

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Кутовий Руслан Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121:006.91
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення еталону передавання одиниці витрати на базі
критичних сопел
(назва роботи)

175-Інформаційно-вимірювальні технології
(шифр і назва спеціальності)

Р.О. Кутовий
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник — Середюк Орест Євгенович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

О.Є. Середюк
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

В.Б. Білицук
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ – 2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 175-Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 20__ року

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

Кутовому Руслану Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення еталону передавання одиниці витрати на базі критичних сопел

керівник роботи Середюк Орест Євгенович, д.т.н., професор,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "03" 12 2024 року № 784/7

2. Строк подання студентом роботи 23.12.2024

3. Вихідні дані до роботи: вид еталону передавання – на базі критичних сопел; вид робочого середовища – повітря, природний газ; умови функціонування еталону передавання – надлишковий тиск 5-7кПа, температура 291-294К, максимальна витрата – 600м³/год

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

1. Аналіз методів і засобів передавання одиниці витрати природного газу

2. Принципи побудови еталонів передавання і технічні засоби для їх метрологічного дослідження

3. Метрологічні дослідження еталонів передавання одиниці витрати природного газу

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

1. Поле еталонів передавання витратовимірювальної техніки;

2. Технічні і метрологічні характеристики еталона передавання на базі барабанного лічильника;

3. Сопло критичного витоку;

4. Функціональна схема ЕП з використанням сопел критичного витоку для роботи в мережах низького тиску;

5. Функціональна схема градування ЕП за допомогою дзвонової еталонної установки.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| нормоконтроль | <i>Біліщук В.Б.</i> | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 30.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1 | <i>Вступ</i> | <i>05.12.2024</i> | |
| 2 | <i>Аналіз методів і засобів передавання одиниці витрати природного газу</i> | <i>05.12.2024</i> | |
| 3 | <i>Принципи побудови еталонів передавання і технічні засоби для їх метрологічного дослідження</i> | <i>10.12.2024</i> | |
| 4 | <i>Метрологічні дослідження еталонів передавання одиниці витрати природного газу</i> | <i>15.12.2024</i> | |
| 5 | <i>Оформлення пояснювальної записки</i> | <i>23.12.2024</i> | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

_____ (підпис)

Кутовий Р.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Середюк О.Є.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: Розроблення еталону передавання одиниці витрати на базі критичних сопел 78 с., 10 рис., 33 джерел, 5 аркушів графічного матеріалу.

Об'єкт дослідження – еталони передавання одиниці об'ємної витрати природного газу.

Мета роботи полягає у розробленні і метрологічному дослідженні еталона передавання одиниці об'ємної витрати природного газу на базі критичних сопел.

У магістерській роботі проаналізовано сучасний стан, види та область застосування еталонів передавання одиниці об'ємної витрати природного газу різних принципів дії.

В роботі розроблена методологія побудови еталонів передавання одиниці об'ємної витрати природного газу, здійснена її реалізація на прикладі функціональної схеми з можливістю роботи в мережах низького тиску. Розглянуті технічні засоби для метрологічного дослідження розробленого еталону передавання. Проведено теоретичні метрологічні дослідження розробленого еталону з використанням його метрологічної моделі.

ВИТРАТА, КРИТИЧНЕ СОПЛО, ЕТАЛОН ПЕРЕДАВАННЯ,
ПРИРОДНИЙ ГАЗ, ДЗВОНОВА УСТАНОВКА, ПОХИБКА,
НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ.

ABSTRACT

Master's thesis: Development of a standard for transferring a unit flow rate on the basis of critical nozzles 78 p., 10 figures, 33 sources, 5 sheets of graphic material.

Object of research - standards for the transmission of a unit of volumetric flow of natural gas.

The purpose of the work is to develop and metrological study of the standard for the transmission of a unit of natural gas volume flow based on critical nozzles.

The master's thesis analyzes the current state, types and scope of application of natural gas flow rate measurement standards of different operating principles.

The work develops a methodology for constructing standards for the transmission of a unit of natural gas volume flow, and implements it on the example of a functional diagram with the ability to operate in low-pressure networks. The technical means for metrological study of the developed transfer standard are considered. Theoretical metrological studies of the developed standard have been carried out using its metrological model.

FLOW RATE, CRITICAL NOZZLE, TRANSFER STANDARD, NATURAL GAS, BELL PLANT, ERROR, UNCERTAINTY.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 7 |
| 1 Аналіз методів і засобів передавання одиниці витрати природного газу | 9 |
| 1.1 Основи побудови еталонів передавання одиниці витрати природного газу..... | 9 |
| 1.2 Особливості впровадження еталонів передавання в Україні..... | 17 |
| 1.3 Аналіз відомих методів побудови повірочних схем для засобів вимірювання витрати | 21 |
| 1.4 Характерні особливості технічних засобів для реалізації повірочної схеми у витратометрії природного газу..... | 28 |
| 1.5 Основи контролю метрологічних характеристик лічильників і витратомірів..... | 30 |
| 1.6 Постановка задачі на магістерську роботу..... | 39 |
| 2 Моделювання засобів передавання одиниці витрати природного газу..... | 41 |
| 2.1 Розроблення методології побудови еталонів передавання..... | 41 |
| 2.2 Розроблення принципів побудови еталонів передавання на основі критичних сопел..... | 43 |
| 2.3 Еталонні установки для метрологічної атестації критичних сопел..... | 48 |
| 3 Метрологічні дослідження еталонів передавання одиниці витрати природного газу | 53 |
| 3.1 Узагальнена метрологічна модель..... | 53 |
| 3.2 Метрологічна модель еталона передавання на базі витратоміра критичного витоку | 58 |
| 3.3 Розрахунок теоретичної похибки еталона передавання..... | 64 |

| | |
|---|----|
| 3.4 Метрологічні дослідження еталонів передавання на базі витратоміра критичного витоку..... | 66 |
| Висновки..... | 72 |
| Перелік посилань на джерела..... | 73 |

ВСТУП

Збільшення обсягів видобутку та транзитного транспортування нафти і газу – один із ключових напрямків розвитку економіки України. Успішне вирішення цього завдання неможливе без застосування методів та засобів неруйнівного контролю. Забезпечення високої якості продукції вимагає розроблення і застосування різноманітних засобів контролю. Якість виробів тісно пов'язана з фізико-механічними властивостями матеріалів та впливає на надійність і довговічність систем, апаратів і приладів на точність їх роботи. Тому розробка і впровадження нових методів і засобів неруйнівного контролю продукції є одним із важливіших питань на сьогоднішній день.

Проблема обліку природного газу, його економного і раціонального використання була і залишається актуальною у таких сферах як енергооблік та енергозбереження. Вивченню цієї проблеми присвячено чимало досліджень [1-3], але в переважній більшості вони зводяться до розроблення комплексу організаційних, які спрямовані на посилення контролю над цільовим використанням природного газу, на мінімізації його фізичних втрат в розподільних газопроводах і на вдосконалення приладного обліку газу.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є впровадження сучасних засобів і методів вимірювання кількості та показників якості газу на всіх газовимірювальних ділянках [2]. Це можливо за умови вдосконалення існуючої національної еталонної бази та створення нових еталонних засобів у галузі витратометрії природного газу, а також застосування новітніх технологій обліку газу у всіх сферах народного господарства і побуті [3].

Так за інформаційними даними в Україні донині відсутні еталонні установки [3], які були би метрологічно атестовані в режимі відтворення і вимірювання миттєвих витрат газу, що характеризує потребу їх технічного вдосконалення, чим обмежується можливість розробки нових конструкцій сучасних витратомірів газу.

Вказані обставини зумовлюють необхідність більш детального метрологічного дослідження і кількісної оцінки поряд з основними

інформативними інтегральними параметрами (значення контрольного об'єму газу і часу його відтворення) ще й якісних інформативних параметрів (миттєве значення витрати газу, його тиск, температура), а також ґрунтового вивчення кореляційних характеристик вказаних параметрів.

Тому виходячи з суті даної проблеми тема магістерської роботи є досить актуальною та потребує подальшого розвитку.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

1.1 Основи побудови еталонів передавання одиниці витрати природного газу

Передавання розмірів одиниць фізичних величин від еталонів робочим засобам вимірювань проводиться за допомогою зразкових засобів вимірювальної техніки (ЗЗВТ), точність яких значно вища, ніж робочих засобів [4]. Зразкові засоби вимірювань – це затверджені в установленому порядку міри, вимірювальні прилади або ж вимірювальні перетворювачі, які призначені для перевірки та градування за ними інших засобів вимірювальної техніки. ЗЗВТ називається засіб, який використовується для перевірки інших засобів вимірювальної техніки (вимірювань) і затверджений як зразковий. На зразкові засоби вимірювань видаються свідоцтва з вказаними метрологічними характеристиками та розрядом за повірочною схемою. Зразковими можуть бути тільки ті засоби вимірювальної техніки, які своєчасно пройшли метрологічну атестацію і визнані придатними для використання їх як зразкові.

За точністю зразкові засоби поділяються на чотири розряди, а засоби, які відповідають найвищому ступеню повірочної схеми, називаються вихідними зразковими засобами вимірювань. На рис.1.1 показано метрологічну послідовність передачі розмірів одиниць фізичних величин від первинних еталонів – робочим еталонам, від них – розрядним зразковим засобам вимірювань, далі – робочим засобам вимірювань.

На схемі показана ієрархія засобів вимірювальної техніки. Найвищий рівень точності представлений первинним еталоном, нижні рівні займають робочі засоби вимірювань.

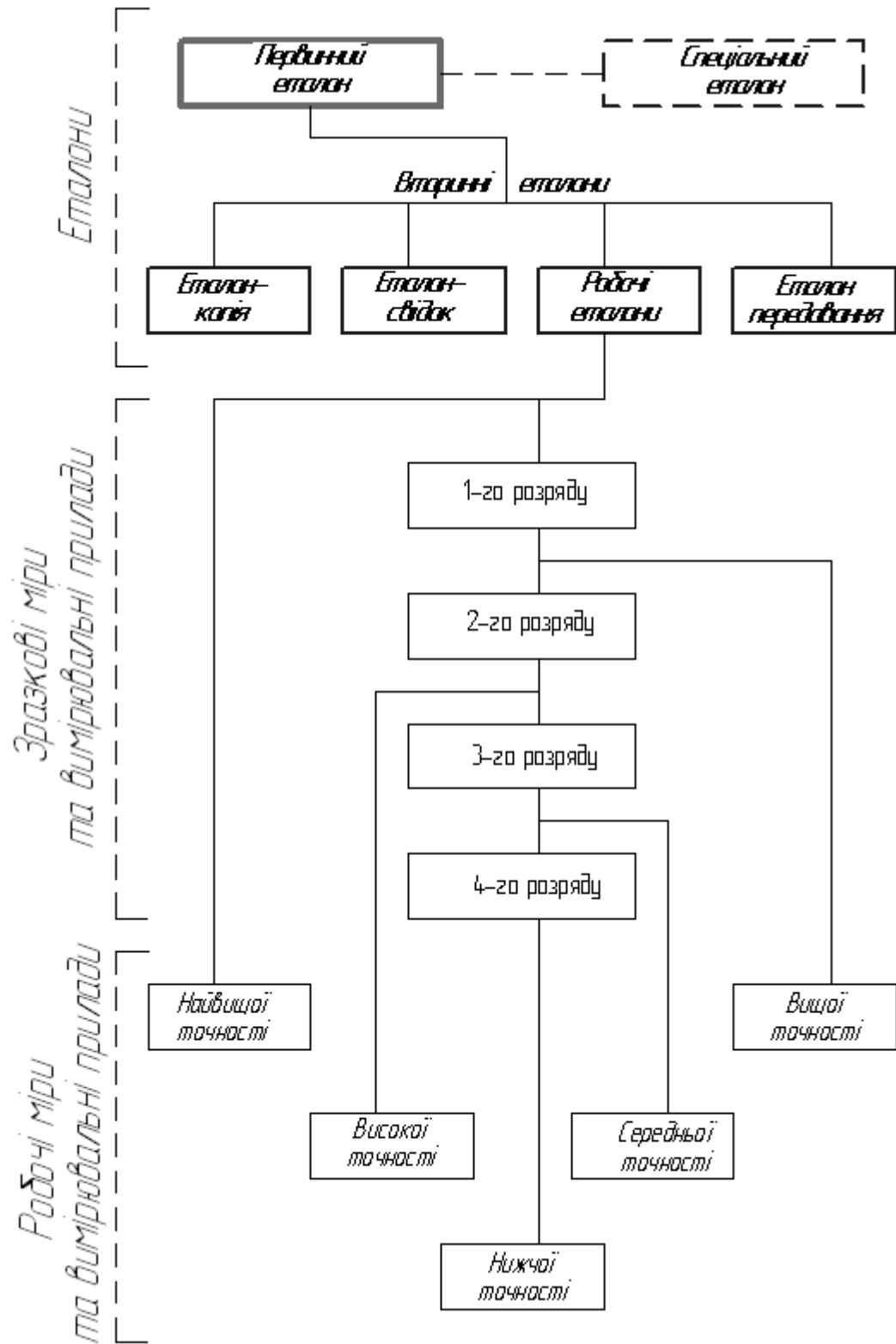


Рисунок 1.1 – Метрологічна послідовність передачі розмірів фізичних одиниць від еталонів до робочих вимірювальних приладів

Між розрядами зразкових засобів вимірювань існує точномірна підпорядкованість: засоби 1-го розряду мають найвищу точність, а засоби 4-го розряду – найнижчу. ЗЗВ 1-го розряду повіряються робочими еталонами, а зразкові засоби 2-го та наступних розрядів повіряються зразковими засобами безпосередньо попередніх розрядів. Як видно зі схеми, окремі робочі засоби найвищої точності можуть повірятися за допомогою робочих еталонів; робочі засоби вимірювання вищої точності – зразковими засобами 1-го розряду; робочі засоби високої точності – зразковими засобами 2-го розряду та ін.

ЗЗВ зберігаються у метрологічних інститутах, лабораторіях державної та відомчої метрологічної служби [5]. Засоби вимірювань як зразкові затверджуються органами Держстандарту, які у своїх лабораторіях мають зразкові засоби вимірювань вищого розряду, ніж пред'явлені для атестації. В окремих випадках з дозволу органів державної метрологічної служби надається право затверджувати зразкові засоби вимірювань метрологічним службам, якщо в останніх є відповідні умови.

Усі зразкові засоби вимірювань підлягають обов'язковій повірці у терміни, визначені Держстандартом України.

В метрології існують методи обробки даних при прямих, опосередкованих, сукупних та сумісних вимірюваннях [6]. Більш детальніше зупинимось на прямих (безпосередніх) та опосередкованих вимірюваннях.

Прямі однократні вимірювання проводять з кількістю спостережень не більше трьох. За простоту експерименту приходиться розраховуватися або більшою кількістю апріорної інформації, або грубою оцінкою похибки результату. Принципово важливим є правильність вибору моделі об'єкту та визначення поняття вимірюваної величини. В протилежному випадку, навіть коли результат спостереження (вимірювання) дозволить скоригувати модель об'єкта, то сам результат є неправильним, а вимірювання – незакінченим.

Обробка даних є різною для різних категорій вимірювання у відношенні повної оцінки точності. Бувають однократні прямі вимірювання з точною оцінкою похибок, вимірювання з наближеною оцінкою похибок та вимірювання з апріорною оцінкою похибок.

Прямі вимірювання з багатократними спостереженням – це найбільш поширена і досліджена задача обробки даних. При цьому математична постановка задачі є найпростішою – оцінити математичне сподівання на основі результатів спостережень:

$$x_i = a + \xi_i + \nu_i, \quad i=1, \dots, n, \quad (1.1)$$

де ξ_i – випадкові похибки, ν_i – систематичні похибки.

До опосередкованих вимірювань з однократним спостереженням аргументів відносяться такі, які базуються на, прямих вимірюваннях з однократними спостереженнями. Величини, які при цьому однократно вимірюються, називаються вимірюваними аргументами. Передбачається, що залежність опосередковано вимірюваної величини y від аргументів x_1, x_2, \dots, x_m є відомою:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1.2)$$

де m – кількість аргументів, від яких залежить y .

До опосередкованих вимірювань з багатократними спостереженнями відносять такі, при яких залежність між вимірюваною величиною і аргументом аналогічна залежності (1.2), однак оцінки аргументів одержують шляхом вимірювання з багатократними спостереженнями. Тому в даному випадку більш обґрунтованими є ймовірнісні моделі похибок і частіше використовується представлення похибок з розділенням їх на систематичні і випадкові складові.

Практична реалізація методів передавання одиниці об'єму витрати газу підтверджується в ДСТУ 3383: 2007, а частина схеми щодо еталонів передавання [7] і на рис.1.2.

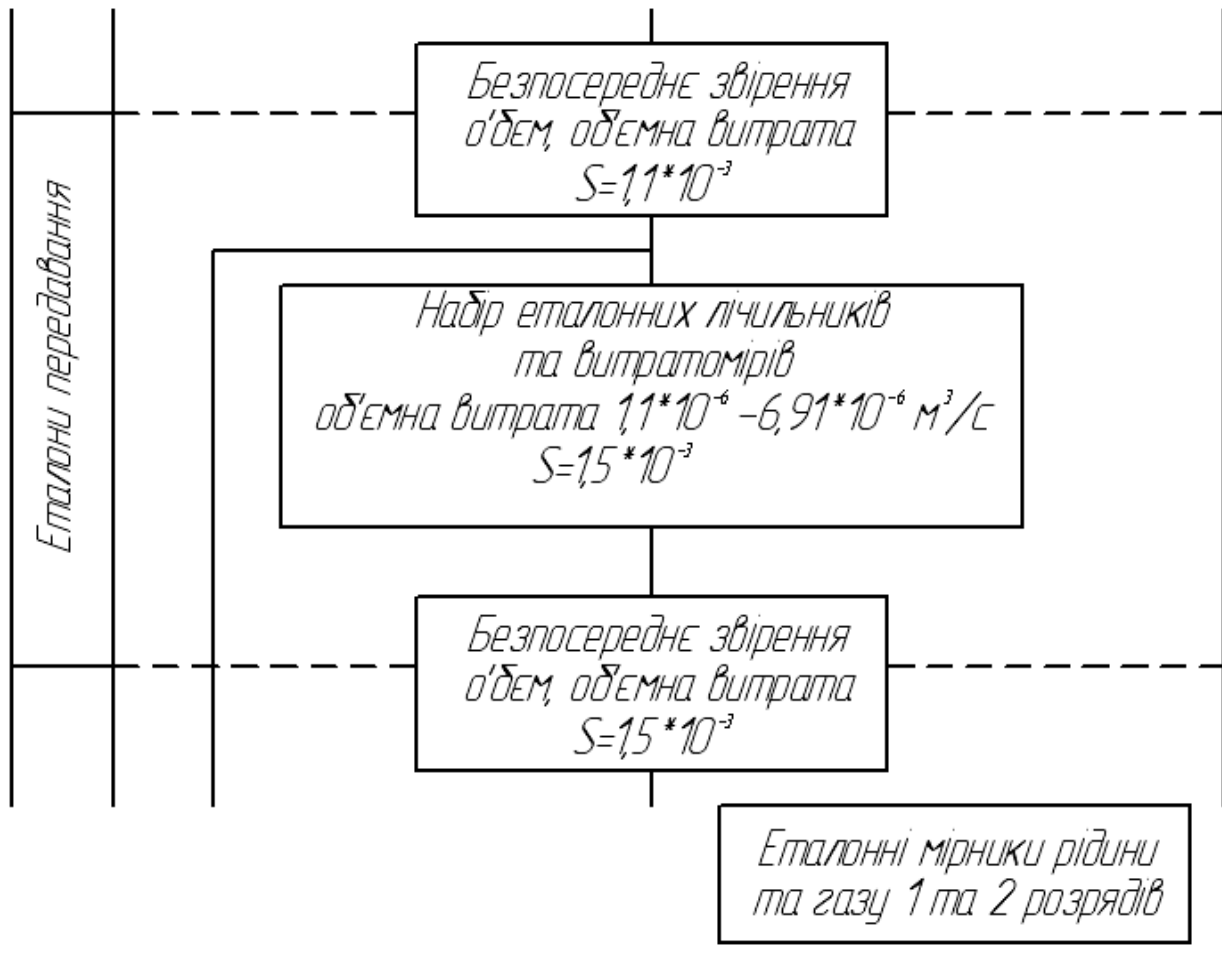


Рисунок 1.2 – Поле еталонів передавання

Поле еталону передавання (рис.1.2) використовує тільки безпосереднє звірення.

Як вторинні еталони можуть застосовуватися, установки повірочні дзвонового типу, гравіметричні, установки еквівалентного витіснення, поршневого типу з діапазоном вимірювання об'єму газу від $0,05$ до 20 м^3 та об'ємної витрати газу від $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ до $6,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» розробив вторинний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу. Враховуються новітні наукові досягнення провідних світових інститутів у галузі витратометрії, а також виходячи з того, що робочі еталони є в кожній області України, у стандарті [8] введено нове поле «Еталони передавання» (рис.1.2). Еталони передавання (ЕП) можуть використовувати набори еталонних лічильників та витратомірів

об'ємною витратою від $1,1 \cdot 10^{-6}$ до $6,91 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Сумарний середній квадратичний відхил результатів звірення S_{Σ} еталона передавання з державним еталоном не повинен перевищувати $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Так від аналізу існуючих методів передавання одиниці витрати газу переходимо до аналізу їх засобів.

Технічні засоби передавання одиниці фізичних величин поряд з еталонами-копіями, робочими еталонами відносяться до вторинних еталонів. У відповідності до основних принципів метрології еталонами передавання називають вторинні еталони, які призначені для взаємного звірення еталонів, що за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо [9]. У витратовимірjuвальній техніці найважливішою з цих обставин є стаціонарність еталонних установок (ЕУ). Тому на сучасному рівні побудови ЕУ еталони передавання є необхідною умовою забезпечення єдності вимірювань об'єму і об'ємної витрати природного газу. Свідченням цього є запровадження поля «еталони передавання» в новому нормативному документі [8]. Однак, згідно цього документу як окремий вид еталонів розглядаються і вторинні еталони, які згідно викладених вище міркувань на базі [9] охоплюють більш ширше коло ЗВТ.

Як вторинні еталони [8] застосовують установки повірочні дзвонового типу, гравіметричні, установки еквівалентного витіснення, PVTt-типу, поршневого типу з діапазоном вимірювання об'єму газу від 0,05 до 20 м³ та об'ємної витрати газу від $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с до $6,94 \cdot 10^{-1}$ м³/с. Сумарний середній квадратичний відхил результатів звірення S_{Σ} робочих еталонів з вторинними еталонами не повинен перевищувати $2 \cdot 10^{-3}$.

Згідно чинного нормативного документу [5] передавання розміру одиниці є процес зведення одиниці фізичної величини, яка відтворюється або зберігається за допомогою ЗВТ, що повіряється, до розміру одиниці, що відтворюється або зберігається еталоном (робочим еталоном), і цей процес зведення здійснюють при повірці ЗВТ.

Аналіз джерел показує [4,6,9], що як ЕП знайшли застосування мобільні засоби, зокрема, побудовані на базі пристроїв з обертовими елементами, а також на пристроях звуження потоку.

Конструктивна реалізація ЕП з обертовими елементами може бути здійснена на базі турбінних, роторних і барабанних лічильників газу. При цьому до них ставлять підвищені вимоги щодо технологічного виконання і метрологічних характеристик. Так як метрологічні характеристики ЕП не можуть бути встановлені методом опосередкованих вимірювань, то вони реалізують отримання і передачу одиниці вимірювань прямим методом.

При цьому їх реалізація спочатку була здійснена на рідинному робочому середовищі. Так, згідно з [10] установка створюється двохступеневою, в якій спочатку здійснюють градування (передачу одиниці) від еталонного ЗВТ до кожного окремого витратоміра вузькограничного контрольного колектора. Після цього вихід вузькограничного контрольного колектора від'єднується від еталонного ЗВТ і під'єднується до виходу проміжного середньограничного контрольного колектора і здійснюють градування кожного окремого витратоміра в ньому

Водночас ще з 80-х років фірмою Gasunie (м.Гронінген, Нідерланди) [11] застосовувався набір з трьох роторних лічильників газу G40 типу CVM (Constant Volume Meter), які застосовувалися для передавання одиниці об'єму повітря від дзвонового еталона об'ємом $0,5\text{м}^3$ з похибкою 0,02% до аналогічного еталона об'ємом 4м^3 з похибкою 0,10%.

Суттєвим недоліком застосування ЕП в Україні є їх відсутність вітчизняного виготовлення, що пов'язано, очевидно, з недостатньо технічним рівнем виготовлення вітчизняних турбінних і роторних лічильників газу, а також практичний аспект проведення звірень тільки на повітрі, а не на природному газі.

Серед нових досліджень побудови ЕП є застосування компараторів на базі лічильників, які працюють з трубопоршневою установкою [9]. Вкажемо також на нове технічне рішення [12] щодо конкретної реалізації мобільного роторно-поршневого прувера з роз'ємним з'єднанням і платформою для

транспортування, а також спеціальне технологічне рішення під'єднання ЕЛ з вузлом приєднання паралельних випробувальних ліній вузького діапазону витрати і укомплектованих дублюючими ЕЛ. Це забезпечує розширення діапазону витрат та тисків до значень, при яких можна здійснювати повірку робочих ЗВТ.

Конструктивна реалізація ЕП на пристроях без рухомих елементів реалізується переважно на базі критичних сопел (КС). Згідно принципу дії витратоміри із застосуванням критичних сопел забезпечують пряме зв'єрення ЕУ з використанням алгоритму вимірювання масової витрати газу [4,9].

Найбільшого поширення останніми роками саме як ЕП критичні сопла набули за кордоном.

Застосування КС як ЕП передбачається при створенні метрологічного центру в м.Боярці [13]. При цьому їх конструкція забезпечить створення мобільних засобів на максимальну витрату до $400\text{м}^3/\text{год}$ при тисках $4,0\text{МПа}$, а в поєднанні з ЕП роторного і турбінного типів планується реалізація способу комплексного відтворення, визначення та передачі еталонних значень витрати газу. В перспективі передбачається застосування цих сопел для гармонізації створюваних в метрологічному центрі еталонів з іншими вітчизняними і закордонними еталонами витрати газу.

До новітніх технічних рішень щодо способу зв'єрення методів та пристроїв повірки лічильників газу відома корисна модель [14], яка передбачає при повірці засобів вимірювання витрати одночасне використання зв'єрень показів комплексу РЕ (сопел критичного витоку, еталонних турбінних, роторних та ультразвукових лічильників), які встановлені на різних пристроях для повірки цих засобів.

Перевагами застосування ЕП з обертовими елементами і на базі критичних сопел є можливість досягнення високої точності передавання одиниць, створення їх мобільних варіантів і функціонування як на повітрі так і на природному газі. Як недолік вкажемо, що їх реалізація потребує високого технологічного рівня виготовлення ЕП, наявність відповідних ЕУ і методичних нормативних документів достатнього наукового рівня. Також відсутні

дослідження ЕП, які би могли працювати на різних робочих середовищах при передачі одиниці вимірювання із повітря на природний газ.

1.2 Особливості впровадження еталонів передавання в Україні

Враховуючи те, що державний еталон та більшість вторинних еталонів являють собою складні динамічні системи, які не підлягають демонтажу та перевезенню, з метою забезпечення можливості передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу методом безпосереднього звірення вторинним та робочим еталонам – повірочним установкам, а також проведення їх взаємних звірень, в повірочну схему введено поле еталонів передавання [15].

Звірення за допомогою ЕП доцільно проводити тому, що метрологічний аналіз повірочних установок (робочих еталонів) може не в повній мірі ідентифікувати всі джерела похибки, особливо її систематичної складової, і тому звірення з державним еталоном є найкращим способом виявлення цих складових.

Зупинимось детальніше на характеристиці ЕП як складової частини технічної основи метрологічного забезпечення ЗВТ об'єму та об'ємної витрати газу.

З досвіду експлуатації еталонів передавання в Європі та США [11] можна сформулювати основні технічні вимоги до еталонів передавання.

Перш за все кожний еталон передавання підлягає індивідуальному градуюванню для забезпечення вищого рівня точності. Відтворюваність градуювальної характеристики ЕП, яка характеризує її стабільність протягом тривалого часу (як мінімум протягом міжповірочного інтервалу), повинна бути не гірше $\pm 0,05\%$. Градуювальна характеристика повинна періодично контролюватися, особливо після транспортування ЕП або після його тривалого зберігання. Градуювальна характеристика еталонів передавання повинна апроксимуватися поліномом не вище другого порядку виду [15]

$$\delta(q) = a_{-2}q^{-2} + a_{-1}q^{-1} + a_0 + a_1q^1 + a_2q^2 \quad (1.3)$$

де a_i – коефіцієнти апроксимаційного полінома, які визначаються із результатів градування; q – об'ємна витрата.

Оптимальним є лінійний характер градувальної характеристики, відхилення результатів експериментальних досліджень від апроксимованої характеристики повинно бути не більше $\pm 0,05\%$ у всьому діапазоні витрат ЕП.

ЕП повинен мати добре вивчену фізичну модель і зрозумілі зовнішні впливи на нього. Якщо на характеристики еталона можуть впливати зміна температури, умови монтажу, параметри робочого середовища, то необхідно усунути ці впливи або вони повинні бути передбачуваними, щоб їх можна було враховувати і виконувати необхідні коригування.

ЕП повинен бути стійким до механічних пошкоджень при транспортуванні та експлуатації. Бажаним є виконання та використання еталонів передавання у вигляді модульної конструкції, яка повинна бути стабільною і однаковою для різних типів установок.

Особливою вимогою до ЕП є їх сумісність (електрична, механічна, гідродинамічна тощо) з державним, вторинними та робочими еталонами. Для забезпечення цієї вимоги еталони передавання повинні комплектуватися високочастотними та низькочастотними імпульсними перетворювачами об'єму та об'ємної витрати газу, а також їх атестація (градування) та експлуатація повинні проводитися з прямими ділянками трубопроводів, які повинні бути невід'ємною складовою ЕП і забезпечувати однакове положення їх монтажу.

Бажаною є наявність самодіагностуючих компонентів еталона передавання. Для цього еталони передавання комплектують дублюючими імпульсними перетворювачами та системою збору і обробки інформації.

Також еталони передавання не повинні збурювати потік робочого середовища (не створювати пульсацій потоку, резонансні явища тощо), щоб не впливати на метрологічні характеристики еталонів, що звіряються.

У даний час в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» створені та проходять практичну апробацію декілька ЕП одиниці об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні витрат від $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $6,94 \cdot 10^{-1}$ м³/с, що дозволить охопити весь комплекс еталонів та повірочних установок, які експлуатуються в

метрологічній системі України для забезпечення єдності та достовірності вимірювань у сфері обліку газу.

Звірення повірочних установок (робочих еталонів) із державним еталоном за допомогою еталонів передавання проводиться за таким алгоритмом.

ЕП монтується на повірочній установці (робочому еталоні) на місце, де встановлюється робочий ЗВТ. Далі проводиться визначення його градуювальної характеристики виду $\delta=f(g)$ згідно з алгоритмом, який покладений в основу роботи робочого еталона (повірочної установки), що звіряється.

Наступним кроком є розрахунок рівня еквівалентності робочого еталона (повірочної установки), що звіряється, до державного первинного еталона за формулою (1.4)

$$E_N = \frac{\delta_{I_{УСТ}} - \delta_{I_{ДЕТУ}}}{\sqrt{\varepsilon_{УСТ}^2 + \varepsilon_{ДЕТУ}^2}}, \quad (1.4)$$

де $\delta_{I_{УСТ}}$, $\delta_{I_{ДЕТУ}}$ – похибки еталона передавання за i -го значення об'ємної витрати, визначені на установці (еталоні), що звіряється, та державному еталоні відповідно; $\varepsilon_{УСТ}$, $\varepsilon_{ДЕТУ}$ – довірчі границі похибки ЕП при його градуюванні на повірочній установці (робочому еталоні), що звіряється, та державному еталоні відповідно.

Значення рівня еквівалентності не повинне перевищувати 1 за всіх значень об'ємної витрати. У випадку, якщо хоча б за одного значення об'ємної витрати $E_N \geq 1$, повірочна установка (робочий еталон) визнається непридатною.

Методика звірення за допомогою еталонів передавання апробована на кількох еталонах та повірочних установках України. Приведемо деякі результати проведених звірень (табл.1.1 та рис.1.3).

Таблиця 1.1 – Характеристики еталонів передавання на базі барабанних лічильників із масляним гідравлічним затвором EP-2 та EP-15.

| Характеристика | EP-2 | EP-15 | Delta S-Flow G100 | TZ Fluxi 2200 G1600 |
|--|-----------|-----------|-------------------|---------------------|
| Діапазон витрат, м ³ /год | 0,016...2 | 0,15...15 | 3...160 | 160...2500 |
| Границі відносної похибки вимірювання, % | ±0,15 | ±0,15 | ±0,15 | ±0,15 |
| Відхилення від апроксимованої характеристики в усьому діапазоні витрат, %, не більше | ±0,03 | ±0,01 | ±0,04 | ±0,03 |
| Відтворюваність, % | ±0,05 | ±0,05 | ±0,05 | ±0,05 |

Таким чином, звірення всіх повірочних установок за допомогою еталонів передавання дає можливість суттєво підвищити рівень забезпечення єдності та достовірності вимірювань у галузі витратометрії природного газу.

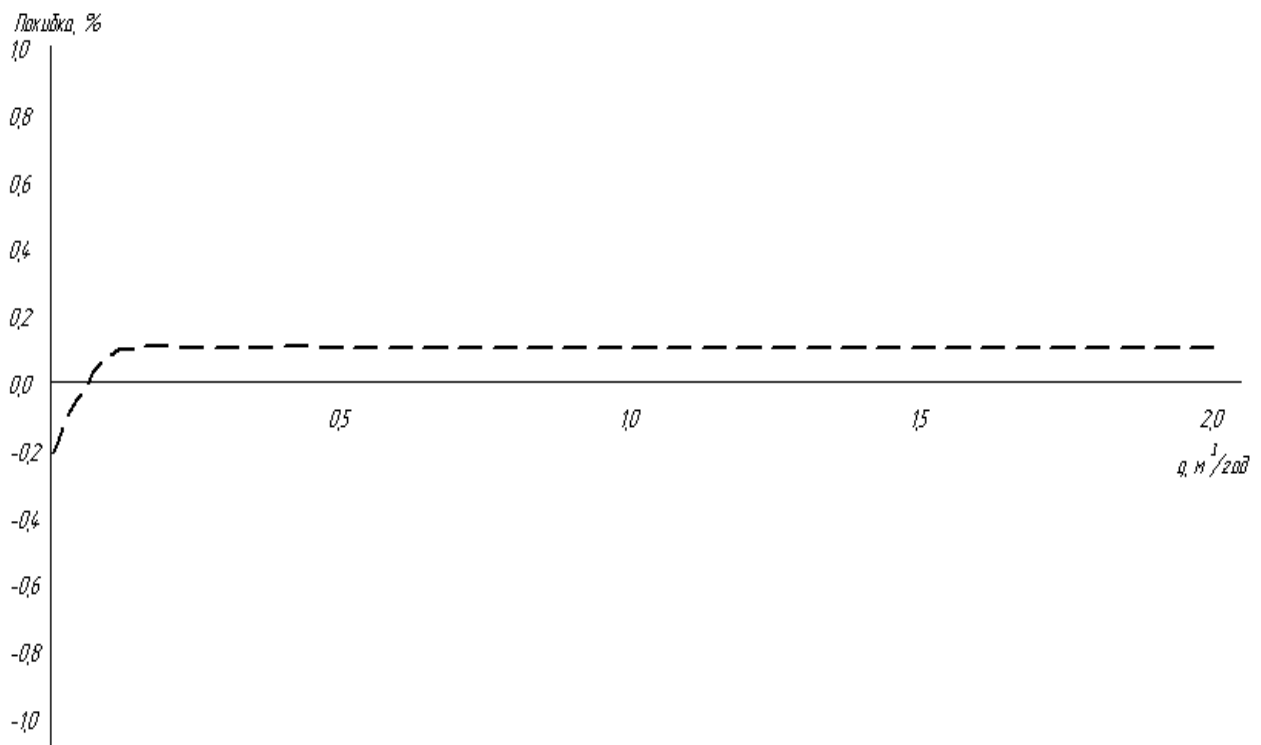


Рисунок 1.3 – Градувальна характеристика еталону передавання EP-2

1.3 Аналіз відомих методів побудови повірочних схем для засобів вимірювальних витрати

Для забезпечення правильної передачі розміру одиниць фізичних величин в усіх ланках метрологічного ланцюга (від еталонів до зразкових засобів, а від них до робочих) повинні дотримуватися певного порядку та послідовності. Цей порядок і забезпечується за допомогою повірочних схем.

Повірочна схема [4] – нормативний документ, що регламентує метрологічну підпорядкованість засобів вимірювальної техніки, які використовуються для передавання розміру одиниці фізичної величини від еталона або вихідного зразкового засобу вимірювальної техніки до інших засобів вимірювальної техніки із встановленням методів та похибок передавання.

У повірочній схемі вказується назва затвердженого державного еталона, вторинних еталонів, зразкових та робочих засобів вимірювальної техніки, методи повірки [9]. Крім того, у повірочній схемі наводяться похибки відтворення та передачі розміру одиниці кожному засобу вимірювання, наведеному у схемі, а також вказуються міри, вимірювальні прилади та вимірювальні перетворювачі, які використовуються у відповідній галузі вимірювальної техніки.

У повірочних схемах подаються методи повірки, які поділяються на такі види:

- безпосереднє звіряння засобів вимірювальної техніки зразковими засобами вимірювальної техніки аналогічного виду;
- звіряння засобів вимірювальної техніки з використанням приладу порівняння;
- повірка вимірювального приладу за зразковою мірою шляхом вимірювання ним величини, відтвореної мірою;
- пряме вимірювання зразковим вимірювальним приладом величини, яка відтворюється мірою, що підлягає повірці;
- непрямі вимірювання величини, яка відтворюється мірою або вимірюється приладом, що підлягають повірці.

Проведемо аналіз відомих повірочних схем ЗВТ.

В переважній більшості повірочні схеми забезпечують передавання одиниці одної фізичної величини, наприклад, маси, температури, надлишкового тиску і т. д [4,9]. Специфікою відомих раніше створених повірочних схем у сфері витратометрії газу є розроблення їх окремих структур для об'ємної і масової витрати газу. Так як досягнення єдності вимірювань в даній роботі стосується перш за все України і передбачає розроблення вдосконаленої методології передавання одиниці вимірювання у сфері витратометрії природного газу, то спочатку проаналізуємо відомі аналогічні повірочні схеми, а потім порівняємо їх з чинною в Україні Державною повірочною схемою [8] для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.

Повірочна схема, яка була розроблена в СРСР [16], передбачала застосування державного і робочого еталонів, а також зразкових засобів вимірювань у вигляді набору зразкових витратомірів або повірочних установок. При цьому останні атестувалися переважно з використанням методу опосередкованих вимірювань, чим не завжди досягалося дотримання єдності вимірювань, хоча нормативними документами передбачалася можливість застосування безпосереднього звірення. Внаслідок відсутності високоточних засобів звірення, які могли би функціонувати за робочих умов вказаних повірочних установок практично не проводилися їх звірення, а досягнення єдності вимірювань базувалося на застосуванні зразкових ЗВТ, запозичених з інших повірочних схем, наприклад, зразкових ваг, мірників, кінцевих мір і т.д. При цьому передавання одиниці відтворюваних величин від зразкових установок здійснювалося шляхом градуювання зразкових або робочих лічильників і витратомірів газу із застосуванням робочого середовища і діапазону робочих тисків зразкових засобів, встановлених технічними характеристиками повірочних установок. Також повірочна схема конкретно не відображала способу відтворення об'єму для досліджуваного лічильника газу, який визначався інтегруванням в часі відтворюваної витрати газу.

Особливістю однієї із закордонних повірочних схем [11] є застосування первинного еталона дзвонового типу з об'ємом дзвона $0,5\text{м}^3$, який функціонує

на повітрі, і набору ЕП на базі лічильників газу G40 типу CVM для атестації дзвонового мірника з більшим діапазоном робочих витрат (до $400\text{м}^3/\text{год}$).

Крім того, в схемі передбачено передавання одиниці об'єму при роботі лічильників на природному газі. Для забезпечення цього застосований підхід, згідно якого передбачається передавання одиниці об'єму для реалізації функціонування лічильників на природному газі. З цією метою застосовується методологія, згідно якої лічильник газу калібрують на різних режимах, зокрема, на природному газі при високому тиску ($0,8\text{МПа}$) і при низьких тисках (декілька кПа), що дає можливість експериментально встановити вплив тиску робочого середовища.

Поряд з геометричним методом градуювання поршневої установки застосовуються рідинні мірники для прямого методу градуювання її контрольних об'ємів, яка на природному газі працює при тисках до $3,5\text{МПа}$. Такий підхід забезпечує метрологічну атестацію лічильників при високих тисках природного газу, а далі їх повірку при менших тисках за допомогою еталонів передавання G250, які атестувалися на дзвоновій установці об'ємом 4м^3 при низьких тисках повітря. Перевагою цієї повірочної схеми є вперше реалізоване передавання одиниць вимірювання об'єму газу методом безпосереднього звірення ЗВТ з врахуванням умов реального природного газу. Границі похибок ЗВТ і їх технічні характеристики вказані на нижче на рисунку.

Особливістю схеми, яка застосовується в Словаччині [17] функціонує на повітрі на витрати до $(0,002\div 1000)\text{м}^3/\text{год}$ є застосування незначної кількості рівнів еталонних ЗВТ, якою передбачені такі види еталонів: первинні еталони, вторинні еталони, робочі еталони фірми «Premagas». Водночас схема передбачає застосування трьох первинних еталонів: одного дзвонового типу (витрати $2\div 65\text{м}^3/\text{год}$) і двох рідинного витіснення в діапазонах витрат $(0,01\div 0,2)\text{м}^3/\text{год}$ і $(0,1\div 3)\text{м}^3/\text{год}$ достатньо високої точності (невизначеність $\pm 0,07\%$), що є одним з кращих показників у світі [18]. Як позитивну сторону схеми відмітимо її чітку ієрархію і застосування трансферних еталонів на базі критичних сопел. Недоліками є відсутність конкретизації передаваної одиниці (витрата чи об'єм), а також недостатнє співвідношення метрологічних

характеристик між первинними і вторинними еталонами (становить один до двох і менше).

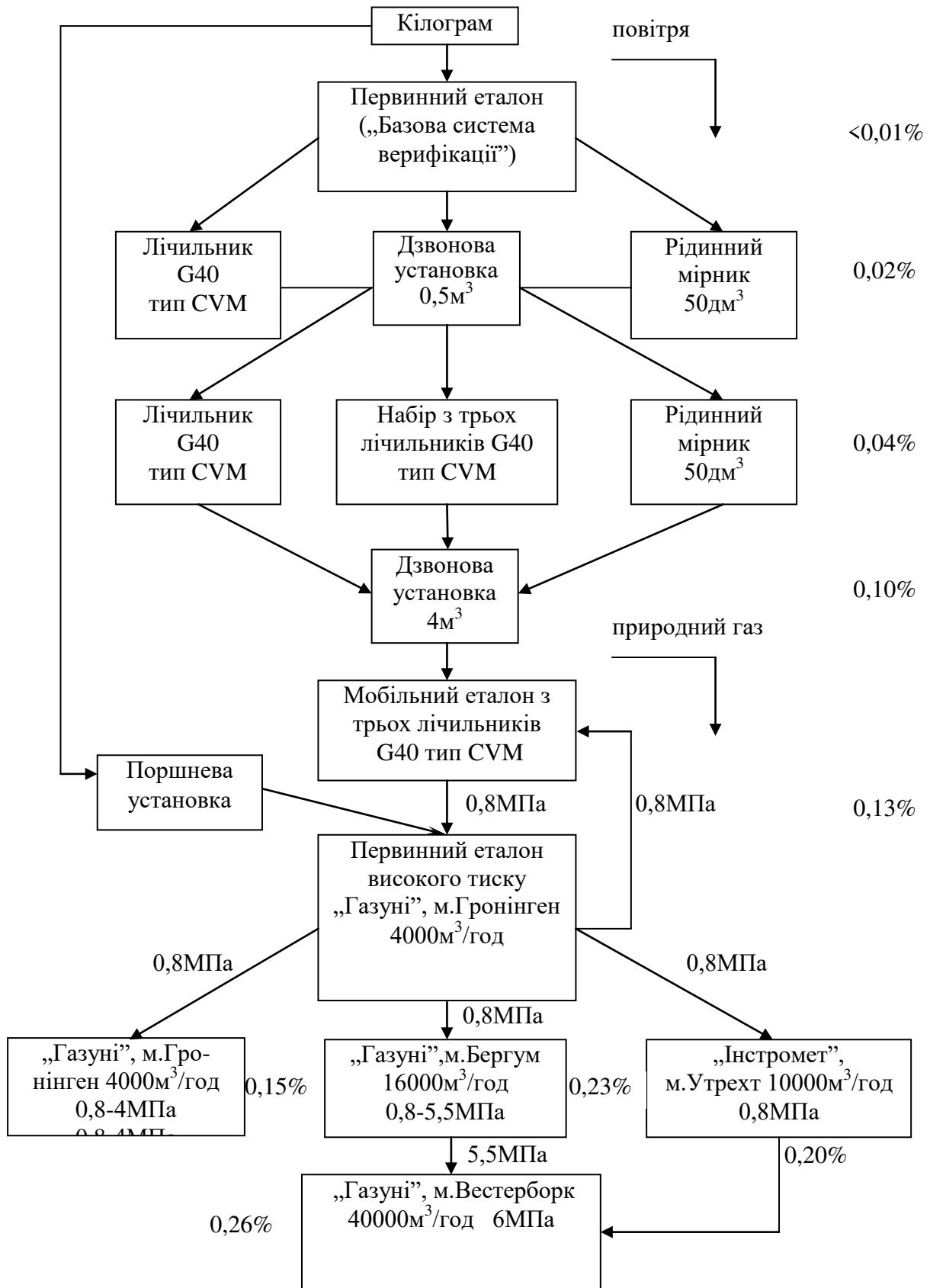


Рисунок 1.4 – Схема передавання одиниці об’єму газу в компаніях «Газуні» і «Інстромет» (Нідерланди)

Серед нових методологічних рішень побудови повірочних схем витратометрії газу є застосування первинних еталонів не у вигляді установок відтворення фізичної величини, а на базі одиниць вимірювання основних фізичних величин (метр, кілограм, секунда). Все більшої актуальності і практичної реалізації набувають національні і міждержавні звірення і гармонізація еталонів об'єму і витрати газу на повітрі і природному газі.

Проведемо аналіз повірочної схеми України для засобів вимірювання витрати та методологічних аспектів її вдосконалення.

Широке впровадження в народногосподарському комплексі різноманітних ЗВТ об'єму та об'ємної витрати природного газу з метою підвищення точності його обліку ставить перед Державною метрологічною системою та метрологічними службами міністерств та відомств першочерговим завданням впровадження ефективних заходів, направлених на поліпшення їх метрологічного забезпечення [16]. Одним із таких заходів є вдосконалення нормативної основи метрологічного забезпечення, стрижнем якої є державна повірочна схема ЗВТ об'єму та об'ємної витрати газу.

В Україні з 1996 року зі створенням і введенням у дію державного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДСТУ 03-01-96 впроваджено в дію ДСТУ 3383-96 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів об'єму та об'ємної витрати газу» [5]. Вона передбачала застосування таких полів ЗВТ: еталони (державний спеціальний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу), зразкові ЗВТ, зразкові ЗВТ, які запозичені з інших повірочних схем, робочі ЗВТ. Новизною цієї схеми було забезпечення єдності вимірювань засобів об'єму та об'ємної витрати газу. Однак, останнім часом ця схема почала не задовольняти умовам сьогодення, перш за все перевантаженістю державного еталона внаслідок зростання номенклатури і кількості робочих ЗВТ і відсутністю можливості застосування вторинних еталонів для підвищення продуктивності градууювально-перевірочних робіт.

Тому з 2007 року в Україні введений новий національний стандарт [8]. Головними схемою особливостями є подальше збереження чіткої ієрархії при застосуванні вперше для витратовимірювальної техніки вимірювання об'єму

газу нових полів еталонних засобів, зокрема, «вторинні еталони», «еталони передавання» та «робочі еталони» замість одного поля «зразкові ЗВТ» в попередній редакції стандарту. Дана схема подана в додатку А.

Новацією повірочної схеми є також застосування вторинних еталонів на базі установок еквівалентного витіснення. Також згідно з новою редакцією повірочної схеми, вторинні еталони, як і еталони передавання, застосовують для взаємного звірення та передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати робочим еталонам [16].

Характерні особливості технічних засобів цієї схеми висвітлено в наступному підрозділі.

Однак ця схема як і попередня нормативно-метрологічно не забезпечує градуювання лічильників і витратомірів газу, а також градуювання ВЗПТ з використанням природного газу, так як державний еталон функціонує на повітрі. В повірочній схемі не передбачене передавання одиниці при зміні виду робочого середовища, що дозволило би здійснити передавання одиниці об'єму і об'ємної витрати безпосередньо за умов функціонування приладів на природному газі. Також схема не передбачає в зв'язку з основними одиницями системи СІ (метр, кілограм, секунда), що реалізовано в деяких закордонних схемах [11,18]. Потребує доопрацювання з можливістю практичної реалізації методика побудови повірочної схеми на базі основних одиниць системи СІ, яка запропонована вітчизняними науковцями [19], так як в ній чітко не конкретизована методика передачі одиниці об'єму і об'ємної витрати до робочих ЗВТ на природному газі.

Тим не менш, запропонована нова повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати суттєво підвищує рівень забезпечення єдності вимірювань у галузі витратометрії газу, а також дозволяє вивести Україну на міжнародний рівень шляхом проведення міжнародних звірень національних еталонів. Підключення нашої держави до гармонізації своєї еталонної бази з європейською з використанням природного газу є доцільним і необхідним, що неможливе без вдосконалення існуючої еталонної бази і розвитку метрологічного забезпечення.

1.4 Характерні особливості технічних засобів для реалізації повірочної схеми у витратометрії природного газу

Повірочну схему в Україні [8] очолює державний первинний еталон на базі дзвонової установки та інформаційно-вимірювального комплексу для збору та обробки інформації з вимірювальних каналів тиску, температури, переміщення дзвону, кількості імпульсів [16]. Вдосконалення системи відліку величини переміщення дзвону з використанням лінійки на базі кодів Галуа, стабілізація тиску під дзвоном за рахунок вдосконалення способу компенсації ваги дзвону, поліпшення термостабілізації приміщення, в якому знаходиться державний еталон, дозволили забезпечити відтворення одиниці об'єму із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювання не більше як $9 \cdot 10^{-4}$ і не вилученою систематичною похибкою $6 \cdot 10^{-4}$ та одиниці об'ємної витрати із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань не більше як $1 \cdot 10^{-3}$ і не вилученою систематичною похибкою $6 \cdot 10^{-4}$.

В якості вторинних еталонів передбачено використання традиційних стаціонарних установок дзвонового та поршневого типів, а також установок інших принципів дій, які успішно використовуються в міжнародній метрологічній практиці, таких, як гравіметричні, установки еквівалентного витіснення та установки PVTt-типу [10].

Цікавим, з точки зору методології вимірювань, є застосування в якості вторинних еталонів гравіметричних установок, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні за допомогою високоточної ваги зміни маси газу, що поступає в калібровану мірну ємність. Таким чином, з урахуванням запозичених з інших повірочних схем робочих еталонів маси та густини створено перехід від вимірювання об'ємної витрати до вимірювання масової витрати [7].

Новацією повірочної схеми є також застосування вторинних еталонів на базі установок еквівалентного витіснення. Принцип дії цих установок полягає у зважуванні об'єму рідини, витісненої газом, який проходить через засіб вимірювання (робочий еталон) і якому передається одиниця вимірювання об'ємної витрати газу. При цьому для визначення об'ємної витрати газу

необхідно знати густину рідини та час її витіснення. Характерним представником еталонних установок одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що базується на методі зважування еквівалентної кількості витісненої рідини, є установка, яка входить до складу еталонної бази Боярського метрологічного центру НАК «Нафтогаз України» [13].

Вторинні еталони на базі установок PVTt-типу відносяться до статичних об'ємних установок [16]. Принцип їх дії подібний до принципу дії гравіметричних установок за відмінністю того, що зміна маси газу в мірній ємкості визначається розрахунковим шляхом за даними вимірювання тиску та температури в мірній ємкості на початку і в кінці вимірювального циклу. Робочі еталони на базі установок PVTt-типу успішно експлуатуються у ВАТ «Івано-Франківськгаз». Діапазон вимірювання та відтворення об'єму газу вторинними еталонами становить від 0,05 до 20м³, а об'ємна витрата газу – від $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $6,94 \cdot 10^{-1}$ м³/с.

Державний еталон, як і вторинні еталони та більшість робочих, у конструктивному плані являють собою складні стаціонарні аеродинамічні установки, які не підлягають демонтажу та перевезенню. Таким чином, з метою забезпечення можливості передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу методом безпосереднього звірення вторинним і робочим еталонам – повірочним установкам, а також проведення їх взаємних звірень, в повірочну схему введено поле еталонів передавання.

Безпосереднє звірення за допомогою еталонів передавання є найкращим способом виявлення цих складових. В якості еталонів передавання в новій редакції повірочної схеми запропоновано застосовувати набори еталонних лічильників та витратомірів об'ємної витрати газу (у тому числі сопел критичного витоку) зі стабільними (відтворюваність $\pm 0,05\%$) протягом тривалого часу метрологічними характеристиками, що виражаються середнім квадратичним відхиленням їх результатів звірень з державним еталоном не більше як $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Згідно з новою редакцією повірочної схеми [8], вторинні еталони, як і еталони передавання, застосовують для взаємного звірення та передавання

розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати робочим еталонам. В Україні у якості робочих еталонів широке застосування знайшли повірочні установки дзвонового типу, PVTt-типу, установки з еталонними лічильниками газу, установки на базі еталонних сопел критичного витоку, а також набори еталонних витратомірів [7,16]. Межі допустимих відносних похибок робочих еталонів становлять від 0,15 до 0,5%, що дозволяє методом безпосереднього звірення з відносною похибкою не більше 0,2% здійснити повірку в діапазоні об'ємних витрат від $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $2,78 \text{ м}^3/\text{с}$ всієї гами робочих ЗВТ (лічильників, витратомірів, лічильників-витратомірів) з межами допустимих відносних похибок від 0,6 до 4%, які експлуатуються в нашій країні.

Отже, як показує аналіз технічних засобів для реалізації повірочної схеми потрібно переглянути чинні в Україні стандарти, які поширюються на ЗВТ, для приведення їх до [8].

1.5 Основи контролю метрологічних характеристик лічильників і витратомірів

Процес вимірювання витрати та кількості газу оснований здебільшого на аналізі (моделюванні) енергетичних змін, які відбуваються в потоці газу залежно від витрати [20]. Винятком є хіба що витратоміри, принцип дії яких не базується безпосередньо на енергетичних характеристиках потоку, наприклад, ультразвукові. Вимірювання витрати за методом змінного перепаду тиску чи турбінні витратоміри (на даний час одні з найбільш широкоживаних) базуються на вказаному принципі. Тому аналіз методів вимірювання витрати, оцінка метрологічних характеристик вимірювальних засобів за цими методами з точки зору гідродинамічних процесів у потоці є основним. Розглянемо суть такого підходу стосовно основних методів та засобів вимірювання витрати та кількості газу.

Витратомірами змінного перепаду тиску називаються прилади [21], принцип роботи яких базується на залежності витрати від перепаду тиску, який

створюється на установленому у трубопроводі нерухомому пристрої (пневмоопір) або самим елементом трубопроводу.

Конструктивно такі витратоміри здебільшого складаються з трьох частин:

- перетворювач витрати, який створює перепад тиску залежно від витрати;
- з'єднувальний пристрій, який передає перепад тиску від перетворювача до вимірювального приладу;
- диференційний манометр, який вимірює перепад тиску, утворений перетворювачем витрати, і градуїований зазвичай в одиницях витрати.

Найчастіше у таких приладах для створення перепаду тиску як інформативного параметра використовують спеціальний звужуючий пристрій, який установлюють у трубопроводі на шляху потоку. Таким пристроєм здебільшого є діафрагма (тонкий диск з круглим циліндричним отвором у центрі) та сопло. Потік газу, який протікає через звужуючий пристрій створює перепад тиску.

$$Q_C = 0,01252\alpha\epsilon d^2 \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)p_1 T_C}{\rho_C p_C T_1 K}}, \quad (1.5)$$

де Q_C – об'ємна витрата газу, приведена до стандартних умов, м³/год;

ρ_C – густина сухого газу в стандартних умовах, тобто при тиску $p_C=1,01325 \cdot 10^5$ Па і температурі $T_C=293,15$ 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;

ϵ – поправочний множник на розширення газу, менший за одиницю;

d – діаметр отвору діафрагми, мм; K — коефіцієнт стисливості газу.

Перевагами даних витратомірів є універсальність застосування (вони придатні для вимірювання витрати будь-яких однофазних середовищ, а деякою мірою і двофазних; вимірювання витрат різної величини в трубах практично будь-якого діаметра і при будь-якому тиску та температурі), зручність масового виробництва, відсутність необхідності еталонних установок у випадку застосування як перетворювачів витрати стандартних звужуючих пристроїв, установлених в трубопроводах, що мають діаметр не менше 50мм. До найбільш

важливих недоліків відносять: квадратичну залежність між витратою і перепадом тиску, наслідком чого є нерівномірність шкали; дуже малий діапазон вимірювання і обмеження при їх застосуванні для змінних витрат.

Похибка вимірювання [20] може лежати у досить широких межах залежно від стану звужуючого пристрою, діаметра трубопроводу, постійності тиску і температури вимірюваного середовища. Тому в середньому теоретично гранична приведена похибка оцінюється $(1\div 3)\%$, а ДСТУ 3383-96 визначає її як 4%. В цьому документі можна більш детально ознайомитись з їхніми метрологічними характеристиками.

Область застосування, програма і методика державної метрологічної атестації цих витратомірів відповідно регламентована в ГОСТ 8.563.1, МДУ 011/03-2001, МДУ 012/04-2001.

Турбінні витратоміри та лічильники [21] належать до класу тахометричних, загальною ознакою яких є обертання чутливого елемента (перетворювача) під дією рушійного моменту, який створюється потоком. Таким елементом у турбінних витратомірах є тангенціальна або аксіальна турбіна.

В основу тахометричного методу вимірювання покладена залежність швидкості обертання тіла (турбіни), встановленого у трубопроводі, від витрати газу. Якщо вал турбіни з'єднати через редуктор з лічильним механізмом, то отримаємо вимірювач кількості – лічильник.

Типовий турбінний лічильник складається з трьох базових вузлів: аеродинамічно збалансованого ротора, корпусу та відлікового пристрою.

Розміри отворів для подачі газу до ротора розраховані з умови забезпечення необхідних швидкостей потоків газу в трубопроводі за максимальної витрати лічильника, тобто повинні бути досягнуті умови мінімізації втрат тиску на лічильнику. Однак, оскільки енергія обертання лопатей ротора – це кінетична енергія потоку, то конструктивно отвори виконуються як направляючі для збільшення швидкості газу і її дію на лопаті турбіни.

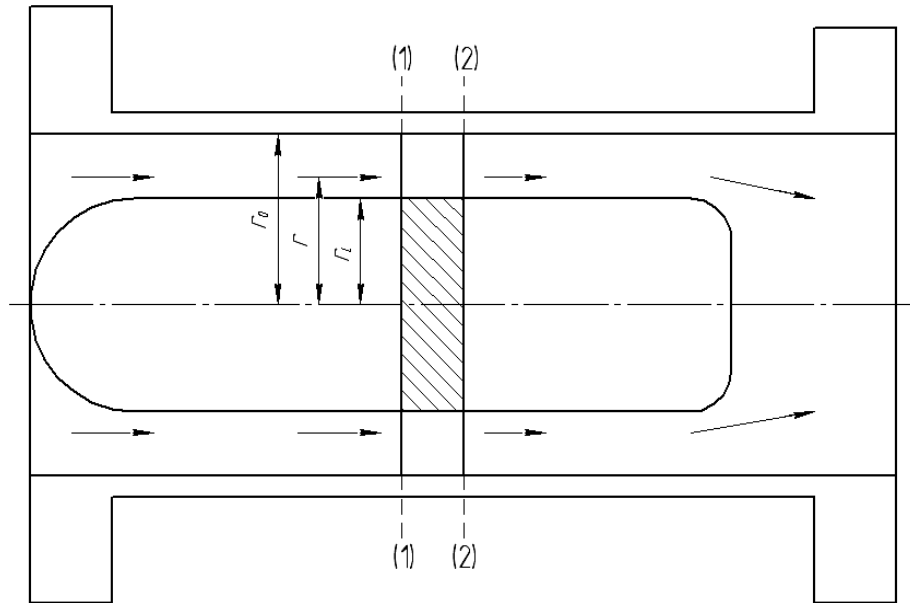


Рисунок 1.5 – Принципова схема турбінного лічильника з аксіальною турбіною

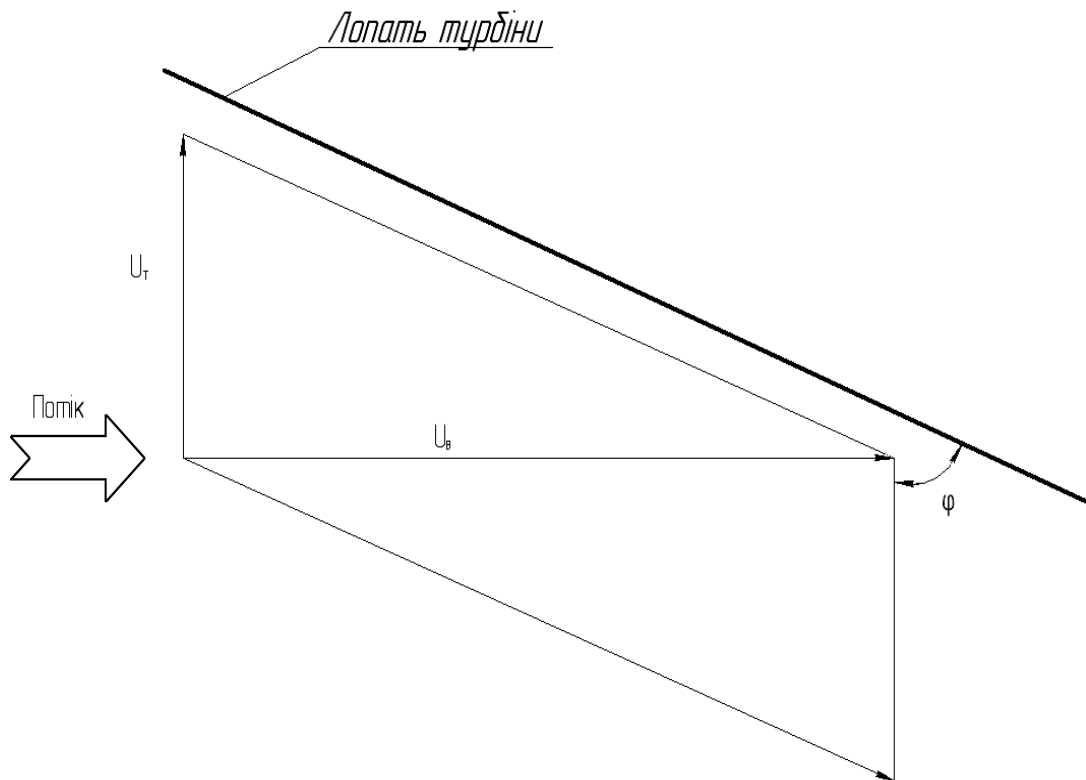


Рисунок 1.6 – Схема швидкостей на турбіні лічильника

Індивідуальне виконання лічильника для конкретних умов експлуатації забезпечує необхідну точність і діапазон вимірювання. На рисунках 1.5 та 1.6 подано відповідно схему турбінного лічильника та план його швидкостей [10].

Це схема так званого «ідеального» лічильника, яка характеризується певними ознаками та припущеннями. При розроблянні конструкцій «реальних» лічильників критерієм їх оптимальності часто виступає ступінь їх відповідності «ідеальним» характеристикам.

Рис.1.6 зображає схему швидкостей газу на вході аксіальної турбіни, яка ілюструє значення її кутової швидкості залежно від витрати та геометричних розмірів самої турбіни. Позначення на рисунку: U_T — лінійна швидкість турбіни, U_{II} — швидкість потоку, що набігає на турбіну, φ — кут нахилу турбіни (кут атаки). Якщо врахувати, що кутова швидкість $\omega = U_T / r$, а $Q = U_{II} \cdot S$, то значення кутової швидкості ідеальної турбіни ω_i становить

$$\omega_i = \frac{Q}{\operatorname{tg} \varphi \cdot r \cdot S} \quad (1.6)$$

де: r — середній радіус турбіни;

S — площа перерізу потоку;

φ — кут нахилу лопаті;

Q — витрата потоку газу.

Таким чином, для аксіальної турбіни швидкість її обертання прямо пропорційна витраті.

Турбінні лічильники відрізняються характеристикою, наближеною до лінійної в широкому діапазоні вимірюваних витрат, також вони мають досить добрі динамічні властивості, що дає можливість за їх допомогою вимірювати витрату пульсуючих потоків, але вони чутливі до перевантажень, зокрема до гідравлічних ударів, із-за яких можливий вихід з ладу турбінки. Також вони чутливі до забруднень, тому перед ними слід встановлювати фільтри.

Метрологічні характеристики даного типу витратомірів розглянемо на прикладі турбінних лічильників природного газу TZ/FLUXI [20]: межі основної відносної похибки лічильників становлять в $\pm 2\%$; температура навколишнього

середовища – від -20°C до $+70^{\circ}\text{C}$; температура вимірюваного середовища – від -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$; температура транспортування та зберігання – від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$; відносна вологість навколишнього середовища – 95% за температури від 35°C ; максимальний робочий тиск – 10МПа.

В основному турбінні витратоміри та лічильники регламентуються такими нормативними документами ДСТУ 3867-99 (ГОСТ 23125-95), МИ 1554-86.

Вихоровими називають витратоміри, основані на зміні частоти коливань, що виникають у потоці в процесі завихрень.

Перевагою вихорових витратомірів є відсутність будь-яких рухомих елементів всередині трубопроводу. Для сприйняття коливань потоку, що виникають у трубопроводі, розміщують або перетворювачі тиску (переважно п'єзOMETричних), або термopетворювачі (переважно термоанемометричного типу). Застосування останніх можливе тому, що пульсація тиску пов'язана із пульсацією швидкості, вимірювання яких зручно здійснювати за допомогою термоанемометрів.

Вихорові витратоміри діляться на три групи [21], які суттєво відрізняються одна від одної.

Витратоміри, що мають в первинному перетворювачі нерухоме тіло, при обтіканні якого з обох сторін почергово виникають зриви вихорів, які утворюють пульсації тиску.

Частота зривання вихорів відповідно до критерію Струхалія [20] $f = vSh/d$, тобто пропорційна відношенню v/d , а отже, при постійному характерному розмірі d тіла пропорційна швидкості u , а значить, і об'ємній витраті Q_0 . Залежність між Q_0 і f виражається рівнянням

$$Q_0 = \left(\frac{sd}{Sh} \right) f \quad (1.7)$$

де s — площа найменшого поперечного перерізу потоку навколо тіла, що обтікається.

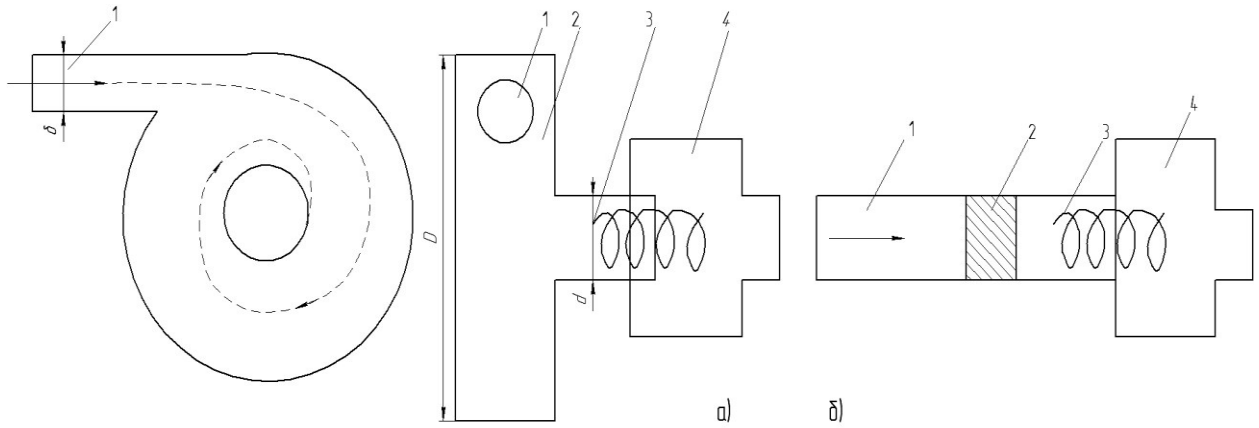
Витратоміри, в первинному перетворювачі яких потік закручується і, попадаючи потім в розширену частину труби, прецесує і створює при цьому пульсації тиску.

Перетворювачі цих витратомірів мають пристрій, що закручує потік, який направляється після цього через коротку циліндричну насадку чи ділянку труби і її розширену частину. В останній потік, що обертається, набуває форми воронки, а його вісь, навколо якої обертається ядро вихору, обертається навколо осі трубопроводу. При цьому тиск на зовнішній поверхні вихорового потоку пульсує синхронно з кутовою швидкістю обертання ядра вихору, пропорційною лінійній швидкості потоку чи об'ємній витраті. Для перетворення частоти пульсацій тиску чи швидкості у вимірювальний сигнал застосовуються п'єзоелементи чи напівпровідникові термоанемометри. Таким чином, цей перетворювач складається з двох ступенів – в 1-ому відбувається перетворення об'ємної витрати потоку в частоту прецесії воронкоподібного вихору, а в 2-ому – перетворення цієї частоти у вимірювальний сигнал.

Витратоміри, в первинному перетворювачі яких струмінь, що витікає із отвору, здійснює автоколивання, створюючи при цьому пульсації тиску (вихорові витратоміри з осцилюючим струменем).

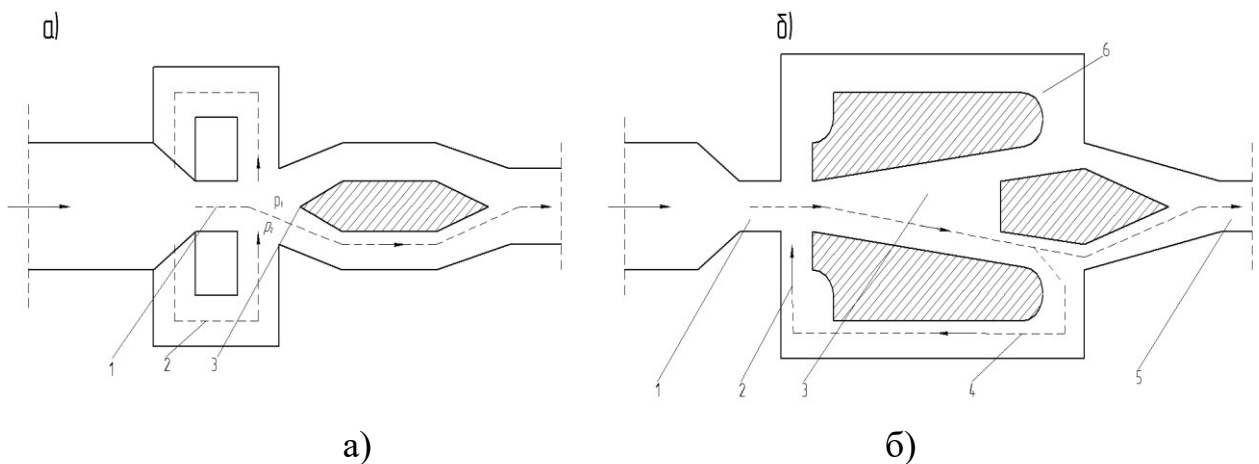
Принципові схеми двох варіантів перетворювачів з осцилюючим струменем наведені на рис.1.7 [10].

Глибина проточної частини перетворювачів постійна. Потік газу проходить через сопло 1 і попадає в дифузор 3 прямокутного перерізу. Під впливом випадкових причин потік в кожен даний момент більшою мірою притискається до тої чи іншої стінки дифузора (наприклад до нижньої). Тоді завдяки ежекуючій дії струменю в перетворювачі релаксаційного типу (рис.1.8, а) тиск p_2 в нижній частині обвідної трубки 2 стане меншим від тиску p_1 у верхній її частині; у трубці 2 виникає рух, показаний стрілкою, який перекине струмінь до верхньої стінки дифузора. Після цього напрям руху в обвідній трубці зміниться, і струмінь почне осцилювати. В перетворювачі зі зворотним гідравлічним зв'язком струмінь, притиснений до нижньої частини дифузора 3, частково видаляється через вихідний патрубок 5.



а – газ по трубі 1 діаметром δ входить тангенціальне в циліндричну камеру 2 діаметром D , де закручується і через патрубок 3 діаметром d і довжиною L поступає в трубу чи камеру 4 більшого діаметра, де потік, який обертається, прецесує, що супроводжується місцевими пульсаціями тиску і швидкості;
 б – закручування потоку відбувається спірально розміщеними лопатками (у іншому ці схеми ідентичні)

Рисунок 1.7 – Схема пристрою, що створює обертовий рух потоку



а — релаксаційний;
 б — зі зворотним гідравлічним зв'язком

Рисунок 1.8 – Перетворювач з осцилюючим струменем

Частина його відгалужується в нижній обвідний канал 4 і, виходячи через сопло 2, перекидає струмінь, що виходить із сопла 1, у верхнє положення. Після цього відбудеться відгалуження частини струменя у верхній обвідний канал 6, струмінь буде перекинутий вниз і настане процес його коливань, що

супроводжується синхронними коливаннями тисків з обох сторін струменя. Останній перетворювач зі зворотним гідравлічним зв'язком кращий. Він краще забезпечує процес осциляції і в більшому діапазоні чисел Re зберігає лінійну залежність між витратою Q_0 потоку і частотою f коливань:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{Q_0}{k \cdot l \cdot F} \quad (1.8)$$

де: T — період коливань струменю;

k — поправочний коефіцієнт;

l і F — довжина і площа дифузора відповідно.

Суттєвими недоліками є акустичні і вібраційні перешкоди [21]. До їх числа відносяться пульсації, які створюються насосами або компресорами, пульсації внаслідок вібрації трубопроводів і т. д. До переваг вихрових витратомірів потрібно віднести достатньо добру точність, яка оцінюється похибкою в $0,5 \div 1,5\%$ від межі шкали, і лінійність останньої у великому діапазоні шкали, відсутність рухомих частин, простота і надійність перетворювача витрати, незалежність показів від тиску і температури.

Метрологічні характеристики цього типу витратомірів розглянемо на прикладі вихрових лічильників газу WBZ 08 [20]: діапазон витрат: для витратомірів, що градуйовані при нормальних умовах — 1:10/20 для витратомірів, що градуйовані при високому тиску — 1:50; межі основної допустимої похибки — $\pm 1\%$; лінійність характеристики — $\pm 0,5\%$; максимальний робочий тиск — 320бар (32МПа).

Ультразвукові витратоміри базуються на вимірюванні, яке залежить від витрати того чи іншого акустичного ефекту, що виникає під час проходження ультразвукових коливань через потік газу [21].

В даний час застосовуються два різновиди ультразвукових витратомірів. Витратоміри, які базуються на переміщенні ультразвукових коливань (УЗК) рухомого середовища: а) УЗК направляються за потоком і проти потоку; б) УЗК направляються перпендикулярно до руху потоку. Витратоміри, що базуються на ефекті Доплера.

Основними елементами перетворювачів ультразвукових витратомірів є випромінювачі і приймачі УЗК. Їх дія базується на п'єзоелектричному ефекті, який полягає в тому, що при стисненні і розтязі в визначених напрямках деяких кристалів (п'єзоелементів) на їх поверхнях виникають електричні заряди. Якщо ж до цих поверхонь прикласти різницю електричних потенціалів, то п'єзоелемент розтягнеться чи стиснеться залежно від того, на якій із цих поверхонь буде більша напруга.

Одним з найбільш відомих природних п'єзоелементів є кварц. Однак в даний час в ультразвукових витратомірах як п'єзоелементи застосовуються різні п'єзокерамічні матеріали, такі як титанат барію, цирконат титанату свинцю.

П'єзоелементи зазвичай виготовляють у вигляді круглих дисків діаметром 10÷20мм і оснащують електродами. Щоб отримати інтенсивні УЗК, потрібно працювати на резонансній частоті п'єзоелемента.

Їхні метрологічні характеристики розглянемо на прикладі ультразвукових лічильників газу «Курс-01» [20]: межі допустимої основної відносної похибки вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу становлять — $\pm 2\%$; поріг чутливості лічильників — 0,1Q; робочий надлишковий тиск — від 50 до 600кПа; діапазон зміни температури вимірюваного середовища — від 25°C до 50°C.

Провівши аналіз найбільш відомих методів та засобів контролю витрати і розглянувши суть їхніх метрологічних характеристик та існуючі в Україні нормативні бази необхідно підвищувати достовірність вимірювання об'єму газу шляхом впровадження на газовимірювальних станціях сучасних високоточних лічильників в комплекті з автоматичними коректорами об'єму газу замість або додатково до існуючих витратомірних пристроїв.

1.6 Постановка задачі на магістерську роботу

Проаналізувавши в попередніх підрозділах сучасний стан і тенденції розвитку методів та засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу можна сформулювати такі висновки:

- 1) На основі аналізу літературних джерел по даній проблемі встановлено, що досягнутий рівень ЕП одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, які застосовуються безпосередньо для градування і повірки робочих лічильників і витратомірів природного газу в багатьох випадках не відповідає сучасним вимогам. Перш за все це зумовлено недостатнім рівнем вивчення фізичних процесів ЕП. Тому необхідно в подальшому проводити дослідження теоретичних основ функціонування еталонів об'єму та об'ємної витрати газу, в основному за допомогою математичного моделювання фізичних процесів.
- 2) З врахуванням функціонування державного еталону на повітрі необхідно вдосконалити методологію передавання одиниць на повітрі і розробити наукові основи методології передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу при зміні виду робочого середовища. Це в свою чергу дасть змогу гармонізувати нашу еталонну базу з європейською.
- 3) Також недоліком застосування ЕП в Україні є відсутність їх вітчизняного виготовлення. Тому потрібно розробляти нові ЕП для проведення звірень не тільки на повітрі, а й на природному газі.

Таким чином завдання на магістерську роботу буде наступним:

- моделювання засобів передавання одиниці витрати природного газу;
- розроблення технічних засобів для метрологічного дослідження;
- метрологічні дослідження засобів передавання одиниці витрати природного газу.

2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНІВ ПЕРЕДАВАННЯ І ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ЇХ МЕТРОЛОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Розроблення методології побудови еталонів передавання

Проведений аналіз досліджень та основ функціонування еталонів передавання дають можливість в подальшому проводити математичне моделювання ЕП. Необхідно встановити функціональну залежність між відтворюваними одиницями фізичних величин (об'єм або об'ємна витрата газу) і параметрами, які формують значення цих відтворюваних величин, а також впливають на передавання цих одиниць до ДП. Дана проблема і вирішується в цьому розділі магістерської роботи.

Перш за все проведемо обґрунтування та опис нової методики побудови ЕП. Методологія передавання одиниць об'єму або витрати природного газу [22], яка передбачає застосування витратомірів змінного перепаду тиску (ВЗПТ) як засобу передавання. Дана методологія може бути реалізована з використанням ВЗПТ на базі існуючого Державного еталону одиниці об'єму і об'ємної витрати газу, робочим середовищем якого є повітря [7].

Суть розробленої методології зводиться до застосування в Державній повірочній схемі ЕП одиниці об'єму і об'ємної витрати, особливістю яких є можливість їх практичної реалізації за різних видів робочого середовища, зокрема повітрі і природному газі (ПГ) [22]. При цьому конструктивне виконання еталону забезпечує як передавання одиниці за різних параметрів робочого середовища, так і проведення звірення з аналогічними закордонними первинними чи робочими еталонами.

Технічна реалізація повинна базуватися на засобах з відповідними науково-методично обґрунтованими моделями витратовимірювання, а самі конструктивні рішення повинні бути максимально простими, технічно досконалими і характеризуватися достатньо високими метрологічними характеристиками, серед яких найбільша увага надається СКВ і стабільності показів.

Новітні теоретичні експериментальні дослідження, та побудовані на них міжнародні норми витратовимірювання природного газу фундаментально описують не тільки процеси вимірювання витрати природного газу, але і подають алгоритми для розрахунку їх складових похибок, які необхідно враховувати при розробленні ЕП одиниці витрати і об'єму газу.

Використання Державного еталону, який забезпечує відтворення і вимірювання в робочому діапазоні витрат повітря за робочих умов з значенням НСП $5 \cdot 10^{-4}$ і СКВ $1 \cdot 10^{-3}$ забезпечує можливість суттєво більш точного від $\pm 0,5\%$ (теоретичне значення) для ВЗПТ, які монтують у випробувальній ділянці вихідного трубопроводу державного еталону. Задання діапазону зміни відтворених витрат буде приводити до зміни значень числа Re_D і параметра k у вимірювальному трубопроводі ВЗПТ, що забезпечує можливість отримання функціональної залежності від цих показників. При цьому у випадку зміни робочого середовища завдяки теорії гідродинамічної подібності стає можливим такий вибір параметрів потоку, для якого є експериментально визначене значення градуовального коефіцієнта C_ε , чим досягається передавання одиниці вимірювання до РЕ.

Шляхом послідовного монтування розглянутого ЕП з робочими ЗВТ інших типів, в т.ч. турбінних, роторних, ВЗПТ здійснюється передавання одиниці об'єму чи об'ємної витрати природного газу від державного чи вихідного еталону, а послідовне під'єднання двох розглянутих ЕП дозволяє додатково реалізовувати їх зв'язання між собою.

Методологія передавання одиниці витрати і об'єму природного газу при зміні виду робочого середовища також може бути реалізована на базі КС.

Даний напрям реалізації принципу побудови ЕП одиниці витратовимірювання полягає в створенні еталонів передавання на базі сопел критичного витоку газу, у яких експериментальним шляхом визначають коефіцієнт витрати [23].

Змінюючи значення відтворюваних витрат Державним еталоном стає можливим знаходження коефіцієнта μ для різних витрат і параметрів робочого середовища (повітря), а розрахунок при цьому числа Рейнольдса Re_d для течії в

горловині КС забезпечує отримання апроксимаційної залежності $\mu=f(\text{Re})$. За цих умов ЕП реалізує такий алгоритм вимірювання об'ємної витрати природного газу за робочих умов [22]:

$$q = \frac{\mu F C_{\text{КС}}}{\rho_p} \frac{p_p}{\sqrt{RT_p}}, \quad (2.1)$$

де q_p – об'ємна витрата природного газу за робочих умов, м³/год;

$C_{\text{КС}}$ – градуювальний коефіцієнт ЕП;

p_p – тиск критичного сопла за робочих умов, МПа;

ρ_p – густина природного газу за робочих умов, кг/м³;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості ПГ;

F – площа КС, м²;

T_p – температура за робочих умов, К;

R – питома газова стала, кДж/кмоль·К.

При функціонуванні ЕП отримане значення μ коригується за результатами отриманої апроксимаційної залежності $\mu = f(\text{Re})$ для робочих умов природного газу [23], а значення функції $C_{\text{КС}}$ розраховується для цих умов.

Аналіз формули (2.1) показує, що із всіх складових алгоритму найбільш суттєво на вираз впливає параметр $C_{\text{КС}}$, якому надана назва градуювального коефіцієнта ЕП [22].

Тому необхідно змодельовати, як буде поводитись цей градуювальний коефіцієнт $C_{\text{КС}}$ при зміні компонентного складу ПГ та деяка функція f яка від цього складу залежить.

2.2 Розроблення принципів побудови еталонів передавання на основі критичних сопел

Як зазначалось вище, відтворювана критичними соплами об'ємна витрата газу за критичних режимів течії в них характеризується точністю і стабільністю відтворюваних об'ємних витрат газу та визначається конструкцією, геометричними розмірами КС і не залежить від тиску на їх виході. Крім того,

незначні габарити КС і безперервність їх функціонування у складі ЕП під час вимірювального циклу надає критичним соплам велику перевагу як еталонного вузла відтворення витрат газу мобільних повірочних установок [2].

Проте головним чинником, що стримує широке практичне застосування таких ЕП є необхідність досягнення значного, приблизно дворазового, перевищення абсолютного тиску на вході КС порівняно з тиском на його виході. Це доволі легко реалізується в мережах газопроводів високого тиску, але в то й же час спричиняє значні втрати тиску робочого середовища і є суттєвим практичним недоліком витратомірів на базі КС. Функціонування КС реалізується в ЕУ РVTt-типу на базі ємності високого тиску з витіканням з останньої попередньо стиснутого робочого середовища.

Основними інформативними параметрами для обчислення відтворюваних витрат ЕП є значення абсолютного тиску p_{21} , p_{22} , p_{2i} і абсолютної температури T_{21} , T_{22} , T_{2i} ізоентропічно загальмованого газу перед КС (індекс “ i ” може набувати максимального значення, яке відповідає кількості паралельних ліній критичних витратомірів). Масова витрата q_{mi} в i -тій витратовимірній лінії розраховується за формулою [24]:

$$q_{mi} = \mu_i \cdot F_i \cdot C_{\text{ЕН}} \cdot \frac{p_{2i}}{\sqrt{R \cdot T_{2i}}}, \quad (2.2)$$

де μ_i - коефіцієнт витрати i -го КС;

F_i - площа отвору i -го КС.

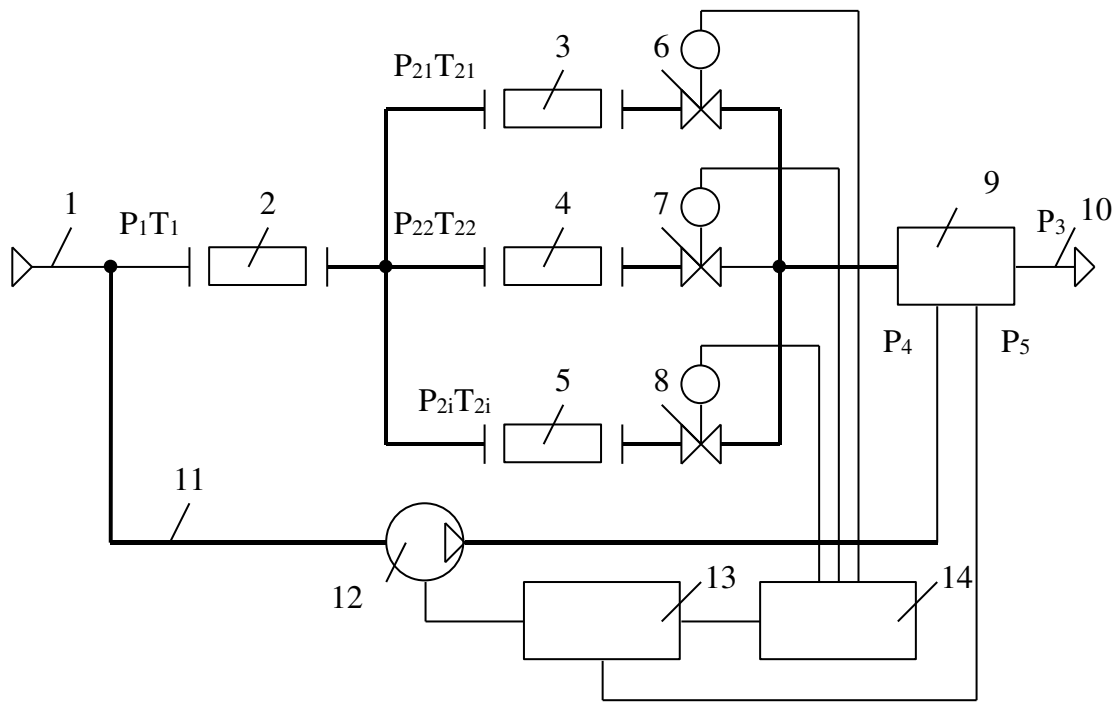


Рисунок 2.1 – Функціональна схема ЕП з використанням сопел критичного витоку для роботи в мережах низького тиску

Об'ємна витрата газу q_i за робочих умов через КС визначається діленням q_{mi} на густину газу за робочих умов, розрахованої за формулою [20]:

$$\rho = \rho_c \cdot \frac{p_{\text{ЕП}i} \cdot T_c}{p_c \cdot T_{\text{ЕП}i} \cdot K_i}, \quad (2.3)$$

де K_i – коефіцієнт стисливості газу на вході i -го КС.

Тому діленням (2.3) на (2.4) отримуємо такий вираз для обчислення витрати q_i в i -тій витратовимірювальній лінії:

$$q_i = q_{mi} \cdot \frac{K_i \cdot R \cdot T_{2i}}{p_{2i}}. \quad (2.4)$$

Тиск p_1 і температура T_1 визначають параметри стану газу перед ДП і дозволяють розраховувати масові або об'ємні витрати (при дослідженні витратомірів) чи масу або об'єм вимірюваного газу (при дослідженні лічильників).

Тиск p_3 характеризує параметр стану газу на виході ЕП, а значення тисків p_4 і p_5 – параметри функціонування газоструминного інжектора. Перший з них визначає тиск робочого середовища, яке подається від засобу компримування

12, а другий – тиск інжектваного потоку, завдяки якому забезпечується критичний режим протікання газу через КС.

Формуванням відповідних значень тиску p_4 і витрати робочого середовища на виході газоструминного інжектора можна до необхідного значення зменшити абсолютний тиск p_5 інжектваного потоку, при якому буде досягнений критичний режим течії газу через КС, у тому числі і для умов мереж газопроводів низького тиску.

ЕП цього типу може бути конструктивно реалізований у вигляді мобільної або стаціонарної ЕУ, а також як еталонний засіб, що може працювати на будь-яких робочих середовищах, в тому числі на повітрі чи природному газі.

Доцільно також звернути увагу на конструкцію КС [24].

До витратомірів критичного витоку відносяться витратоміри із звужуючим пристроєм (соплом, діафрагмою), витрата газу через яке не залежить від тиску газу за звужуючим пристроєм і в основному визначається тиском газу перед ним. Це пов'язано з тим, що при досягненні або перевищенні газом в звужуючому пристрої швидкості звуку тиск газу за звужуючим пристроєм перестає впливати на швидкість потоку газу в критичному січенні сопла або діафрагми (рис.2.8).

Конструкція і розміри сопла критичного витоку показані на рис.2.2, а, а характер зміни тиску в січенні цього сопла — на рис.2.2, б.

Як видно з рис.2.2, б, характер зміни тиску уздовж осі сопла змінюється таким чином. Тиск газу p_1 у форкамері 1 вимірювального трубопроводу перед соплом 2 (рис.2.2, а) рівний розподілу газу на вході в сопло. На вхідній ділянці сопла ab відбувається звуження потоку з дозвуковими швидкостями. При цьому тиск p_1 плавно знижується до значення p_1' (крива 1). Січення А-А сопла є критичним, швидкість потоку в ньому зростає і стає рівною або більшою швидкості звуку. Ділянка bc сопла є зоною надзвукових швидкостей.

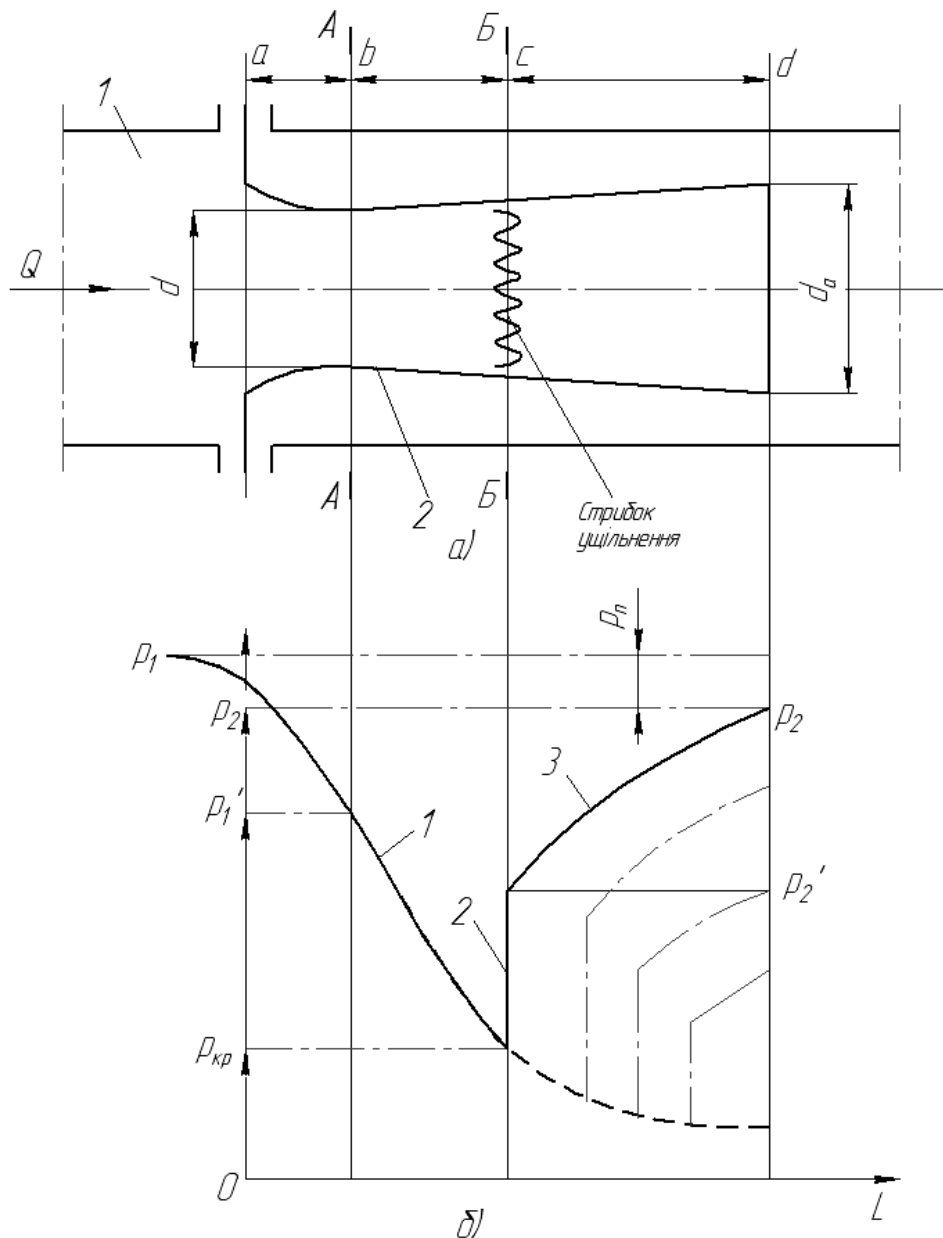
У січенні Б-Б відбувається стрибок ущільнення газу, тиск газу $p_{кр}$ в цьому перетині стрибкоподібно зростає від значення $p_{кр}$ до p_2' (вертикальна пряма 2). На ділянці cd відбувається розширення перетину сопла, швидкість газу падає до

дозвукових значень, а тиск газу плавно зростає до тиску p_2 , який менше вхідного тиску p_1 на величину втрат тиску p_n (крива 3).

Критичним відношенням тиску, при якому швидкість газу в критичному сеченні сопла рівна швидкості звуку, визначається співвідношенням

$$\frac{p_2}{p_1} \leq 0,5, \quad (2.5)$$

де p_1 і p_2 — абсолютний тиск газу перед соплом і в його вихідному сеченні відповідно.



а – конструкція та основні розміри;

б – характер зміни тисків в сеченні сопла.

Рисунок 2.2 – Сопло критичного витоку

2.3 Еталонні установки для метрологічної атестації критичних сопел

ЕУ на базі дзвонових мірників є загальновизнаним метрологічним засобом для вимірювання об'єму і витрати газу [20, 26], першого практично застосування якого вони набули вже більше ста років. Вони можуть бути реалізовані за таких трьох типів установок: порційно-статичні, неперервно-циклічні і дискретно-динамічні.

Основним вузлом дзвонових ЕУ є мірник. Він містить дзвін, який своєю нижньою частиною занурений в ємність з рідиною, що має назву витіснювача. У підготовчий період випробування здійснюється подача газу під дзвін від стороннього джерела витрати, завдяки чому дзвін підіймається. Після наповнення мірника до необхідного об'єму трубопровід подачі газу перекривають. При відкритті запірної пристрою в трубопроводі, що сполучає піддзвоний простір з ДП, починається витіснення газу з-під дзвона через ДП. Об'єм газу, що витісняється, відлічується з контрольної лінійки. Після цього запірний пристрій закривають. За різницею показів відлікового пристрою ДП і відомому об'єму газу V_E який переданий від ЕУ до ДП, визначають відносну похибку лічильника δ_L за формулою:

$$\delta_L = \frac{V_L - V_E}{V_E} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

де V_L – об'єм повітря, виміряний лічильником.

При випробуванні витратомірів пропущений об'єм газу усереднюється за час його відтворення і порівнюється з показами витратоміра q_B . Похибку останнього δ_B розраховують за однією із наступних формул:

$$\delta_B = \frac{q_B - \frac{dV_E}{dt}}{\frac{dV_E}{dt}} \cdot 100, \% \quad (2.7)$$

$$\delta_{\hat{a}} = \frac{q_{\hat{a}} - \frac{\Delta V_{\hat{A}}}{\Delta t}}{\frac{\Delta V_{\hat{A}}}{\Delta t}} \cdot 100, \% \quad (2.8)$$

де $\frac{dV_E}{dt}$ – миттєва відтворювана витрата газу за допомогою ЕУ;

$\frac{\Delta V_E}{\Delta t}$ – усереднена за інтервал часу Δt відтворювана витрата ЕУ.

Основним недоліком дзвонових порційно-статичних ЕУ є та обставина, що з їх вимірювального циклу не вилучений неусталений режим роботи як ДП, так і ЕУ. З метою зменшення впливу вказаного чинника на точність таких ЕУ доводиться збільшувати тривалість вимірювального циклу. Це, в свою чергу, вимагає створення громіздких і дорогих установок з вельми значним об'ємом мірника, аж до 60м^3 . Тобто для досягнення витрати $0,28\text{м}^3/\text{с}$ ($1000\text{м}^3/\text{год}$) потрібен мірник з об'ємом дзвону 50м^3 . Тому останнім часом такі ЕУ знаходять застосування лише для дослідження лічильників газу на порівняно невеликих витратах, зокрема, при градуюванні і перевірці побутових лічильників газу [20].

Перша неперервно-циклічна дзвонова ЕУ [21] розроблена у ВНДІМ ім. Д.І.Менделєєва (м.Санкт-Петербург, Російська Федерація) і застосовувалася на газоремонтному заводі для градуювання і перевірки промислових лічильників газу на витрати до $0,42\text{м}^3/\text{с}$ ($1500\text{м}^3/\text{год}$). Вона створена на базі двох працюючих почергово дзвонових мірників об'ємом по 5м^3 і додатково містить пристрій для згладжування пульсацій відтворюваних витрат і клапани, керовані за допомогою шляхових вимикачів. Під час роботи установки відбувається наповнення одного мірника при одночасному витісненні газу через ДП з іншого. Похибка цієї установки, а також аналогічної до неї на витрати до $0,042\text{м}^3/\text{с}$ ($150\text{м}^3/\text{год}$) не перевищує $\pm 0,35\%$.

Подальше підвищення точності такого типу дзвонових ЕУ, особливо при відтворенні великих витрат, практично неможливо внаслідок неминучої наявності пульсацій тиску при перемиканні керованих клапанів. У числі їх переваг слід зазначити можливість досягнення безперервної відтворюваної витрати за умови необхідності забезпечення високої точності тривалих випробувань.

Серед нових напрацювань побудови таких ЕУ є технічне рішення [26], яке передбачає застосування двох видів джерел робочого середовища (повітря і природний газ) з системами забезпечення автоматичного керування установкою

і збору вимірювальної інформації з ЕУ і ДП. Практична реалізація нової дводзвонової установки типу ОКМА-0,3 здійснена в управлінні газового господарства м. Бендери (Молдова) на малі витрати (до $12\text{м}^3/\text{год}$) з похибкою відтворення і вимірювання об'єму газу $\pm 0,12\%$.

Одна із створених за участю фахівців ІФНТУНГ установок, зокрема, РКДУ-0,028 [26] після модернізації впродовж (1994÷1996)р.р. була атестована і впроваджена як Державний спеціальний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕГУ 03-01-96. Об'єм газу, що відтворюється та зберігається еталоном становить 1м^3 за робочих умов, а для об'ємних витрат діапазон їх відтворення і зберігання становить від 4 до $200\text{м}^3/\text{год}$. При цьому СКВ результату вимірювання об'єму не перевищує $9 \cdot 10^{-4}$ при НСП не більшій за $5 \cdot 10^{-4}$. Значення цих МХ при відтворенні витрати не перевищують $1 \cdot 10^{-3}$ і $6 \cdot 10^{-4}$ відповідно. Цей еталон дозволив вперше запровадити Державний стандарт України замість раніше чинного стандарту СРСР.

В Україні останніми роками дзвонові ЕУ набули широкого застосування, загальна кількість яких за даними ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» перевищує 20. Діапазони мірних об'ємів дзвонових установок, що експлуатуються, складають від 0,05 до 28м^3 , а відтворювані ними об'ємні витрати знаходяться в діапазоні від 0,01 до $10000\text{м}^3/\text{год}$ [20].

До новітніх вітчизняних дзвонових ЕУ можна віднести установку ВДДУ-0.44М, яка створена в АТ «Кримтеплокомуненерго» (м.Сімферополь), робочі еталони дзвонового типу ВАТ «Івано-Франківськгаз» [26], КП «СКБ ЗА» (м.Івано-Франківськ), ІВФ «Темпо» (м.Івано-Франківськ).

Однією із найбільших за відтворюваними витратами закордонних дзвонових ЕУ є установка створена на базі мірника об'ємом 350куб.футів (10м^3), яка застосовується компанією «American Meter Company» у Філадельфії (США) для дослідження лічильників газу. Конструкція установки дозволяє змінювати співвідношення об'ємів дзвону, використовуваних для розгону ДП і пропуску контрольного об'єму газу. Як замкова рідина застосовується олива, яка перемішується за допомогою помпи, завдяки цьому поліпшується термостабільність в процесі роботи установки і підвищується її точність. В

установці передбачена можливість зміни тиску під дзвоном за допомогою змінних вантажів. Установка дозволяє градуувати і повіряти прилади за витрат до $0,47\text{м}^3/\text{с}$ ($1700\text{м}^3/\text{год}$).

Відомі також дзвонові ЕУ, які експлуатуються в Нідерландах компанією Gasunie [20]. Одна з них (об'єм дзвона $0,5\text{м}^3$) застосовується для передавання одиниць вимірювання до еталонних роторних лічильників G40 (витрата до $65\text{м}^3/\text{год}$), а друга (об'єм дзвона 4м^3 , який проградуваний з похибкою $\pm 0,10\%$) застосовується для перевірки зразкових турбінних і роторно-поршневих лічильників газу в діапазоні витрат $1,1 \cdot 10^{-3} \div 0,11 \text{ м}^3/\text{с}$ ($4 \div 400\text{м}^3/\text{год}$). У числі переваг слід зазначити досить високу точність ЕУ і застосування спеціалізованого комп'ютера для управління різними режимами роботи установки, збору і обробки вимірювальної інформації.

Особливістю технічного виконання характеризується дзвонова установка з частотним виходом, у якій під час відтворення витрат газу кодуємим пристроєм формуються електричні імпульси, кількість яких пропорційна до ходу дзвона. Пульсації тиску на виході ДП перетворюються в електричні сигнали, кількість яких порівнюється з числом імпульсів, сформованих кодуємим пристроєм ЕУ. За різницею імпульсів з ЕУ і ДП обчислюється похибка останнього. Значення відтворюваних витрат цієї установки не перевищують $0,042\text{м}^3/\text{с}$ ($150\text{м}^3/\text{год}$).

Останніми роками за кордоном також створені нові дзвонові установки, зокрема, з об'ємом мірника 1м^3 у Німеччині (відносна розширена невизначеність (ВРН) менша $0,06\%$) і комплекс установок з об'ємом мірників $5,664 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ (ВРН $0,172\%$), $0,1139\text{м}^3$ (ВРН $0,19\%$), $0,3605\text{м}^3$ (ВРН $0,19\%$) у США [20].

Робочим середовищем у проаналізованих дзвонових ЕУ є повітря, однак за принципом дії в них може застосовуватися будь-який газ, в тому числі природний.

Основним джерелом похибок відтворення об'єму дзвоновими ЕУ є похибки визначення об'єму дзвона і похибки від нестабільності тиску під час вимірювального циклу внаслідок дії механічних і гідродинамічних сил опору, а

також неточності компенсації виштовхувальної сили дзвона. Суттєвою може бути похибка від непостійності температури в приміщенні, внаслідок зміни лінійних розмірів деталей дзвонового мірника. Ще одним джерелом похибки є похибка від випаровування в піддзвоновий простір замкової рідини, яка залежить від тривалості вимірювального циклу, площі змоченої поверхні дзвону і дзеркала рідини, а також вологості повітря, що подається під дзвін. Для зменшення похибок витіснювачі сучасних дзвонових ЕУ, заповнюються оливою, а установки обладнуються спеціальними пристроями для забезпечення стабільності тиску під дзвоном і коректорами температурної похибки та похибки від зміни рівня замкової рідини при занурюванні в неї дзвона.

Тому тенденції розвитку дзвонових ЕУ стосуються запровадження сучасних більш точних методів геометричного (опосередкованого) або прямого за допомогою еталонів передавання [15] чи вторинних еталонів градування дзвонового мірника, вдосконалення системи збору і обробки вимірювальної інформації, впровадження нових конструктивних виконань вузлів і пристроїв [20, 26], що сприяє підвищенню точності ЕУ. Значній кількості дзвонових ЕУ в Україні за останніми вимогами чинного нормативного документа [8] надано статус робочих еталонів, що свідчить про актуальність удосконалення конструкції цього типу ЕУ і розвитку їх метрологічних моделей з метою підвищення точності функціонування. Крім того, не набула практичної реалізації метрологічна атестація цих еталонів на базі теорії невизначеності, що потребує актуалізації у відповідності до метрологічної практики сьогодення.

3 МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАЛОНІВ ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

3.1 Узагальнена метрологічна модель

Відомі метрологічні моделі стосуються аналізу конкретних типів ЕУ, наприклад, повірочних установок дзвонового типу, поршневих ЕУ, з обертовими елементами, на базі критичних сопел. Однак, на даний час практично відсутня теорія побудови метрологічних моделей (ММ), якими можна було би описати практично всі типи ЕУ. Крім того, практично відсутні розробки ММ з використанням теорії невизначеності у вимірюваннях, що на даний час є актуальним при вході України в ЄС і СОТ. Це зумовлює необхідність проведення гармонізації метрологічних норм України з міжнародними метрологічними нормами цих країн. Тому доцільним є розроблення узагальненої ММ для ЕУ об'єму та об'ємної витрати газу з використанням теорії невизначеності у вимірюваннях.

При розробці узагальненої ММ аналізувався бюджет невизначеності ЕУ згідно їх типів А і В. При цьому розглянуті джерела, які формують методологічні принципи побудови ММ і об'єднані у такі групи невизначеностей [31]:

- визначені алгоритмом функціонування ЕУ згідно принципу дії (типи А, В);
- сформовані еталонними засобами вищої точності при передаванні одиниці об'єму чи витрати до ЕУ або які застосовуються при метрологічній атестації ЕУ опосередкованим методом (тип В);
- вимірювальних каналів (типи А, В);
- від дестабілізуючих факторів роботи ЕУ (тип А, які визначаються експериментальним чином, і тип В, які розраховуються від граничних меж зміни параметрів ЕУ);
- розрахунку параметрів чи коефіцієнтів, які застосовуються при роботі РЕ, наприклад, невизначеності розрахунку фактора стисливості чи густини

робочого середовища або коефіцієнта витікання звужувального пристрою (тип В);

- точності збирання вимірювальної інформації з ДП (тип В);
- системи обробки вимірювальної інформації (тип В);
- зумовлені точністю передавання одиниці вимірювання від ЕУ до ДП (тип В).

Крім того, за наявності кореляції між параметрами ЕУ розраховують бюджет кореляцій вхідних величин (тип А чи В) в залежності від експериментально чи теоретично встановленого виду коваріації.

Виходячи з перерахованих складових невизначеностей розроблена узагальнена ММ у вигляді ієрархічної структури їх побудови (рис 3.1), яка дає можливість формувати компоненти складових невизначеності для конкретного типу ЕУ, а також здійснювати їх кількісний аналіз і сумування згідно основних положень теорії невизначеності.

У зв'язку з тим, що як основна МХ закордонних ЕУ оцінюється розширена невизначеність, а в Україні з цією метою переважно користуються терміном похибка, то для співставлення МХ установок необхідно розробити методологію перерахунку розширеної невизначеності ЕУ в границю допустимої похибки.

Розширена невизначеність визначається за формулою [24]:

$$U_p = k_o \cdot U_c(y), \quad (3.1)$$

де k_o – коефіцієнт охоплення;

$U_c(y)$ - стандартна сумарна невизначеність.

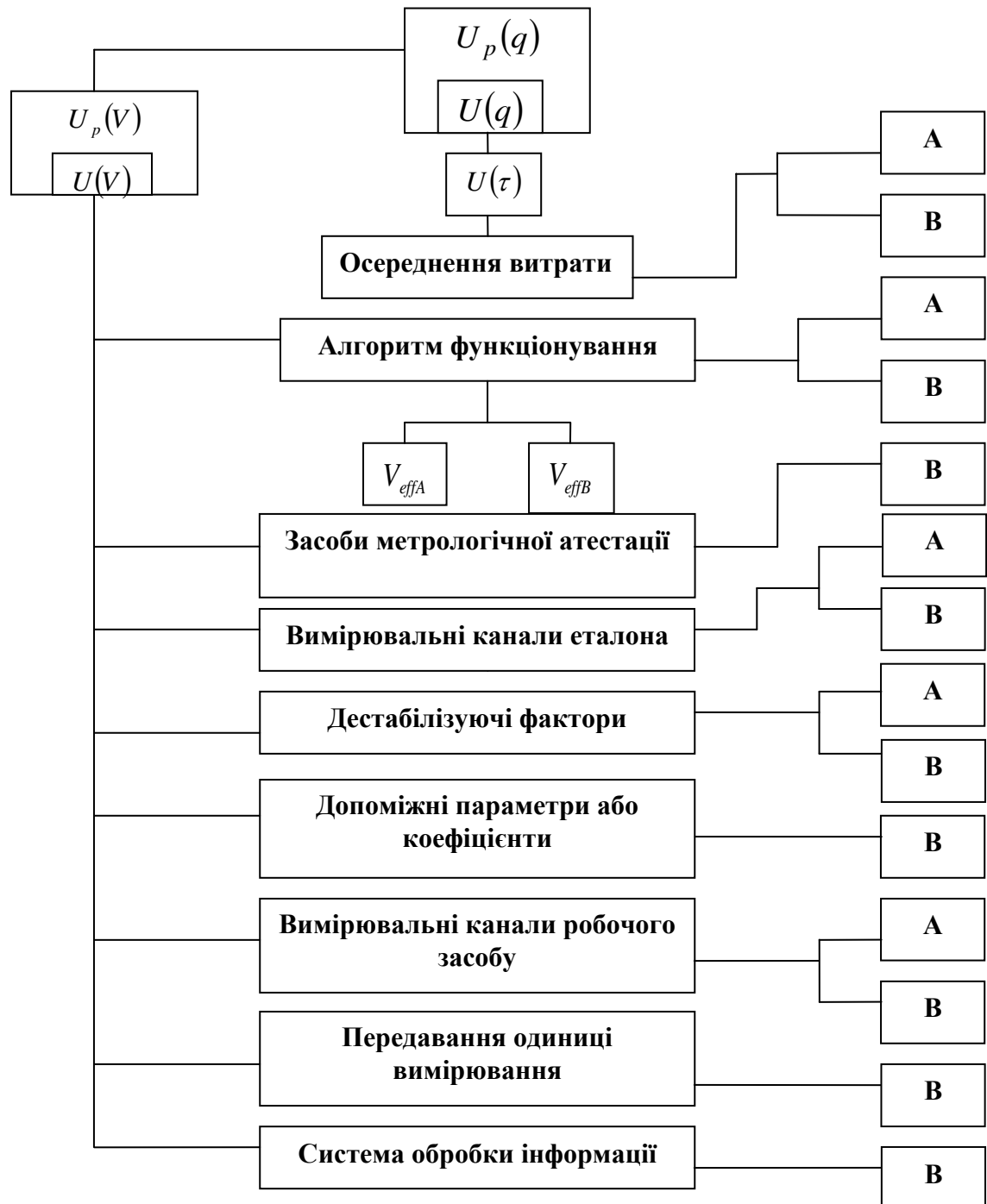


Рисунок 3.1 – Узагальнена метрологічна модель еталонів об’єму та об’ємної витрати газу з використанням теорії невизначеності

Відносну різницю значень розширеної невизначеності U_p і границі допустимої похибки $\Delta(P)$ подамо у вигляді безрозмірного параметра співвідношення МХ ε_{MX} [24]:

$$\varepsilon_{MX} = \frac{U_p - \Delta(P)}{U_p}. \quad (3.2)$$

Після арифметичних перетворень виразу (3.2) отримаємо алгоритм розрахунку границі допустимої похибки $\Delta(P)$ за відомих значеннях параметра ε_{MX} :

$$\Delta(P) = U_p \cdot (1 - \varepsilon_{MX}). \quad (3.3)$$

Значення параметра ε_{MX} залежатиме від співвідношення систематичної Θ і випадкової S складових похибки ЕУ, довірчої імовірності P отриманого результату, виду обробки результатів вимірювань (статистичний або нестатистичний), кількості складових НСП m та кількості проведених вимірювань n . Числові значення параметра ε_{MX} для ЗВТ і конкретизованих різних значень x , P , m , n .

Однак, враховуючи, що при МА витратовимірювальних ЕУ проводиться зазвичай більше 12 вимірювань при експериментальному визначенні складових похибки, а кількість складових НСП в ЕУ завжди є більшою двох, то для практичного розрахунку сформуємо таку таблицю для значень параметра ε_{MX} [24].

Зазначимо, що розраховане значення параметра ε_{MX} , може бути як більше так і менше нуля в залежності від вибраних вихідних даних, тобто коефіцієнт перерахунку розширеної невизначеності в границю допустимої похибки може бути як більшим так і меншим одиниці. Зважаючи, що співвідношення між Θ і S для ЕУ реально знаходиться в межах $0,8 \leq \Theta/S \leq 8$ [24], то на базі (3.3) здійснимо ряд конкретних обчислень для діапазону значень коефіцієнта K_{MX} перерахунку розширеної невизначеності в границю допустимої похибки за формулою:

$$K_{MX} = 1 - \varepsilon_{MX}. \quad (3.4)$$

Таблиця 3.1 – Числові значення параметра ϵ_{MX} при різних x , n , P , m для умов витратовимірювальної техніки.

| $x=\Theta/S$ | n | $P=0,95$ | $P=0,99$ | | | |
|--|-----|------------------|--------------|--------------|-------|-------|
| | | | $m=2$ | $m=3$ | $m=4$ | $m>4$ |
| $x>8$ | - | 0,073 | 0,23 | 0,17 | 0,11 | 0,079 |
| $x<0,8$ | - | 0,078 | 0,067 | 0,058 | 0,050 | 0,047 |
| $0,8\leq\Theta/S\leq 8$ при $n>30$ спостере- жень | 12 | -0,03÷0,023 | -0,088÷0,079 | -0,13÷0,008 | -0,17 | -0,20 |
| | 20 | - 0,014÷0,034 | -0,058÷0,099 | -0,093÷0,03 | -0,14 | -0,16 |
| | 24 | -0,01÷0,036 | -0,052÷0,10 | -0,087÷0,034 | -0,13 | -0,16 |
| | 30 | 0,038 | -0,045÷0,11 | -0,082÷0,038 | -0,13 | -0,15 |

Таблиця 3.2 – Числові значення коефіцієнта перерахунку метрологічних характеристик K_{MX} розширеної невизначеності в границю допустимої похибки для витратовимірювальних ЕУ.

| n | $P=0,95$ | $P=0,99$ | | | |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------|-------|
| | | $m=2$ | $m=3$ | $m=4$ | $m>4$ |
| 12 | 1,03÷0,977 | 1,088÷0,921 | 1,13÷0,992 | 1,17 | 1,20 |
| 20 | 1,014÷0,966 | 1,058÷0,911 | 1,093÷0,97 | 1,14 | 1,16 |
| 24 | 1,01÷0,964 | 1,052÷0,90 | 1,087÷0,966 | 1,13 | 1,16 |
| 30 | 0,962 | 1,045÷0,89 | 1,082÷0,962 | 1,13 | 1,15 |

З аналізу діапазону значень коефіцієнта K_{MX} (табл. 3.2) витікає, що границя допустимої похибки установки становить (0,9÷1,15) від значення розширеної невизначеності і в переважній більшості практичного застосування ці оцінки MX є співрозмірними, що дозволяє з достатньою для практики точністю застосовувати їх для порівняльної оцінки MX різних видів еталонної витратовимірювальної техніки.

3.2 Метрологічна модель еталона передавання на базі витратоміра критичного витоку

Основними інформативними параметрами ЕП є значення абсолютного тиску p_2 (далі позначення $p_{\text{кк}}$) і абсолютної температури T_2 (далі позначення $T_{\text{кк}}$) ізоентропічно загальмованого газу перед кожним i -им КС, які визначають масову витрату q_m . Тоді формулу можна подати через густину ρ робочого середовища [24]:

$$q_m = \mu F C_{\text{кк}} \sqrt{p_{\text{кк}} \rho}. \quad (3.5)$$

Об'ємна витрата газу q за робочих умов через КС визначається діленням q_m на густину газу ρ за робочих умов. Добуток $\mu \cdot F$ у (3.5) є градувальним коефіцієнтом КС, який позначимо через $K_{\text{зр}}$. Тому з врахуванням цього і необхідності обчислення об'єму газу $V = q\tau$ при метрологічних дослідженнях лічильників запишемо такий вигляд алгоритму (3.5) розрахунку відтворюваного контрольного об'єму V для ЕП

$$V = K_{\text{зр}} C_{\text{кк}} \tau \sqrt{(p_{\text{кк}}/\rho)}, \quad (3.6)$$

де τ - тривалість відліку контрольного об'єму ЕП.

Відомі метрологічні дослідження МХ ЕУ на базі ВКВГ газу подаються в загальному вигляді і не містять їх кількісної оцінки, що не дає можливості оцінювання ЕУ на відповідність до повірочної схеми [8].

Таким чином при побудові ММ необхідно враховувати похибки всіх складових, що входять в алгоритм (3.6) функціонування ЕП при вимірюванні ним об'єму газу за робочих умов. Проведемо їх аналіз для досліджуваного ЕП з використанням концепції теорії невизначеності [32].

Для розрахунку сумарної невизначеності вимірювання витрати природного газу ЕП використаємо принцип незалежності похибки вимірювання параметрів у (3.6), що рекомендується застосовувати для практичних цілей розрахунку похибки ВКВГ. Тому на базі алгоритму (3.6) і за умови припущення відсутності кореляційних зв'язків між значеннями параметрів ЕП [32], запишемо такий вираз для метрологічної моделі РЕ [31]:

$$U(V) = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial K_{zp}} \cdot U(K_{zp})\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial C_{kc}} \cdot U(C_{kc})\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \tau} \cdot U_B(\tau)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial p_{kc}} \cdot U_B(p_{kc})\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \cdot U(\rho)\right)^2}, \quad (3.7)$$

де $\frac{\partial V}{\partial K_{zp}}$, $\frac{\partial V}{\partial C_{kc}}$, $\frac{\partial V}{\partial \tau}$, $\frac{\partial V}{\partial p_{kc}}$, $\frac{\partial V}{\partial \rho}$ - коефіцієнти впливу для розрахунку

невизначеності параметрів K_{zp} , C , τ , p_{kc} , ρ відповідно;

$U(K_{zp})$, $U(C)$, $U_B(\tau)$, $U_B(p_{kc})$, $U(\rho)$ - стандартні невизначеності обчислення коефіцієнтів K_{zp} , C , вимірювання параметрів τ , p_{kc} і розрахунку густини природного газу ρ відповідно.

Зважаючи, що на стадії проектування ЕП практично неможливо обчислити кількісні характеристики невизначеності без конкретних числових даних, а для обґрунтування можливості і доцільності використання запропонованого ПЕ необхідно оперувати конкретними числовими даними, то для розрахунку задамося такими попередньо визначеними оцінками значень вхідних величин для робочих умов його функціонування на природному газі: $\bar{\rho}_C = 0,712 \text{ кг/м}^3$; $\bar{p}_{kc} = 380 \text{ кПа}$; $\bar{T}_{kc} = 288 \text{ К}$.

Спочатку чисельно оцінимо всі невизначеності, які входять в (3.7). При цьому їх будемо обчислювати за типом В в силу неможливості застосування статистичних методів оцінки для обробки результатів багаторазових вимірювань.

Для розрахунку невизначеності градувального коефіцієнта $U(K_{zp})$ скористаємося виразом (3.6), який подамо у вигляді для умов градування ВКВГ за допомогою дзвонової ЕУ [24]:

$$q_n = K_{zp} C_n \sqrt{(p_{kcn} / \rho_n)}. \quad (3.8)$$

В (3.8) і далі за текстом індекс « n » конкретизує відповідність функції критичної витрати і параметрів абсолютного тиску і густини повітряному робочому середовищу за умов відтворення дзвоною ЕУ витрати повітря q_n .

Тому із (3.8) отримуємо

$$K_{zp} = \frac{q_n}{C_n \sqrt{(p_{kcn}/\rho_n)}}. \quad (3.9)$$

Значення функції C_n вибирається із таблиць [24] для повітря як робочого середовища стосовно умов дзвонової ЕУ, яке буде рівним $C_n = 0.6853$.

Із (3.9) слідує, що визначення K_{zp} здійснюється непрямим методом і сумарна невизначеність його розрахунку визначається на основі значень невизначеностей вхідних величин з врахуванням їх ступеня впливу через часткові похідні і за відсутності кореляційних зв'язків між ними [32]:

$$U(K_{zp}) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{zp}}{\partial q_n} U_B(q_n)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_{zp}}{\partial C_n} U_B(C_n)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_{zp}}{\partial p_{kcn}} U_B(p_{kcn})\right)^2 + \left(\frac{\partial K_{zp}}{\partial \rho_n} U_B(\rho_n)\right)^2} \quad (3.10)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_{zp}}{\partial q_n} &= \frac{1}{C_n \sqrt{(p_{kcn}/\rho_n)}}, & \frac{\partial K_{zp}}{\partial C_n} &= -\frac{\bar{q}_n}{C_n^2 \sqrt{(p_{kcn}/\rho_n)}} \\ \frac{\partial K_{zp}}{\partial p_{kcn}} &= -\frac{\bar{q}_n}{2C_n \sqrt{(p_{kcn}^3/\rho_n)}}, & \frac{\partial K_{zp}}{\partial \rho_n} &= \frac{\bar{q}_n}{2C_n \sqrt{(p_{kcn} \cdot \rho_n)}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Значення стандартних невизначеностей у (3.10) розраховуються за певною методикою [31]. Для вибраної витрати $q_n = 100 \text{ м}^3/\text{год}$ при робочому тиску дзвонової установки $p_{kcn} = 106,325 \text{ кПа}$ (надлишковий тиск повітря 5 кПа), температурі повітря $T_{kcn} = 293,15 \text{ К}$ і його розрахованій густині при цих умовах $\rho_n = 1,263 \text{ кг/м}^3$ значення невизначеностей становлять $U_\delta(q_n) = 2,015 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $U_B(p_{kcn}) = 35,44 \text{ Па}$; $U_B(\rho_n) = 2,212 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$. Значення стандартної невизначеності $U_\delta(C_n)$ для функції критичної витрати повітря розраховується із врахуванням табличних даних цієї функції. Це дозволяє використати рівномірний закон розподілу похибки і записати на базі [32] таку формулу для обчислення невизначеності:

$$U_B(C_n) = \delta(C_n) \cdot \bar{C}_n / \sqrt{3} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6853 / \sqrt{3} = 1,97 \cdot 10^{-5}. \quad (3.12)$$

У (3.12) похибка $\delta(C_n)$ визначення функції C_n вибрана як половина останнього розряду табличного значення (0,00005) для вибраного значення оцінки функції $\bar{C}_n = 0,6853$.

Після підстановки числових значень параметрів q_n , C_n , $p_{ксп}$, ρ_n як оцінок у (3.11) отримуємо

$$\frac{\partial K_{zp}}{\partial q_n} = 5,036 \cdot 10^{-3} \frac{с}{м}, \quad \frac{\partial K_{zp}}{\partial C_n} = -2,041 \cdot 10^{-4} м^2,$$

$$\frac{\partial K_{zp}}{\partial P_{ксп}} = -6,601 \cdot 10^{-10} \frac{м \cdot с^2}{кг}, \quad \frac{\partial K_{zp}}{\partial \rho_n} = 5,53 \cdot 10^{-5} \frac{м^5}{кг}$$

Наступна підстановка розрахованих вагових коефіцієнтів і стандартних невизначеностей у (3.10) приводить до результату $U(K_{zp}) = 1,606 \cdot 10^{-7} м^2$.

Обчислення невизначеності $U(C)$ функції критичної витрати за умов роботи ЕП на природному газі здійснимо на базі наступного алгоритмів (2.2) і (2.3) розрахунку функції C [20] для природних газів:

Тому використовуючи методику, аналогічну до викладеної вище для розрахунку невизначеності $U(K_{zp})$, можемо записати:

$$U(C_{n2}) = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{n2}}{\partial a_c} \cdot U_B(a_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{n2}}{\partial b_c} \cdot U_B(b_c)\right)^2 + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial C_{n2}}{\partial X_i} \cdot U_B(X_i)\right)^2}, \quad (3.13)$$

де

$$\frac{\partial C_{n2}}{\partial a_c} = \bar{f}; \quad \frac{\partial C_{n2}}{\partial b_c} = 1; \quad \frac{\partial C_{n2}}{\partial X_{N_2}} = -0,5\bar{a}_c;$$

$$\frac{\partial C_{n2}}{\partial X_{CO_2}} = \frac{\partial C_{n2}}{\partial X_{C_2H_6}} = \bar{a}_c; \quad \frac{\partial C_{n2}}{\partial X_{C_3H_8}} = 2\bar{a}_c; \quad \frac{\partial C_{n2}}{\partial X_{C_4H_{10}}} = 3\bar{a}_c. \quad (3.14)$$

Для обчислення невизначеності $U(C_{n2})$ задамося таким складом природного газу: $X_{N_2} = 0,591 \cdot 10^{-2}$; $X_{CO_2} = 0,333 \cdot 10^{-2}$; $X_{C_2H_6} = 1,955 \cdot 10^{-2}$;

$$X_{C_3H_8} = 0,786 \cdot 10^{-2}; \quad X_{C_4H_{10}} = 0,422 \cdot 10^{-2}.$$

Згідно попередньо вибраних упараметрів функціонування ЕП на природному газі ($p_{\text{кк}}=0,38$ МПа, $T_{\text{кк}}=288$ К) оцінка табличних значень функції C_{n2} буде становити $a_c = -0,0322$; $b_c = 0,6701$.

Невизначеності $U_B(a_c)$ і $U_B(b_c)$ розраховуємо аналогічно до їх знаходження для функції C_n для повітря. Тому

$$U_B(a_c) = \delta(a_c) \cdot \bar{a}_c / \sqrt{3} = -5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0322 / \sqrt{3} = -9,29 \cdot 10^{-7};$$

$$U_B(b_c) = \delta(b_c) \cdot \bar{b}_c / \sqrt{3} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6701 / \sqrt{3} = 1,93 \cdot 10^{-5}.$$

Невизначеності $U_B(X_i)$ обчислимо на підставі [32], з врахуванням відомої абсолютної похибки хроматографа за формулою:

$$U_B(X_i) = 2\delta(X_i) / \sqrt{36}. \quad (3.15)$$

Оскільки абсолютна похибка хроматографа залежить від вимірної концентрації компонентів, то стосовно даних отримуємо:

$$\delta(X_{N_2}) = \delta(X_{C_3H_8}) = \delta(X_{C_4H_{10}}) = \pm 2 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta(X_{C_2H_6}) = \pm 7 \cdot 10^{-4}.$$

Підставляючи обчислені значення коефіцієнтів вагомості і отримані результати розрахованих невизначеностей у (3.13) отримуємо $U(C_{n2}) = 2,221 \cdot 10^{-5}$.

Невизначеності вимірювання часу $U_B(\tau)$ і тиску $U_B(p_{\text{кк}})$ розраховуємо за формулами, які враховують метрологічні характеристики використовуваних вимірювальних засобів:

$$U_B(\tau) = 2\delta(\tau) / \sqrt{36} = 2 \cdot 10^{-3} / \sqrt{36} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

$$U_B(p_{\text{кк}}) = 2\delta(p) \cdot \bar{p}_{\text{кк}} / 100\sqrt{36} = 2 \cdot 0,075 \cdot 3,8 \cdot 10^5 / 100\sqrt{36} = 95 \text{ Па},$$

де $\delta(\tau)$ - абсолютна похибка хронометра, с;

$\delta(p)$ - відносна похибка манометра, %;

$\bar{p}_{\text{кк}}$ - робочий тиск природного газу в ЕП, Па.

Використовуючи для розрахунку невизначеності $U(\rho)$ методику для випадку непрямих вимірювань і некорельованості результатів вимірювання параметрів, отримуємо таке значення $U(\rho) = 2,101 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ на базі попередньо

розрахованих значень $U_B(\rho_C) = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$; $U_B(P_{КС}) = 95 \text{ Па}$;
 $U_B(T_{КС}) = 0,05 \text{ К}$; $U(Z) = 6,26 \cdot 10^{-4}$.

Для обчислення коефіцієнтів впливу, які входять в (3.7), шляхом визначення часткових похідних щодо кожного із параметрів виразу (3.6) отримані такі залежності і їх кількісні оцінки:

$$\frac{\partial V}{\partial K_{зр}} = \bar{C} \bar{\tau} \sqrt{(\bar{P}_{КС} / \bar{\rho})} = 8,916 \cdot 10^3 \text{ м}; \quad \frac{\partial V}{\partial C} = \bar{K}_{зр} \bar{\tau} \sqrt{(\bar{P}_{КС} / \bar{\rho})} = 1,868 \text{ м}^3;$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = -\frac{\bar{K}_{зр} \bar{C} \bar{\tau}}{2 \sqrt{(\bar{\rho}^3 / \bar{P}_{КС})}} = -0,225 \text{ м}^6 / \text{кг}; \quad \frac{\partial V}{\partial \tau} = \bar{K}_{зр} \bar{C} \sqrt{(\bar{P}_{КС} / \bar{\rho})} = 3,467 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$\frac{\partial V}{\partial P_{КС}} = \frac{\bar{K}_{зр} \bar{C} \bar{\tau}}{2 \sqrt{(\bar{P}_{КС} \cdot \bar{\rho})}} = 1,642 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$$

Таким чином, після підстановки у (3.7) розрахованих вище значень стандартних невизначеностей і відповідних значень коефіцієнтів впливу отримаємо таке числове значення сумарної невизначеності вимірювання об'єму $U(V) = 1,516 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Зважаючи, що для вибраних значень оцінок параметрів $\bar{K}_{зр} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\bar{C} = 0,6680$; $\bar{\tau} = 36 \text{ с}$; $\bar{P}_{КС} = 380 \text{ кПа}$; $\bar{\rho} = 2,764 \text{ кг/м}^3$ згідно (3.6) розрахункове значення об'єму природного газу за робочих умов буде становити $V = 1,248 \text{ м}^3$, отримуємо таке числове значення відносної сумарної невизначеності:

$$\delta U(V) = \frac{U(V)}{V} \cdot 100 = \pm 0,121\%. \quad (3.16)$$

Для обчислення розширеної невизначеності вимірювання ЕП об'єму $U_p(V)$ необхідно результат з (3.16) помножити на коефіцієнт охоплення k_0 для відповідної довірчої ймовірності. Приймаючи $k_0 = 2$ згідно вибраної довірчої ймовірності $P = 0,95$ [32] отримаємо $U_p(V) = \pm 0,25\%$.

Застосуванням ЕП на базі КС досягається розширення сфери застосування чинної повірочної схеми [8] для передавання одиниць вимірювання об'єму і об'ємної витрати на реальному середовищі (природний газ) до робочих засобів

вимірювальної техніки. Розглянутий ЕП також відкриває нові аспекти для досягнення єдності вимірювань при зміні виду одиниць передавання, зокрема при переході від об'ємної до масової витрати газу.

Розглянута ММ ЕП на базі теорії невизначеності у вимірюваннях відображає розвиток метрологічних моделей розглянутих еталонних витратовимірювальних засобів і сприяє вирішенню проблем забезпечення єдності вимірювань об'єму і витрати природного газу.

3.3 Розрахунок теоретичної похибки еталону передавання

Для визначення даної похибки скористаємось алгоритмом визначення граничної похибки витрати газу [24] та значеннями параметрів які визначені в розділі 2.

Похибка вимірювання витрати газу за допомогою КС складається за методом середніх квадратів із інструментальних похибок приладів, що вимірюють тиск та температуру, а також похибок визначення густини та коефіцієнта стисливості газу [20]. Тоді формула буде наступною:

$$\delta_{q_n} = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\chi^2 + \delta_{P_p}^2 + 4\delta_d^2 + \frac{1}{4}(\delta_\rho^2 + \delta_T^2 + \delta_Z^2)}, \quad (3.17)$$

де δ_α – гранична похибка визначення коефіцієнта витрати α ;

δ_χ – гранична похибка визначення показника адіабати χ ;

δ_{P_p} – гранична похибка визначення тиску P_p за робочих умов;

δ_d – гранична похибка визначення критичного діаметру КС d ;

δ_ρ – гранична похибка визначення відносної густини газу $\bar{\rho}$;

δ_T – гранична похибка визначення температури газу T_p ;

δ_Z – гранична похибка визначення коефіцієнта стисливості газу Z .

За результатами дослідження КС [24] можна прийняти, що $\delta_\alpha=0,02\%$; $\delta_d=0,025\%$; $\delta_\rho=0,05\%$ та $\delta_\chi=0,01\%$.

Всі інші складові виразу (3.17) визначаються по формулах [9, 24].

Гранична похибка визначення тиску за робочих умов визначається наступним чином:

$$\delta_{Pp}^2 = 0,25 \left(\frac{P_{gp}}{P_p} S_p \right)^2, \quad (3.18)$$

де P_{gp} – граничне значення шкали манометра, яке рівне 1МПа;

P_p – текуче значення вимірювального тиску ($P_p=0,3$ МПа);

S_p – клас точності манометра, який рівний 0,1%.

$$\text{Тоді будемо мати: } \delta_{Pp} = \sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{0,3}{1} \right) \cdot 0,1} = 0,167\%.$$

Гранична похибка визначення температури газу δ_T знаходиться за такою формулою:

$$\delta_T^2 = 0,5 S_t \frac{N_t}{T_p}, \quad (3.19)$$

де N_t – діапазон шкали вимірювання термометра, яке рівне 50;

T_p – значення вимірювальної температури ($T_p=293,15$ К);

S_t – клас точності термометра, який рівний 0,1%.

$$\text{Звідси, } \delta_T = \sqrt{0,5 \cdot 0,1 \cdot \frac{50}{293,15}} = 0,092\%.$$

Похибка визначення коефіцієнта стисливості Z ПГ розраховується за формулою:

$$\delta_Z = \sqrt{(1-Z)^2 (\delta_{Pp}^2 + 16\delta_T^2 + 4\delta_\rho^2 + 0,04\delta_{N_2}^2 + 0,003\delta_{CO_2}^2 + \delta_{Z_{табл}}^2)}, \quad (3.20)$$

де Z – коефіцієнт стисливості ПГ, $Z=0,981$;

δ_{N_2} та δ_{CO_2} – похибки визначення молярної концентрації відповідно азоту та вуглекислого газу в ПГ. Для нашого випадку приймаємо: $\delta_{N_2}=0,01\%$;

$\delta_{CO_2}=0,01\%$;

$\delta_{Z_{табл}}$ – похибка визначення табличних значень коефіцієнта стиснення. Для практичних розрахунків можна прийняти 0,25%;

δ_ρ – гранична похибка визначення густини газу ρ , яка визначається наступною формулою:

$$\delta_{\rho} = \frac{50 \cdot \Delta\rho}{\rho}, \quad (3.21)$$

де $\Delta\rho$ – максимальна абсолютна похибка визначення ρ і рівна половині розряду останньої цифри в табличному значення ρ , тобто 0,0005;

ρ – густина газу приведена до нормальних умов, $\rho=0,759\text{кг/м}^3$.

$$\text{Звідси, } \delta_{\rho} = \frac{50 \cdot 0,0005}{0,759} = 0,033\%.$$

Тоді:

$$\delta_z = \sqrt{(1-0,981)^2(0,167^2 + 16 \cdot 0,092^2 + 4 \cdot 0,033^2 + 0,04 \cdot 0,01^2 + 0,003 \cdot 0,01^2 + 0,25^2)} = 0,009\%.$$

Підставивши всі розраховані похибки у вираз (3.17) отримаємо:

$$\delta_{q_n} = \sqrt{0,01^2 + 0,02^2 + 0,167^2 + 4 \cdot 0,025^2 + \frac{1}{4}(0,05^2 + 0,092^2 + 0,009^2)} = 0,183\%.$$

Таким чином теоретична похибка ЕП складає 0,183%, що в нашому випадку є прийнятним.

3.4 Метрологічні дослідження еталонів передавання на базі витратоміра критичного витоку

Серед найбільш поширених засобів, які знаходять застосування при обліку природного газу є ВЗПТ, які в силу суттєвості методичних похибок застосовуються переважно як робочі ЗВТ [9, 24]. Водночас відомі результати застосування зразкових діафрагм для атестації на природному газі ВЗПТ, лічильників газу і турбінних витратомірів.

Тому з врахуванням цих передумов розглянутий новий науково-методологічний підхід побудови ЕП в межах чинної Державної повірочної схеми [8], який полягає на створенні ЕП одиниці витрати природного газу на базі ВЗПТ [33]. Однак для їх практичного впровадження необхідно здійснити метрологічні дослідження запропонованого типу ЕП.

При градуванні ЕП із застосуванням дзвонової ЕУ як ЕП спочатку заповнюється простір під дзвоном 6 (рис.3.2) від джерела витрати 11 через трубопровід 12 і відкритий клапан 13. При цьому клапан 15 у вихідному трубопроводі 14 є закритим. Після досягнення дзвоном 6 необхідного

положення запірний клапан 13 закривається і подача газу від джерела 11 припиняється. Дзвін 6 опиняється у нерухомому зваженому стані. Далі пристроєм задавання витрати 16 задають значення відтворюваної витрати газу і відкривають клапан 15, внаслідок чого дзвін 6 під дією власної ваги починає опускатися і витискувати повітря через звужувальний пристрій 1 ЕП. При цьому за допомогою контрольної лінійки 8 і оптоелектронної пари 9 вимірювачем BS (поз. 1-1) відлічується контрольний об'єм газу, який відтворюється дзвоном, і час його відтворення хронометром KE (2-1), а блоком 10 збору і обробки інформації одночасно здійснюється збір інформації про значення перепаду тиску Δp (7-1), тиску p (8-1) і температури T (6-1, 6-2) на звужувальному пристрої 1, і тиск (3-1), температуру (4-1, 4-2) і фізичні характеристики робочого середовища робочого еталона.

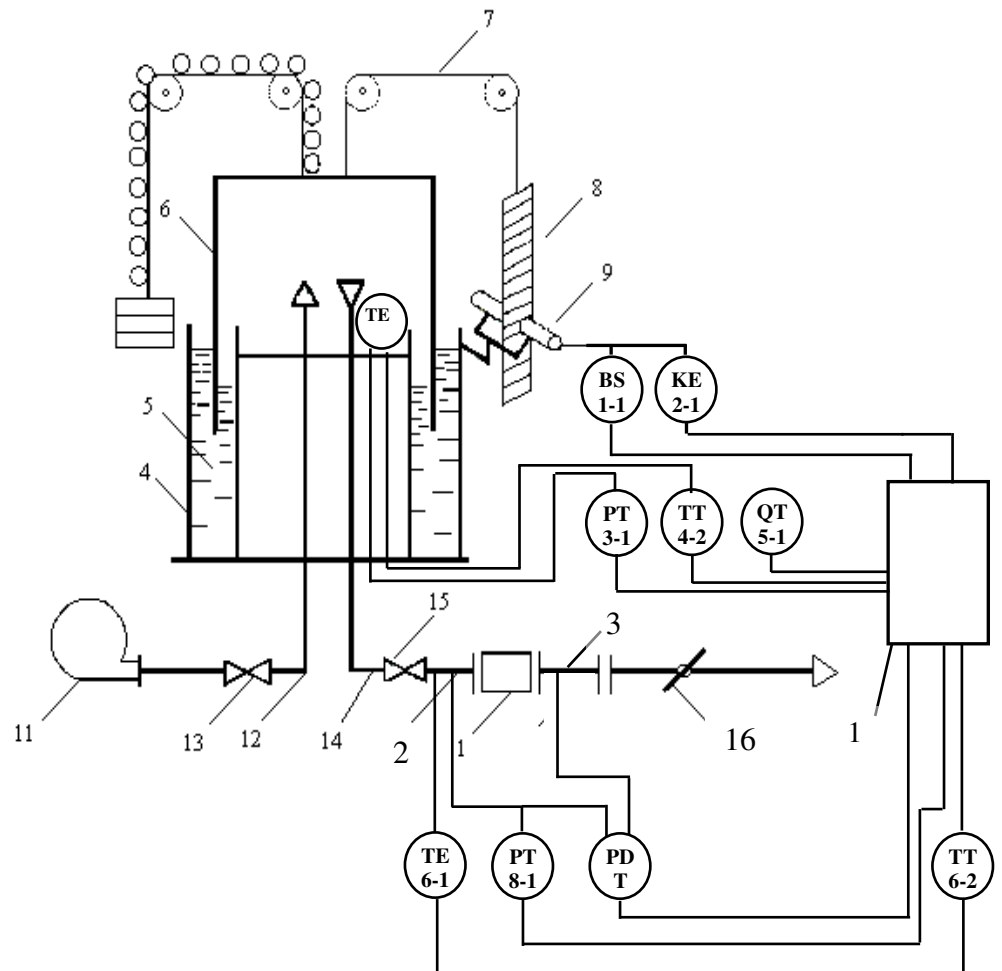


Рисунок 3.2 – Функціональна схема градування ЕП за допомогою дзвонової

В комплект ЕП входить перетворювач якісних параметрів робочого середовища Q (5-1), які забезпечують визначення показника адиабати (застосовується при роботі ЕП на природному газі). При опусканні дзвона 6 до крайнього нижнього положення запірний клапан 15 закривається. Градувальний цикл при цьому закінчується, який повторюють за інших відтворених витрат дзвоною ЕУ.

Далі вимірювана інформація обробляється у вузлі 10, за допомогою якого здійснюють розрахунок градувального коефіцієнта звужувального пристрою за робочих умов його визначення на дзвонової ЕУ з використанням алгоритму (5.3), який для умов градування ЕП поданий у вигляді:

$$K_{ep} = \frac{q_{EP} \sqrt{1 - \beta^4}}{\left(\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_n}} \right)}, \quad (3.22)$$

де q_{EP} - об'ємна витрата повітря, яка передана від еталонного засобу (державний, робочий чи інший вид еталона) до ЕП при його градуванні;
 ρ_n - густина повітря перед звужувальним пристроєм ЕП.

Зважаючи, що об'єм повітря, який відтворюється РЕ дзвонового типу в силу дії термогазодинамічних факторів змінюється при транспортуванні до ЕП для обчислення параметрів q_{EP} , ρ_n і числа Re застосовувався такий алгоритм [33]:

$$q_{EP} = q_{PE} \frac{p_{PE}}{p_{EP}} \frac{T_{EP}}{T_{PE}} \frac{Z_{EP}}{Z_{PE}}, \quad (3.23)$$

$$q_{PA} = V_{PE} / \tau, \quad (3.24)$$

$$\rho_n = \rho_c \frac{p_{EP}}{p_c} \frac{T_c}{T_{EP}} \frac{Z_c}{Z_{EP}}, \quad (3.25)$$

$$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_{EP} \rho_n}{D \mu_n}, \quad (3.26)$$

де V_{PE} , q_{PE} – об'єм та об'ємна витрата повітря за робочих умов, які відтворені робочим еталонном відповідно;

p_{PE} , T_{PE} , Z_{PE} – абсолютні тиск, температура та ФС повітря за робочих умов робочого еталона відповідно;

p_{EP} , T_{EP} , Z_{EP} – абсолютні тиск, температура та ФС повітря за робочих умов ЕП відповідно;

p_c , T_c , Z_c – значення стандартних умов абсолютного тиску, температури та ФС повітря за стандартних умов відповідно;

τ – час відтворення контрольного об'єму ЕП;

μ_n – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря за робочих умов ЕП.

Метрологічні дослідження проводилися на базі дослідного зразка ЕП, з використанням двох прямолінійних ділянок трубопроводу умовного діаметра $D_u=100$ мм довжиною по 20 D_u і стандартної діафрагми з середнім значенням діаметра отвора $\bar{d} = 56,002$ мм. В комплект ЕП входить обчислювач витрати і об'єму газу типу ОЕ-22ДМ, який під'єднується до багатопараметричного перетворювача тиску, перепаду тиску і температури типу Fisher Rosemount моделі 3095, укомплектованого первинним перетворювачем температури типу ТСП-1288. Як РЕ дзвонового типу для градуювання ЕП [33] застосовувалася установка типу РКДУ-0,44 (ВАТ «Івано-Франківський завод Промприлад») з границею сумарної відносної похибки передачі одиниці об'єму газу $\delta_{PE} = \pm 0,16\%$ в діапазоні витрат $(10 \div 1000) \text{ м}^3/\text{год}$. Розраховані середні значення для параметрів \bar{q}_{PEi} , \bar{Re}_i , \bar{K}_{zpi} , \bar{K}_{zpmi} , які наведені в табл.3.3, стосуються усереднених значень за результатами j -их вимірювань для кожної i -тої витрати ЕП при його градуюванні.

В табл.3.3 також наведені результати обчислень СКВ середнього значення експериментально визначеного $S(K_{zpi})$ і теоретично розрахованого $S(K_{zpmi})$ значень градуювального коефіцієнта, а також похибки δ_K визначення цього коефіцієнта двома методами для i -их значень витрати.

При цьому на базі [33] застосовувалися такі формули:

$$S(K_{zpi}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (K_{zpij} - \bar{K}_{zpi})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.27)$$

$$S(K_{zpmi}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (K_{zpmij} - \bar{K}_{zpmi})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.28)$$

Таблиця 3.3 – Результати градування і теоретичних досліджень ЕП.

| № досліджуваної витрати | \bar{q}_{PEi} , м ³ /год | \bar{Re}_i | \bar{K}_{zpi} | $S(\bar{K}_{zpi}) \times 10^{-4}$ | \bar{K}_{zpmi} | $S(\bar{K}_{zpmi}) \times 10^{-6}$ | δ_{Ki} , % |
|-------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------|
| 1 | 154,019 | 38426 | 0,61906 | 1,09600 | 0,61138 | 3,4740 | 1,256 |
| 2 | 197,439 | 49198 | 0,61720 | 1,53491 | 0,60977 | 2,1898 | 1,219 |
| 3 | 269,344 | 67044 | 0,61355 | 2,45715 | 0,60750 | 4,0782 | 0,995 |
| 4 | 335,981 | 83480 | 0,60992 | 0,68838 | 0,60549 | 2,7193 | 0,732 |
| 5 | 401,544 | 99419 | 0,60689 | 0,52198 | 0,60341 | 1,8035 | 0,577 |
| 6 | 464,315 | 114994 | 0,60410 | 0,42934 | 0,60123 | 1,8240 | 0,479 |
| 7 | 499,298 | 123796 | 0,60171 | 1,37994 | 0,59988 | 4,3082 | 0,305 |

$$\delta_{Ki} = \frac{\bar{K}_{zpi} - \bar{K}_{zpmi}}{\bar{K}_{zpmi}} \cdot 100\%, \quad (3.29)$$

де K_{zpij} - значення коефіцієнта K_{zpi} для кожного j -того вимірювання за i -того значення числа Re ;

\bar{K}_{zpi} , \bar{K}_{zpmi} – середні значення градувального коефіцієнта експериментально визначеного і теоретично розрахованого за результатами n вимірювань для кожної i -тої витрати.

З отриманих результатів очевидно є наявність систематичної похибки δ_K між експериментально встановленим значенням коефіцієнта K_{zpi} і його

розрахованим теоретичним значенням $K_{зрт}$, яка зростає із зменшенням числа Re . Отримані результати стосуються діапазону порівняно невеликих чисел Re ($0,4 \cdot 10^5 \div 1,2 \cdot 10^5$), що зумовлено технологічними можливостями робочого еталона РКДУ-0,44 і в першу чергу малими значеннями надлишкового робочого тиску, який не перевищує 5кПа. Однак цей діапазон є дозволеним для застосування ВЗПТ, так як згідно [24] для $0,1 \leq \beta \leq 0,559$ мінімально допустиме значення становить $Re_{min} = 5000$.

Таким чином розроблений ЕП одиниць витрати природного газу на базі ВЗПТ і його метрологічні дослідження обґрунтовують можливість створення нового типу еталонних ЗВТ (ЕП і робочих еталонів), так як досліджуваний ЕП з врахуванням оцінених МХ практично відповідає вимогам чинного нормативного документа [8].

ВИСНОВКИ

За результатами виконання магістерської роботи проведено моделювання та метрологічні дослідження еталонів передавання одиниці витрати природного газу, що є вагомим фактором для метрологічної практики України при вирішенні проблеми раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів.

В першому розділі виконаний детальний аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку методів і засобів передавання одиниці витрати природного газу в Україні та світі. Він засвідчив необхідність в подальшому проводити дослідження теоретичних основ функціонування еталонів об'єму та об'ємної витрати газу, в основному за допомогою математичного моделювання фізичних процесів. Дослідження повірочної схеми України для засобів вимірювання витрати акцентувало увагу на розробленні наукової основи методології передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу при зміні виду робочого середовища. Характерні особливості технічних засобів для реалізації повірочної схеми підтвердили необхідність впровадження ефективних заходів, спрямованих на поліпшення їх метрологічного забезпечення.

Другий розділ висвітлює основи побудови еталонів передавання і технічні засоби для їх метрологічного дослідження, а також принципи реалізації засобів для метрологічної атестації критичних сопел. Отримані результати також відкривають нові можливості щодо поглибленого вивчення і кількісної оцінки динамічних складових похибки еталонів передавання.

В третьому розділі проведено метрологічні дослідження еталонів передавання одиниці витрати газу, які обґрунтовують можливість створення нового типу еталонних засобів вимірювальної техніки. Розрахована теоретична похибка еталона передавання. Розглянута метрологічна модель еталона передавання на базі теорії невизначеності у вимірюваннях відображає розвиток метрологічних моделей розглянутих еталонних витратовимірювальних засобів і сприяє вирішенню проблем забезпечення єдності вимірювань об'єму і витрати природного газу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Енергетична безпека держави: високоефективні технології видобування, постачання і використання природного газу / Є.І.Крижанівський, М.І.Гончарук, В.Я.Грудз та ін. –К.: Інтерпрес ЛТД, 2006. -282 с.
2. Середюк О.Є., Чеховський С.А. Новітні технології метрологічного забезпечення обліку газу як елемент енергозбереження // Нафтогазова енергетика. – 2006. - №1. – С.82-87.
3. Гончарук М.І. Аналіз причин втрат природного газу // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - №1. – С.51-53.
4. В.Д.Цюцюра, С.В.Цюцюра. Метрологія та основи вимірювань. Навч. посібн., К., «Знання –Прес», 2003 – С.54-77.
5. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [від 05.06.2014р., № 1314-VII: у редакції від 01.05.2019 р.].
6. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання: Навчальний посібник для студентів ВУЗів. - Івано-Франківськ: Факел, 2002. – С.177-223.
7. Петришин І.С. Система метрологічного забезпечення засобів вимірювання об'єму газу // Метрологія та прилади – 2007. -№ 2. – С.25-27.
8. ДСТУ 3383:2015. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. [Чинний від 2016-01-01; на заміну ДСТУ 3383:2007]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. II, 5 с. (Національний стандарт України).
9. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник. У 2 т. / М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник та ін.; За ред. Б.Стадника. - Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”; 2005. – Т.1: Основи метрології. – 532с.
10. Облік природного газу: довідник / уклад.: М. П. Андрійшин, О. М. Карпаш, О. Є. Середюк [та ін.]; за ред. проф. С. А. Чеховського. Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. 180 с.

11. Pays-bas. Piston prover primary standard for high-pressure gas metering /H.Bellinda, C. P. Hoeks, A.Kool //Bull.Orqanis. Int. Metrol. Leg.-1985.- №100.- P.21-31.
12. Кузьмін С. В., Сидоренко О. М., Борушак Б. О., Гасішвілі Е. О. Стенд для перевірки лічильників. Пат. 76931, С2 (Україна), МПК(2006) 7 G01F25/00; Заявл. 30.06.2006; Опубл. 15.09.2006. Бюл. №9.
13. Домницький Р. Метрологічний центр НАК „Нафтогаз України” // Метрологія та прилади. -2007. - №1. - С.14-19.
14. Кузьмін С. В., Сидоренко О. М., Борушак Б. О. Спосіб звірення методів та пристроїв повірки лічильників газу. Пат. на корисну модель 22233, U (Україна), МПК(2006) 7 G01F25/00; Заявл. 10.07.2006; Опубл. 25.04.2007. Бюл. №5.
15. Петришин І.С. Впровадження еталонів передавання в повірочну практику засобів вимірювальної техніки об’єму та об’ємної витрати газу // Український метрологічний журнал. – 2006. -№ 6. - С.55-59.
16. Петришин І.С. Методологічні аспекти вдосконалення державної повірочної схеми в галузі витратометрії газу // Український метрологічний журнал. – 2007. -№ 1. - С.42-43.
17. Primarne etalony prietoku plynov v smu. Ing. Stefan Makovnik, SMU Bratislava.
18. John D.Wright. What is the “Best” Transfer Standard for Gas Flow?//www.cstl.nist.gov.
19. Власюк Я.М., Кісіль І.С. Особливості складу та технічні характеристики комплексу технічних засобів метрологічного центру природного газу НАК “Нафтогаз України” // Методи та прилади контролю якості. -2004. - №12. - С.65-69.
20. Андріішин М.П., Канєвський С.О. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник. Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004 — 160с.
21. 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, М. А. Кононенко, О. Є.

- Середюк, В. М. Романів. За ред. проф. Чеховського С. А. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. 534 с..
22. Середюк О.Є. Методологія передавання одиниці об'єму газу при зміні робочого середовища / О.Є. Середюк, С.А. Чеховський // Вимірювання витрати та кількості газу: всеукр. наук.–техн. конф., 17–20 травня 2005р, Івано–Франківськ: матеріали конф. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2005.– С.59.
23. Середюк О.Є. Принципи побудови еталонів передавання одиниці об'єму природного газу в контексті державної повірочної схеми / О.Є. Середюк // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2006): V міжнар. наук.–техн. конф., 10–12 жовтня 2006р, Харків: наукові праці конф.: у 2 т. – Том 2. – Харків: ННЦ „Інститут метрології”. – 2006. – С.219–222.
24. 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, М. А. Кононенко, О. Є. Середюк, В. М. Романів. За ред. проф. Чеховського С. А. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. 534 с.
25. Пристрій для калібрування, метрологічної атестації та перевірки сопел критичного витоку / І. С. Петришин, П. Я. Джочко, Д. О. Середюк, Я. В. Безгачнюк: пат. 61881U Україна, МПК (2011.01) G01 F 25/00. № u201104886; заявл. 19.04.11; опубл. 25.07.11, Бюл. № 14.
26. Пат. 42275 С2 Україна, МПК 7 G 01 F 25/00. Дзвонова установка для градуювання та перевірки витратомірів і лічильників газу / Прудніков Б.І., Середюк О.Є., Федоришин Я.С.; заявники і патентовласники Прудніков Б.І., Середюк О.Є., Федоришин Я.С. – № 2000127353; заявл. 20.12.00; опубл. 15.02.05, Бюл. №2.
27. Пат. 30411 С2 Україна, МПК 7 G 01 F 25/00. Пристрій для градуювання критичних витратомірів газу / Середюк О.Є., Петришин І.С.; заявники і патентовласники Середюк О.Є., Петришин І.С. – № 98031485; заявл. 25.03.98; опубл. 17.02.03, Бюл. №2.

28. Середюк О.Є. Мобільна установка для бездемонтажного діагностування побутових лічильників газу / О.Є. Середюк, А.Г. Винничук // Нафтогазова енергетика. – 2007. - №3(4). –С.76-80.
29. Бродин Ю.І. Оцінка точності дзвонових витратовимірювальних установок / Ю.І. Бродин // Український метрологічний журнал. – 1998. – №3. – С.48–51.
30. Бабак В.П. Обробка сигналів: Підручник для студ. техн. спец. вузів / В.П.Бабак, В. С. Хандецький, Е.Шрюфер.–К.: Либідь, 1999. – 496 с.
31. Середюк О.Є. Узагальнена метрологічна модель еталонів об'єму та об'ємної витрати газу / О.Є. Середюк // Приладобудування 2008: стан і перспективи: 7-а наук.-техн. конф., 22-23 квітня 2008 р., Київ: зб.тез доп. – Київ: ПБФ, НТУУ «КПІ», 2008. – С.244-245.
32. Пристрій для градування, метрологічної атестації та перевірки сопел критичного витоку / Д. О. Середюк, О. В. Міхуткін, В. О. Протопопов, О. Є. Середюк: пат. 73194U Україна, МПК (2012.01) G01F 25/00. № u201203903; заявл. 30.03.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17..
33. Пат. 25208 U Україна, МПК (2006) G 01 F 25/00. Еталон передавання одиниці об'єму, маси та витрати природного газу. / Середюк О.Є., Крук І.С., Рудко В.П., Чеховський С.А., Луцик Р.П., Прудніков Б.І.; заявники і патентовласникии - ті ж самі. – № u200704218; заявл. 16.04.07; опубл. 25.07.07, Бюл. № 11.