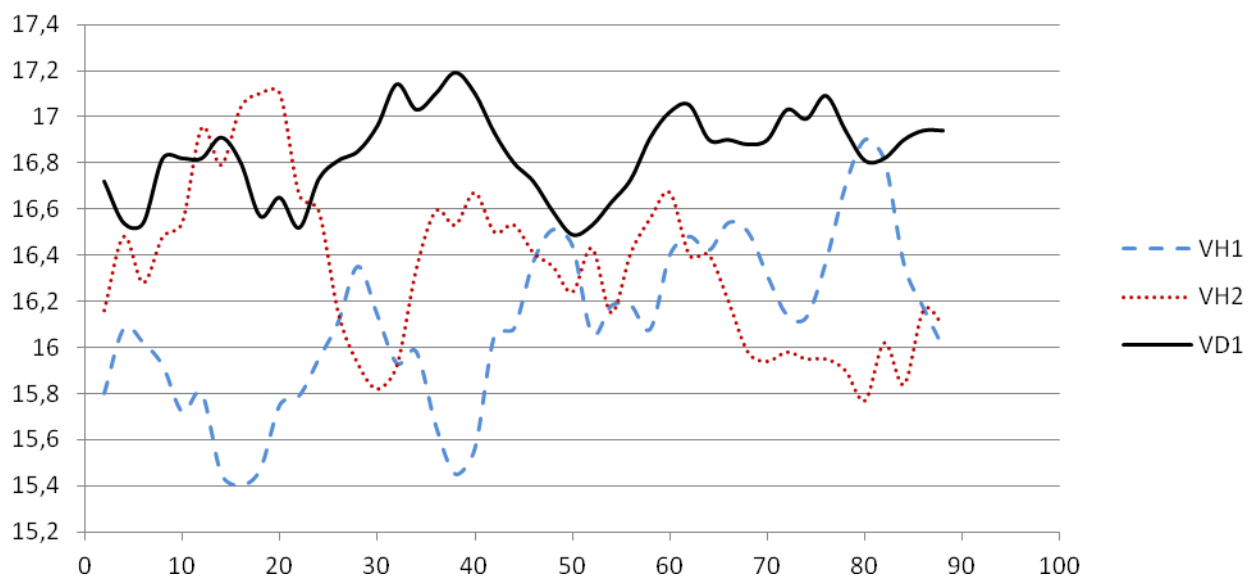


Рисунок 3.10 – Графік змінювання швидкості потоку на хордах і діаметрі в трубопроводі діаметром 100 мм при витраті 455 м³/год

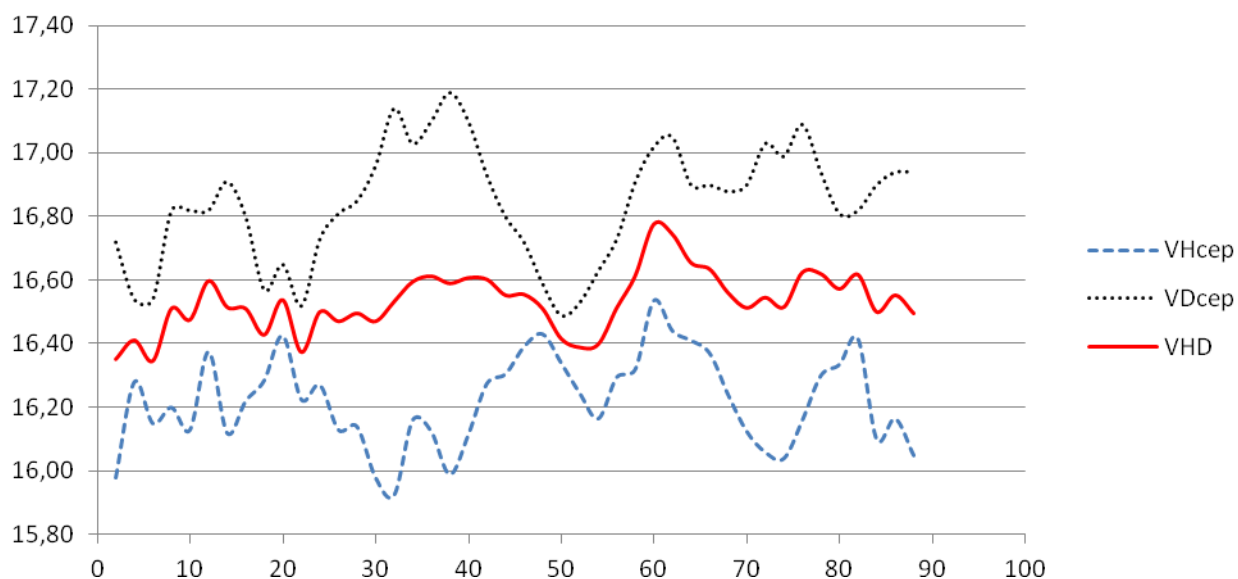


Рисунок 3.11 – Графік змінювання середньої швидкості потоку в трубопроводі діаметром 100 мм при витраті 455 м³/год

Таблиця 3.5 – Значення швидкостей в трубопроводі діаметром 150 мм при витраті 1600 м³/год

| Час | V <sub>H1</sub> | V <sub>H2</sub> | V <sub>Hсер</sub> | V <sub>D1</sub> | V <sub>D2</sub> | V <sub>Dсер</sub> | V <sub>HD</sub> |
|-----|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 2   | 23,90           | 23,94           | 23,92             | 25,41           | 25,50           | 25,46             | 24,69           |
| 4   | 24,25           | 24,55           | 24,40             | 25,41           | 25,50           | 25,46             | 24,93           |
| 6   | 24,63           | 23,97           | 24,30             | 25,41           | 25,50           | 25,46             | 24,88           |
| 8   | 24,74           | 23,97           | 24,36             | 25,41           | 25,50           | 25,46             | 24,91           |
| 10  | 25,27           | 23,52           | 24,40             | 25,06           | 25,06           | 25,06             | 24,73           |
| 12  | 24,74           | 24,29           | 24,52             | 24,89           | 24,62           | 24,76             | 24,64           |
| 14  | 24,96           | 23,69           | 24,33             | 25,20           | 24,77           | 24,99             | 24,66           |
| 16  | 25,23           | 23,00           | 24,12             | 25,25           | 24,67           | 24,96             | 24,54           |
| 18  | 25,59           | 22,85           | 24,22             | 25,18           | 24,82           | 25,00             | 24,61           |
| 20  | 24,85           | 23,03           | 23,94             | 25,26           | 24,67           | 24,97             | 24,45           |
| 22  | 24,16           | 23,57           | 23,87             | 25,48           | 24,81           | 25,15             | 24,51           |
| 24  | 24,07           | 23,85           | 23,96             | 25,48           | 25,12           | 25,30             | 24,63           |
| 26  | 23,76           | 23,50           | 23,63             | 25,47           | 25,37           | 25,42             | 24,53           |
| 28  | 23,96           | 23,37           | 23,67             | 25,40           | 25,38           | 25,39             | 24,53           |
| 30  | 24,52           | 23,56           | 24,04             | 25,49           | 25,17           | 25,33             | 24,69           |
| 32  | 24,65           | 23,36           | 24,01             | 25,44           | 25,74           | 25,59             | 24,80           |
| 34  | 23,68           | 23,54           | 23,61             | 25,48           | 25,60           | 25,54             | 24,58           |
| 36  | 23,38           | 23,86           | 23,62             | 25,03           | 25,20           | 25,12             | 24,37           |

|            |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>38</b>  | 23,58 | 23,78 | 23,68 | 25,14 | 25,09 | 25,12 | 24,40 |
| <b>40</b>  | 23,33 | 23,84 | 23,59 | 24,83 | 24,92 | 24,88 | 24,23 |
| <b>42</b>  | 23,25 | 23,13 | 23,19 | 25,21 | 24,63 | 24,92 | 24,06 |
| <b>44</b>  | 23,60 | 23,29 | 23,45 | 25,04 | 24,42 | 24,73 | 24,09 |
| <b>46</b>  | 23,70 | 23,02 | 23,36 | 25,48 | 24,19 | 24,84 | 24,10 |
| <b>48</b>  | 24,66 | 22,97 | 23,82 | 25,77 | 23,94 | 24,86 | 24,34 |
| <b>50</b>  | 25,55 | 22,52 | 24,04 | 26,24 | 24,04 | 25,14 | 24,59 |
| <b>52</b>  | 26,43 | 23,32 | 24,88 | 25,72 | 23,74 | 24,73 | 24,80 |
| <b>54</b>  | 25,80 | 23,00 | 24,40 | 25,55 | 24,13 | 24,84 | 24,62 |
| <b>56</b>  | 25,55 | 23,00 | 24,28 | 25,65 | 24,22 | 24,94 | 24,61 |
| <b>58</b>  | 24,70 | 22,93 | 23,82 | 25,30 | 24,37 | 24,84 | 24,33 |
| <b>60</b>  | 24,19 | 23,63 | 23,91 | 25,48 | 24,50 | 24,99 | 24,45 |
| <b>62</b>  | 23,54 | 23,56 | 23,55 | 25,70 | 24,96 | 25,33 | 24,44 |
| <b>64</b>  | 24,24 | 23,73 | 23,99 | 25,56 | 25,12 | 25,34 | 24,66 |
| <b>66</b>  | 24,18 | 23,79 | 23,99 | 25,47 | 25,39 | 25,43 | 24,71 |
| <b>68</b>  | 24,44 | 23,79 | 24,12 | 25,40 | 25,45 | 25,43 | 24,77 |
| <b>70</b>  | 24,89 | 23,29 | 24,09 | 24,74 | 25,20 | 24,97 | 24,53 |
| <b>72</b>  | 24,95 | 23,67 | 24,31 | 24,81 | 25,11 | 24,96 | 24,64 |
| <b>74</b>  | 24,04 | 23,90 | 23,97 | 25,15 | 25,18 | 25,17 | 24,57 |
| <b>76</b>  | 24,49 | 24,18 | 24,34 | 24,93 | 25,37 | 25,15 | 24,74 |
| <b>78</b>  | 23,78 | 24,20 | 23,99 | 25,22 | 25,48 | 25,35 | 24,67 |
| <b>80</b>  | 23,13 | 24,63 | 23,88 | 25,77 | 25,95 | 25,86 | 24,87 |
| <b>82</b>  | 22,78 | 24,40 | 23,59 | 25,71 | 26,02 | 25,87 | 24,73 |
| <b>84</b>  | 22,71 | 24,55 | 23,63 | 25,58 | 26,16 | 25,87 | 24,75 |
| <b>86</b>  | 22,14 | 24,24 | 23,19 | 25,65 | 25,92 | 25,79 | 24,49 |
| <b>88</b>  | 22,43 | 24,40 | 23,42 | 25,54 | 25,82 | 25,68 | 24,55 |
| <b>90</b>  | 22,98 | 24,36 | 23,67 | 25,40 | 25,70 | 25,55 | 24,61 |
| <b>92</b>  | 23,38 | 24,10 | 23,74 | 25,41 | 25,77 | 25,59 | 24,67 |
| <b>94</b>  | 24,17 | 23,99 | 24,08 | 25,26 | 25,50 | 25,38 | 24,73 |
| <b>96</b>  | 24,83 | 23,84 | 24,34 | 25,25 | 25,53 | 25,39 | 24,86 |
| <b>98</b>  | 25,12 | 23,45 | 24,29 | 24,96 | 25,42 | 25,19 | 24,74 |
| <b>100</b> | 25,10 | 23,13 | 24,12 | 25,00 | 25,46 | 25,23 | 24,67 |
| <b>102</b> | 24,84 | 23,07 | 23,96 | 24,69 | 25,22 | 24,96 | 24,46 |
| <b>104</b> | 24,50 | 23,24 | 23,87 | 25,25 | 24,79 | 25,02 | 24,45 |
| <b>106</b> | 24,79 | 23,34 | 24,07 | 25,27 | 24,66 | 24,97 | 24,52 |
| <b>108</b> | 25,65 | 23,76 | 24,71 | 25,78 | 24,30 | 25,04 | 24,87 |
| <b>110</b> | 26,19 | 23,84 | 25,02 | 25,69 | 24,08 | 24,89 | 24,95 |
| <b>112</b> | 26,78 | 23,79 | 25,29 | 25,89 | 23,91 | 24,90 | 25,09 |
| <b>114</b> | 27,13 | 23,73 | 25,43 | 25,43 | 24,33 | 24,88 | 25,16 |
| <b>116</b> | 26,66 | 23,72 | 25,19 | 25,52 | 24,19 | 24,86 | 25,02 |

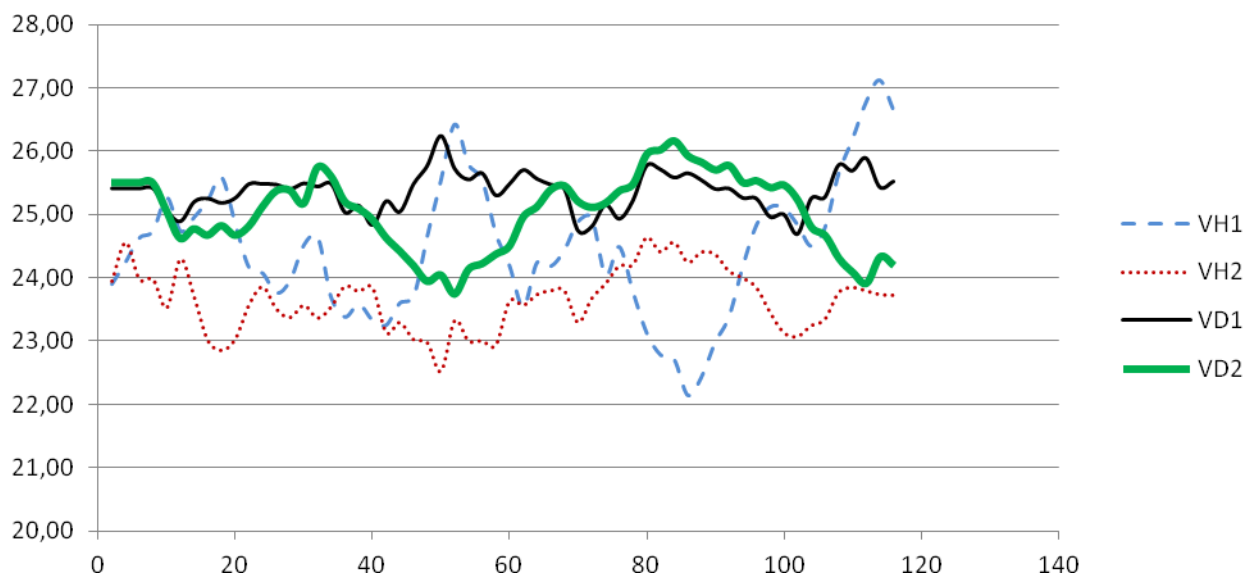


Рисунок 3.12 – Графік змінювання швидкості потоку на хордах і діаметрі в трубопроводі діаметром 150 мм при витраті 1600 м³/год

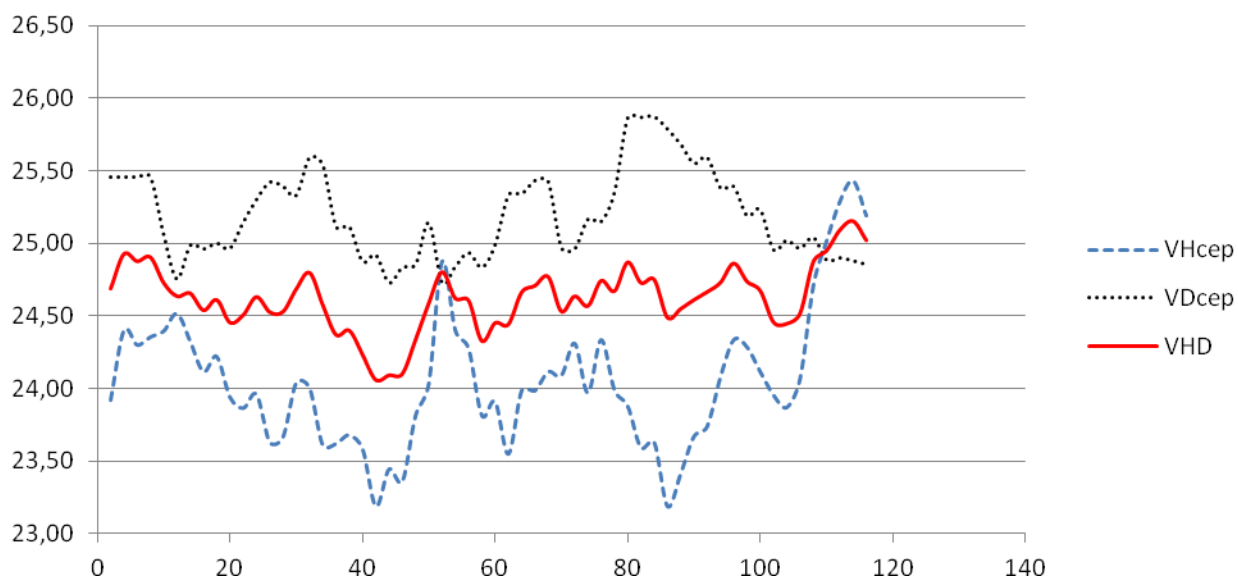


Рисунок 3.13 – Графік змінювання середньої швидкості потоку в трубопроводі діаметром 150 мм при витраті 1600 м³/год

Таблиця 3.6 – Значення швидкостей в трубопроводі діаметром 150 мм при витраті  $1120 \text{ м}^3/\text{год}$

| Час | V <sub>H1</sub> | V <sub>H2</sub> | V <sub>Нсеп</sub> | V <sub>D1</sub> | V <sub>D2</sub> | V <sub>Дсеп</sub> | V <sub>HD</sub> |
|-----|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 2   | 16,87           | 16,30           | 16,59             | 17,62           | 18,05           | 17,84             | 17,21           |
| 4   | 16,90           | 16,62           | 16,76             | 17,27           | 17,96           | 17,62             | 17,19           |
| 6   | 16,48           | 16,96           | 16,72             | 17,26           | 18,08           | 17,67             | 17,20           |
| 8   | 16,19           | 16,76           | 16,48             | 17,44           | 17,91           | 17,68             | 17,08           |
| 10  | 16,59           | 16,32           | 16,46             | 17,64           | 17,72           | 17,68             | 17,07           |
| 12  | 16,53           | 16,26           | 16,40             | 17,71           | 17,81           | 17,76             | 17,08           |
| 14  | 16,02           | 16,79           | 16,41             | 17,58           | 17,81           | 17,70             | 17,05           |
| 16  | 16,18           | 16,57           | 16,38             | 17,82           | 17,98           | 17,90             | 17,14           |
| 18  | 16,38           | 16,62           | 16,50             | 17,84           | 17,94           | 17,89             | 17,20           |
| 20  | 15,92           | 16,67           | 16,30             | 17,68           | 17,88           | 17,78             | 17,04           |
| 22  | 16,17           | 16,40           | 16,29             | 17,84           | 18,13           | 17,99             | 17,14           |
| 24  | 16,41           | 16,30           | 16,36             | 17,99           | 18,19           | 18,09             | 17,22           |
| 26  | 16,10           | 16,38           | 16,24             | 17,89           | 18,04           | 17,97             | 17,10           |
| 28  | 15,69           | 16,59           | 16,14             | 17,91           | 18,14           | 18,03             | 17,08           |
| 30  | 15,87           | 16,75           | 16,31             | 17,90           | 18,12           | 18,01             | 17,16           |
| 32  | 15,96           | 16,98           | 16,47             | 17,81           | 17,93           | 17,87             | 17,17           |
| 34  | 16,05           | 17,01           | 16,53             | 17,52           | 18,03           | 17,78             | 17,15           |
| 36  | 16,36           | 17,12           | 16,74             | 17,59           | 18,10           | 17,85             | 17,29           |
| 38  | 16,39           | 17,34           | 16,87             | 17,57           | 18,12           | 17,85             | 17,36           |
| 40  | 16,35           | 17,31           | 16,83             | 17,57           | 18,19           | 17,88             | 17,36           |
| 42  | 16,21           | 17,20           | 16,71             | 17,59           | 18,33           | 17,96             | 17,33           |
| 44  | 16,06           | 17,18           | 16,62             | 17,71           | 18,48           | 18,10             | 17,36           |
| 46  | 15,79           | 16,98           | 16,39             | 17,70           | 18,75           | 18,23             | 17,31           |
| 48  | 16,00           | 16,86           | 16,43             | 17,72           | 18,66           | 18,19             | 17,31           |
| 50  | 15,92           | 16,63           | 16,28             | 17,58           | 18,83           | 18,21             | 17,24           |
| 52  | 16,13           | 16,61           | 16,37             | 17,84           | 18,84           | 18,34             | 17,36           |
| 54  | 16,10           | 16,49           | 16,30             | 17,72           | 18,58           | 18,15             | 17,22           |
| 56  | 16,36           | 16,39           | 16,38             | 17,58           | 18,40           | 17,99             | 17,18           |
| 58  | 16,22           | 16,36           | 16,29             | 17,81           | 18,30           | 18,06             | 17,17           |
| 60  | 16,62           | 16,67           | 16,65             | 18,11           | 18,12           | 18,12             | 17,38           |
| 62  | 16,55           | 17,09           | 16,82             | 17,69           | 17,91           | 17,80             | 17,31           |
| 64  | 16,61           | 17,25           | 16,93             | 17,78           | 18,05           | 17,92             | 17,42           |
| 66  | 16,62           | 17,43           | 17,03             | 17,85           | 18,21           | 18,03             | 17,53           |
| 68  | 16,79           | 17,37           | 17,08             | 17,68           | 18,20           | 17,94             | 17,51           |
| 70  | 16,50           | 17,02           | 16,76             | 17,43           | 18,35           | 17,89             | 17,33           |
| 72  | 16,20           | 16,75           | 16,48             | 17,59           | 18,46           | 18,03             | 17,25           |
| 74  | 16,13           | 16,62           | 16,38             | 17,53           | 18,31           | 17,92             | 17,15           |
| 76  | 16,02           | 16,47           | 16,25             | 17,33           | 17,99           | 17,66             | 16,95           |
| 78  | 16,28           | 16,59           | 16,44             | 17,25           | 18,05           | 17,65             | 17,04           |
| 80  | 16,47           | 16,65           | 16,56             | 17,25           | 17,73           | 17,49             | 17,03           |

|            |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>82</b>  | 16,66 | 16,25 | 16,46 | 16,97 | 17,76 | 17,37 | 16,91 |
| <b>84</b>  | 16,64 | 16,09 | 16,37 | 17,07 | 17,71 | 17,39 | 16,88 |
| <b>86</b>  | 16,74 | 16,29 | 16,52 | 17,27 | 17,81 | 17,54 | 17,03 |
| <b>88</b>  | 16,46 | 16,14 | 16,30 | 17,25 | 17,52 | 17,39 | 16,84 |
| <b>90</b>  | 16,35 | 16,24 | 16,30 | 17,41 | 17,42 | 17,42 | 16,86 |
| <b>92</b>  | 16,43 | 16,61 | 16,52 | 17,48 | 17,42 | 17,45 | 16,99 |
| <b>94</b>  | 16,49 | 17,00 | 16,75 | 17,36 | 17,50 | 17,43 | 17,09 |
| <b>96</b>  | 16,31 | 17,21 | 16,76 | 17,46 | 17,44 | 17,45 | 17,11 |
| <b>98</b>  | 16,23 | 17,26 | 16,75 | 17,28 | 17,78 | 17,53 | 17,14 |
| <b>100</b> | 16,25 | 17,27 | 16,76 | 17,32 | 17,93 | 17,63 | 17,19 |
| <b>102</b> | 15,89 | 17,37 | 16,63 | 17,48 | 18,01 | 17,75 | 17,19 |
| <b>104</b> | 15,67 | 17,12 | 16,40 | 17,60 | 18,13 | 17,87 | 17,13 |
| <b>106</b> | 15,83 | 16,49 | 16,16 | 17,74 | 18,15 | 17,95 | 17,05 |
| <b>108</b> | 16,11 | 16,25 | 16,18 | 18,13 | 17,98 | 18,06 | 17,12 |
| <b>110</b> | 16,24 | 16,24 | 16,24 | 17,99 | 18,18 | 18,09 | 17,16 |
| <b>112</b> | 16,43 | 15,97 | 16,20 | 18,10 | 18,02 | 18,06 | 17,13 |
| <b>114</b> | 16,93 | 15,71 | 16,32 | 18,04 | 17,99 | 18,02 | 17,17 |
| <b>116</b> | 17,00 | 15,92 | 16,46 | 17,94 | 17,79 | 17,87 | 17,16 |
| <b>118</b> | 16,87 | 15,82 | 16,35 | 17,84 | 17,90 | 17,87 | 17,11 |
| <b>120</b> | 16,94 | 15,64 | 16,29 | 18,09 | 17,77 | 17,93 | 17,11 |
| <b>122</b> | 17,39 | 15,93 | 16,66 | 18,01 | 17,86 | 17,94 | 17,30 |
| <b>124</b> | 17,20 | 16,34 | 16,77 | 17,95 | 17,82 | 17,89 | 17,33 |

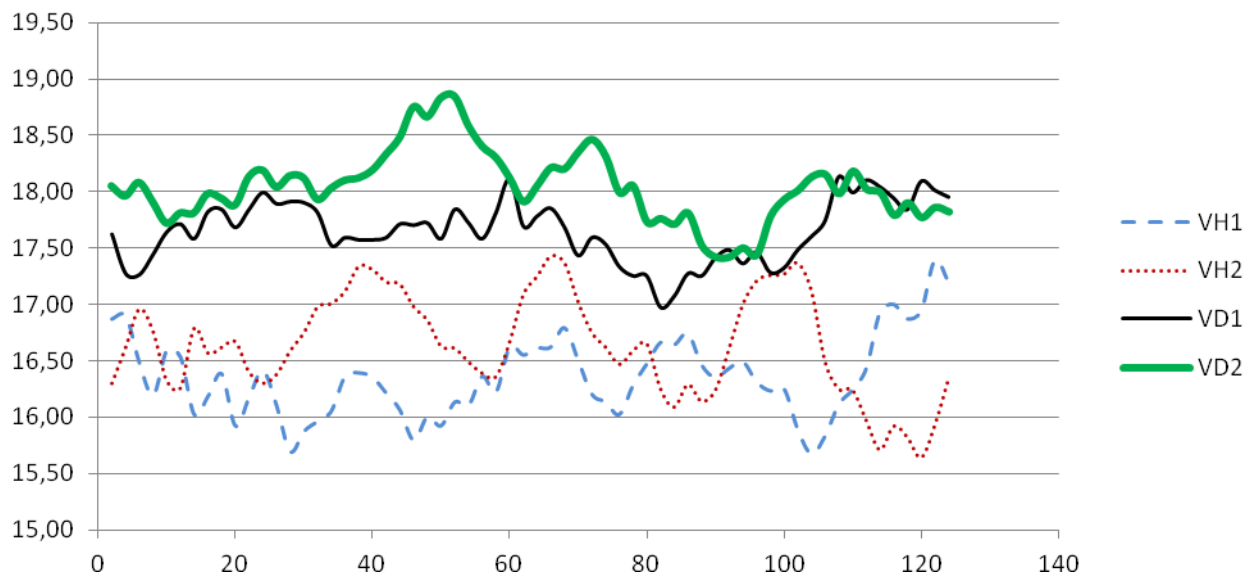


Рисунок 3.14 – Графік змінювання швидкості потоку на хордах і діаметрі в трубопроводі діаметром 150 мм при витраті 1120  $\text{м}^3/\text{год}$

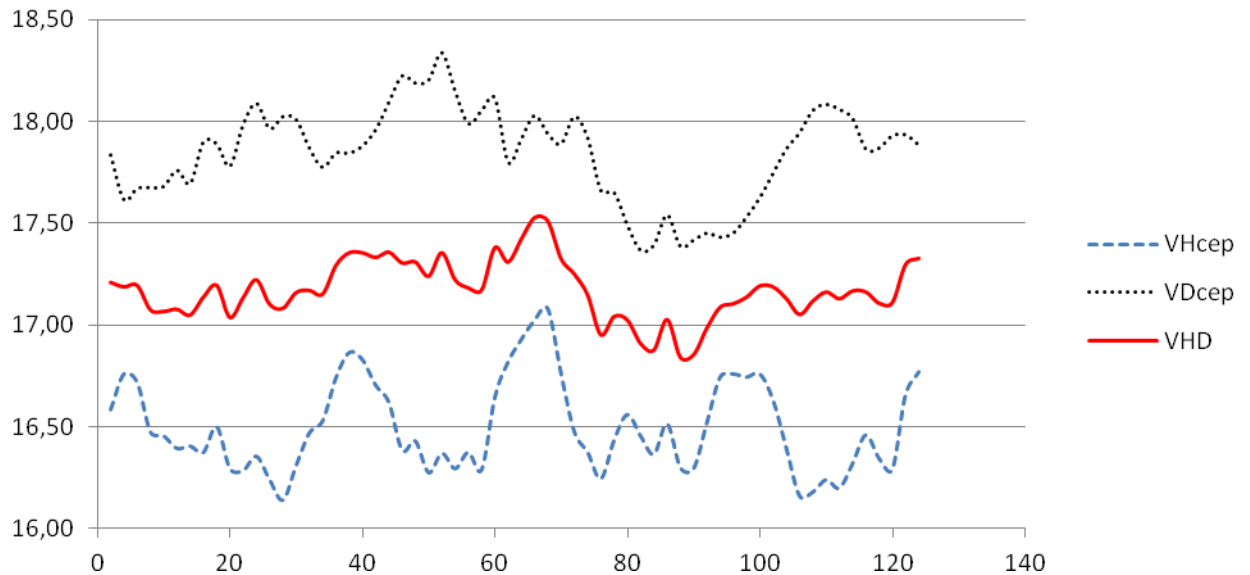


Рисунок 3.15 – Графік змінювання середньої швидкості потоку в трубопроводі діаметром 150 мм при витраті  $1120 \text{ м}^3/\text{год}$

На підставі даних, отриманих під час дослідження, можливо зробити висновок, що реальний розподіл швидкостей відрізняється від теоретичного. На підставі цього аналізу є також очевидним, що використання однопроменевих ультразвукових витратомірів не може забезпечити похибку меншу від 3-4%.

### 3.3 Розробка метрологічного забезпечення для акустичного витратоміра

Під метрологічним забезпеченням розуміється перш за все установки, за допомогою яких можна оцінювати похибку акустичного витратоміра в процесі його виготовлення (метрологічна атестація або первинна повірка) або під час експлуатації (періодична повірка). Для цієї мети можуть використовуватись еталонні установки, які відповідають чинним нормативним документам України у сфері вимірювання об'єму і об'ємної витрати газу і які наведені на рис. 3.16 - 3.19 [8].

Також для реалізації метрологічного забезпечення необхідна розробка метрологічного документа в галузі метрології в якості якого застосовується програма державної метрологічної атестації і методика повірки. Нижче також подається сутність розробленої методики повірки багатоканального акустичного витратоміра.

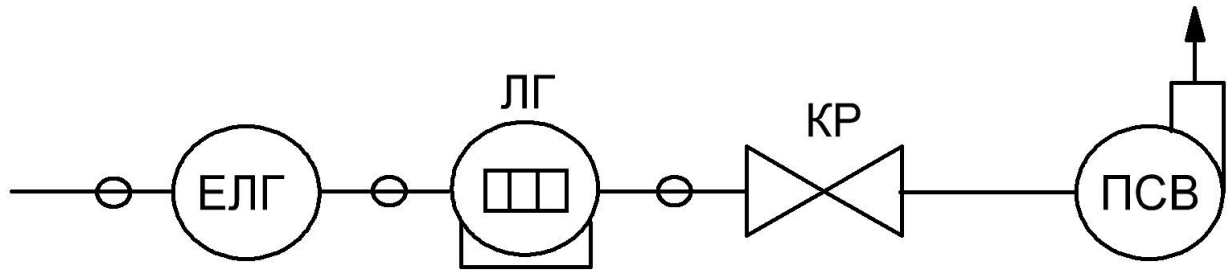


Рисунок 3.16 - Повірочна установка з еталонним лічильником газу, що знаходиться до лічильника

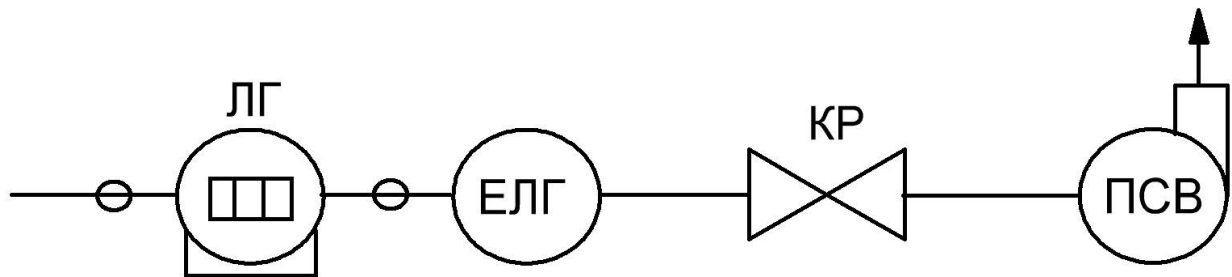


Рисунок 3.17 - Повірочна установка з еталонним лічильником газу, що знаходиться за лічильником

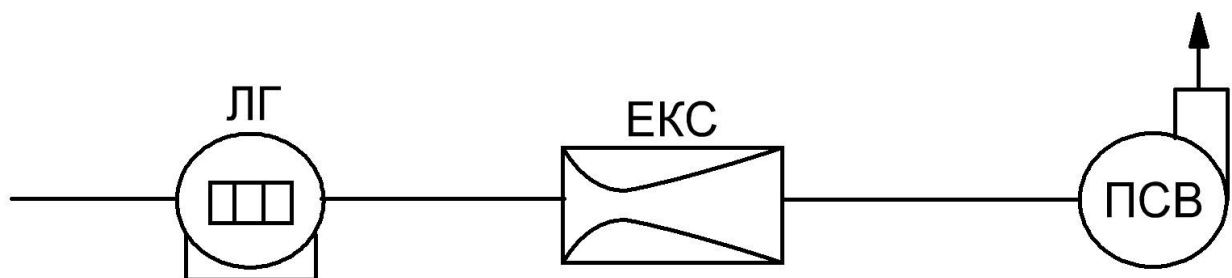


Рисунок 3.18 - Повірочна установка з еталонним критичним соплом, що функціонує на розрідження

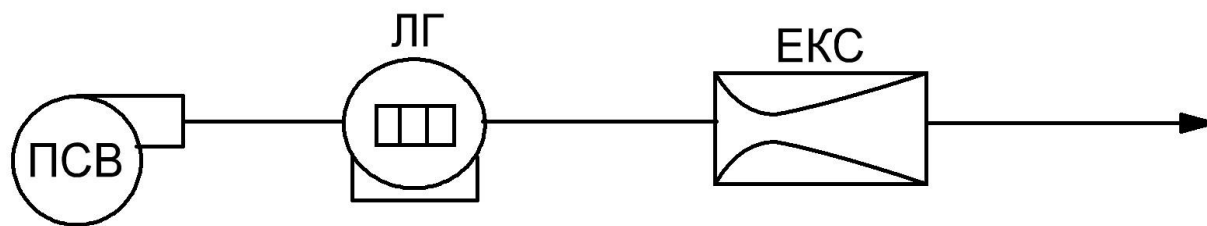


Рисунок 3.19 - Повірочна установка з еталонним критичним соплом, що працює на нагнітання

Умовні позначення: КР – крани запірний та регулювальний; ПСВ – пристрій створення витрати; ЕЛ – еталонний лічильник; ЕКС – еталонне критичне сопло; ЛГ – лічильник газу.

При проведенні повірки повинні бути виконані операції зазначені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Перелік операцій повірки [10]

| Найменування операції                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Номер пункту методики | Проведення операцій             |                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                       | первинній повірці               | періодичній повірці            |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2                     | 3                               | 4                              |
| 1 Зовнішній огляд<br>1.1 Перевірка зовнішнього вигляду<br>1.2 Перевірка маркування<br>1.3 Перевірка комплектності<br>1.4 Перевірка наявності стрілки напрямку протікання газу<br>1.5 Перевірка захисту паролем установочних коефіцієнтів при градуванні лічильника                                      |                       | Так                             | Так                            |
| 2 Перевірка герметичності                                                                                                                                                                                                                                                                               |                       | Так                             | Так                            |
| 3 Опробування<br>3.1 Перевірка функціонування                                                                                                                                                                                                                                                           |                       | Так                             | Так                            |
| 4 Перевірка незмінності показів лічильника при відсутності витрати газу                                                                                                                                                                                                                                 |                       | Так                             | Так                            |
| 5 Визначення метрологічних та технічних характеристик<br>5.1 Визначення відносної похибки<br>5.2 Визначення втрати тиску за максимальної об'ємної витрати<br>5.3 Перевірка порогу чутливості<br>5.4 Перевірка значення імпульсу вихідного сигналу<br>5.5 Визначення середньо зваженого значення похибки |                       | Так<br>Так<br>Так<br>Так<br>Так | Так<br>Так<br>Так<br>Так<br>Ні |

При отриманні негативних результатів при проведенні будь-якої операції, повірку припиняють і лічильник вважають таким, що не пройшов повірку.

## Засоби повірки

При проведенні повірки повинні бути застосовані засоби вимірювальної техніки та випробувальне обладнання (далі – засоби повірки), що зазначені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Засоби повірки

| Порядковий номер | Найменування засобу повірки                            | Основні технічні характеристики                                                                                                                                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | 2                                                      | 3                                                                                                                                                                                                      |
| 1                | Повірочна установка з еталонними лічильниками газу     | Границі допустимої відносної похибки при атестованих значеннях об'ємних витрат не більше $\pm 0,3 \%$ .<br>Діапазон об'ємної витрати від $1,6 \text{ м}^3/\text{год}$ до $2500 \text{ м}^3/\text{год}$ |
| 2                | Повірочна установка з еталонними критичними соплами    | Границі допустимої відносної похибки при атестованих значеннях об'ємних витрат не більше $\pm 0,3\%$ .<br>Діапазон об'ємної витрати від $1,6 \text{ м}^3/\text{год}$ до $2500 \text{ м}^3/\text{год}$  |
| 3                | Стенд для перевірки герметичності лічильника.          | Тиск від 0 МПа до 3,0 МПа,<br>Клас точності манометра для вимірювання тиску не нижче 1                                                                                                                 |
| 4                | Манометр еталонний МО 11202<br>ТУ 25.05.1664-74        | Верхня границя вимірювання 3,0 МПа.<br>Клас точності 0,4                                                                                                                                               |
| 5                | Мановакууметр двотрубний                               | Діапазоном вимірювання від 0 Па до 2000 Па, ціна поділки 10 Па                                                                                                                                         |
| 6                | Термометр скляний ртутний<br>ГОСТ 28498-90             | Діапазони вимірювання від 0 до 50 °С, ціна поділки 0,1 °С                                                                                                                                              |
| 7                | Барометр-анероїд БАММ-1<br>ТУ 25-11.1513-79            | Діапазон вимірювання від 80 кПа до 110 кПа, ціна поділки 100 Па                                                                                                                                        |
| 8                | Психрометр аспіраційний М-34<br>ТУ 25-1607.054-85      | Діапазон вимірювання відносної вологості від 10 % до 100 %, ціна поділки термометрів 0,2 °С                                                                                                            |
| 9                | Секундомір однострілковий С-1-2а<br>ТУ 25-1819.0021-90 | Тривалість повного оберту секундної стрілки 60 с, ціна поділки 0,2 с                                                                                                                                   |

|    |                                                           |                                                                                                          |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 | Ротаметри<br>ГОСТ 13045-81                                | Вимірювання об'ємної витрати від 0,4 мЗ/год , границі допустимої зведеної похибки не більше $\pm 2,5 \%$ |
| 11 | Лічильник імпульсів програмний Ф5264<br>ТУ25-0414.0095-84 | Діапазон частот від 10 Гц до 106 Гц                                                                      |

Всі засоби повірки, що застосовуються при повірці, повинні бути повірені згідно з ДСТУ 2708:2006, або атестовані згідно з ДСТУ 3215-95.

#### Вимоги безпеки

Під час повірки лічильників необхідно дотримуватись вимог безпеки, що діють на підприємствах і організаціях, які проводять повірку лічильників, а також вимог безпеки, що наведені в експлуатаційній документації на лічильники та засоби повірки.

Загальні вимоги безпеки згідно ГОСТ 12.2.003-91, ДНАОП 0.00-1.32-01.

До проведення повірки допускаються особи, що пройшли інструктаж з техніки безпеки та протипожежної техніки.

Перед проведенням повірки лічильників, що знаходились в експлуатації, необхідно пропустити через лічильник повітря за витрати від  $0,7q_{v \max}$  до  $q_{v \max}$  до повного очищення лічильника від залишків природного газу.

При проведенні повірки необхідно дотримуватись загальних вимог безпеки, а також інструкцій з безпеки на робочому місці, затверджених у встановленому порядку.

Особи, які виконують операції повірки лічильників на робочому еталоні, мають отримати інструктаж з техніки безпеки на робочому місці.

#### Умови повірки [10]

Повірку проводять за таких умов:

– використання повітря, як робочого середовища;

- температури робочого середовища та навколишнього повітря ( $20 \pm 2$ ) °C;
- відносна вологість навколишнього повітря до 80 %;
- атмосферний тиск повітря в діапазоні від 84 кПа до 106,7 кПа (від 630 до 800 мм рт. ст.)
- зміна температури повітря, що протікає через робочий еталон та лічильник, який випробовують, за час одного вимірювання не повинна перевищувати 0,5 °C за 1 годину;
- зміна температури навколишнього повітря, не більше ніж 2 °C за 8 годин та не більше 0,5 °C за 1 годину;
- напруга живлення ( $220/380 \pm 10\%$ ) В частотою ( $50 \pm 1$ ) Гц;
- відсутність вібрації, трясіння, ударів, які впливають на роботу робочих еталонів.

#### Підготовка до повірки [9]

Перед проведенням повірки необхідно:

- перевірити засоби повірки на наявність чинних відбитків повірочних тавр та свідоцтв про їх повірку або атестацію;
- підготувати засоби повірки до роботи згідно з вимогами експлуатаційних документів, які на них поширюються;
- підготувати робочі місця на відповідність вимогам безпеки;
- перевірити умови повірки.

Лічильники, які піддаються повірці треба витримати у приміщенні, де буде проводитись повірка, не менше двох годин.

#### Проведення повірки [9]

При проведенні зовнішнього огляду візуальним шляхом встановити відповідність лічильника наступним вимогам:

- наявність на корпусі лічильника стрілки, що вказує напрямок протікання газу;

- наявність пломб та відбитків повірочного тавра (при періодичній повірці);
- відсутність видимих пошкоджень та дефектів, які перешкоджають роботі лічильника і зчитуванню показів з індикатора;
- комплектування і маркування повинні відповідати вимогам експлуатаційної документації;

Перевірку герметичності лічильника проводити повітрям на стенді для перевірки герметичності шляхом створення у внутрішній частині корпусу лічильника надлишкового тиску повітря. Об'єм трубопроводу від запірного крану до входу в корпус лічильника повинен бути в 3–4 рази менше за об'єм внутрішньої частини корпусу лічильника.

Перевірку герметичності проводити наступним чином [10]:

а) встановити на вхідні та вихідні фланці лічильника заглушки, при цьому заглушка на вхідному фланці повинна мати штуцер для під'єднання устаткування, яке створює надлишковий тиск;

б) з'єднати лічильник з джерелом тиску, відкрити запірний кран і створити у внутрішній частині корпусу лічильника, розрахованого на максимальний робочий надлишковий тиск 1,6 МПа, значення надлишкового тиску повітря  $(1,76 \pm 0,5)$  МПа.

Величину тиску в лічильнику контролюють манометром еталонним класу точності не нижче 0,4. При цьому треба дотримуватись відповідних норм та правил безпеки, контролюючи тиск в лічильнику;

в) перекрити запірний кран та протягом 5 хвилин контролювати покази манометра еталонного.

Лічильники вважають такими, що витримали перевірку, якщо не спостерігалось зниження тиску на протязі останніх 3 хвилин.

Визначення відносної похибки вимірювання об'єму слід проводити на робочому еталоні. Відносну похибку вимірювання об'єму слід визначати шляхом пропускання через лічильник потоку повітря з об'ємною витратою  $q_{vj}$ , значення яких для різних типорозмірів лічильників наведені в таблиці 3.9.

Рекомендована послідовність визначення відносної похибки вимірювання об'єму: від максимальної об'ємної витрати  $q_{v \max}$  до мінімальної об'ємної витрати  $q_{v \min}$ , або в зворотному порядку – від  $q_{v \min}$  до  $q_{v \max}$ .

Відхилення установлених на робочому еталоні значень об'ємної витрати від нормованих, вказаних в табл. 3.9, не повинно перевищувати значень:

- мінус 5 % для значення об'ємної витрати  $q_{v \max}$ ;
- 5 % для значення об'ємної витрати  $q_{v \min}$ ;
- $\pm 5$  % для інших значень об'ємних витрат.

Для приведення об'ємів повітря, виміряних лічильником, що повіряється, до умов на вході в робочий еталон необхідно вимірювати абсолютний тиск повітря  $P_i$  та температуру  $t_i$  перед лічильником і відповідно  $P_o$  та  $t_o$  перед робочим еталоном.

В програмне забезпечення робочого еталона ввести відповідне значення об'єма в  $\text{м}^3$ , що відповідає одному імпульсу вихідного сигналу, яке вказано на маркуванні лічильника та ФО.

Визначення відносної похибки вимірювання об'єму лічильником проводиться один раз на кожній витраті, згідно з табл. 3.9. При цьому пропускають контрольний об'єм, який вказаний в табл. 3.10 [9].

Таблиця 3.9 – Значення об'ємних витрат в залежності від типорозміру лічильника

| Позначення<br>типорозміру<br>лічильника | Значення об'ємної витрати $q_{vi}$ , $\text{м}^3/\text{год}$ , в точках діапазону |                 |                 |                  |                  |                  |              |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|--------------|
|                                         | $q_{v \max}$                                                                      | $0,7q_{v \max}$ | $0,4q_{v \max}$ | $0,25q_{v \max}$ | $0,15q_{v \max}$ | $0,05q_{v \max}$ | $q_{v \min}$ |
| G160                                    | 250                                                                               | 175             | 100             | 62,5             | 37,5             | 12,5             | 1,6          |
| G250                                    | 400                                                                               | 280             | 160             | 100              | 60               | 20               | 2,5          |
| G400                                    | 650                                                                               | 455             | 260             | 162,5            | 97,5             | 32,5             | 4,0          |
| G650                                    | 1000                                                                              | 700             | 400             | 250              | 150              | 50               | 6,5          |
| G1000                                   | 1600                                                                              | 1120            | 640             | 400              | 240              | 80               | 10,0         |
| G1600                                   | 2500                                                                              | 1750            | 1000            | 625              | 375              | 125              | 16,0         |

Таблиця 3.10 - Мінімальне значення об'єму повітря, яке необхідно пропускати за витрат в залежності від типорозміру лічильника

| Позначення<br>типорозміру<br>лічильника | Значення мінімального об'єму повітря, м <sup>3</sup> |                 |                 |                  |                  |                  |              |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|--------------|
|                                         | $q_{v \max}$                                         | $0,7q_{v \max}$ | $0,4q_{v \max}$ | $0,25q_{v \max}$ | $0,15q_{v \max}$ | $0,05q_{v \max}$ | $q_{v \min}$ |
| G160                                    | 16,0                                                 | 10,0            | 6,4             | 4,0              | 2,0              | 1,0              | 0,2          |
| G250                                    | 25,0                                                 | 16,0            | 10,0            | 6,4              | 4,0              | 1,6              | 0,4          |
| G400                                    | 40,0                                                 | 25,0            | 16,0            | 10,0             | 6,4              | 2,5              | 0,7          |
| G650                                    | 64,0                                                 | 40,0            | 25,0            | 16,0             | 10,0             | 4,0              | 2,0          |
| G1000                                   | 100,0                                                | 64,0            | 40,0            | 25,0             | 16,0             | 6,0              | 2,0          |
| G1600                                   | 160,0                                                | 100,0           | 64,0            | 40,0             | 25,0             | 10,0             | 2,0          |

В процесі визначення відносної похибки лічильника необхідно проводити вимірювання втрати тиску та контролювати зміну температури при протікання повітря по тракту пневматичної системи.

Вимірювання температури та тиску проводять на вході робочого еталону (або в ньому) та перед лічильником, що повіряють.

Відносну похибку лічильника у відсотках вираховують за формулою [8]:

$$\delta_i = \left( \frac{V_i}{V_0} \times \frac{P_i}{P_0} \times \frac{T_0}{T_i} - 1 \right) \times 100 \quad (3.1)$$

де  $\delta_i$  – відносна похибка лічильника за і-тої витрати, %;  $V_i$  – об'єм повітря, виміряний лічильником, що повіряють, м<sup>3</sup>;  $V_0$  – об'єм повітря, виміряний робочим еталоном, м<sup>3</sup>;  $P_i$  – абсолютний тиск повітря на вході лічильника, що повіряють, Па;  $P_0$  – абсолютний тиск повітря на вході робочого еталону (або в ньому), Па;  $T_0$  – температура повітря на вході робочого еталону (або в ньому), К;  $T_i$  – температура повітря на вході лічильника, що повіряють, К.

Значення абсолютного тиску у робочому еталоні та на вході лічильника, що повіряють, обчислюють за формулами:

$$P_o = P_{\phi} + P_o' \quad (3.2)$$

$$P_i = P_o + P_n \quad (3.3)$$

де  $P_o$  – атмосферний тиск, Па;  $P_o'$  – надлишковий тиск (розрідження) повітря на вході робочого еталону (або в ньому), Па;  $P_n'$  – надлишковий тиск (розрідження) повітря на вході лічильника, що повіряють, Па.

Значення величини розрідження робочого середовища у формулах (3.2) і (3.3) слід підставляти зі знаком «мінус».

При проведенні повірки на робочому еталоні з автоматизованою системою вимірювання об'єм  $V_i$  вираховують за формулою [8]:

$$V_i = N_i \times K, \quad (3.4)$$

де  $N_i$  – кількість імпульсів вихідного сигналу, які надійшли від лічильника, що повіряється;  $K$  – значення імпульсу, виражене в одиницях об'єму, вихідного сигналу лічильника, що повіряється і зазначене в маркуванні та ФО лічильника, м<sup>3</sup>.

Результати визначення відносної похибки вважати позитивними, якщо величина відносної похибки не перевищує при первинній повірці 0,9, а при періодичній повірці 1,0 від границь допустимих значень відносної похибки за об'ємних витрат:

$\pm 1 \%$  – в діапазоні об'ємної витрати  $q_{vt} \leq q_v \leq q_{v \max}$ ;

$\pm 2 \%$  – в діапазоні об'ємної витрати  $q_{v \min} \leq q_v < q_{vt}$ .

де  $q_{vt}$  – перехідна об'ємна витрата, яка відповідає витраті  $0,05 q_{v \max}$  [8].

Визначення втрати тиску на лічильнику проводити на робочому еталоні з робочим середовищем – повітрям за максимальною об'ємною витратою. Втрату тиску вимірювати за допомогою мановакуумметра двотрубного, який під'єднують між входом та виходом лічильника, або на трубопроводі в місцях, розміщених на віддалі не більше ніж 1 DN перед лічильником і після лічильника. Визначення втрати тиску може бути здійснено за допомогою диференційного перетворювача тиску, який входить в склад робочого еталону.

Втрати тиску на лічильнику визначається, як найбільше значення втрати тиску при незмінній об'ємній витраті в процесі одного вимірювання.

Допускається втрати тиску визначати одночасно з визначенням відносної похибки вимірювання об'єму.

Результати контролю вважати позитивними, якщо втрати тиску за максимальної об'ємної витрати не перевищують 100 Па.

Перевірку порогу чутливості лічильника проводять шляхом фіксування зміни показів останнього розряду індикатора лічильника під час проходження через лічильник потоку повітря з об'ємною витратою  $1/3 q_{v \min}$ , яка зазначена в документації на лічильник, наступним чином:

а) задати на установці витрату, яка відповідає значенню від  $0,27q_{v \min}$  до  $0,33q_{v \min}$ ;

б) під час проходження повітря слідкувати за показами індикатора лічильника;

в) вимірювання значення об'ємної витрати при заданому значенні порогу чутливості здійснюється робочим еталоном або ротаметром [8].

Результати перевірки вважати позитивними, якщо покази об'єму на індикаторі зростають.

## ВИСНОВКИ

Аналіз засобів вимірювання витрати природного газу показав, що одним із перспективним на сучасний етап є ультразвукові витратоміри, так як вони характеризуються високим діапазоном вимірюваних витрат (1:100 і більше), відсутністю зношуваних рухомих частин і достатньо високою точністю, яка може не перевищувати 1%. Досліджені особливості функціонування акустичних витратомірів, зокрема вплив на їх похибку факторів, які визначаються розподілом швидкостей потоку газу в трубопроводі. Тому в магістерській роботі вирішено такі основні задачі:

- проведений аналіз методів вимірювання витрати природного газу;
- здійснено теоретичне обґрунтування доцільності розробки багатоканального акустичного витратоміра;
- розроблені основні конструктивні рішення при проектуванні витратоміра;
- виконані дослідження впливу розподілу швидкостей потоку в трубопроводі на похибку витратоміру;
- розроблено метрологічне забезпечення для акустичного витратоміра.

На підставі отриманих результатів дипломного проектування визначена оптимальна схема розташування п'єзоелектричних перетворювачів в ультразвуковому лічильнику газу, що відкриває нові можливості для розроблення багатопроменевих лічильників газу підвищеної точності.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Облік природного газу: довідник / М. П. Андрієшин, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський; за редакцією С. А. Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с.
2. Вимірювання витрати та кількості газу : довідник / М. П. Андрієшин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш та ін. - Івано-Франківськ : Сімик, 2004. - 160с.
3. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2-2005 (ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, NEQ)  
[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=50184](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50184)
4. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів. - Івано-Франківськ.: Сімик, 2006.- 1313 с.
5. Власюк Я.М., Кисіль І.С., Середюк О.Є., Реалізація концепції створення єдиної системи обліку природного газу в Україні. *Методи та прилади контролю якості*. 2005. №13. С.61-65.
6. Бродин Ю.І. Дзвонова установка відтворення та вимірювання об'єму газу для повірки лічильників газу: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. - Івано-Франківськ: Факел, 2002. - 19с.
7. Бродин І.С. Середюк О.Є., Чеховський С.А. Поршнева витратомірна установка високого тиску РПДУ-41пг: Проспект МВССО УРСР. Івано-Франківський інститут нафти та газу. - Київ: Реклама, 1989. - 4с.
8. Метрологія. Лічильники газу побутові. Методи та засоби повірки: Р50-071-98. – [Чинний від 1998-03-27]. – К.: Державний стандарт України, 1998. – III, 20 с.
9. ДСТУ ISO 17089-2:2018 Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Лічильники газу ультразвукові. Частина 2. Лічильники

для промислового обліку (ISO 17089-2:2012, IDT)

[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=81393](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81393)

10. ДСТУ 9036:2020 Метрологія. Лічильники газу ультразвукові. Методика повірки. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=90537](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90537)

11. Методика експериментальних досліджень впливу параметрів природного газу на метрологічні характеристики лічильників газу/ А.Г. Бестелесний, Я.М. Власюк, І.С. Кисіль, Б.І. Прудніко, О.Є. Середюк, С.А. Чеховський. *Методи та прилади контролю якості*. 2007. №18. С.46-50.

12. Rainer Kramer, Bodo Mickan/Transfer of gas meter user for legal metrology applications (custody transfer) in Germany//www.inti.gav.ar.

13. Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості : навч. посіб. / С. А. Чеховський, І. С. Петришин, Н. М. Піндус, С. П. Ващишак, Л. А. Витвицька, О.Є. Середюк та ін.; за ред.: С. А. Чеховського; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2010. - 534 с.

14. Пістун Є.П. Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. Львів: ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. 576 с.

15. Лічильник газу GFA202 настанова з експлуатації 636128.314EU-202 HE <http://energo.kh.ua/en/products/english-ultrasonic-gas-flow-meters-gfa-202-gfa414/>

16. Лічильник газу GFA414 настанова з експлуатації 636128.314EU-414 HE <http://energo.kh.ua/en/products/english-ultrasonic-gas-flow-meters-gfa-202-gfa414/>

17. ДСТУ EN 12405-2:2018 Лічильники газу. Пристрої перетворювання. Частина 2. Перетворювання в енергію (EN 12405-2:2012, IDT) [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=81570](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81570)

18. Стеценко А.А. Удосконалення ультразвукового методу і засобів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах: автореф. дис.

канд. техн. наук: 05.01.02- стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Харків: ННЦ “Інститут метрології” 2015. — 23 с.

19. Патент на винахід № 97074. С2 Україна. МПК (2006.01) G01F1/66 Ультразвуковий фазово-імпульсний витратомір / Середюк О.Є., Лютак З.П., Малісевич В. В. № а201104611. заявл. 14.04.2011. опубл. 26.12.2011. Бюл №24.

20. ДСТУ 3383:2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу  
[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=61972](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61972)

21. Середюк О.Є. Метрологічні дослідження еталона передавання одиниці витрати природного газу на базі витратоміра змінного перепаду тиску: зб. наук. праць «Теплоенергетика, Інженерія довкілля, Автоматизація» Вісник НУ «Львівська політехніка». 2008. Вип. 617. С. 154–162.

22. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. З Поправкою (ІПС № 8-96) [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78591](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78591)

23. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів: Підручник. К.: Либідь, 1999. – 496 с.

24. Щупак І.В., Чернишенко О.М., Андріїшин Н.М., Негреба Р.З., Сучасні підходи до вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу. Нафтогазова галузь України. 2014. № 5. С.39-41.