

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

Васільєв Віталій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження метрологічних моделей дзвонових еталонних  
витратовимірювальних установок

(назва роботи)

175-Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

В.В. Васільєв

(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

З.П. Лютак

(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**

Васільєву Віталію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження метрологічних моделей дзвонових еталонних витратовимірювальних установок

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 еталонної установки – дзвонова; вид робочого середовища – повітря; умови функціонування установки – надлишковий тиск 5-7кПа, температура 291-294К, максимальна витрата – 1600м<sup>3</sup>/год

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

1. Аналіз видів і області застосування еталонних витратовимірювальних установок

2. Розроблення технічних рішень дзвонових установок для покращення їх метрологічних характеристик

3. Дослідження метрологічних моделей еталонних витрато вимірювальних установок

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

1. Класифікація еталонних витратовимірювальних установок;

2. Функціональна схема дзвонової витратовимірювальної установки ;

3. Алгоритм вагової компенсації дзвонової установки;

4. Принципова схема дзвонової еталонної установки;

5. Результати чисельного моделювання похибки від зміни рівня замкової рідини;

6. Моделювання впливу точності виготовлення вузлів установки на її метрологічні характеристики.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
нормоконтроль	<i>Проф. Лютак З.П.</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 видів і області застосування еталонних витратовимірювальних установок</i>	<i>05.12.2024</i>	
3	<i>Розроблення технічних рішень дзвонових установок для покращення їх метрологічних характеристик</i>	<i>10.12.2024</i>	
4	<i>Дослідження метрологічних моделей еталонних витрато вимірювальних установок</i>	<i>15.12.2024</i>	
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>23.12.2024</i>	

Студент \_\_\_\_\_

( підпис )

*Васильєв В.В.*

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

( підпис )

*Середюк О.Є.*

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: «Дослідження метрологічних моделей дзвонових еталонних витратовимірювальних установок» 82 с., 14 рис., 29 джерел, 6 аркушів графічного матеріалу.

Об'єкт дослідження – процес метрологічного дослідження еталонних витратовимірювальних установок.

Мета роботи полягає у метрологічному дослідженні моделей дзвонових еталонних витратовимірювальних установок.

У даній магістерській роботі проаналізовано сучасний стан, види та область застосування еталонних витратовимірювальних установок з робочими середовищами повітря і природного газу.

В роботі розроблені технічні рішення дзвонових установок з метою покращення їх метрологічних характеристик. Також, здійснено дослідження метрологічних моделей еталонних витратовимірювальних установок.

**ВИТРАТА, ДЗВОНОВА УСТАНОВКА, ЕТАЛОН, ПОВІТРЯ, МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОХИБКА, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ.**

## **ABSTRACT**

Master's thesis: "Study of metrological models of bell-type reference flowmeters" 82 p., 14 fig., 29 sources, 6 sheets of graphic material.

The object of the study is the process of metrological study of reference flowmeters.

The purpose of the work is to conduct a metrological study of models of bell-type reference flowmeters.

This master's thesis analyzes the current state, types and scope of application of reference flowmeters with air and natural gas working media.

The work develops technical solutions for bell-type flowmeters in order to improve their metrological characteristics. Also, a study of metrological models of reference flowmeters was carried out.

**FLOW, BELL INSTALLATION, STANDARD, AIR, METROLOGICAL CHARACTERISTICS, ERROR, UNCERTAINTY.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Аналіз видів і області застосування еталонних витратовимірювальних установок.....	6
1.1 Класифікація зразкових засобів вимірювання витрати газу .....	6
1.2 Засоби вимірювання витрати газу безперервної дії .....	9
1.3 Порційно-статичні засоби вимірювання та відтворення витрати .....	13
1.4 Безперервно-циклічні засоби вимірювання витрати .....	17
1.5 Дискретно-динамічні засоби вимірювання витрати .....	19
1.6 Постановка завдання на магістерську роботу.....	26
2 Розроблення технічних рішень дзвонових установок для покращення їх метрологічних характеристик.....	27
2.1 Розроблення функціональної схеми еталонної дзвонової установки ...	27
2.2 Розроблення математичної моделі відтворення об'єму газу дзвонової витратовимірювальної установки .....	31
2.3 Дослідження конструкції і алгоритму функціонування вагового компенсатора дзвонової установки .....	35
2.4 Дослідження впливу зміни рівня замкової рідини на похибку дзвонової установки .....	45
3 Дослідження метрологічних моделей еталонних витрато вимірювальних установок.....	50
3.1 Дослідження алгоритмів визначення похибки від непостійності тиску в дзвонових еталонних установках .....	50
3.2 Моделювання впливу робочого тиску дзвонових еталонних установок на їх метрологічні характеристики.....	55
3.3 Дослідження впливу точності виготовлення і монтажу вузлів дзвонових еталонних установок на їх метрологічні характеристики.....	65
3.4 Розрахунок похибок еталонних дзвонових установок .....	71
Висновки.....	78
Перелік посилань на джерела.....	79

## ВСТУП

**Актуальність теми.** При вирішенні питань енергозбереження, серед яких природний газ займає важливе місце, потрібні прилади для вимірювання його об'єму на різних підприємствах, а також у населення. Для цього використовуються промислові лічильники газу і побутові лічильники газу. Останні знаходять застосування переважно у комунально-побутових споживачів, тобто у населення. Це є одним із практичних шляхів вирішення питань енергозбереження.

Україна належить до енергодефіцитних країн і задовільняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобутку менше, ніж на 50%. Наша держава є одним з найбільших у світі імпортерів природного газу. Гострота енергетичної кризи в країні зумовлена не лише дефіцитом паливно-енергетичних ресурсів, а й, значною мірою, їх неефективним використанням. Перевитрати енергетичних ресурсів підвищують собівартість продукції, ще більше ускладнюючи економічну ситуацію в державі. Однак частина затрат на паливно-енергетичні ресурси в структурі собівартості продукції продовжує зростати. Технічний рівень енерготехнологій та енергообладнання в Україні значно поступається західноєвропейському. Як наслідок, наприклад, Франція споживає газу в три рази менше, але випускає в п'ять разів більше, ніж Україна товарної продукції.

З урахуванням різкого зростання цін на газ до рівня світових та збільшення його споживання населенням проблема точного обліку використання газу стала особливо актуальною.

У відповідності до діючої в Україні Державної повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу еталонні установки за статусом поділяються на Державний еталон, вторинні еталони, робочі еталони та еталони передавання. Саме витратовимірвальна установка дзвонового типу є Держвним еталоном відтворення витрати газу, тому дослідження її метрологічних характеристик є актуальним.

**Мета роботи** полягає у метрологічному дослідженні моделей дзвонових еталонних витратовимірювальних установок.

**Задачі дослідження** полягають у наступному:

- аналіз видів та області застосування еталонних витратовимірювальних установок природного газу в Україні та за кордоном;
- розроблення технічних рішень дзвонових установок з метою покращення їх метрологічних характеристик;
- метрологічні дослідження еталонних витрато вимірювальних установок.

**Об'єктом дослідження** є процес метрологічного дослідження еталонних витратовимірювальних установок.

**Предметом дослідження** є еталонні витратовимірювальні установоки та їх метрологічні характеристики.

**Методи дослідження:** аналіз статистичних та теоретичних даних, порівняння різних типів еталонних витратовимірювальних установок, моделювання практичних аспектів функціонування еталонних установок.

**Наукова новизна** роботи полягає у обґрунтуванні можливості покращення метрологічних характеристик дзвонових еталонних витрато вимірювальних установок.

**Практичне значення** даної магістерської роботи полягає у здійсненні метрологічних досліджень еталонних витрато вимірювальних установок та врахуванні різних факторів впливу на точність їх функціонування.

# 1 АНАЛІЗ ВИДІВ І ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕТАЛОННИХ ВИТРАТОВИМІРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

## 1.1 Класифікація зразкових засобів вимірювання витрати газу

Установки і системи (далі засоби) точного відтворення і вимірювання витрати газу, ті, що застосовуються для випробування витратомірів і лічильників, розрізняються різноманітністю принципів дії, неоднакові по метрологічних і технічних характеристиках, структурі, рівні автоматизації, габаритних розмірах, вартості, продуктивності градуювально-перевіряючих робіт. Тому необхідною передумовою аналізу еталонних витратовимірювальних установок є їх класифікація, яка в більшості випадків здійснюється або за їх принципом дії, або по конструкції в межах одного типу.

Детальна класифікація приведена в [5] (табл.1.1). У ній разом з розділенням еталонних витратовимірювальних установок по методу градуювання витратомірів і способу їх побудови, що практично розкриває питання відмінності їх принципу дії, також указуються області застосування. У свою чергу, як відомо, область застосування того або іншого типу засобів вимірювання та відтворення витрати (ЗВВВ) обумовлюється технічним рівнем використовуваних при створенні еталонних витратовимірювальних установок технологічних процесів, недосконалість яких може обмежити можливості розробки еталонних витратовимірювальних установок підвищеної точності. Тому такий напрям класифікації на вашу думку характеризує лише досягнутий рівень створених закордоном еталонних витратовимірювальних установок і не розкриває можливих шляхів підвищення точності і ефективності.

В процесі синтезу сучасних еталонних витратовимірювальних установок вищій точності разом з типами вживаних технічних пристроїв для їх реалізації необхідно враховувати і такі важливі показники як структура потоку газу, число ступенів (кількість паралельних потоків), що дозволяють досягти необхідні межі вимірювання, а також ступінь автоматизації пристроїв, вживаних для збору, обробки і представлення вимірювальної інформації. Такий

підхід дозволяє створювати нові ефективні еталонні витратовимірювальні установки, які володіють поліпшеними технічними і метрологічними характеристиками.

Таблиця 1.1 Класифікація методів градуювання витратомірів і області застосування еталонних витратовимірювальних установок

№ п/п	Основні методи градуювання витратомірів	Способи побудови (основний елемент) установок градуювання витратомірів	Сфера застосування установок
1	Ваговий	Із застосуванням розрідження; надмірного тиску; двох фаз	Еталонні засоби („первинне”)
2	Об’ємний	Дзвоновий мірник Із застосуванням витиснення води Поршневий подільник	Еталонні засоби („первинне”) Градуювання по місцю („в лінії”)
3	Мітковий	Радіоактивне речовина Хімічне речовина	Зразкові засоби („вторинні”) и градуювання по місцю („в лінії”)
4	„Площа-швидкість”	Трубка Піто із застосуванням калориметричного способу	Зразкові засоби („вторинні”) и градуювання по місцю („в лінії”)
5	Із застосуванням зразкових засобів („порівняльний”)	Діафрагма Звукове сопло З примусовою зміною параметрів робочого органу	Зразкові засоби („вторинні”)

На рис.1.1 приведена прийнята в роботі класифікація еталонних витратовимірювальних установок з доповненнями (вони виділені пунктирними лініями), введення яких направлено на розкриття останніх досягнень, що набули найбільше поширення в витратовимірювальній техніці. Зазначимо, що ці доповнення не змінюють суті класифікаційної схеми. Перерахуємо її основні положення:

- структура відтворних потоків;
- спосіб вимірювання кількості газу (тип вживаного пристрою) ;
- число ступенів в еталонних витратовимірювальних установок, спосіб наповнення зразкової місткості, вид джерела витрати і характер переміщення роздільника;



У основу аналізу відомих еталонних витратовимірювальних установок газу покладемо структуру відтворних потоків, що дозволить якнайповніше оцінити їх погляду їх точності, швидкодії і якості відтворення і вимірювання витрати. На нашу думку такий аналіз дозволить обґрунтувати принцип дії і створити випробувальну витратовимірювальну установку необхідної точності, що володіє високою ефективністю роботи.

## **1.2 Засоби вимірювання витрати газу безперервної дії**

У еталонних витратовимірювальних установках безперервної дії потік газу необмежений в часі і необурений як на початку так і в кінці вимірювального циклу. Вони діляться на соплові, з нормальними діафрагмами, з елементами, що обертаються, калориметричні, із застосуванням трубок Піто, а також з примусовою зміною параметрів потоку.

Соплові еталонні витратовимірювальні установки [21] і еталонні витратовимірювальні установки з нормальними діафрагмами [22] засновані на вимірюванні витрати газу індивідуально градуйованими соплами або діафрагмами і порівнянні їх свідчень з результатами вимірювання витрати цього ж потоку випробовуваними витратомірами або лічильниками. Такі зразкові засоби набули досить широке поширення зважаючи на свою простоту і можливість проведення випробувань приладів в реальних умовах, забезпечують велику продуктивність при значному статичному тиску. Так, головним інститутом ВНІП атестовано зразкове сопло, встановлене в трубопроводі діаметром 530 мм, що дозволяє вимірювати витрати  $41,6...83,2 \text{ нм}^3/\text{с}$  ( $1,5 \cdot 10^5...3 \cdot 10^5 \text{ нм}^3/\text{год}$ ) з погрішністю  $\pm 1\%$  при надмірному тиску газу до 7 МПа. З його допомогою експериментальним методом здійснена атестація двадцяти імпорتنих камерних діафрагм для витратомірів змінного перепаду тиску.

Подальше підвищення точності вимірювання витрати за допомогою сопел можливе шляхом досягнення в них критичного режиму закінчення, при якому швидкість газу рівна швидкості звуку, а масова витрата залежить лише

від температури і тиску газу на вході в сопло. Дослідженню критичних сопел, їх конструюванню і застосуванню у складі еталонних витратовимірювальних установок присвячені роботи [22]. За даними цих публікацій погрішність створених зразкових еталонних витратовимірювальних установок такого типу знаходиться в межах від  $\pm 0,15\%$  до  $\pm 0,5\%$ . Така висока неоднозначність в оцінці точності цих засобів вимірювання свідчить про недостатню вивчену критичних сопел і фізичних явищ, що протікають в них, а також про можливий вплив на їх метрологічні характеристики ряду чинників, що дестабілізують, вимірювання яких з високою точністю скрутне. Такими чинниками, наприклад, можуть бути компонентний склад природного газу, ступінь його забрудненості і ін. Істотним недоліком згаданих засобів вимірювання є можливість відтворення за допомогою одного сопла лише одного значення об'ємної витрати. Тому такі еталонні витратовимірювальні установки як правило багатоступеневі. У числі переваг соплових еталонних витратовимірювальних установок автори публікацій відзначають їх нечутливість до обурень в магістралі на виході критичних сопел. Тому такі засоби вимірювання найбільш доцільно застосовувати для вимірювання масової витрати газу, а також для стабілізації відтворних витрат в зразкових витратовимірюваних установках інших типів, в першу чергу, вагових [25].

Еталонні витратовимірювальні установки з нормальними діафрагмами найчастіше створюються для випробування робочих засобів вимірювань в реальних умовах, зокрема витратомірів змінного перепаду тиску [26] або лічильників газу [22]. У Радянському Союзі такого типу установка з погрішністю  $+ 1\%$  застосовується для градуювання і перевірки діафрагм, встановлених на газових сировинних потоках нафтопереробної і нафтохімічної промисловості. Фірмою „ Southern California Gas” (США) [26] побудований випробувальний центр поблизу компресорної станції на магістральному газопроводі діаметром 850 мм, який містить 6 паралельно підключених контрольних ліній діаметром по 400 мм із зразковими діафрагмами в кожній. Для монтажу досліджуваного приладу є 4 лінії різних діаметрів (50, 150, 400 і 750 мм або відповідно 2, 6, 16 і 30 дюймів). Центр

дозволяє випробовувати без обмеження в часі будь-які витратоміри на витратах до  $155 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $5,6 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{год}$ ) і тиску від атмосферного до тиску в магістральному трубопроводі. В порівнянні з еталонними витратовимірювальними установками на базі критичних сопел установки з нормальними діафрагмами характеризуються меншою точністю. В той же час в них відсутня ступінчастість відтворних витрат. Крім того, порівняльна простота конструкції обох типів еталонних витратовимірювальних установок, невеликі розміри, відсутність рухомих вузлів і деталей дозволяють створювати на їх основі пересувні установки для перевірки лічильників газу по місцю експлуатації [22].

У еталонних витратовимірювальних установках з елементами, що обертаються, найбільше застосування одержали зразкові турбінні і об'ємно-камерні [22] перетворювачі, розміщені в потоці газу послідовно з випробовуваним приладом. Аналіз вказаних літературних джерел показує, що такі еталонні витратовимірювальні установки в більшості випадків застосовуються для випробування лічильників газу при максимальних витратах до  $1,39 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $5000 \text{ м}^3/\text{год}$ ), хоча відомий випадок застосування і на витратах до  $6,9 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $25000 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Рідше експлуатуються установки на базі зразкових турбінних витратомірів газу, призначені для випробувань випускаються промисловістю витратомірів. Наприклад, фірмою „ UGI (Meters) Ltd. таким шляхом випробовуються витратоміри на витратах до  $1,1 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $4000 \text{ м}^3/\text{год}$ ), а фірма "Обаду" (Японія) для аналогічної мети як зразковий засіб використовує турбінні витратоміри з граничними витратами до  $1,66 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $6000 \text{ м}^3/\text{год}$ ) при атмосферному тиску і до  $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $900 \text{ м}^3/\text{год}$ ) при тиску до 1 МПа. У Нідерландах за допомогою семи зразкових турбінних витратомірів здійснюється розмноження одиниці відтворних витрат повітря дзвонової випробувальної установки і їх передача робітникам витратомірам з максимальними витратами до  $3,33 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $12000 \text{ м}^3/\text{год}$ ) [23].

У Радянському Союзі (інститут витратометрії р. Казань) на базі п'яти зразкових турбінних витратомірів у типа ОГАР продуктивністю до  $0,014 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $50 \text{ м}^3/\text{год}$ ) розроблена пересувна перевірна лабораторія ППЛГ-250, яка

характеризується погрішністю  $\pm 0,5\%$  і дозволяє випробовувати витратоміри продуктивністю до  $0,07\text{м}^3/\text{с}$  ( $250\text{ м}^3/\text{год}$ ) [24].

Таким чином, в еталонні витратовимірювальні установки з елементами, що обертаються, хоча і можливе досягнення високої точності (погрішність  $\pm 0,2\%$ ), проте їм властиві вузькі межі вимірювання і складність забезпечення єдності умов роботи зразкових приладів під час їх атестації і експлуатації, в першу чергу на великих витратах. Якоюсь мірою ці труднощі зменшуються при створенні витратовимірювальних систем по схемах, що виключає необхідність пропуску всього потоку газу через зразковий прилад. Це дозволяє застосовувати зразкові витратоміри менших типорозмірів, але при цьому погрішність вимірювання декілька зростає. Крім того, похибка еталонних витратовимірювальних установок з елементами, що обертаються, завжди нижча погрішності зразкових витратовимірювальних установок, наприклад, дзвонових, за допомогою яких градууються зразкові прилади таких еталонних витратовимірювальних установок [26].

Калориметричні еталонні витратовимірювальні установки в більшості випадків знаходять застосування при випробуванні масових витратомірів газу обмеженої точності і характеризуються складністю досягнення високої точності відтворення вимірювання витрати.

В даний час закордоном одержали застосування еталонних витратовимірювальних установок, створювані на базі тисковимірюваних трубок (трубок Піті). З їх допомогою реалізується так званий метод "площа-швидкість", заснований на визначенні витрати потоку інтеграцією по поперечному перетину трубопроводу локальних швидкостей, зміряних трубками Піті. Таким трубкам властива обмежена точність і їх застосування доцільно лише для попередніх вимірювань при визначенні працездатності витратомірів, наприклад, після ремонту. Відомий також випадок застосування еталонної витратовимірювальної установки з тисковимірюваними трубками для градуювання турбінного витратоміра на повітрі при витратах  $3,4 \times 10^{-2} \dots 6,8 \times 10^{-2}\text{м}^3/\text{с}$  ( $123\dots 246\text{ м}^3/\text{год}$ ).

Еталонні витратовимірювальні установки на основі примусового

вимірювання параметрів потоку описано в [27]. Його принцип дії базується на визначенні кута закручування потоку при проходженні через турбінний витратомір. Перевага методу полягає в незалежності кута закручування потоку від тиску і температури вимірюваного середовища. По приведених в [27] даним зміна кута закручування потоку на 1% свідчить про істотну (приблизно на 2,26%) зміну градієвальної характеристики витратоміра. Проте створення такого типу еталонних витратовимірювальних установок вимагає розробки спеціальних пристроїв для вимірювання параметрів закрученого потоку і їх подальшого вдосконалення з метою підвищення точності.

### **1.3 Порційно-статичні засоби вимірювання та відтворення витрати**

У порційно-статичних засобах вимірювання витрати через вимірювальний пристрій пропускають порцію газу, причому відлік показів з вимірювального пристрою здійснюють в статиці при непрацюючому приладі. Засоби вимірювання витрати такого типу можна створювати на базі дзвонових і кільцевих мірників, еластичних місткостей, місткостей, що знаходяться під високим тиском, вагових пристроїв, а також інших пристроїв, в яких здійснюється витіснення газу допоміжним середовищем.

Засоби вимірювання витрати на базі дзвонових мірників є загально визнаним метрологічним засобом для вимірювання об'єму і витрати газу. Перше практичне застосування мірників здійснене більше» ста років тому. Мірник містить дзвін, який своєю нижньою частиною занурений в резервуар з рідиною, званий витіснювачем. У початковий період випробування приладу здійснюється подача газу під дзвін від стороннього джерела витрати, завдяки чому дзвін підіймається. Після закінчення наповнення мірника до необхідного об'єму трубопровід подачі газу перекривають. При відкритті замкового пристрою в трубопроводі, що сполучає піддзвоний простір з вимірювальним приладом, починається витіснення газу з-під дзвону через вимірювальний прилад. Об'єм газу, що витісняється, відлічується візуально по контрольній лінійці. Після цього

замковий пристрій закривають. По різниці свідчень відлікового пристрою і відомому контрольному об'єму, пройденому через відліковий пристрій, визначають погрішність випробовуваного приладу. При випробуванні витратомірів пропущений об'єм газу усереднюється за час його витіснення і порівнюється з свідченнями вимірювального приладу.

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

Принцип дії порційно-статичних еталонних витратовимірювальних установок з еластичною місткістю описані в полягає в пропуску газу від джерела витрати через вимірювальний пристрій в еластичну ємність, після чого досліджуваний прилад від'єднується від місткості і об'єм зібраного в ній газу витісняється через зразковий лічильник. При цьому вимірювання об'єму газу можна здійснювати на витратах, значно менших, ніж при наповненні місткості, що дозволяє в деяких випадках понизити погрішність вимірювання до  $\pm 0,2\%$ . Проте широкого практичного застосування такі установки не одержали зважаючи на складність експлуатації, необхідності точної стабілізації параметрів навколишнього середовища і не досить надійної герметичності еластичних місткостей, особливо при їх тривалій експлуатації.

Еталонні витратовимірювальні установки високого тиску засновані на закінченні з такої судини газу через досліджуваний прилад. Вимірюючи

температуру, і тиск газу в судині постійного об'єму до і після закінчення, за допомогою рівнянь стану газу визначається дійсна витрата, яка потім порівнюється з свідченнями МП. Витратовимірювальна установка такого типу свого часу створювалася у виробничому об'єднанні "Київпромарматура". Застосовується для градування на реальному газі витратовимірювальних діафрагм і дослідження дросельних елементів малогабаритної арматури. Місткість судини складає  $0,05 \text{ м}^3$  (50л), максимальний початковий робочий тиск – 18 МПа. Установка дозволяє вимірювати витрати до 0,17 кг/с (600 кг/год) з погрішністю  $\pm 1\%$ , Перевагою СВДР з судиною високого тиску є можливість вимірювання витрати газу в одиницях маси, а також незначні габарити. До недоліків слід віднести складність стабілізації витрати, обумовлену нестабільністю термогазодинамічних процесів під час спорожнення судини. Це не дозволяє такі еталонні витратовимірювальні установки атестувати з високою точністю.

Еталонні витратовимірювальні установки з витісненням газу допоміжним середовищем засновані на забезпеченні нерозривності і рівності по витраті потоків газу і витіснення газом рідини. Витрата газу визначається або за свідченнями зразкового витратоміра рідини, або за наслідками вимірювання рівня рідини у вимірювальному резервуарі на початку і кінці вимірювального циклу і тривалості його закінчення. Еталонні витратовимірювальні установки з витісненням газу рідиною дозволяють випробовувати прилади як при атмосферному так і підвищеному статичному тиску.

Переваги всіх типів еталонних витратовимірювальних установок з витісненням газу допоміжним середовищем є можливість випробування приладів при високому тиску до 10 МПа. Загальний недостаток порівняно невисока точність характеризується погрішністю  $\pm 0,45\text{...}0,50\%$ .

Вагові еталонні витратовимірювальні установки порційно-статичного типу можуть створюватися на основі двох методів вимірювання: непрямого і прямого. Непрямий полягає в зважуванні об'ємі рідини, витисненої газом, який пройшов через вимірювальний прилад. При цьому для визначення об'ємної

витрати газу необхідно знати густину рідини і час її витіснення. Прямий метод вимірювання припускає безпосереднє зважування порцій газу, що пройшов через вимірювальний пристрій, і визначення витрати по навмисному часу пропуску цього об'єму.

Еталонні витратовимірювальні установки на основі непрямого методу вимірювання розроблено управлінням по стандартизації, метрології і випробуванню продукції (АСМВ, ГДР). Його погрішність складає  $\pm 0,001\%$  на витратах від  $7,5 \times 10^{-6}$  (0,027) до  $1,18 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $4,26 \text{ м}^3/\text{год}$ ) при відтворень в цих межах 22 фіксованих значень витрати. Як рідина, що витісняється, застосовується вода, а робочого газу - повітря. Зважування здійснюється вагами з похибкою  $\pm 2 \times 10^{-5}\%$  при максимальному навантаженні 50 кг. Еталонні витратовимірювальні установки застосовується для проведення спеціальних вимірювань, що вимагають високої точності, наприклад, при перевірці зразкових лічильників газу класу 0,4 при надмірному тиску 0,5... 3,2 кПа, а також для випробування промислових і побутових лічильників. Перевагою розглянутого зразкового засобу є його висока точність. Проте, така точність вимірювання властива лише в режимі відтворення і вимірювання об'єму газу, оскільки стабільність відтворних витрат недостатня і складає  $\pm 0,7\%$ . До його недоліків також слід віднести обмежені межі вимірювання і ступінчастість відтворних витрат.

До порційно-статичних еталонних витратовимірювальних установок віднесені також засоби, створені на базі вантажокільцевих установок. Такі еталонні витратовимірювальні установки володіють високою точністю, але можливість досягнення великих витрат тут сильно обмежена, оскільки виготовлення барабанів великих розмірів з багатошаровими кільцевими перетинами постійної площі пов'язане із значними технологічними труднощами, а досягти збільшення швидкості обертання барабанів практично неможливо. Доцільнішим, на нашу думку, є застосування цих еталонних витратовимірювальних установок при роботі по дискретно-динамічному методу відтворення і вимірювання, який буде розглянутий нижче.

#### 1.4. Безперервно-циклічні засоби вимірювання витрати

До безперервно-циклічних еталонних витратовимірювальних установок відносяться такі засоби, в яких потік газу утворений послідовними порціями і обурений їх "стикової". При цьому загальна тривалість створюваної витрати практично не обмежується в часі. Принципово такі засоби можуть бути створені із застосуванням будь-якого типу розглянутих вище порційно-статичні еталонні витратовимірювальні установки, а також на основі поршневих еталонних витратовимірювальних установок. В даний час відомо про практичне застосування таких еталонних витратовимірювальних установок лише двох типів: дзвонових і поршневих.

Перше у вигляді дзвонової автоматизованої випробувальної установки розроблено у ВНІМ ім. Д.І.Менделєєва (р. Ленінград) і застосовується на Ленінградському газоремонтному заводі для градування і перевірки промислових лічильників газу на витратах до  $0,42 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1500 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Вона створена на базі двох по черзі працюючих дзвонових мірників об'ємом по  $5 \text{ м}^3$  і містить вентилятор, пристрій для згладжування пульсацій відтворних витрат і клапани, керовані за допомогою путніх вимикачів. Під час роботи установки відбувається наповнення одного мірника при одночасному витісненні газу через вимірювальний пристрій з іншого.

Подальше підвищення точності такого типу дзвонових установок, особливо при відтворенні великих витрат, практично неможливо зважаючи на неминучу наявність пульсацій тиску при перемиканні керованих клапанів. У числі їх переваг слід зазначити можливість досягнення безперервної контрольованої витрати при необхідності забезпечення високої точності випробувань, що тривало проводяться.

Принцип дії поршневих еталонних витратовимірювальних установок газу полягає у виділенні з потоку середовища за допомогою поршневого роздільника і детекторів, розміщених на вимірювальному трубопроводі, що калібрується, контрольного об'єму газу. При випробуванні лічильників або витратомірів здійснюють збір вимірювальної інформації з випробовуваного

приладу за період проходження поршневого розділювача від одного детектора до іншого. При цьому вимірюваний контрольний об'єм газу рівний об'єму вимірювального трубопроводу, що калібрується, ув'язненому між двома детекторами, а вимірювальний трубопровід встановлюється в одній лінії послідовно з вимірювальним трубопроводом.

У поршневих безперервно-циклічних еталонних витратовимірювальних установках багатократне виділення контрольного об'єму здійснюється при зміні напрямку переміщення Ін. Витратовимірювальна установка такого типу розроблена і затверджена Держстандартом СРСР як Державний первинний еталон одиниці об'ємної витрати газу. Вона створена по замкнутій кільцевій схемі, що включає вимірювальний трубопровід з ущільненим поршневим розділювачем і двома детекторами положення роздільника, ротаційну повітродувну і перемикаючий чотириходовий вентиль. Для стабілізації витрати застосовується гаситель пульсацій, буферна місткість і регулятори. Під час роботи установки при проходженні поршневого розділювача мимо детекторів формуються команди початку і кінця проходження роздільником ділянки вимірювального трубопроводу, що калібрується, що приводить до перемикання чотириходового вентиля і зміни напрямку руху. Цим досягається безперервне відтворення витрати газу, чисельне значення якого визначається усереднюванням за часом сумарної кількості контрольних об'ємів.

Висока точність описаної еталонних витратовимірювальних установках забезпечується застосуванням безконтактних детекторів положення поршневого розділювача і високою точністю обробки внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу. Завдяки цьому досягається рівномірне переміщення. Замкнута кільцева схема трубопроводів дозволяє виробляти випробування при підвищеному статичному тиску. Діапазон усереднених значень об'ємної витрати газу складає  $0,001 \dots 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $3,6 \dots 54 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Відтворення одиниці витрати забезпечується з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань не більш  $8 \times 10^{-4}$  при невиключеній систематичній погрішності  $5 \times 10^{-4}$ . Це забезпечує досягнення щонайвищої точності, яка за своїм значенням співставлена з кращими зарубіжними

аналогами. В той же час ця установка дозволяє відтворювати лише порівняно незначні витрати газу. На основі описаної установки створена загальносоюзна перевірна схема для засобів вимірювання об'ємної витрати газу в діапазоні  $1 \times 10^{-6} \dots 1 \times 10^2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Безперервно-циклічні поршневі СБІР знайшли також застосування за рубежом. Так, компанією " HumfHle pipe Line " (США) створена і експлуатується поршнева установка, подібна вищеописаною за принципом дії і межами вимірювання.. Її продуктивність по витраті не перевищує  $0,0193 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $69,4 \text{ м}^3/\text{год}$ ) при повторюваності свідчень  $\pm 0,05\%$ .

### **1.5 Дискретно-динамічні засоби вимірювання витрати**

Відмінна особливість дискретно-динамічних засоби вимірювання витрати полягає у виділенні з потоку газу лише однієї дискретної (контрольної) дози невеликого об'єму, пропуск якої через вимірювальний пристрій здійснюється в динамічному режимі. У цих еталонних витратовимірювальних установках в якнайповнішій мірі задовольняються вимоги високої швидкодії, точності і досягнення великих витрат при обмежених об'ємах зразкових місткостей.

Аналіз літературних джерел показує, що дискретно-динамічних засоби вимірювання витрати вперше було розроблене в Радянському Союзі і впроваджене на івано-франківському приладобудівному заводі (нині "Промприбор") на базі дзвонової автоматизованої випробувальної установки для перевірки лічильників газу на витрати до  $0,28 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ ).

З аналізу алгоритмів роботи сучасних еталонних витратовимірювальних установок витікає можливість їх розділення на дві групи: дискретно-динамічні засоби вимірювання витрати без попереднього розгону досліджуваного приладу і дискретно-динамічні засоби вимірювання витрати з попереднім розгоном досліджуваного приладу (рис.1.2). Зупинимося детальніше на кожному з названих різновидів.

### 1.5.1 Дискретно-динамічні еталонні витратовимірювальні установки без попереднього розгону випробовуваного приладу

У еталонних витратовимірювальних установках такого типу розгін досліджуваного приладу до заданого режиму роботи здійснюється частиною об'єму зразкового засобу. Їх недоліком є те, що при цьому відбувається зменшення контрольного об'єму газу, а це в свою чергу викликає зниження верхньої межі вимірювання дискретно-динамічних еталонних витратовимірювальних установок. Проте, постачання досліджуваними приладами точними пристроями для збору вимірювальної інформації сприяє широкому застосуванню таких дискретно-динамічних еталонних витратовимірювальних установок. В даний час відома реалізація наступних типів дискретно-динамічних еталонних витратовимірювальних установок без попереднього розгону досліджуваними приладами (рис.1.2.): дзвонових, поршневих, з витісненням газу допоміжним середовищем, вантажокільцевих, із застосуванням мильної плівки і міткових.

У дзвонових дискретно-динамічних еталонних витратовимірювальних установок реалізація даного алгоритму роботи здійснюється із застосуванням індивідуального способу наповнення дзвону. Як критерій для порівняння ефективності роботи дзвонових дискретно-динамічних еталонних витратовимірювальних установок запропонований коефіцієнт ефективності використання об'єму дзвону, у вигляді відношення максимально досяжної витрати ( $y \text{ м}^3/\text{с}$ ) до об'єму дзвону ( $y \text{ м}^3$ ).

Дзвонова установка з індивідуальним наповненням дзвону створена на базі мірника об'ємом 350 куб.футів ( $10 \text{ м}^3$ ) і застосовується компанією "American Meter Company" у Філадельфії (США) для дослідження лічильників газу. Конструкція установки дозволяє змінювати співвідношення об'ємів дзвону, використовуваних для розгону досліджуваного приладу і пропуску контрольної дози газу. Як рідина затвора застосовується масло, перемішуване за допомогою насоса, що дозволяє поліпшити термостабільність в процесі роботи установки і підвищити її точність. У установці передбачена можливість



Компанією " The Peoples &as Light and Соку Companu" (США) створена станція для випробування лічильників газу, що містить автоматизовані установки, в яких застосовуються дзвонові мірники об'ємом 0,14; 0,56; 5,664 м<sup>3</sup> (5,20 і 200 куб.футів відповідно) . Разом з їх оснащенням цифро друкуючими пристроями і системами автоматичного управління роботою і контролю параметрів найбільша відтворна ними витрата не перевищує 0,034 м<sup>3</sup>/с (140 м<sup>3</sup>/год) в наймогутнішій по витраті установці, що свідчить про низьку ефективність використання об'єму мірника (коефіцієнт ефективності рівний 0,006с<sup>-1</sup> ).

Автоматизована дзвонова установка компанії Rockw/ULb " (Піттсбург, США) за способом розділення об'єму дзвону подібна установці в Монтеруже. Для відтворення витрат, що не перевищують 0,11 м<sup>3</sup>/с (400 м<sup>3</sup>/год), застосований дзвоновий мірник об'ємом 1,4 м<sup>3</sup>, з якого виділяється постійний контрольний об'єм, рівний 0,56 м<sup>3</sup> і становлячий 40% об'єму мірника. Погрішність установки складає ± 0,35% при коефіцієнті ефективності 0,078 с<sup>-1</sup> .

Серед установок, створених останнім часом, вкажемо на дискретно-динамічних еталонних витратовимірювальних установок, експлуатуюче в Нідерландах, і створене в Інституті Метрології "G.Colbonctfel" (IMGC) в м.Туріні (Італія). Перше застосовується для перевірки зразкових турбінних і роторно-поршневих витратомірів газу в діапазоні витрат 1,1 · 10<sup>-3</sup>... 0,11 м<sup>3</sup>/с (4...400 м<sup>3</sup>/год). У цій установці дзвін мірника об'ємом 4 м<sup>3</sup> занурений у витіснювач, а мірник проградуїований з погрішністю ±0,1%. Погршеност' установки в цілому складає ±0,2%. Для розгону досліджуваного приладу виділяється приблизно 1м<sup>3</sup> об'єму мірника, що складає 25% його об'єму. Тому коефіцієнт ефективності установки невисокий і рівний 0,028 с<sup>-1</sup> . У числі переваг слід зазначити застосування спеціального комп'ютера, забезпеченого наборами пакетів перфокарт для управління різними режимами роботи установки, збору і обробки вимірювальної інформації, а також застосування дисплея і друкуючого пристрою.

Витратовимірювальна установка характеризується невеликими відтворними витратами 2x10<sup>-4</sup> ...4,2x10<sup>-2</sup>м<sup>3</sup>/с (0,72...151,2 м<sup>3</sup>/год) і незначним

об'ємом дзвону ( $1\text{ м}^3$ ). Коефіцієнт ефективності у неї невеликий ( $0,042\text{ с}^{-1}$ ). Для вимірювання контрольний об'єм газу складає 50% загального об'єму дзвону, а коефіцієнт ефективності рівний  $0,06\text{ с}^{-1}$ . До числа недоліків установки необхідно віднести залежність тиску під дзвоном від значення відтворних витрат і обмежена верхня межа вимірювання.

Своєрідним технічним рішенням відрізняється установка з частотним виходом, яка в дослівному перекладі названа "пульсуючою перевіркою установкою". Під час відтворення витрати газу кодуємим пристроєм формуються електричні імпульси, кількість яких пропорційна ходу дзвону. Пульсації тиску на виході досліджуваного приладу перетворюються в електричні сигнали, кількість яких потім порівнюється з числом імпульсів, сформованих кодуємим пристроєм, і по різниці імпульсів обчислюється похибкою досліджуваного приладу. Проте в статті не вказані діапазони відтворних витрат газу і не аналізується погрішність. Разом з тим на основі приведеної фотографії можна зробити висновок про те, що це малопотужна по витраті установка. За нашою оцінкою витрата тут не перевищує  $0,028\dots 0,042\text{ м}^3/\text{с}$  ( $100\dots 150\text{ м}^3/\text{год}$ ). Установка дозволяє випробовувати тільки лічильники газу, створюючі при роботі пульсації тиску, що можна вважати її деяким недоліком.

Описані дзвові витрато вимірювальні установки без попереднього розгону досліджуваного приладу в Радянському Союзі розповсюдження не одержали, оскільки в них не може бути досягнута висока ефективність використання об'єму дзвону.

До поршневих витрато вимірювальні установки без попереднього розгону досліджуваного приладу можна віднести до безперервно-циклічні витрато вимірювальні засоби поршневого типу, працюючі часу відтворення витрати тільки за час одного циклу. Сюди ж можуть бути віднесені і установки з примусовим переміщенням поршневого роздільника, в яких стабільність відтворних витрат вища в порівнянні з безперервно-циклічними установками. Проте в обох згаданих поршневих установок розгін досліджуваного приладу і досягнення сталого режиму роботи здійснюється при переміщенні поршня усередині того, що калібрується вимірювальний трубопровід, що приводить до

зменшення контрольного об'єму газу, що витісняється, і зниження верхньої межі відтворних витрат. Тому такі установки одержали практичне застосування при відтворенні лише невеликих витрат гаса, що не перевищують  $0,022 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $80 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Розширення верхньої межі відтворних витрат в аналізованих установках приводить до значного збільшення їх розмірів. Так, для створення установки на витрати до  $1,26 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $4530 \text{ м}^3/\text{год}$ ) потрібно вимірювальний трубопровід з контрольним об'ємом  $34 \text{ м}^3$ , що привело до ускладнення конструкції установки і підвищення її вартості.

Як приклад втрато вимірювальної установки з витісненням газу допоміжним середовищем розглянемо установку, в якій потік рідини створюється насосом і витісняє газ з резервуару, що калібрується, через досліджуваний прилад в атмосферу. У середині резервуару встановлені датчики рівня, за допомогою яких фіксується початок і кінець витіснення контрольного об'єму газу при наповненні мірника рідиною без зупинки досліджуваного приладу. У цій установці розгін досліджуваного приладу до сталого режиму здійснюється в процесі заповнення рідиною резервуару установки, що калібрується. Такого типу установкам властива низька ефективність використання об'єму резервуару, що калібрується. До переваг можна віднести відсутність елементів, що механічно переміщуються. Недоліком є необхідність постачання спеціальними пристроями для виключення розчинення газу в рідині і складність досягнення великих витрат.

#### 1.5.2 Дискретно-динамічні еталонні витрато вимірювальні установки з попереднім розгоном випробовуваного приладу

Реалізація таких еталонних витрато вимірювальних установок на базі дзвонових мірників набула поширення поки тільки в колишньому Радянському Союзі і передбачає розгін досліджуваного приладу не частиною об'єму дзвону, а за допомогою додаткового джерела витрати, що забезпечує значне підвищення ефективності роботи установок. При цьому випробувальний цикл установки починається пуском повітря і відкриттям клапана в лінії подачі

повітря під дзвін. При наповненні його приблизно на  $3/4$  об'єму відкривається клапан у вихідному трубопроводі зі встановленим в ній досліджуваного приладу, чим забезпечується його розгін до сталого режиму роботи і одночасне донаполненіє мірника. Після досягнення дзвоном крайнього верхнього положення повітродувного відключається і клапан в лінії підведення повітря під дзвін закривається. З цієї миті газ через досліджуваний прилад подається тільки з-під дзвону. Після закінчення перехідного процесу, пов'язаного із зміною напрямку переміщення дзвону, відліковим пристроєм установки виділяється контрольний об'єм газу, під час пропуску якого здійснюється збір вимірювальної інформації з досліджуваного приладу при його роботі в сталому режимі. Весь цикл випробування приладу і збору вимірювальної інформації автоматизований.

У першому із створених витрато вимірювальних установок такого типу з об'ємом мірника  $5 \text{ м}^3$  досягнуть вельми високий коефіцієнт ефективності ( $0,084 \text{ с}^{-1}$ ), чим забезпечується можливість випробування лічильників газу на витратах до  $0,42 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) при погрішності  $\pm 0,35\%$ .

У числі переваг поршневих витрато вимірювальних установок відзначимо можливість створення на їх основі пересувних установок. В той же час поршневим дискретно-динамічні витрато вимірювальні установки властиве зниження точності при відтворенні малих витрат унаслідок зростання перетікань газу між тим, що переміщається поршня і стінкою вимірювального трубопроводу. Це обмежує нижні межі вимірювання таких зразкових засобів. Тому останнім часом надається значна увага як розробці пристроїв для точного визначення вказаних перетікань, так і удосконаленню конструкції установок, що дозволяють зменшити ці перетікання поліпшенням якості ущільнення поршня.

Конструктивна реалізація дискретно-динамічного методу вимірювання у вагових витрато вимірювальних установок з попереднім розгоном досліджуваного приладу передбачає застосування швидкодійних перемикаючих замочних органів. Вони дозволяють направляти відтворний потік газу у встановлений на вимірювальному вузлі бак тільки після досягнення

випробовуваним приладом заданого сталого режиму роботи і здійснювати зворотне перемикання потоку після закінчення процесу закінчення газу в бак. Висока точність таких витрато вимірювальних установок дозволила створити на їх основі Державний первинний еталон і розробити загальносоюзну перевірочну схему для засобів вимірювань масової витрати газу в діапазоні  $4 \cdot 10^{-2} \dots 2,5^{-2} \cdot 10^2 \text{ кг/с}$ . В даний час вагові дискретно-динамічні витрато вимірювальні установки знаходять широке розповсюдження для випробування в першу чергу масових витратомірів газу. Тут відзначимо, що для випробування об'ємних витратомірів і лічильників газу такі установки розповсюдження не одержали.

### **1.6 Постановка завдання на магістерську роботу**

Витратовимірювальні установки дзвонового типу володіють безперечно високими точнісними характеристиками при вимірюванні та відтворенні об'єму та об'ємної витрати. Вони набули широкого розповсюдження для еталонних вимірювань, тому дослідження її метрологічних характеристик є актуальним завданням. Таким чином завданням на магістерську роботу буде:

- аналіз видів та області застосування еталонних витратовимірювальних установок природного газу в Україні та за кордоном;
- розроблення технічних рішень дзвонових установок з метою покращення їх метрологічних характеристик;
- метрологічні дослідження еталонних витрато вимірювальних установок.

## **2 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЗВОНОВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЇХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

### **2.1 Розроблення функціональної схеми еталонної дзвонової установки**

Основними вузлами установки (рис.2.1) є дзвоновий мірник, що включає в себе дзвін 6 та витіснювач 3, заповнений замковою рідиною; три направляючі колони 8, розташовані по колу під кутом  $120^\circ$  одна від одної; рама з направляючими 5, встановлена на дзвоні і з'єднана з нею оптична шкала 14.

Стенд для встановлення турбінних лічильників 18 та стенд для встановлення ротаційних лічильників газу 24; повітродувка 2 з мотором 23; газорозподільні клапани 20, 21; задавачі витрати 17, 25 (можуть бути виконані з дистанційним і ручним керуванням встановлення значень витрат газу, що задаються); пульт контролю параметрів і управління роботою установки (на рисунку 2.1 не показаний).

Установка стаціонарно розміщена в приміщенні повірювальної станції, де здійснюється підготовка приладів до перевірки. В зв'язку з цим станція обладнана додатковими пристроями: кран-балкою для транспортування приладів, столом для промивки лічильників. Для зменшення шуму в приміщенні станції під час випробувань повітродувка встановлена в окремому приміщенні.

Установка реалізує дискретно-динамічний метод відтворення вимірювання об'єму і витрати газу з метою калібрування і перевірки промислових лічильників природного газу (далі за текстом – прилади, що повіряються, ПП). Дискретно-динамічний метод полягає в тому, що ПП спочатку розганяється потоком повітря від повітродувки до усталеного режиму роботи, після чого «на ходу» з-під дзвона витіснюється попередньо виміряний з високою точністю контрольний об'єм повітря. За час витіснення контрольного об'єму з допомогою ІВС знімаються покази з ПП, які і порівнюються з контрольним об'ємом.

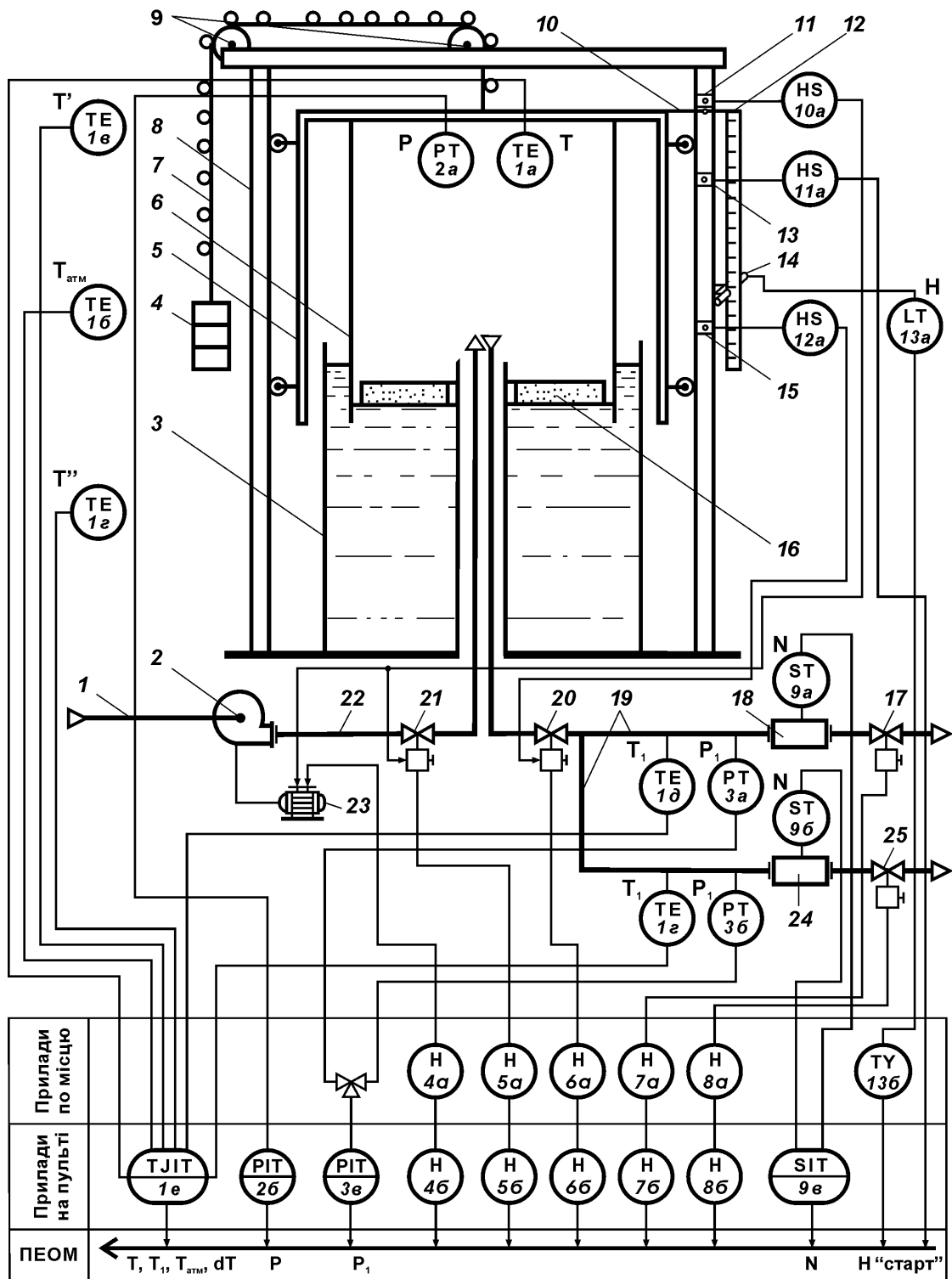


Рисунок 2.1 – Функціональна схема дзвонової витратовиміральної установки

Дзвін 6, що входить до складу дзвонового мірника занурений в замкову рідину резервуара витіснювача 3. Через дно резервуара в піддзвоновий простір підведені трубопроводи – вхідний 22 для подачі повітря під дзвін від

повітродувки 2 та вихідний 19, що розгалужується на дві вітки. Одна вітка веде до стенду 24 для повірки ротаційних лічильників газу РГ, друга – до стенду 18 повірки турбінних лічильників ЛГ. У вихідних трубопроводах обидвох стендів встановлено задавачі витрати 17 і 25.

Замковою рідиною витіснювача є вода з незначним вмістом солей. Для зменшення випаровування з поверхні рідини гідравлічного замка під дзвоном встановлений плаваючий диск 16 з пінопласту. Для запобігання змочування і випаровування рідини з занурених поверхонь дзвона при його підніманні внутрішня і зовнішня стінки дзвона покриті спеціальним водо-відштовхуючим і стійким до корозії покриттям.

Направляючі колони 8 (на рисунку 2.1 третя колона не показана) та рама 5, встановлена на дзоні, забезпечують вертикальне переміщення дзвона. Компенсація втрати ваги дзвона при його зануренні в рідину гідравлічного замка здійснюється ваговим способом з допомогою компенсаційної стрічки 7, натяг якої забезпечується противагою 4.

Фіксація контрольного об'єму дзвона здійснюється з допомогою оптичної шкали 14, жорстко зв'язаної з рамою 5, а також системи вимірювання переміщення дзвона (СВПД), що включає оптопару 12. Переривання світлового потоку здійснюється за допомогою затемнювачів, виготовлених у вигляді вузьких (шириною не більше 0,8 мм) металевих пластинок.

Система автоматичного керування роботою установки (САУ) забезпечує автоматичний режим роботи від початку повірювального циклу до його закінчення. САУ включає в себе електропривідну силову частину, що забезпечує запуск і зупинку електродвигуна 23 повітродувки 2, а також керує роботою запірних органів – газорозподільчих клапанів 21 та 20. Крім цього система включає в себе давачі положення дзвона 11, 13, 15 (кінцеві вимикачі) та сигнальні елементи (геркони, світлодіоди).

Кнопки 4б...8б служать органами управління роботою установки в напівавтоматичному режимі. Допускається також робота установки в ручному режимі. В цьому випадку підйом, зупинка, опускання дзвона, а також управління роботою клапанів здійснюється в любий момент часу за допомогою

вимикачів по місцю (кнопки 4а...8а). Цей режим роботи установки застосовується для відладки, при пробних експериментах і в разі виникнення позаштатних ситуацій.

Комп'ютеризована система збору і обробки вимірювальної інформації ІВС складається з ЕОМ типу IBM PC з процесором Intel Pentium-II/III та ряду необхідних програм та апаратних засобів. ІВС здійснює збір, вимірювання та обробку за допомогою ЕОМ значень тиску, температури, кількості електричних імпульсів, що поступають від ПП, а також сигналів з оптичного давача положення дзвона дзвонового мірника.

Установка працює таким чином. Перед початком роботи проводиться тестування відлікової апаратури і встановлення режимних параметрів роботи установки за допомогою ІВС. При цьому встановлюються вибрані межі вимірювання контрольного об'єму, типорозмір ПП, температурні поправки і т. і. (див. ТО ІВС).

У вихідному положенні дзвін опускається в замкову рідину витіснювача, газорозподільчі клапани 21 та 20 закриті, задавачі витрати 17 і 25 встановлені в потрібне положення; на неробочому повірювальному стенді задавач перекриває вихідний патрубок, а на робочому, до якого герметично під'єднаний ПП, задавач виставлено на потрібну витрату. Робочий цикл починається пуском повітродувки і відкриттям газорозподільчого клапана 21 у вхідній лінії. В результаті цього починається заповнення повітрям піддзвонового простору і підйом дзвона до верхньої визначеної позначки на оптичній шкалі. Коли дзвін установки ще не досягне верхнього положення, САУ забезпечує відкриття клапана 20 у вихідній лінії (при витраті, більшій за  $850 \text{ м}^3/\text{год}$  з певною часовою затримкою). Це дозволяє дзвону дійти до свого верхнього положення і стабілізувати коливний процес. Одночасно при цьому САУ подає команду на закриття клапана 21 і відключення повітродувки. Після відкриття клапана 20 дзвін починає опускатися, витісняючи повітря з-під дзвона через ПП з заданою витратою.

При опусканні дзвона разом з ним рухається оптична шкала з розташованими на ній затемнювачами. Останні на шкалі розміщені таким

чином, що при її переміщенні вони по чергово перетинають світловий промінь, що подається від лазерного світлодіода на фотоелемент. Світлодіод і фотоелемент (оптопара 12) встановлені на колоні нерухомо. При короткочасному перетинанні світлового променя першим по ходу затемнювачем з допомогою ІВС починається відлік імпульсів, що поступають від ПП. Після проходження через ПП контрольного об'єму газу вибраний ІВС другий затемнювач по ходу дзвона вниз знову перетинає світловий потік, генеруючи командний сигнал на завершення відліку імпульсів. Дзвін ще дещо опускається, після чого САУ подає команду на закриття газорозподільчого клапана 20. Після цього потік газу через прилад припиняється, а робочий цикл установки завершується.

При роботі установки в автоматичному режимі вся інформація, зібрана з допомогою ІВС, поступає в ПЕОМ, де обробляється за заданою програмою. Програма забезпечує обчислення миттєвого значення витрати, розраховує об'єм, пропущений через ПП, вносячи корекцію на температуру і тиск, порівнює контрольний об'єм з показами ПП і розраховує похибку. Результати розрахунку виводяться на друк у вигляді протоколу.

При відтворенні об'єму похибка установки визначається за результатами розрахунків середньо-квадратичних відхилень (СКВ) та невиключених систематичних похибок (НСП) результатів вимірювання контрольного об'єму газу та передачі його до досліджуваного приладу (ДП).

## **2.2 Розроблення математичної моделі відтворення об'єму газу дзвонової витратовимірювальної установки**

Багатопараметрична математична модель відтворення об'єму газу дзвонивими еталонними установками. Відомі моделювання в дзвонивих ЕУ [16] спрямовані на аналіз і розроблення математичних моделей щодо підвищення точності визначення відтворюваних об'ємів газу, а конструктивно-алгоритмічні вдосконалення [17] передбачають зміну конструкції з метою кількісного зменшення факторів, які визначають точність відтворення контрольних об'ємів

газу або сприяють ефективності функціонування установок.

Аналіз існуючих конструкцій і алгоритмів функціонування дзвонових установок показав, що корегування відтворюваних контрольних об'ємів здійснюється опосередковано, тобто вимірюванням інформативних параметрів установок (тиск і температура повітря під дзвоном) у сукупності з попередньо алгоритмічно встановленим розрахунком приросту контрольного об'єму. При цьому окремо враховується вплив кожного з факторів, наприклад, зростання рівня замкової рідини кільцевого резервуара [17] або зміна тиску під дзвоном [18]. Для одночасного врахування цих двох факторів при функціонуванні дзвонів ЕУ запропоноване нове технічне рішення [19], особливістю якого є застосування пристрою корекції контрольного об'єму газу, виконаного у вигляді диференціального перетворювача тиску із каналами вимірювання тиску у піддзвовому просторі та у внутрішній секції кільцевого резервуару, який через блок спряження підключений до мікропроцесорного обчислювача приросту контрольного об'єму газу.

Для кількісної оцінки похибки, що виникає від неточності розрахунку вагового компенсатора, застосовувався такий вираз [18] для визначення зміни рівня замкової рідини витіснювача  $\Delta h$  внаслідок зміни  $\Delta p$  тиску під дзвоном

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho_p g} \cdot \frac{S_3}{S_B + S_3}. \quad (2.1)$$

Робочий надлишковий тиск  $p_{нд}$  установки визначається відомою залежністю [20]:

$$p_{нд} = \frac{G}{S_0}, \quad (2.2)$$

де  $G$  – вага дзвона з урахуванням дії архімедової сили і ваги противаги;  
 $S_0$  – площа внутрішнього перерізу дзвона на межі його занурення в рідину.

За умови постійності площі  $S_0$ , що витікає з принципу дії дзвонових ЕУ і задається технологічними вимогами при виготовленні дзвона, на основі (2.2) можна записати:

$$\Delta p = \frac{\Delta G}{S_0} . \quad (2.3)$$

Так як зміна ваги дзвона визначається зміною виштовхувальної сили при його зануренні і вагою вагового компенсатора, яка уточнюється за допомогою коефіцієнта корекції  $K_K$  отримуємо:

$$\Delta F = \rho_{\delta} \cdot g \cdot S_{\Delta} \cdot H \cdot K_K . \quad (2.4)$$

З урахуванням (2.3) і (2.4) вираз (2.1) набуває вигляду

$$\Delta h = \frac{S_{\Delta} \cdot S_3 \cdot K_K}{S_0 \cdot (S_B + S_3)} . \quad (2.5)$$

У свою чергу зміна рівня  $\Delta h$  у витіснювачі зумовить таке додаткове витіснення об'єму газу :

$$\Delta V = \Delta h \cdot S_B . \quad (2.6)$$

Алгоритм функціонування коректора передбачає практичну реалізацію декількох алгоритмів корегування відтворюваного контрольного об'єму газу.

Перша складова алгоритму корегування встановлює приріст контрольного об'єму  $\Delta V_p$  внаслідок підняття рівня  $\Delta h$  замкової рідини у внутрішній секції кільцевого резервуара (рис.2.1) і записується виразом (2.6).

Кількісно підняття рівня рідини  $\Delta h_{pD}$  від переміщення дзвона  $H$  визначається геометричними розмірами вузлів установки обчислюється за формулою:

$$\Delta h_{pD} = \Delta H \cdot \frac{S_{\Delta}}{S_B + S_3} . \quad (2.7)$$

При цьому застосування дифманометра для вимірювання приросту рівня рідини забезпечує незалежність результату від зміни робочого тиску під дзвоном, оскільки перетворювач є диференціальним. Це дає можливість врахувати не теоретично розраховані значення параметрів  $S_{\Delta}, S_B, S_3$ , а фактичну зміну рівня замкової рідини і зумовленою цією зміною величину корегування відтворюваного контрольного об'єму.

Друга складова алгоритму корегування визначається виразом:

$$\Delta V_T = \frac{\Delta p}{2 \cdot p_0} \cdot V_K, \quad (2.8)$$

де  $\Delta V_T$  – приріст контрольного об'єму газу  $V_K$  при зміні тиску на величину  $\Delta p$  під дзвоном за час його відтворення установкою;  $p_0$  – значення абсолютного тиску під дзвоном.

Третя складова алгоритму корегування повинна враховувати зміну рівня  $\Delta h_{рТ}$  замкової рідини у внутрішній секції кільцевого резервуара внаслідок зміни тиску під дзвоном. Для цього можна використати формулу (2.1).

Принциповою відмінністю впливу зміни рівня рідини у внутрішній секції резервуара згідно алгоритму (2.3) порівняно з алгоритмом (2.7) є його випадковий характер, тобто можливість його приросту або зменшення внаслідок випадкової зміни профілю стінок дзвона (точність конструктивного виготовлення) і випадкової дії збурюючих факторів (локальне тертя взаєморухомих елементів установки, непостійність сил гідравлічного опору переміщенню дзвону в залежності від режимів його функціонування). Це дає можливість врахувати складову  $\Delta h_{рТ}$  як доповнення до складової  $\Delta h_{рД}$  і розраховувати приріст контрольного об'єму згідно алгоритму (2.8) при двох складових зміні рівня рідини у кільцевому резервуарі. Водночас при виміряному значенні  $\Delta h_{рТ}$  можна визначити значення  $\Delta p$  із алгоритму (2.3) для його врахування при розрахунку приросту контрольного об'єму згідно (2.8).

Алгоритми (2.1), (2.6), (2.7), (2.8) за своєю суттю є багатопараметричною математичною моделлю, яка враховує вплив зміни тиску під дзвоном і рівня у резервуарі при відтворюванні контрольного об'єму газу. Практична реалізація моделі дає можливість не тільки розрахувати похибку дзвонової ЕУ від непостійності вказаних параметрів, а також здійснювати коригування відтворюваних значень контрольного об'єму газу.

### 2.3 Дослідження конструкції і алгоритму функціонування вагового компенсатора дзвонової установки

Очевидно, що будь-яка невідповідність між довантаженням дзвона і діючою виштовхувальною силою зумовлює зміну тиску під дзвоном і як було обгрунтовано в підрозділі 2.2 появу додаткової похибки. Тому досліджуємо вплив конструкції ланцюгового довантаження на компенсацію виштовхувальної сили.

Дзвонові витратовимірювальні установки призначені в більшості випадків для повірки лічильників газу. Повірка ускладнена за рахунок нерівномірності робочого ходу дзвону, яка виникає в процесі неповної компенсації виштовхувальної сили.

Найбільш простим та достатньо точним ваговим методом довантаження з допомогою ланцюга є метод Галя. Дослідження нерівномірності руху дзвона може базуватись на вивченні кінематики ланцюгової передачі.

Кінематичний аналіз ланцюгової передачі витратовимірювальної установки необхідний тому, що нерівномірність повірочних витрат є основним недоліком витратовимірювальних установок.

Розглянемо метод вагової компенсації виштовхувальної архімедової сили, противагою ваги набігаючих ланок ланцюгової передачі.

Так, як кількість зубців зірочок ланцюгової передачі  $z$  – ціле число, то  $z_{\min}=4$  (на відміну від шестерен), а

$$z_{\max} \geq (2 \div 20)z_{\min} \quad (2.9)$$

в залежності від діаметра зірочок. У витратовимірювальній установці використовується лише трикратний діапазон варіацій  $z$ :

$$\frac{z_{\max}}{z_{\min}} = 3 \quad (2.10)$$

Для дослідження виберемо спрощену модель ланцюгової передачі, замінивши зірочки двома дисками радіуса  $r$ , відстань між центрами яких  $S$ , а реальний ланцюг з жорсткими ланками довжиною  $l$  і товщиною  $\delta \ll l$ , зі

шарнірно-точковим з'єднанням.

Для зручності приймемо кількість точок доторкання, які знаходяться на рівній відстані, кожного диску з ланками  $z_1 = \frac{z}{4}$  також цілим числом. Тоді, щоб зберегти постійну варіацію  $z_1$  в рамках від  $\frac{z}{4}$  до  $\frac{z}{4} + 1$ , необхідно виконати умову:

$$l \leq 2 \cdot r \cdot (\sqrt{2} - 1). \quad (2.11)$$

Звідси:

$$l_{MAX} = 2 \cdot r \cdot (\sqrt{2} - 1), \quad (2.12)$$

$$\alpha_{MAX} = 2 \cdot \arctg \cdot (\sqrt{2} - 1) - \frac{\pi}{4}, \quad (2.13)$$

$$z_{MIN} = \frac{2 \cdot \pi}{\alpha_{MAX}}, \quad (2.14)$$

де  $\alpha$  – центральний кут ланки 1.

Для виявлення степені рівномірності руху дзвона необхідно встановити характер переміщення  $h$  кінців ланцюга з закріпленими до них грузами  $F_1$  та  $F_2$ , тобто потрібно отримати функцію:

$$h = f(\beta). \quad (2.15)$$

За допомогою якої можна знайти швидкість:

$$v = \frac{dh}{d\beta}, \quad (2.16)$$

і розрахувати прискорення:

$$w = \frac{d^2h}{d^2\beta}. \quad (2.17)$$

Відзначимо, що при дії противаги  $F_1$  та дзвону  $F_2$  трос, який огинає диски є довжиною:

$$L_T = h_1 + h_2 + (\pi + j') \cdot r, \quad (2.18)$$

де

$$j' = \frac{S}{r}, \quad (2.19)$$

а  $h_1$  та  $h_2$  – вертикальні участки троса до  $F_1$  та  $F_2$ .

Опускання дзвону під дією різниці сил

$$\Delta F = F_2 - F_1 \quad (2.20)$$

на  $\Delta h_2$  супроводжується підйомом противаги на  $\Delta h_1$ .

Звідси довжина троса дорівнює:

$$L_T = (h_1 - \Delta h_1) + r \cdot (\pi + j') + (h_2 + \Delta h_2). \quad (2.21)$$

Так як  $L_T = \text{const}$ , то з (2.18) і (2.21) отримуємо:

$$\Delta h_2 - \Delta h_1 = 0, \quad (2.22)$$

$$\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h = r \cdot \beta. \quad (2.23)$$

Тому

$$v_{cp} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{dh}{dt} = \text{const} \quad (2.24)$$

і

$$\pm w = v' = 0. \quad (2.25)$$

Таким чином, при наявності троса рівномірність опускання дзвону інваріантна до  $v$  і в цілому визначається ступінню постійності в часі сумарного момента сил в'язкого та сухого тертя  $M_{тр}$ . Однак, трос не забезпечує вагової компенсації, оскільки гнучкість його обернено пропорційна погонній масі.

При наявності ланцюгової передачі, вага однієї ланки дорівнює  $F_L$ , то на рівномірність опускання дзвону крім  $M_{тр}$  має вплив ще і сумарний ваговий момент, який визначається:

$$M_{вЛ} = f(\beta): \quad (2.26)$$

і дорівнює:

$$\begin{aligned}
 M_{BL} &= r \cdot F_{JI} \cdot \left[ \sum_{i=0}^{z_1} [\sin(i \cdot \alpha + \beta) - \cos(i \cdot \alpha + \beta)] + \frac{h_2 - h_1}{l} \right] = \\
 &= 1,41 \cdot r \cdot F_{JI} \cdot \left[ \sum_{i=0}^{z_1} \left[ \sin \left( i \cdot \alpha + \beta + \frac{\pi}{4} \right) \right] + \frac{h_2 - h_1}{l} \right] \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

де  $\alpha$  - центральний кут ланки ланцюга,  $z_i$  - кількість ланок на колі барабана,  $i$  - порядковий номер ланки,  $\beta$  - початковий кут.

Одночасно діючі фактори згідно з (2.27), а також невизначеність виразу

$$a = f(\beta) \quad (2.28)$$

де  $a$  - віддаленість вершини ланки ланцюга від диска), призводять до того, що рух кінців ланцюга описується дуже складним законом. Тому обмежимося розглядом впливу згідно з (2.27). Так як  $\Delta F = const$  і ланцюг не має можливості ковзати відносно дисків, то  $\frac{dh}{dt} = const$  і вирази (2.21) і (2.22) можна використовувати як масштабно-часову прив'язку.

Приймаємо за вихідне положення момент часу  $t_0$ , при якому  $\beta=0$ ,  $a=0$ ,  $z = \frac{\pi}{2 \cdot \alpha}$  (ціле число). Нехай в момент часу  $t$  диски повернуться на кут  $\beta$ . Симетричність системи забезпечує умова:

$$S = j \cdot l, \quad (2.29)$$

при чому при будь-якому  $\beta$   $S = const$ .

Лінійне переміщення вершин ланок  $b$  можна визначити так:

$$b = 2 \cdot r \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (2.30)$$

що дозволяє знайти:

$$a = \frac{r \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \sin \beta}{\cos \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2}} = r \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) \cdot \sin \beta. \quad (2.31)$$

Як частковий випадок, при  $i=0$  та  $\beta = \frac{\alpha}{2}$  вираз (2.31) для визначення максимальної віддаленості вершини ланки ланцюга перетворюється в:

$$a_{MAX} = r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} \right) = \frac{r}{\cos \frac{\alpha}{2}} \cdot \left( 1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (2.32)$$

Звичайно, що для виразу (2.31) зміни  $\beta$  лежать в межах від  $\beta=0$  до  $\beta=\alpha$ , оскільки, при  $\beta>\alpha$  аналогічний процес відбувається з наступною ланкою. Аналіз показує, що (2.31) напівсинусоїда, в чому можна переконатися за результатами числового моделювання, які представлені на рис.2.2.

Симетричність задачі обумовлює синхронну зміну  $a$  по (2.31) для двох кінців ланцюга. Однак доцільною є вивчення поведінки функції (2.25). Для її знаходження необхідно задати початкові умови для  $h_1$  та  $h_2$ .

Нехай  $\beta=0$   $h_1 = h_2 = h = \frac{l}{2} \cdot (2 \cdot m + 1)$ , тобто,  $F_1$  та  $F_2$  знаходяться на одному горизонтальному рівні, тоді довжина ланцюга дорівнює:

$$L_{\mathcal{L}} = j \cdot l + 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{4 \cdot \alpha} + 2 \cdot h = l \cdot \left( \frac{\pi}{2} + 2 \cdot m + j + 1 \right). \quad (2.33)$$

При визначенні (2.25) будемо вважати, переміщувані грузи  $F_1$  та  $F_2$  мають одну степінь свободи, тобто, їх центри ваги горизонтально не відхиляються. Ця умова виконується для  $F_2$  тому, що дзвін обладнаний вертикальними направляючими, а для  $F_1$  при  $n > n_{кр}$ , де критичне число обертів диска  $n_{кр}$  є функцією характерних параметрів (маси  $F_1$  і жорсткості  $h_1$ ) підвішеного маятника. При таких умовах отримаємо:

$$\begin{aligned}
h &= \frac{l}{2} \cdot (2 \cdot m + 1) - \left[ \sqrt{m^2 \cdot l - r^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right)^2} + r \cdot \cos \beta \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) - \frac{r}{\sin} (1 - \cos \beta) \right] \\
&= r \cdot \left[ (2 \cdot m + 1) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \sqrt{4 \cdot m^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \beta \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right)^2} - \right. \\
&\quad \left. - \left[ \cos \beta \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right] \right], \tag{2.34}
\end{aligned}$$

при чому  $m=f(\beta)$ : через кожні  $\beta=\alpha$  зменшується на 1 для  $h_1$  та збільшується на 1 для  $h_2$ . Вираз (2.34) з ціллю аналізу можна спростити, приймаючи до уваги початкові умови (2.33) і той факт, що  $m^2 \cdot l^2 \gg a^2$ . Тоді, отримуємо:

$$h \approx r \cdot \left[ \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) - \cos \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) \right], \tag{2.35}$$

$$v = r \cdot \left[ \sin \beta \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot \sec^2 \frac{\beta}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \right], \tag{2.36}$$

$$w = r \cdot \left[ \cos \beta \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot \sec^2 \frac{\beta}{2} \left[ \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \cdot (1 + \cos) - 2 \cdot \sin \beta \right] \right], \tag{2.37}$$

Знак приблизного дорівнює в (2.35) означає що ми зневажаємо змінною глибиною модуляції.

Фактично про опусканні дзвону глибина амплітудної модуляції виразів (2.35)-(2.37) лінійно росте зі збільшенням  $\beta$  для  $h_1$  і лінійно зменшується для  $h_2$ . Звідси слідує що найбільш нерівномірний рух дзвону має місце на початковому участку його робочого ходу.

Тому циклічність зміни  $a$  по (2.31) являється однією з головних причин нерівномірного руху дзвону. Це зумовлює обмеженість застосування витратовимірювальних установок дзвонового типу в якості еталонних метрологічних засобів при повірці витратомірів газу.

Отримані результати чисельного аспекту математичного моделювання проілюстровані на рис.2.2.

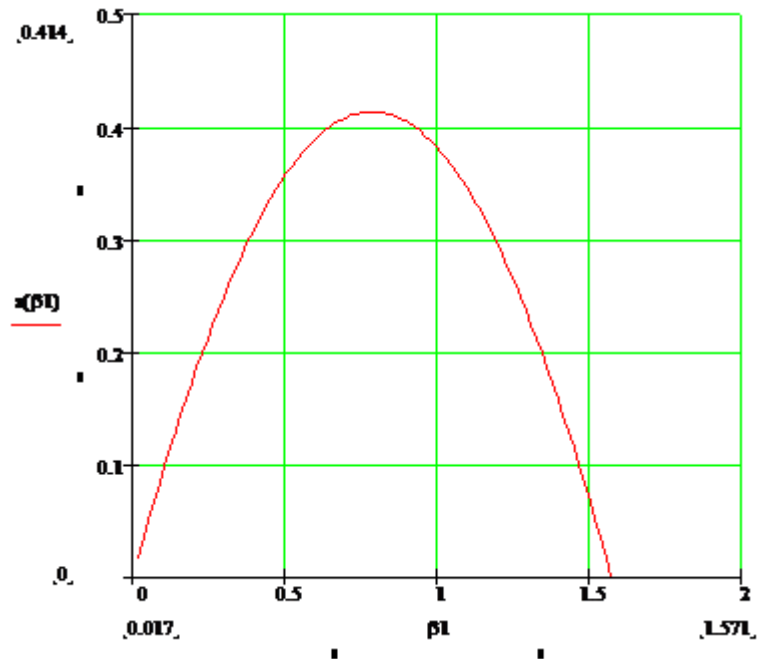


Рисунок 2.2 – Графічне представлення результатів розрахунку кінематичних властивостей ланцюгової передачі

Враховуючи, що компенсація виштовхувальної сили методом ланцюгового довантаження неодмінно виникає нестабільність тиску під дзвоном, вітчизняними вченими запропоновано метод довантаження за допомогою локальних грузів, який забезпечує підвищення точності компенсації.

Розглянемо детальніше метод вагового довантаження з допомогою локальних грузів. Метод є досить простим в конструктивній реалізації, а довантаження здійснюється локально, тобто дією кожного груза окремо. Проведемо теоретичне дослідження впливу кількості цих грузів на стабільність довантаження дзвону. Вони забезпечують компенсацію зменшення ваги дзвона при зростанні глибини його занурення у рідину шляхом пропорційного довантаження дзвона локальними грузами  $1, 2, \dots, n$  вагою  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , що знаходяться на барабані радіуса  $r$ . Відповідно враховуємо, що при зануренні дзвона архімедова сила виштовхування зростає і необхідно збільшувати силу довантаження збільшуючи кількість грузів.

Однак донині відсутні теоретичні викладення які би встановлювали з метрологічного аспекту необхідні співвідношення між масою  $m_i$  кожної важки і

розмірами барабана.

Припустимо, що на довантаження поставлено один груз, який буде довантажувати дзвін при повороті роликів, які його утримують на  $90^\circ$ . Виходячи з трикутника, який утворюється при дії сил тяжіння грузів та плеча дії даних сил можна визначити з якою силою довантажує кожен груз зокрема, або всіх разом. Отже, отримаємо таку аналітичну залежність:

$$F_i = m_i \cdot g \cdot r \cdot \sin \beta_i, \quad (2.38)$$

де  $\beta_i$  – кут який утворюється між дією сили та радіусом кола  $r$ ,  $r$  – радіус барабана,  $m_i$  – маса  $i$ -того локального груза,  $g$  – прискорення сили земного тяжіння.

Відповідно коли взяти один локальний груз довантаження, то процес буде тривати на протязі повороту барабана на кут  $90^\circ$ . Якщо підставити числові значення у вираз (2.38) то отримується наступна графічна залежність сили довантаження в залежності від кута повороту.

Проаналізувавши отриманий графік можна зробити висновок, що довантаження здійснюється пульсаційно, а це значить, що не точно бо є велике відхилення від прямої ідеального довантаження, яка проходить від  $0$  до  $90^\circ$  в напрямку зростання сили довантаження. Отримаємо таке рівняння, яке описує довантаження:

$$\Delta F = m_1 \cdot g \cdot r \cdot \sin \beta_1 \quad (2.39)$$

де  $m_1$  – маса одного локального груза довантаження;  $\beta_1$  – кут повороту барабана, змінюється в межах від  $(0$  до  $90^\circ)$ .

Візьмемо два локальних грузи. І отримаємо такий результат. Розташували їх на однаковій відстані по стінці барабана, а відповідно через  $45^\circ$  один від одного. На початку руху дія довантаження здійснюється вагою першого груза, а через поворот барабана на  $45^\circ$  дія довантаження здійснюється уже двома грузами. При проходженні першим грузом ділянки повороту від  $45^\circ$  до  $90^\circ$  сила дії його довантаження є сильнішою ніж наступного за ним, що дає

можливість отримати наступне рівняння яке описує силу довантаження уже двома локальними грузами довантаження:

$$\Delta F_2 = m_2 \cdot g \cdot r \cdot \left[ \sin \beta_2 + \sin \left( \beta_2 + \frac{\pi}{2 \cdot 2} \right) - \sin \frac{\pi}{2 \cdot 2} \right] \quad (2.40)$$

де  $m_2 = \frac{m_1}{2}$  - маса одного локального груза довантаження;  $\beta_2$  - кут повороту барабана, при якому діє сила довантаження одного груза, змінюється в межах від (0 до 45°).

Для трьох грузів довантаження, коли їх розмістити на рівній відстані один від одного по стінці барабана, то отримаємо наступний алгоритм. Процес довантаження тут ділиться на три цикли. В першому довантаження проводить перший груз при проходженні кута повороту в межах від 0 до 30°. Під час другого етапу довантаження проходить уже двома грузами причому перший проходить кут повороту від 30 до 60°, а другий починає своє довантаження і діє в межах від 0 до 30°. Третій цикл, це коли довантаження здійснюється трьома грузами при цьому їхня дія продовжується на кожних 30° кута повороту барабана. Дія всіх трьох є в межах проходження першим грузом кута від 60 до 90°.

Для трьох грузів довантаження отримуємо наступне рівняння:

$$\Delta F = m_3 \cdot g \cdot r \cdot \left[ \sin \beta_3 + \sin \left( \beta_3 + \frac{\pi}{2 \cdot 3} \right) - \sin \frac{\pi}{2 \cdot 3} + \sin \left( \beta_3 + \frac{\pi \cdot 2}{2 \cdot 3} \right) - \sin \frac{\pi \cdot 2}{2 \cdot 3} \right] \quad (2.41)$$

де  $m_3 = \frac{m_1}{3}$  - маса одного локального груза довантаження;  $\beta_3$  - кут повороту барабана, при якому діє сила довантаження одного груза, змінюється в межах від (0 до 30°).

Цифра 3 чисельнику складової синуса означає, що довантаження здійснюється трьома грузами довантаження, але для розрахунку приймаємо лише довантаження першим грузом.

При збільшенні кількості грузів пульсації довантаження зменшуються. Провівши обробку результатів та звівши попередні розрахунки на один графік можна отримати спільну залежність кількості грузів довантаження до точності довантаження. Тут враховується наступний зміст, що при збільшенні кількості відповідних грузів, які розміщені на однаковій відстані один від одного та мають однакову масу довантаження здійснюється більш плавно. Отож, при збільшенні кількості грузів можна досягнути кращого, точнішого результату довантаження.

Суть досліджуваної проблеми полягає в тому, щоб знайти оптимальне число грузів довантаження, коли дія їх буде найбільш близькою до ідеального значення прямої.

Тепер коли виведено залежності для визначення сили довантаження трьох локальних грузів, то можна вивести рівняння для обчислення сили довантаження для  $n$ -ої кількості локальних грузів. Тому за участю автора отриманий наступний вираз для розрахунку дії змінного від кута повороту барабана довантаження  $\Delta F$  всіма локальними  $n$  грузами, які одночасно знаходяться на барабані:

$$\Delta F = \frac{m}{n} \cdot g \cdot r \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \sin \beta_n + \sin \left( \beta_n + i \cdot \frac{\pi}{2 \cdot n} \right) - \sin i + \frac{\pi}{2 \cdot n} \right] \quad (2.42)$$

де  $\beta_i$  - кут повороту  $i$ -того груза на поверхні барабана, який змінюється в межах від 0 до  $-\frac{\pi}{2 \cdot n}$ ;  $m$  – маса  $n$  грузів, які розміщені на барабані.

Запропонований алгоритм описує взаємозв'язок вище вказаних параметрів  $m$ ,  $n$ ,  $r$ ,  $\beta$  із значенням діючого довантажуючого зусилля і практично забезпечує розрахунок оптимального співвідношення між цими параметрами згідно вибраного критерію оптимізації, наприклад, формування мінімального відхилення амплітуди пульсації довантажуючої сили від теоретично заданої. Отриманий вираз (2.42) надає можливість розраховувати похибку  $\delta$  від пульсацій довантаження дзвона за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta F - \Delta F_T}{p \cdot S} \cdot 100, \% \quad (2.43)$$

де  $\Delta F_T$ ,  $\Delta F$  – теоретично необхідне і амплітуда розрахованого довантаження дзвона при повороті барабана на кут  $\beta_n$ ;  $p$  – тиск повітря під дзвоном;  $S$  – площа внутрішньої поверхні дзвона.

#### 2.4 Дослідження впливу зміни рівня замкової рідини на похибку дзвонової установки

Однією із складових похибки дзвонової еталонних установок, яка є об'єктом детальних досліджень останніми роками, є похибка від зміни рівня замкової рідини у внутрішньому кільцевому резервуарі витіснювача при зануренні дзвона під час відтворення контрольного об'єму газу.

Здійснимо чисельне моделювання впливу зміни рівня замкової рідини на похибку еталонних установок на базі тотожності (2.1). Оскільки ця похибка зумовлена підняттям рівня під час відтворення дзвоном контрольного об'єму газу і носить систематичний характер, то охарактеризуємо її як НСП і розрахуємо за формулою:

$$\Theta_{\Delta V} = \frac{\Delta V}{V_K} \cdot 100, \% \quad (2.44)$$

де  $\Theta_{\Delta V}$  – НСП від зміни рівня замкової рідини;  $\Delta V$  – приріст об'єму рідини у внутрішньому кільцевому резервуарі при відтворенні дзвоном контрольного об'єму  $V_K$ .

Значення об'єму  $V_K$  визначається приростом занурення дзвона  $H$  (рис.2.1) і обчислюється за формулою:

$$V_K = \pi \cdot R_2^2 \cdot H, \quad (2.45)$$

де  $R_2$  – радіус внутрішньої поверхні стінки дзвона.

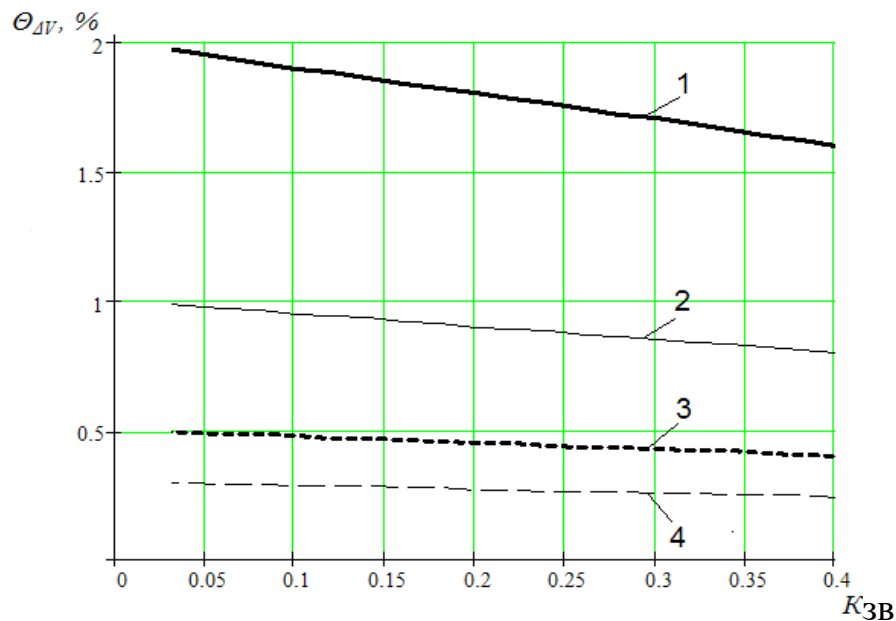


Рисунок 2.3 – Результати чисельного моделювання похибки  $\Theta_{\Delta V}$ : 1 –  $K_{CD} = 0,02$ ; 2 –  $K_{CD} = 0,01$ ; 3 –  $K_{CD} = 0,005$ ; 4 –  $K_{CD} = 0,003$ .

Для розрахунку приросту об'єму  $\Delta V$  спочатку запишемо вираз для  $\Delta h$  із (2.1), у якому значення площ  $S_D, S_B, S_3$  подані через відповідні радіуси  $R_1, \dots, R_4$  (рис.2.1):

$$\Delta h = H \cdot \frac{R_3^2 - R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2) + (R_4^2 - R_3^2)}. \quad (2.46)$$

Приріст об'єму  $\Delta V$  далі розраховується за формулою (2.8), в якій  $\Delta h$  знаходиться за (2.15).

Однак, враховуючи, що при проектуванні дзвонових еталонних установок основними конструктивними параметрами є радіус  $R_2$  (рис. 2.4) (визначає діапазон відтворюваних витрат і контрольних об'ємів еталонних установок), товщина стінки дзвона  $\varepsilon_D$  (визначає міцність і жорсткість форми дзвона) і ширина  $\sigma$  внутрішнього і зовнішнього кільцевих зазорів витіснювача (визначає вплив гідродинамічних параметрів замкової рідини на стабільність тиску і відтворюваних витрат еталонних установок), подамо формулу (2.8) з урахуванням (2.46) через ці параметри:

$$\Delta V = \frac{\pi}{2} \cdot \varepsilon_{\text{Д}} \cdot H \cdot (2R_2 - \sigma), \quad (2.47)$$

де

$$\varepsilon_{\text{Д}} = R_3 - R_2, \quad (2.48)$$

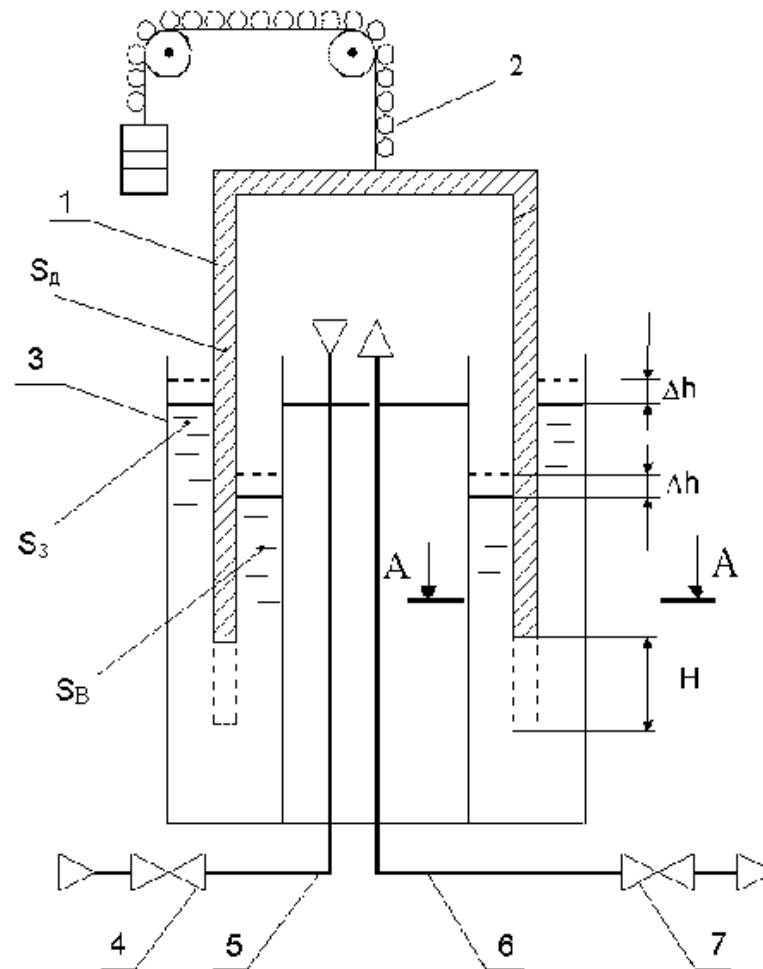
$$\sigma = R_2 - R_1 = R_4 - R_3. \quad (2.49)$$

Тому з врахуванням (2.45), (2.47)–(2.49) формула (2.44) набуває вигляду:

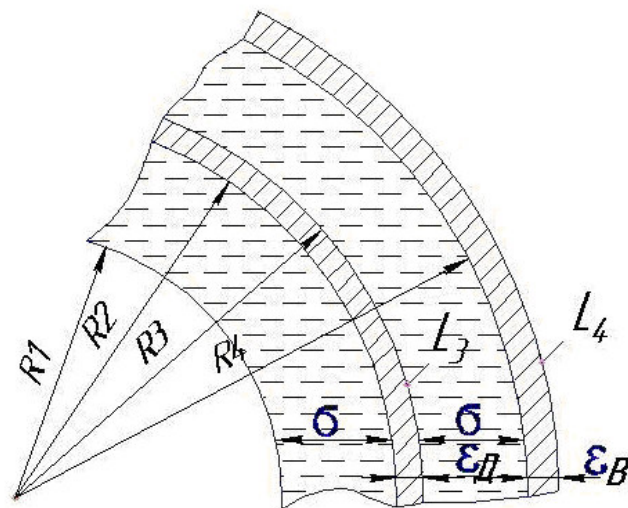
$$\Theta_{\Delta V} = \left( \varepsilon_{\text{Д}} / 2R_2^2 \right) \cdot (2R_2 - \sigma) \cdot 100, \%. \quad (2.50)$$

Для чисельного аналізу похибки  $\Theta_{\Delta V}$  подамо (2.50) у безрозмірному вигляді шляхом введення коефіцієнта товщини стінки дзвона  $K_{\text{СД}} = \varepsilon_{\text{Д}} / R_2$  і коефіцієнта ширини зазору витіснювача  $K_{\text{ЗВ}} = \sigma / R_2$ . При цьому отримаємо такий алгоритм для обчислення похибки від зміни рівня замкової рідини:

$$\Theta_{\Delta V} = K_{\text{СД}} \cdot (1 - 0,5K_{\text{ЗВ}}) \cdot 100, \%. \quad (2.51)$$



a)



б)

Рисунок 2.4 – Спрощена принципова схема дзвонової еталонної установки (а) та схема перерізу А-А кільцевого витіснювача (б): 1 – дзвін; 2 – важковий ваговий компенсатор; 3 – витіснювач; 4, 7 – запірні клапани; 5, 6 – підвідний і відвідний трубопроводи;  $R_1$  – радіус зовнішньої поверхні внутрішньої стінки витіснювача;  $R_2, R_3$  – радіус внутрішньої і зовнішньої поверхонь стінстінок дзвона відповідно;  $R_4$  – радіус внутрішньої поверхні зовнішньої стінки витіснювача.

Враховуючи, що реальні значення конструктивних параметрів ЕУ знаходяться в межах  $\varepsilon_D = (3...10)$  мм,  $R_2 = (0,5...1,5)$  м,  $\sigma = (0,03...0,2)$  м сформуємо такий діапазон зміни безрозмірних коефіцієнтів  $K_{CD} = (0,003...0,02)$  і  $K_{ЗВ} = (0,02...0,4)$ . Результати чисельного моделювання алгоритму (2.51) подані на рис.2.3, які свідчать, що похибка  $\Theta_{\Delta V}$  може сягати 2% і навіть для найбільш сприятливих умов (тонкостінний дзвін при  $K_{CD} = 0,003$  і широкий зазор витіснювача  $K_{ЗВ} = 0,4$ ) становить 0,24%. Це значення є суттєвою складовою похибки, яке майже вдвічі перевищує границю сумарної допустимої похибки ( $\pm 0,15\%$ ) переважної більшості відомих створених дзвонів еталонних установок. Тому на цю похибку необхідно обов'язково вводити поправку при градуюванні дзвона геометричним методом.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕТАЛОННИХ ВИТРАТОВИМІРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

#### 3.1 Дослідження алгоритмів визначення похибки від непостійності тиску в дзвонових еталонних установках

До числа суттєво впливових складових, які підлягають обов'язковій оцінці у еталонних установках, належить похибка від непостійності тиску під дзвоном, яка відповідно також формує одну із невизначеностей від дестабілізуючих факторів роботи еталонних установок (рис.3.1), зокрема невизначеність від непостійності тиску під дзвоном. Алгоритм оцінки цієї похибки у всіх вказаних роботах зводиться до порівняння контрольного об'єму газу  $V_K$ , відрахованого за допомогою відлікового пристрою установки, з практично відтвореним (дійсним) об'ємом газу  $V_D$ , який передається до ДП.

Аналітично це записується формулою:

$$\delta_p = \frac{V_D - V_K}{V_K} \cdot 100, \%, \quad (3.1)$$

де  $\delta_p$  - відносна похибка від зміни тиску під дзвоном.

Розрахунок значення об'єму  $V_D$  ґрунтується на застосуванні основного рівняння стану газу. Водночас алгоритми його обчислення можуть відрізнятися між собою внаслідок можливих різних підходів до вибору граничних умов і суті фізичних процесів під дзвоном установки. Це, своєю чергою, може привести до різних розрахованих значень похибки, які експериментально перевірити неможливо. Тому доцільними є теоретичні дослідження алгоритмів визначення цієї похибки, із застосуванням чисельного моделювання на основі врахування фізичних основ функціонування дзвонових еталонних установок.

Під час відтворення установкою контрольного об'єму газу з її конструктивних особливостей є очевидним, що відповідно до основного рівняння стану газу будь-яка зміна тиску повітря під дзвоном спричинить зміну об'єму газу під ним. Водночас математичне моделювання таких установок і їх

експериментальні дослідження обґрунтовують і підтверджують наявність непостійності тиску під дзвоном при роботі установки. Тому на базі моделювання взаємозв'язку між зміною тиску повітря під дзвоном і відтвореним установкою його об'ємом отримані такі алгоритми для обчислення похибки від непостійності тиску:

$$\delta_{pЛ} = -\frac{\Delta p}{2p_0} \cdot 100, \% \quad (3.2)$$

$$\delta_{pП} = -\frac{2\Delta p}{3p_0} \cdot 100, \% \quad (3.3)$$

де  $\delta_{pЛ}$  і  $\delta_{pП}$  – відносні похибки від непостійності тиску  $\Delta p$  під дзвоном при їх лінійній і параболічній апроксимаціях відповідно;  $p_0$  – початкове значення абсолютного тиску під дзвоном.

Застосування методики дає можливість розраховувати дійсне значення витісненого об'єму газу при апроксимації тиску під дзвоном як функції від його лінійного переміщення  $H$  і швидкості опускання  $u$  поліномами вищих порядків або іншими видами нелінійних залежностей, наприклад, логарифмічною чи експоненціальною. При цьому конкретизацію апроксимованої кривої зміни тиску потрібно визначати за результатами експериментальних досліджень установки на різних режимах роботи, що зумовить подання в іншому виді формул (3.2) чи (3.5).

Практичну цінність виразів (3.2) і (3.3) проілюструємо за допомогою осцилограм тиску (рис.3.2), отриманих при експериментальних дослідженнях робочого еталону на базі дзвонової еталонної установки типу РКДУ-0.44, яка експлуатується на ВАТ «Івано-Франківський завод «Промприлад».

Про наявність випадкової складової коливань тиску свідчать високочастотні флуктуації зміни тиску протягом всього періоду витіснення дзвоном об'єму повітря. Вони зумовлені дією випадкових чинників, наприклад, локальними змінами механічних сил тертя під час руху направляючих стабілізації вертикального положення дзвона, неідеальністю площі його поперечного перерізу вздовж висоти, вібрацією дзвона та інших вузлів

установки. З наведених осцилограм також видно, що із збільшенням відтворених витрат спектр коливань тиску під дзвоном зміщується в бік нижчих частот. Це пояснюється зростаючим впливом інерційних сил маси дзвона і жорстко з'єднаних з ним рухомих направляючих, що сприяє згладжуванню високочастотних флуктуацій.

Узагальнена формула обчислення похибки  $\delta_p$  від непостійності тиску у витратовимірвальних установках:

$$\delta_p = - \left( \frac{V_3}{V_k} \ln \frac{p_0}{p_0 + \Delta p} + \frac{p_0}{\Delta p} \ln \frac{p_0}{p_0 + \Delta p} + 1 \right) \cdot 100, \% \quad (3.4)$$

де  $V_3$  – загальний об'єм газу, що міститься у витратовимірвальній установці.

Водночас для оцінювання досліджуваної похибки  $\delta_p$  застосовувався такий алгоритм:

$$\delta_p = - \frac{p_0}{(p_0 + \Delta p)^2} \cdot \Delta p \cdot 100, \% \quad (3.5)$$

Порівняння виразів (3.2) і (3.7) з відомими виразами (3.4) і (3.5) вказує, що всі вони передбачають використання як інформативних параметрів значення абсолютного тиску  $p_0$  на початку та його приріст  $\Delta p$  за час відтворення контрольного об'єму газу.

Водночас, з аналізу поданих на рис.3.2 кривих очевидно є наявність похибки від нестабільності тиску, навіть, за умови випадкового співпадіння його значень на початку та в кінці відтворення контрольного об'єму. Обчислення цієї похибки за алгоритмами (3.4) і (3.5) зумовлює отримання її нульового значення, у той час як у формулах (3.2) і (3.3) вираз  $\Delta p$  означає не вимірне значення зміни тиску, а його обчислене апроксимоване значення за час відтворення контрольного об'єму.

Другою неточністю відомих алгоритмів (3.4) і (3.5) є неврахування ними фактичного закону зміни тиску впродовж відтворення контрольного об'єму газу. Про актуальність врахування цього чинника свідчить те, що результати

обчислень за (3.2) і (3.3) відрізняються між собою на 33%, виходячи з апроксимації лінійною чи параболічною залежностями. Вкажемо, що жоден з алгоритмів (3.4) і (3.5) не дає можливості розраховувати похибку від локальних змін тиску. Як видно з рис.3.2 такі зміни характеризуються випадковими додатними та від'ємними приростами стосовно середнього значення чи апроксимованої залежності. Враховуючи високу частоту таких флуктуацій, очевидно є в більшості практичних випадків взаємна компенсація приростів і зменшень контрольного об'єму, що обґрунтовує можливість нехтування цією складовою похибки для більшості практичних випадків. Водночас застосування методу сплайнової апроксимації для алгоритмів (3.2)–(3.3) відкриває можливість знаходження інтегрованого значення приросту тиску для будь-якої частки відтворюваного контрольного об'єму газу, а, значить, і похибки  $\delta_p$  від локальних змін тиску.

Особливістю формули (3.4) і незаперечною її цінністю є наявність складової  $\frac{V_3}{V_K} \ln \frac{p_0}{p_0 + \Delta p}$ , яка аналізує вплив на досліджувану похибку  $\delta_p$  вимірювання значення відтворюваного контрольного об'єму відносно загального об'єму газу в установці. Однак враховуючи, що в реальних ДВУ, навіть при неповному витісненні контрольного об'єму значення  $V_3$  не може перевищувати більше ніж на порядок значення  $V_K$ , а зміна тиску під дзвоном у більшості випадків не перевищує 20Па, то при надлишковому тискові 5кПа співвідношення  $p_0$  до  $\Delta p$  буде близьким до  $5 \cdot 10^{-3}$ . Тому першим доданком у (3.4) при визначенні похибки для дзвонових ЕУ в переважній більшості випадків з достатньою для практики точністю можна знехтувати.

Чисельний аналіз отриманих і відомих алгоритмів розрахунку похибки від непостійності тиску  $\delta_p$  поданий на рис.3.2.

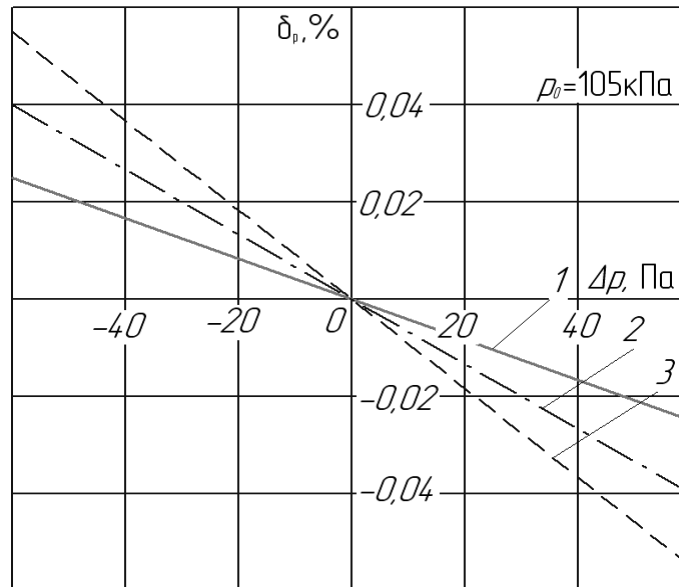


Рисунок 3.2 – Результати чисельного аналізу алгоритмів та розрахунку похибки

$\delta_p$  від непостійності тиску  $\Delta p$  при початковому тискові  $P_0 = 105$  кПа:

*1-графічна інтерпретація алгоритмів (3.4) і (3.6); 2, 3- графічна інтерпретація алгоритмів (3.5) і (3.7) відповідно*

З нього слідує, що максимального значення при однакових приростах тиску похибка набуває у разі розрахунку за алгоритмом (3.5). Його застосування зумовлює отримання найбільш можливих значень похибки без конкретизації тривалості такого відхилення і моменту його наявності. Цей алгоритм доцільний насамперед при розрахунку похибки на режимах роботи еталонної установки, які зображені на рис.3.2, з. Однак, якщо врахувати при цьому відсутність детермінованої складової зміни тиску, як параметр  $\Delta p$  необхідно вибирати максимальне відхилення тиску під дзвоном від середнього значення  $p_0$ . Реально це означає, що похибка  $\delta_p$  буде розрахована для половинного значення  $\Delta p$ , що спричинить, як видно з рис.3.2, практичну збіжність з результатами, зображеними прямою 1.

Розходження результатів обчислення похибки за алгоритмами (3.2) і (3.4) не перевищує одного відсотка (пряма 1) і кожен з них можна рекомендувати до розрахунку похибки при наявності детермінованої складової зміни тиску впродовж досліджуваного періоду вимірювального циклу, що відображають криві *а*, *б*, *в* на рис.3.3. Водночас вираз (3.2) порівняно з (3.4) простіший за

математичним описом. Формула (3.3) доцільна для застосування при наявності детермінованої нелінійної форми зміни тиску під дзвоном, прикладом якої є крива *a* на рис.3.3. Досліджені алгоритми у сукупності із метрологічними дослідженнями і застосуванням апроксимаційних залежностей дають можливість точніше оцінити похибку еталонної установки від непостійності тиску під дзвоном практично при будь-яких закономірностях його зміни. Практично це забезпечує розвиток метрологічної моделі еталонної установки шляхом уточнення і правильного вибору алгоритму розрахунку похибки від непостійності тиску у відповідності до теорії похибок, а також при обчисленні невизначеності від непостійності тиску в еталонній установці.

### **3.2 Моделювання впливу робочого тиску дзвонових еталонних установок на їх метрологічні характеристики**

Найбільш суттєвим недоліком дзвонових еталонних установок є обмеженість діапазону робочих тисків до (5...10) кПа, який визначається максимально можливою різницею рівнів замкової рідини у кільцевому резервуарі всередині і ззовні дзвона. Зростання робочих тисків збільшує верхню границю відтворюваних витрат, розширює функціональні можливості установок стосовно одночасного градуювання чи повірки більшої кількості лічильників і витратомірів газу або щодо дослідження приладів із збільшеним перепадом тисків на первинному перетворювачі. Але при цьому зменшується значення максимального контрольного об'єму газу, який відтворюється дзвоною еталонною установкою. Тому доцільним є створення дзвонових еталонних установок із змінним робочим тиском, оскільки в існуючих функціонування здійснюється при заздалегідь визначених постійних значеннях робочих тисків, які встановлюються нормативними документами на еталонні витратовимірвальні засоби або технічними умовами на досліджувані витратоміри чи лічильники газу. Метрологічний аналіз дзвонових установок за відомими програмами метрологічної атестації і теоретичними дослідженнями складових їхньої похибки донині здійснюється тільки стосовно непостійності

робочого тиску під дзвоном або з врахуванням необхідності забезпечення точності передавання одиниці об'єму від установки. Всі ці міркування вказують на актуальність моделювання дослідження впливу робочого тиску під дзвоном еталонних установок на їх метрологічних характеристик.

Конструктивно в дзюнових установках при їх розробці ставиться мета досягнення постійності відношення ваги дзюна  $G$  з врахуванням дії архімедової сили і ваги противаги до його площі  $S_0$  внутрішнього перерізу дзюна на межі його занурення в рідину. Однак, так як площа  $S_0$  внаслідок неподоланих технологічних затруднень (особливо при виготовленні великогабаритних дзюнів) ніколи не може бути ідеально постійною вздовж висоти дзюна, то як наслідок і силу  $G$  необхідно коригувати і нові напрямки технічних вдосконалень в цьому аспекті. Водночас з аналізу фізичних процесів, що мають місце у витіснювачі дзюнових еталонних установок, очевидною є різниця рівнів замкової рідини на внутрішній і зовнішніх поверхнях стінок дзюна, яка пропорційна до робочого тиску установки. Але, так як витіснюваний об'єм визначається різницею об'ємів газу під дзвоном в моменти початку і кінця відліку контрольного об'єму, тобто в моменти різної глибини занурення дзюна у рідину витіснювача, то значення робочого тиску також будуть змінювати глибину занурення дзюна при фіксації границь контрольного об'єму. Проаналізуємо кількісно можливий вплив цих змін на значення витіснюваних об'ємів газу.

Як відомо, точність дзюна визначається технологічними можливостями обладнання для його виготовлення, транспортування і монтажу безпосередньо на місці експлуатації. Тому для оцінки точності виготовлення дзюнів скористаємося реальними геометричними характеристиками установок, що знаходяться в експлуатації. Аналіз виконаємо на базі Державного спеціального еталону ДСТУ-03-01-96, створеного шляхом модернізації установки РКДУ-0,028, трьох робочих еталонів ВАТ «Івано-Франківський завод «Промприлад» (установки РКДУ-0,44, РКДУ-0,42 (модернізована установка ГМ-5000), ГМ-2000), а також робочий еталон ВАТ «Івано-Франківськгаз» (установка ІФГАЗ-1). При цьому скористаємося результатами метрологічної атестації вказаних

еталонних установок, основні технічні характеристики яких зведені в табл.3.1, а на рис.3.4 подана графічна ілюстрація зміни діаметра дзвона вздовж його висоти. При цьому як вісі координат на рис.3.4 вибрані порядковий ( $i$ -ий) номер фіксованого контрольного об'єму дзвонової еталонної установки і відносне відхилення  $\delta_{Di}$  діаметра від його середнього значення  $\bar{D}$ . Значення параметрів для табл.3.1 і графіків рис.3.4 обчислювалися за формулами:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i, \quad (3.6)$$

$$\delta_{Di} = \frac{D_i - \bar{D}}{\bar{D}}, \quad (3.7)$$

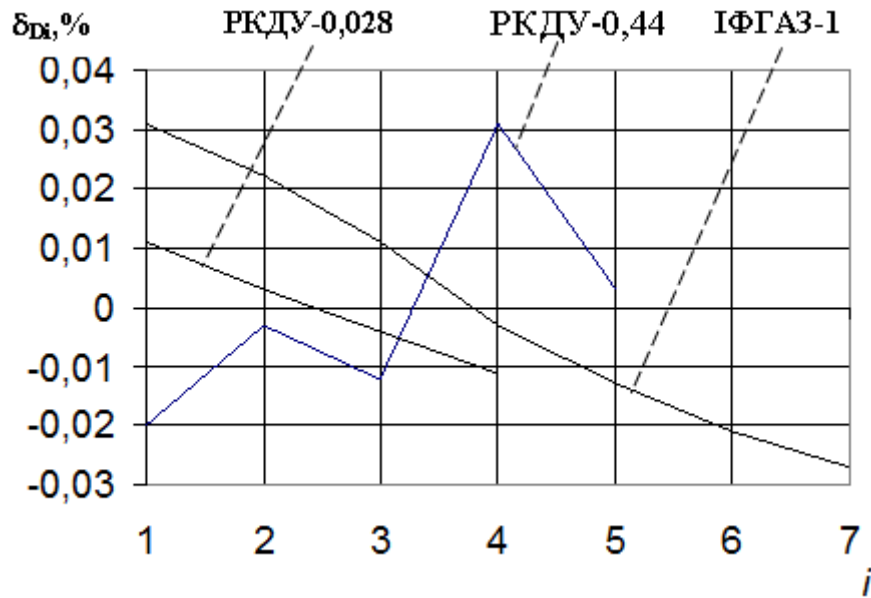
$$S_D = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2} \cdot 100, \quad \% \quad (3.8)$$

де  $D_i$  – внутрішній діаметр дзвона, що відповідає його  $i$ -му контрольному об'єму;  $\bar{D}$  – середнє значення внутрішнього діаметра дзвона для  $N$ -ої кількості контрольних об'ємів;  $\delta_{Di}$  – відносне відхилення внутрішнього діаметра дзвона для  $i$ -го контрольного об'єму;  $S_D$  – СКВ внутрішнього діаметра дзвона для  $N$  контрольних об'ємів.

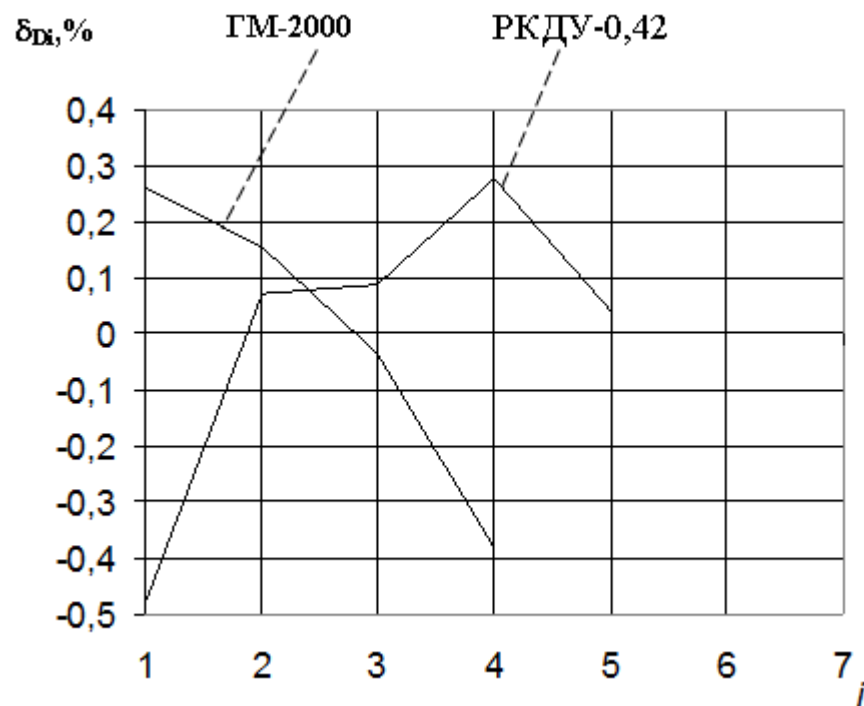
Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики дзвонових еталонних установок

Параметр	Тип установки				
	ДЕТУ-03-01-96 (РКДУ-0,028)	РКДУ-0,44	РКДУ-0,42 (ГМ-5000)	ГМ-2000	ІФГАЗ-1
1. Діапазон витрат, м <sup>3</sup> /с (м <sup>3</sup> /год)	1,1·10 <sup>-3</sup> 5,6·10 <sup>-2</sup> (4-200)	2,8·10 <sup>-3</sup> 0,69 (10-2500)	2,8·10 <sup>-3</sup> 0,42 (10-1500)	1,1·10 <sup>-3</sup> 4,2·10 <sup>-2</sup> (4-150)	6,9·10 <sup>-6</sup> 1,1·10 <sup>-2</sup> (0,25-40)
2. Робоче середовище	повітря	повітря	повітря	повітря	повітря
3. Робочий тиск, кПа	5,5	5,5	1,5	1,5	3,5
4. Максимальний контрольний об'єм, м <sup>3</sup>	1,6	5	5	2	0,175
5. Мінімальний контрольний об'єм V <sub>кi</sub> , м <sup>3</sup>	0,4	1	1	0,4; 0,6	0,025; 0,020; 0,010
6. Середнє значення діаметра дзвона $\bar{D}$ , мм	1198,2	1800,9	2251,1	1064,9	695,5
7. Локальні відхилення діаметра дзвона $\delta_{Di}$ , % максимальне мінімальне	0,011 -0,011	0,031 -0,020	0,276 -0,479	0,263 -0,383	0,031 -0,028
8. Середнє квадратичне відхилення діаметра дзвона S <sub>D</sub> , %	8,08·10 <sup>-3</sup>	0,017	0,253	0,246	0,021
9. Середнє значення висоти дзвона для мінімального контрольного об'єму $\bar{H}_i$ , мм	354,7	392,5	251,3	450,1; 672,1	65,6
10. Границя допустимої похибки при вимірюванні об'єму газу, %	НСП*=5·10 <sup>-4</sup> СКВ*=9·10 <sup>-4</sup>	±0,16	±0,25	±0,28	±0,17

\*НСП і СКВ відтворення і вимірювання об'єму газу подані в абсолютних одиницях.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Графічна ілюстрація зміни діаметра дзвона від порядкового номера фіксованого контрольного об'єму для установок РКДУ-0,028, РКДУ-0,44, ІФГАЗ-1 (а) і установок ГМ-2000, РКДУ-0,42 (б).

Зауважимо, що параметр  $\bar{D}$  в еталонній установці для всієї висоти дзвона не оцінюється, бо при їх метрологічній атестації визначаються довжини ділянок дзвона, які відповідають кожному фіксованому значенню його контрольного об'єму.

При визначенні об'єму дзвона проводять багаторазові (вздовж висоти і напрямку) вимірювання його діаметра, після чого знаходять оцінку середнього значення  $\tilde{D}_i$  для кожного наперед заданого контрольного об'єму  $V_{ki}$  і розраховують його висоту  $H_i$  з відомої формули

$$V_{ki} = \frac{\pi \tilde{D}_i^2}{4} H_i. \quad (3.9)$$

З аналізу рис.3.4 видно, що конкретна форма дзвона в установках РКДУ-0,028, ІФГАЗ-1, ГМ-2000 наближена до конусоподібної, а в установках РКДУ-0,44 і РКДУ-0,42 носить випадковий характер.

З табл.3.3 видно, що всі еталонні установки характеризуються непостійністю діаметра дзвона, яка кількісно змінюється в межах від 0,011% (установка РКДУ-0,028) до 0,479% (установка РКДУ-0,42) і компенсується різною висотою контрольних об'ємів. При цьому відносні зміни діаметра в багатьох випадках перевищують границю основної допустимої похибки установки, що вказує на доцільність дослідження умов виникнення в них похибки від значення робочого тиску і кількісної її оцінки. З цією метою для установки ІФГАЗ-1 виконані багаторазові вимірювання діаметра по всій висоті дзвону (рис.3.5), а також розрахована градувальна характеристика відтвореного контрольного об'єму  $V_k$  як функція від координати  $h_T$  висоти дзвона від його торця.

Рівень замкової рідини у внутрішній частині дзвона при різних значеннях робочого тиску, проведено обчислення за допомогою градувальної характеристики і формули (3.9) фактичних значень семи фіксованих контрольних об'ємів газу  $V_{ki}$ , а також семи значень інтегральних витіснюваних контрольних об'ємів  $\Sigma V_{ki}$  для випадку умовно заданої постійної висоти  $H_i$  всіх фіксованих значень  $V_{ki}$ . При знаходженні значень інтегральних об'ємів  $\Sigma V_{ki}$  застосовувався такий алгоритм:

$$\Sigma V_{ki} = \Sigma V_{k(i-1)} + V_{ki}, \quad (3.10)$$

де  $\Sigma V_{ki}$ ,  $\Sigma V_{k(i-1)}$  – сумарні об'єми газу, які відтворені установкою при витісненні  $i$ -тої та  $(i-1)$ -тої кількості контрольних об'ємів відповідно.

Результати обчислень об'ємів  $V_{ki}$  і  $\Sigma V_{ki}$  при тисках 0; 1; 2; 3; 4 кПа подані в табл.3.2.

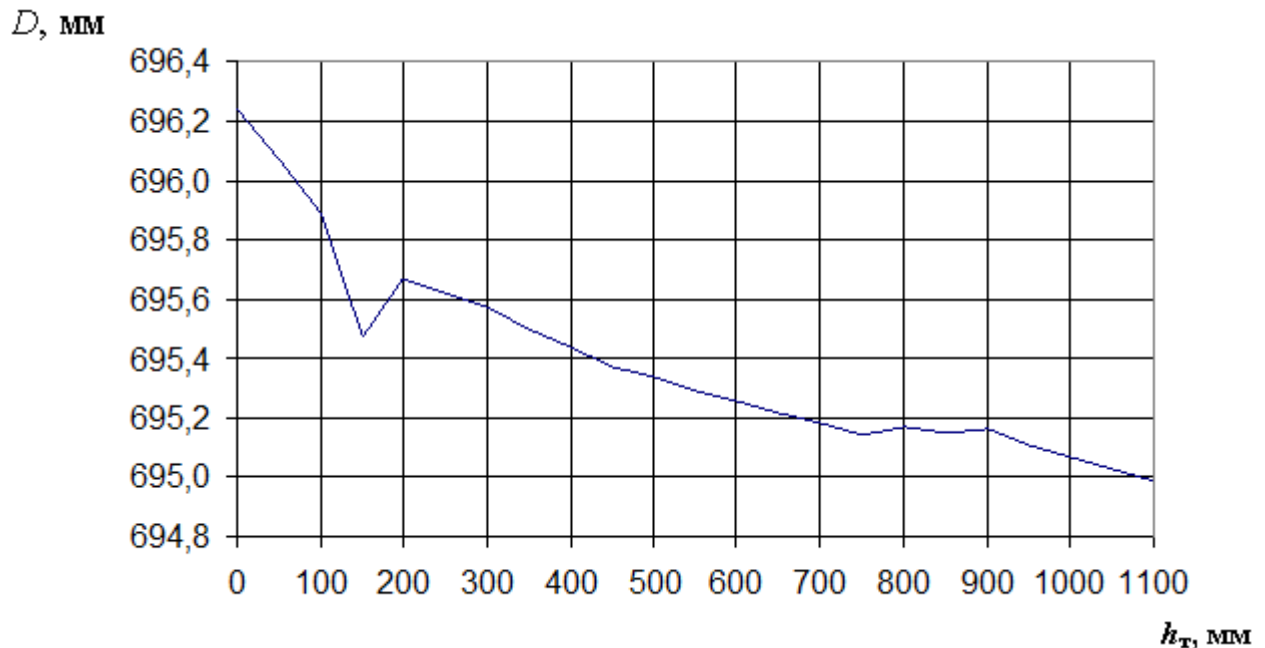


Рисунок 3.5 – Графічна ілюстрація зміни внутрішнього діаметра дзвона установки ІФГАЗ-1 від віддалі  $h_T$  до його торця

Таблиця 3.2 – Значення відтворюваних контрольних об'ємів установки ІФГАЗ-1 і додаткової похибки від зміни робочого тиску при умовно постійній висоті фіксованих контрольних об'ємів

Тиск $p$ , кПа	Порядковий номер фіксованого контрольного об'єму							
	1		2		3		4	
	$V_{k1}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p1}$ , %	$\Sigma V_{k2}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p\Sigma 2}$ , %	$\Sigma V_{k3}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p\Sigma 3}$ , %	$\Sigma V_{k4}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p\Sigma 4}$ , %
0	25,09	-	50,28	-	75,41	-	100,50	-
1	25,17	0,32	50,25	-0,06	75,40	-0,01	100,53	0,03
2	25,22	0,52	50,38	0,2	75,44	0,04	100,59	0,09
3	25,05	-0,16	50,28	0	75,42	0,01	100,48	-0,02
4	24,92	-0,68	50,00	-0,56	75,18	-0,30	100,30	-0,2

продовження таблиці 3.2

Тиск $p$ , кПа	Порядковий номер фіксованого контрольного об'єму					
	5		6		7	
	$\Sigma V_{k5}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p\Sigma5}$ , %	$\Sigma V_{k6}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p\Sigma6}$ , %	$\Sigma V_{k7}$ , дм <sup>3</sup>	$\delta_{p\Sigma7}$ , %
0	125,70	-	150,81	-	175,88	-
1	125,67	-0,02	150,87	0,04	175,94	0,03
2	125,77	0,06	150,91	0,07	176,07	0,11
3	125,62	-0,06	150,86	0,03	175,97	0,05
4	125,40	-0,21	150,51	-0,20	175,74	-0,08

Похибки  $\delta_{pi}$  і  $\delta_{p\Sigma i}$  від зміни робочого тиску відповідно для випадків витіснення фіксованих і інтегральних контрольних об'ємів обчислювалися за таким алгоритмом :

$$\delta_{pi} = \frac{V_{ki} - V_{ki}^0}{V_{ki}^0} \cdot 100, \quad \%, \quad (3.11)$$

$$\delta_{p\Sigma i} = \frac{\Sigma V_{ki} - \Sigma V_{ki}^0}{\Sigma V_{ki}^0} \cdot 100, \quad \%, \quad (3.12)$$

де  $V_{ki}^0$ ,  $\Sigma V_{ki}^0$  – значення  $i$ -го фіксованого і інтегрального контрольних об'ємів при нульовому робочому тиску відповідно;  $V_{ki}$ ,  $\Sigma V_{ki}$  – значення  $i$ -го фіксованого і інтегрального контрольних об'ємів при ненульовому робочому тиску відповідно.

Графічний аналіз табл.3.2 разом з алгоритмом (3.12) поданий на рис.3.6. Із нього слідує, що похибка від зміни робочого тиску має різні знаки як для різних порядкових контрольних об'ємів, так і для різних робочих тисків. При цьому чисельне значення цієї похибки може суттєво (декількаразово) перевищувати границю допустимої похибки установки при відтворенні нею

невеликих контрольних об'ємів. Із зростанням значень відтворюваних контрольних об'ємів (рис.3.6, а) похибка суттєво спадає, однак залишається співрозмірною з похибкою установки. Висновку про однозначність взаємозв'язку між досліджуваною похибкою і робочим тиском установки (рис.3.5, б) зробити не можна, так як для одних контрольних об'ємів похибка із зростанням тиску зростає, а для інших спадає або носить випадковий характер. У цілому аналіз змін похибки  $\delta_{p\Sigma i}$  засвідчує про неможливість внесення на неї єдиної поправки без конкретизації умов функціонування установки. Це обґрунтовує необхідність математичного моделювання для оцінки досліджуваної похибки як додаткової і однієї із складових сумарної похибки еталонної установки.

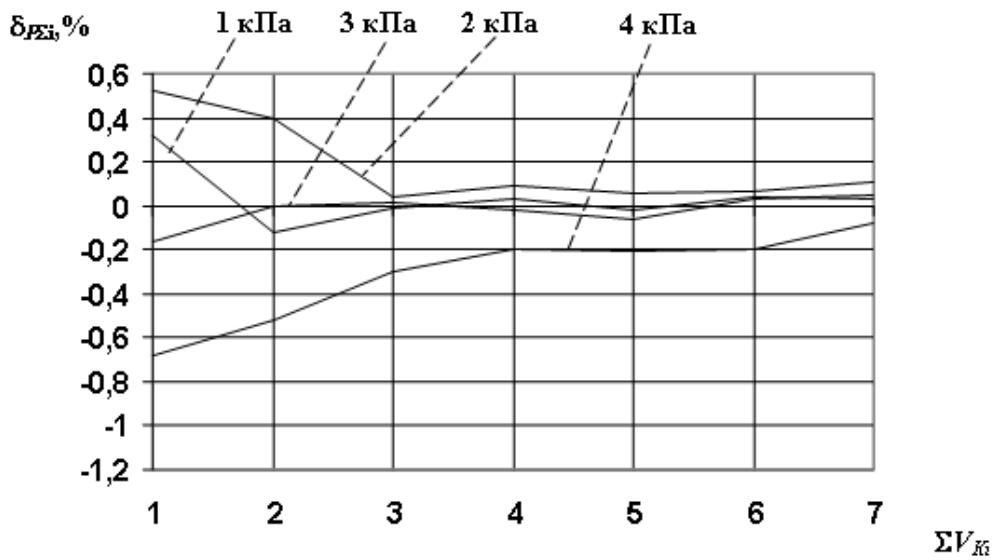
За вихідну умову для розрахунку похибки від зміни робочого тиску установки приймемо зміну  $i$ -го витіснюваного об'єму внаслідок зміни площі внутрішнього перерізу дзвона на межі його занурення в рідину, що математично можна записати як

$$\delta_{pi} = \frac{V_{ki+1} - V_{ki}}{V_{ki}} \cdot 100, \% , \quad (3.13)$$

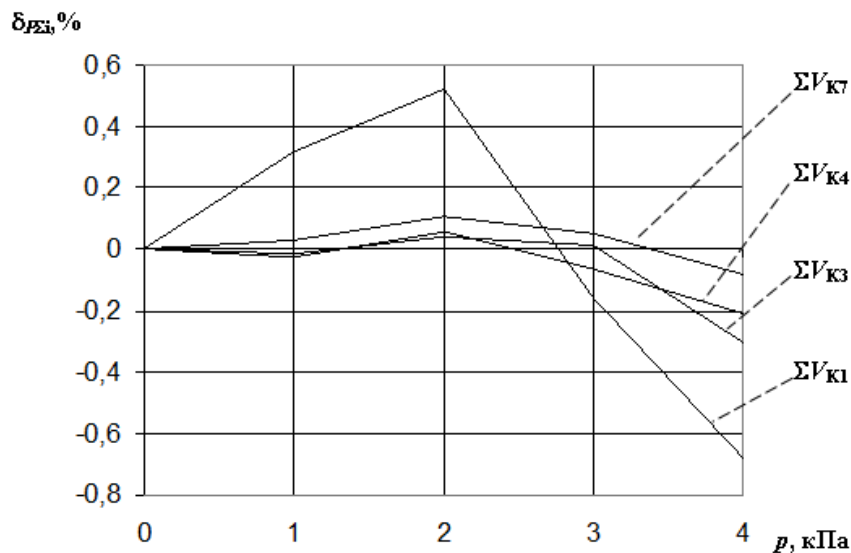
де  $V_{ki+1}$  і  $V_{ki}$  – об'єми двох сусідніх за порядком фіксованих контрольних об'ємів.

Після ділення чисельника і знаменника виразу (3.13) на висоту  $H_i$  контрольного об'єму  $V_{ki}$  і з врахуванням рівності розрахункового значення об'ємів  $V_{ki+1}$  і  $V_{ki}$  з достатньою для практики точністю отримуємо

$$\delta_{pi} = \frac{S_{ki+1} - S_{ki}}{S_{ki}} \cdot 100, \% . \quad (3.13)$$



а)



б)

Рисунок 3.5 – Залежність додаткової похибки  $\delta_{p\Sigma_i}$  установки ІФГАЗ-1 від відтворюваних інтегральних контрольних об'ємів і робочих тисків: *а* – при чотирьох постійних значеннях тиску; *б* – при чотирьох постійних значеннях інтегральних контрольних об'ємів.

Враховуючи, що площі  $S_{k_{i+1}}$  і  $S_{k_i}$  визначаються як результат проведення непрямих вимірювань, то формула (3.14), яка за своєю суттю відображає похибку від зміни площі, може бути подана через похибку  $\delta'_{Di}$  від зміни діаметра дзвона з подвійним ваговим коефіцієнтом:

$$\delta_{pi} = 2\delta'_{Di}, \quad (3.15)$$

$$\text{де} \quad \delta'_{Di} = \frac{\bar{D}_{i+1} - \bar{D}_i}{\bar{D}_i} \cdot 100, \quad \% \quad (3.16)$$

Розрахована за формулами (3.15), (3.16) похибка для  $i$ -того контрольного об'єму може мати місце, коли зміна робочого тиску  $\Delta p$  від робочого заданого зумовить зміну рівня рідини під дзвоном на висоту  $\Delta h_i$  стосовно конкретного  $i$ -го контрольного об'єму висотою  $H_i$ . Тому похибка  $\delta_{pi}$  буде визначатися зміною  $\Delta h_i$  по відношенню до висоти  $H_i$ , що можна подати як

$$\delta'_{pi} = 2\delta'_{Di} \frac{\Delta h_i}{H_i}. \quad (3.17)$$

Враховуючи, що взаємозв'язок між  $\Delta h_i$  і  $\Delta p$  визначається залежністю (2.3) запишемо таку кінцеву формулу для обчислення похибки для  $i$ -го контрольного об'єму від зміни робочого тиску установки

$$\delta_{pi} = \frac{2}{\rho_p g K_\Gamma} \cdot \frac{\delta'_{Di}}{H_i} \Delta p, \quad (3.18)$$

де  $K_\Gamma$  – коефіцієнт геометричних параметрів установки, який визначається виразом

$$K_\Gamma = 1 + \frac{S_B}{S_3}. \quad (3.19)$$

Із виразу (3.18) слідує, що зменшення похибки  $\delta_{pi}$  досягається при збільшенні висоти  $H_i$  контрольного об'єму за рахунок надання дзвону форми більш витягнутого циліндра або при зростанні відтворюваного контрольного об'єму, що приводить до взаємної компенсації додатних і від'ємних приростів для кожного з фіксованих мінімальних контрольних об'ємів. Друга частина висновку графічно проілюстрована на рис.3.6.

Проведені дослідження повніше розкривають особливості

функціонування дзвонових еталонних установок і сприяють вирішенню прикладних задач їх метрологічних досліджень. Отриманий алгоритм (3.16), (3.18), (3.19) надає можливість розраховувати похибку від зміни робочого тиску для будь-яких відтворюваних значень фіксованих і інтегральних контрольних об'ємів газу. Цим досягається розвиток відомих метрологічних моделей дзвонових еталонних установках, а його практична реалізація дозволяє підняти точність метрологічної атестації ЕУ, чим в кінцевому результаті досягається підвищення точності відтворення і вимірювання витрати і об'єму газу. Отриманий алгоритм (3.16), (3.18), (3.19) може бути використаний при обчисленні невизначеності від зміни робочого тиску в дзвонових еталонних установках.

### **3.3 Дослідження впливу точності виготовлення і монтажу вузлів дзвонових еталонних установок на їх метрологічні характеристики**

Можливість введення поправки з метою вилучення похибки  $\Theta_{\Delta V}$  від непостійності рівня замкової рідини, обґрунтовує доцільність метрологічного аналізу кількісного визначення цієї поправки, оскільки вона зумовлює виникнення похибки  $\delta_{\Delta V}$  від приросту контрольного об'єму, що в свою чергу визначається точністю виготовлення вузлів дзвонових еталонних установок, зокрема дзвона і витіснювача. Ця обставина дотепер не врахована у проаналізованих і відомих автору програмах метрологічної атестації дзвонових еталонних установок і літературних джерелах щодо цього напрямку метрологічних досліджень.

Для кількісної оцінки похибки  $\delta_{\Delta V}$  для розрахунку  $\Delta V$  через параметри дзвонної еталонних установок, значення яких визначають прямим методом при метрологічній атестації установок. Такими параметрами будуть товщини стінок дзвона  $\varepsilon_D$  і зовнішнього циліндра витіснювача  $\varepsilon_B$  (вимірюються, наприклад, ультразвуковим товщиноміром), а також довжини кіл поверхонь зовнішньої стінки дзвона  $L_3$  і зовнішнього циліндра витіснювача  $L_4$  (вимірюються, наприклад, металеву рулеткою 3-го розряду). Використовуючи

загальновідомі геометричні формули для визначення розмірів довжини кола із врахуванням позначень можна записати:

$$R_2 = \frac{L_3}{2\pi} - \varepsilon_D, \quad (3.20)$$

$$\sigma = \frac{L_4 - L_3}{2\pi} - \varepsilon_B. \quad (3.21)$$

Підстановкою (3.20) і (3.21) отримуємо:

$$\Delta V = \frac{\varepsilon_D \cdot H}{4} (3L_3 - L_4 - 4\pi\varepsilon_D - 2\pi\varepsilon_B). \quad (3.22)$$

Враховуючи, що вираз (3.22) характеризує визначення  $\Delta V$  як результат опосередкованого вимірювання, то обчислимо його похибку у вигляді СКВ інструментальної похибки  $S_{\Delta V}$  визначення приросту контрольного об'єму. Розрахунок похибки при непрямих вимірюваннях стосовно виразу (3.24) може бути проведений за формулою:

$$S_{\Delta V} = \left[ \left( \frac{\partial \Delta V}{\partial H} \Delta H \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_D} \Delta \varepsilon_D \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta V}{\partial L_3} \Delta L_3 \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta V}{\partial L_4} \Delta L_4 \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_B} \Delta \varepsilon_B \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

де  $\Delta H$ ,  $\Delta \varepsilon_D$ ,  $\Delta \varepsilon_B$ ,  $\Delta L_3$ ,  $\Delta L_4$  - абсолютні значення похибок еталонних засобів, які застосовуються для метрологічної атестації дзвонової еталонної установки;  $\partial \Delta V / \partial H$ ,  $\partial \Delta V / \partial \varepsilon_D$ ,  $\partial \Delta V / \partial \varepsilon_B$ ,  $\partial \Delta V / \partial L_3$ ,  $\partial \Delta V / \partial L_4$  - функції впливу вимірюваних значень  $H$ ,  $\varepsilon_D$ ,  $\varepsilon_B$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  на результат опосередкованого вимірювання  $\Delta V$  відповідно.

Функції впливу визначаються шляхом диференціювання (3.22) відносно відповідних змінних і мають вигляд:

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial H} = \frac{\varepsilon_D}{4} (3L_3 - L_4 - 4\pi\varepsilon_D + 2\pi\varepsilon_B) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_D} = H \left( \frac{3}{4} L_3 - \frac{L_4}{4} - 4\pi\varepsilon_D + \frac{\pi}{2} \varepsilon_B \right) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial L_3} = \frac{3}{4} \varepsilon_D H, \quad \frac{\partial \Delta V}{\partial L_4} = -\frac{\varepsilon_D H}{4}, \quad \frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_B} = -\frac{\varepsilon_D \pi}{2} H \quad (3.26)$$

Чисельне дослідження функцій впливу показало знехтувально малий вплив (більше ніж на 2 порядки) всіх складових порівняно з функцією  $\partial \Delta V / \partial \varepsilon_D$ . Подальше її чисельне дослідження показало можливість нехтування у виразі (3.25) доданками з параметрами  $\varepsilon_D$  і  $\varepsilon_B$ , що дозволило записати

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon} \approx \frac{H}{4} (3L_3 - L_4) \quad (3.27)$$

Таким чином можна подати вираз (4.27) як

$$S_{\Delta V} \approx \frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_D} \Delta \varepsilon_D, \quad (3.28)$$

де  $\partial \Delta V / \partial \varepsilon_D$  визначається із (3.27).

Похибку  $\delta_{\Delta V}$  обчислення приросту контрольного об'єму розрахуємо за формулою:

$$\delta_{\Delta V} = \frac{S_{\Delta V}}{V_K} \cdot 100, \% . \quad (3.29)$$

Спільний розв'язок виразів (3.27)-(3.29) приводить до такої формули:

$$\delta_{\Delta V} = \frac{\pi(3L_3 - L_4)}{L_3^2} \cdot \Delta \varepsilon_D \cdot 100, \% . \quad (3.30)$$

Для чисельного аналізу (3.30) запишемо довжини кіл  $L_3$  і  $L_4$  через введені в другому розділі безрозмірні коефіцієнти  $K_{CD} = \varepsilon_D / R_2$ ;  $K_{3B} = \sigma / R_2$ :

$$L_3 = 2\pi(R_2 + \varepsilon_D) = 2\pi R_2(1 + K_{CD}) \quad (3.31)$$

$$L_4 = 2\pi(R_2 + \varepsilon_D + \sigma + \varepsilon_B) = 2\pi R_2(1 + K_{CD} + K_{3B}) \quad (3.32)$$

Тому формула (3.30) з врахуванням (3.31) і (3.32) набуває такого вигляду:

$$\delta_{\Delta V} = \frac{2 + K_{CD} - K_{ЗВ}}{2(1 + K_{CD})^2} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{R_2} \cdot 100, \% \quad (3.33)$$

Як видно із (3.34) значення похибки  $\delta_{\Delta V}$  буде визначатися не тільки значеннями безрозмірних параметрів, але і конкретним геометричним розміром (радіусом дзвона) і абсолютною похибкою вимірювання товщини його стінки. Тому чисельний аналіз цієї похибки проведений для трьох конкретних значень радіусів дзвона (500, 1000 і 1500мм) за умови застосування найбільш точного вітчизняного ультразвукового товщиноміра УТ-111 з абсолютною похибкою вимірювання  $\pm 0,01$ мм. Результати аналізу (рис.3.7) свідчать, що невилучена систематична похибка (НСП) обчислення приросту контрольного об'єму не перевищує  $\pm 0,002\%$  для найбільш несприятливого набору параметрів дзвонових еталонних установок і суттєво зменшується при зростанні радіуса дзвона і ширини кільцевого зазору витіснювача. Водночас у випадку неправильного вибору або відсутності товщиноміра необхідної точності ця складова похибки може вирости на порядок, тобто до  $\pm(0,01...0,02)\%$ , що вже може суттєво вплинути на допустиму похибку еталонних установок. З поданих графіків на рис.3.7 також видно незначний вплив на похибку  $\delta_{\Delta V}$  зміни товщини стінки дзвона, тобто параметра  $K_{CD}$ , при фіксованому значенні радіуса дзвона.

Наведений метрологічний аналіз похибки  $\delta_{\Delta V}$  доповнимо міркуванням, що поданий їй метрологічний аналіз стосувався тільки розрахунку НСП, яке визначається метрологічні характеристики застосовуваних ЗВТ. За реальних умов метрологічної атестації дзвонових еталонних установок необхідно враховувати ще і похибку знаходження СКВ багаторазових вимірювань параметрів  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $\varepsilon_D$ ,  $\varepsilon_B$ , яка повинна розраховуватись за алгоритм мами (3.23) і (3.29) з відмінністю в тому, що замість абсолютних похибок використовуваних ЗВТ приймаються розраховані значення СКВ за результатами багаторазових вимірювань кожного параметра. Цей фактор також зумовлює деяке зростання похибки дзвонових еталонних установок і буде залежати від метрологічних

характеристик використаних ЗВТ і фахового рівня спеціалістів з експлуатації даного вимірювального обладнання.

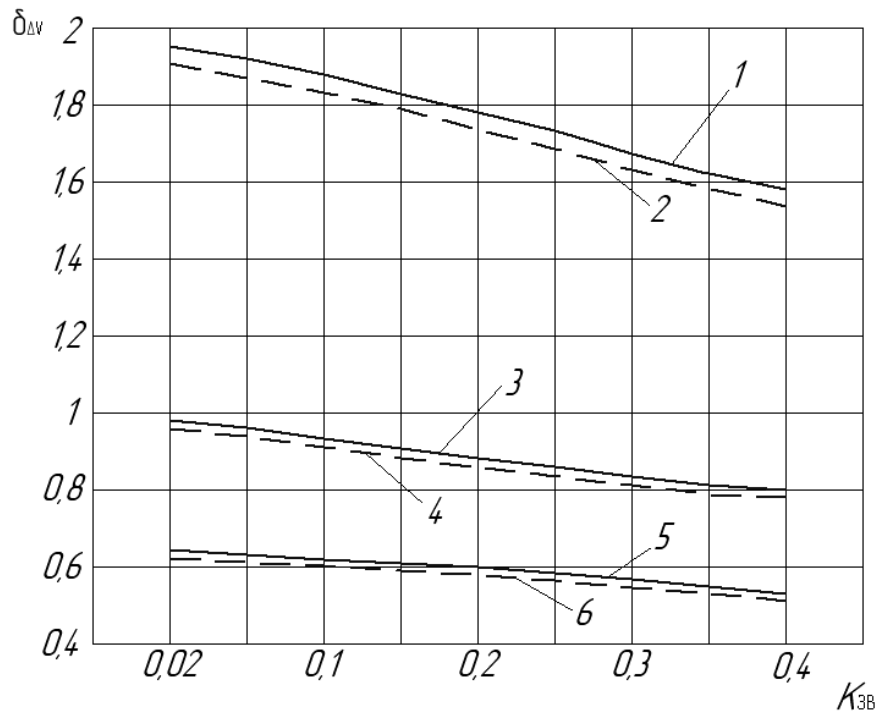
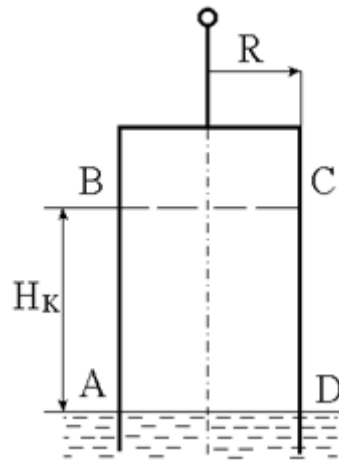


Рисунок 3.7 – Результати чисельного моделювання похибки  $\delta_{\Delta V}$ :

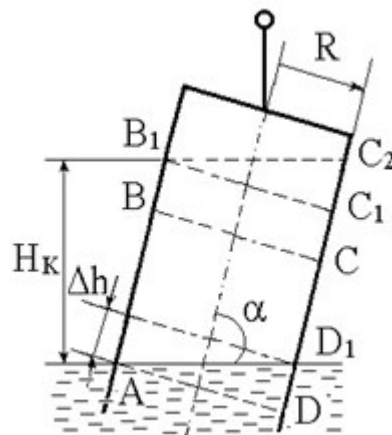
- 1 –  $R_2=500; K_{сд}=0,003$ ; 2 –  $R_2=500; K_{сд}=0,02$ ;  
 3 –  $R_2=1000; K_{сд}=0,003$ ; 4 –  $R_2=1000; K_{сд}=0,02$ ;  
 5 –  $R_2=1500; K_{сд}=0,003$ ; 6 –  $R_2=1500; K_{сд}=0,02$

Одним із факторів впливу точності монтажу вузлів дзвонових ЕУ на збільшення їх похибки є відхилення дзвона від вертикального положення. Незважаючи на те, що еталонні установки конструктивно містять вузли стабілізації його вертикального положення, які сприяють досягненню високої точності еталонних установок. При недостатньо якісному регулюванні чи спрацюванні можуть спричинити погіршення роботи установки, оскільки викликають появу участків локального підвищеного тертя, і як наслідок зміну тиску під дзвоном. Крім того, з метою підвищення стабільності відтворюваних витрат газу в ряді випадків доцільною є відмова від примусової механічної вертикалізації дзвона, що може викликати його функціонування в нахиленому положенні. Ці обставини обґрунтовують необхідність кількісної оцінки впливу

нестабільності вертикального положення дзвона (рис.3.8) на складові похибки еталонних установок.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Схема витіснення контрольних об'ємів газу при вертикальному (а) і нахиленому (б) положеннях дзвона.

Проведена оцінка значень витіснюваних контрольних об'ємів дзвона при роботі його в однаково нахиленому (перший режим) і змінному нахиленому (другий режим) положеннях. Встановлено, що при першому режимі додаткова похибка  $\delta_{V1}$  пропорційна до об'єму циліндра з фронтальним перерізом  $BB_1C_1C$  (рис.3.8, б), а при другому – похибка  $\delta_{V2}$  пропорційна об'єму зрізаного циліндра з фронтальним перерізом  $B_1C_2C_1$  (рис.3.8, б). Для кількісної оцінки складових

похибки еталонних установок  $\delta_{V1}$  і  $\delta_{V2}$  для розглянутих умов їх функціонування отримані такі залежності:

$$\delta_{V1} = (\text{csc}\alpha - 1) \cdot 100, \% \quad (3.34)$$

$$\delta_{V2} = (R \cdot \text{ctg}\alpha / H_K) \cdot 100, \% \quad (3.35)$$

де  $R$  – радіус внутрішнього перерізу дзвона,  $H_K$  – висота дзвона, яка відповідає відтворюваному контрольному об'єму  $V_K$ ;  $\alpha$  – кут нахилу твірної дзвона до поверхні рідини.

Проведені дослідження повніше розкривають особливості функціонування дзвонових еталонних установок і сприяють вирішенню прикладних задач їх проектування з метою підвищення точності відтворення об'єму та витрати газу. Отримані алгоритми надають можливість кількісно оцінити похибку від зміни робочого тиску дзвонових еталонних установок, а також від зміни рівня замкової рідини кільцевого витіснювача і неточності вертикального положення дзвону. Практична реалізація отриманих алгоритмів дозволяє підвищити точність метрологічної атестації еталонних установок, а також здійснювати обчислення складових невизначеності еталонних установок від зміни досліджених факторів. Цим досягається розвиток відомих дзвонових еталонних установок.

### 3.4 Розрахунок похибок еталонних дзвонових установок

Розрахунок невилученої систематичної похибки (НСП) та середньоквадратичного відхилення (СКВ) відтворення одиниці об'єму газу.

Розрахунок НСП та СКВ робочого еталона необхідно вести згідно ГОСТ 8.381- 80, згідно якого:

– НСП відтворення, передачі еталоном одиниці фізичної величини обчислюють за формулою:

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial Y_i} \Delta Y_i \right)^2}, \quad (3.36)$$

де  $K$  – коефіцієнт залежності НСП від вибраної ймовірності при їх рівномірному розподілі,  $\Delta Y_i$  – НСП вимірювання величини  $Y_i$ ;  $\frac{\partial F}{\partial Y_i}$  – коефіцієнти впливу величини  $Y_i$  на величину  $F$ , що виражається частковою похідною функції:

$$F = f(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n). \quad (3.37)$$

– СКВ відтворення, передачі еталоном одиниці фізичної величини обчислюють за формулою:

$$S = \sqrt{\left( \frac{\partial F}{\partial Y_1} \right)^2 S_1^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial Y_2} \right)^2 S_2^2 + \dots + \left( \frac{\partial F}{\partial Y_n} \right)^2 S_n^2}, \quad (3.38)$$

де  $S_{x1} \dots S_{xn}$  – СКВ результатів вимірювань величин  $Y_1 \dots Y_n$  і при прямих вимірювань з багатьма спостереженнями обчислюють за формулою:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.39)$$

де  $Y_i$  – результат  $i$ -го спостереження,  $\bar{Y}$  – середнє арифметичне результатів вимірювань,  $n$  – число спостережень

Розрахунок НСП та СКВ передачі розміру одиниці об'єму газу.

Згідно закону газового стану, об'єм, що передається на вхід досліджуваного ЗВТ об'єму газу, обчислюють за формулою:

$$V = V_0 \cdot \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0}, \quad (3.40)$$

де  $V_0$ ;  $P_0$ ;  $T_0$  – значення об'єму, тиску та температури під дзвоном;  $V$ ;  $P$ ;  $T$

– значення об'єму, тиску та температури перед досліджуваним ЗВТ об'єму газу.

Для обчислення НСП та СКВ передачі розміру одиниці об'єму газу розраховують коефіцієнти впливу, що є похідними об'єму по змінним  $V_0$ ;  $P_0$ ;  $T_0$ ;  $P$ ;  $T$ .

$$\frac{\partial V}{\partial V_0} = \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0} = 1, \text{ при } P_0 = P \text{ і } T_0 = T \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial V}{\partial P_0} = \frac{V_0 \cdot T}{P \cdot T_0} = \frac{1}{P} \approx 0,000001, \text{ при } V_0 = 1 \text{ і } T_0 = T \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial V}{\partial P} = -\frac{V_0 \cdot P_0 \cdot T}{P^2 \cdot T_0} = -\frac{1}{P} \approx -0,000001, \text{ при } V_0 = 1 \text{ і } P_0 = P, T_0 = T \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T_0} = \frac{-V_0 \cdot P_0 \cdot T}{P \cdot T^2} = -\frac{1}{T_0} = -0,0034 \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \frac{V_0 \cdot P_0}{P \cdot T_0} = \frac{1}{T_0} = 0,0034 \quad (3.45)$$

НСП передачі розміру одиниці об'єму газу розраховують за наступною формулою:

$$\Theta_{IV} = \pm 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_0} \Theta_{BV}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_0} \Delta P_{PE}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \Delta P_{PE}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_0} \Delta T_{PE}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \Delta T_{PE}\right)^2}, \quad (3.46)$$

де –  $\Theta_{BV}$  – НСП відтворення одиниці об'єму газу,  $\Delta P_{PE}$ ,  $\Delta T_{PE}$  – похибки ЗВТ, що використовувались при атестації відповідних вимірювальних каналів.

СКВ передачі розміру одиниці об'єму газу розраховують за наступною формулою:

$$S_{IV} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_0}\right)^2 S_{BV}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_0}\right)^2 S_{P_0}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)^2 S_P^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_0}\right)^2 S_{T_0}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)^2 S_T^2 + \Delta^2_{V_{\Delta T}} + \Delta^2_{V_P}}, \quad (3.47)$$

Визначення СКВ та НСП відтворення одиниці об'ємної витрати газу НСП та СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу розраховують для мінімальної та максимальної витрат, що відтворюються робочим еталоном.

Об'ємну витрату газу в загальному вигляді обчислюють за формулою:

$$q = \frac{V}{t} \quad (3.48)$$

де  $V$  – об'єм газу,  $\text{м}^3$ ;  $t$  - час протікання даного об'єму газу за даної витрати, с.

НСП відтворення робочим еталоном одиниці об'ємної витрати газу

$$\Theta_{Bq} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot \Theta_{BV}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \Delta t_q\right)^2}, \quad (3.49)$$

де  $\frac{\partial q}{\partial V}$  та  $\frac{\partial q}{\partial t}$  – коефіцієнти впливу;  $\Theta_{BV}$  – НСП відтворення робочим еталоном одиниці об'єму газу,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta t_q$  – похибка вимірювання часу частотоміром-хронометром, с.

СКВ відтворення державним еталоном одиниці об'ємної витрати:

$$S_{Bq} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot S_t\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot S_{BV}\right)^2}, \quad (3.50)$$

де  $S_{BV}$  – СКВ відтворення робочим еталоном одиниці об'єму газу,  $\text{м}^3$ ;  $S_t$  – СКВ результатів вимірювання часу, с.

У формулах (3.49, 3.50) коефіцієнти впливу  $\frac{\partial q}{\partial V}$  та  $\frac{\partial q}{\partial t}$  обчислюють як похідні функції (3.48) за параметрами  $V$  і  $t$ :

$$\frac{\partial q}{\partial V} = \frac{1}{t}, \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{V}{t^2}. \quad (3.52)$$

Визначення СКВ та НСП передачі розміру одиниці об'ємної витрати газу.

НСП передачі розміру одиниці об'ємної витрати:

$$\Theta_{Пq} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot \Theta_{ПV}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \Delta_{tq}\right)^2}, \quad (3.53)$$

СКВ передачі розміру одиниці об'ємної витрати газу:

$$S_{Пq} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot S_t\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial V} \cdot S_{ПV}\right)^2}, \quad (3.54)$$

Розрахунок сумарної похибки передачі розміру одиниці об'єму газу.

Сумарну похибку передачі розміру одиниці об'єму газу робочим еталоном обчислюють за формулою:

$$\delta_{ПV} = \frac{t_{\Sigma} \sqrt{S_{ПV}^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_{ПV}^2}}{V_{\kappa}} \cdot 100, \quad (3.55)$$

де  $S_{ПV}$  – СКВ передачі розміру одиниці об'єму газу, м<sup>3</sup>,  $\Theta_{ПV}$  – НСП передачі розміру одиниці об'єму газу, м<sup>3</sup>,  $V_{\kappa}$  – контрольний об'єм робочого еталона, м<sup>3</sup>;  $t_{\Sigma}$  – квантільний множник, який визначається за формулою:

$$t_{\Sigma} = \frac{\Theta + t \cdot S}{S_{\Theta} + S}, \quad (3.56)$$

де  $t$  – квантіль нормального розподілу для відповідної довірчої ймовірності (для  $P=0,95$   $t = 1,96$ ).

Похибка (3.55) розраховується для всіх контрольних об'ємів, що відтворюються робочим еталоном. За кінцеве значення сумарної похибки передачі розміру одиниці об'єму приймається її максимальне значення.

Розрахунок сумарної похибки передачі розміру одиниці об'ємної витрати газу.

Сумарну похибку передачі розміру одиниці об'ємної витрати газу робочим еталоном обчислюють за формулою:

$$\delta_{Пq} = \frac{t_{\Sigma} \sqrt{S_{Пq}^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_{Пq}^2}}{q} \cdot 100, \quad (3.57)$$

де  $S_{Пq}$  – СКВ передачі розміру одиниці об’ємної витрати газу, м<sup>3</sup>/год,  $\Theta_{Пq}$  – НСП передачі розміру одиниці об’ємної витрати газу, м<sup>3</sup>/год,  $q$  – значення витрати, м<sup>3</sup>/год. Похибка (3.57) розраховується для максимальної та мінімальної витрат, які відтворюються державним еталоном. За кінцеве значення сумарної похибки передачі розміру одиниці об’ємної витрати приймається її максимальне значення.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі здійснено аналіз видів і області застосування еталонних витратовимірювальних установок, зокрема наведено класифікацію зразкових засобів вимірювання витрати газу. Описано принцип дії витрато вимірювальних установок, вказано їх переваги та недоліки.

Розроблено технічні рішення дзвонових установок для покращення їх метрологічних характеристик. Наведено функціональну схему еталонної дзвонової установки та її математичну модель відтворення об'єму газу. Досліджено конструкції і алгоритму функціонування вагового компенсатора дзвонової установки. Також, в роботі проаналізовано вплив зміни рівня замкової рідини на похибку дзвонової установки.

В роботі проведений аналіз метрологічних моделей еталонних витрато вимірювальних. Досліджено алгоритми визначення похибки від непостійності тиску та впливу точності виготовлення дзвонових еталонних установок. В роботі наведено алгоритм розрахунку похибок еталонних дзвонових установок.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»: за станом на 11.02.98 р. № 113: у редакції від 15.06.04 р. № 1765-IV / Відомості Верховної Ради України. Офіц. вид. К.: Парлам. вид-во. 2004. №37. С.1434-1453.
2. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу: ДСТУ 3383: 2007.– [Чинний від 2007-07-01; на заміну ДСТУ 3383-96]. К.: Держспоживстандарт України, 2007. III, 9 с. – (Національний стандарт України).
3. Цюцюра В.Д. Метрологія та основи вимірювань / В.Д. Цюцюра. - Навч. посібн., К., "Знання -Прес", 2003.
4. Результати міждержавних звірень національних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. Вимірювання витрати та кількості газу: матеріали Всеукр. наук.- техн. конф., [Івано-Франківськ], ІФНТУНГ, Факел, 2007. 7с.
5. Облік природного газу: довідник / М. П. Андріїшин, О. М. Карпаш, О. Є. Середюк [та ін.]; за ред. проф. С. А. Чеховського. Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. 180 с.
6. Бродин І.С., Середюк О.Є. Дзвонова витратовимірювальна установка /Прспект МВССО УРСР: Івано-Франківський інститут нафти і газу.- Київ: Реклама, 1989.- 4с.
7. ДСТУ 3231-95. Метрологія. Еталони державні та вторинні одиниць вимірювань. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування.
8. Середюк О.Є. Дзвові повірочні установки для побутових і промислових засобів вимірювання витрати / О.Є. Середюк, Д.О. Середюк // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. Володимира Даля. 2006. №1(95). С.203-207.
9. Середюк О.Є. Аналіз впливу робочого тиску еталонних дзвонових витратовимірювальних установок на їх метрологічні характеристики / О.Є.

Середюк, С.А. Чеховський, Б.І. Прудніков // Методи та прилади контролю якості. 2001. 7. С. 111–116.

10. Домницький Р. Метрологічний центр НАК „Нафтогаз України ” // Метрологія та прилади. -2007. - №1. - С.14-19.

11. Дорожовець М. Р. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб. / М. Р. Дорожовець. – Л. : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 656 с.

12. Петришин І.С., Безгачнюк Я.В., Середюк Д.О. Дослідження характеристик робочих еталонів об’єму газу роторного типу Приладобудування 2006: стан і перспективи: 5-а наук.– техн. конф., 25–26 квітня 2006 р., м. Київ: зб. наук. праць. Київ: ПБФ, НТУУ “КПІ”, 2006. С. 292–293.

13. Радиш С.В. Установки для повірки промислових лічильників газу ПУЛГ-3 і ПУЛГ-7. Вимірювання витрати та кількості газу: 5-а всеукр. наук.-техн. конф., 23–25 жовтня 2007 р, Івано-Франківськ: матеріали конф. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел. 2007. С.28–29.

14. Метрологія. Еталонні лічильники газу. Типова програма та методика державної метрологічної атестації./ І.Петришин, Я.Безгачнюк, Д.Середюк. – [Чинна від 2006-05-18. Наказ ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» №171 від 18.05.2006р.]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», 2006. – I, 11с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Методика).

15. Середюк О.Є. Метрологічне забезпечення відтворення і передавання одиниць об’єму та об’ємної витрати природного газу: дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: Спец. 05.01.02 – Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення – Івано-Франківськ, 2009.- 384с.

16. Середюк О.Є. Математичне моделювання якісно-інформативних процесів дзвонових витратовимірювальних установок / О.Є. Середюк // Методи та прилади контролю якості. – 1997. – № 1. – С.29–34.

17. Вошинський В.С. Спосіб компенсації виштовхувальної сили замкової рідини розділювача в робочих еталонах об’єму газу дзвонового типу /

В.С.Вощинський, В.В. Вощинський // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №9. – С.44–45.

18. Середюк О.Є. Аналіз впливу робочого тиску еталонних дзвонових витратовимірювальних установок на їх метрологічні характеристики / О.Є. Середюк, С.А. Чеховський, Б.І. Прудніков // Методи та прилади контролю якості. – 2001. – № 7. – С. 111–116.

19. Пат. 52765 С2 Україна, МПК 7 G 01 F 25/00. Дзвонова установка для градування 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. – № 2000020812; заявл. 15.02.00; опубл. 15.01.03, Бюл. №1.

20. Середюк О.Є., Чеховський С.А. Новітні технології метрологічного забезпечення обліку газу як елемент енергозбереження // Нафтогазова енергетика. – 2006. - №1. – С.84-89.

21. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 92 с. (Державний стандарт України).

22. Richardson W.B., How to field test large gas meters //Pipe Line Ind.-1973.-Vol.39, №1.- P.34-36.

23. Heeres J. Test Installation for Gas Meters with a Maximum Capacity of 12000 m<sup>3</sup>/h //Bull. Organis. Int. Metrol. Leg.-1985.- №98.- P.20-28.

24. Державний спеціальний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу / І.С.Бродин, І.С.Петришин, А.Г.Бестелесний, П.І.Дикий // Український метрологічний журнал. – 1997. – №3. – С.31–34.

25. ДСТУ EN12480:2006. (EN 12480:2002:IDT). Лічильники газу роторні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. VI, 25с. (Національний стандарт України).

26. Kemp L.J. Large-Volume Gas Meter Test at Newberry //Pipe Line Ind.- 1968.-Vol.28, №6.- P.50-50.
27. Dijstelbergen H.H. Experiences with high pressure gas meter calibration: Congr. Mesucora 79, Secc. №9, 12dec., 1979.- P.19-27.
28. Середюк О.Є. Методологія побудови еталонів передавання одиниці об'єму природного газу / О.Є. Середюк // Український метрологічний журнал. – 2007. – №1. – С.38-41.
29. ДСТУ EN12261:2006. (EN 12261:2002:ITD). Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. V, 33с. (Національний стандарт України).