

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

Присяжнюк Тарас Ігорович

УДК 006.91:681.122

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИЧНИХ ЗАСАД
ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВІДТВОРЕННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ
В ДІАПАЗОНІ ВІД 0,001 ДО 0,016 М³/ГОД

Спеціальність 05.01.02 -
"Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення"

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

*Цей примірник дисертації
ідеальної ва змістом з
іншими примірниками дисертації,
що подані в аналізі* Науковий керівник: доктор технічних
D20.052.03. наук, професор Петришин І. С.

Восемий секретар *М. Драмчук*
дд. 11.12

Підпис *М. Драмчука*
посвідчено

Івано-Франківськ – 2013

Е.В. Присяжнюк
22.05.12

d462



ЗМІСТ

	Арк.
ВСТУП.....	5
1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ МІКРОВИТРАТ В ДІАПАЗОНІ ВІД $0,277 \cdot 10^{-6}$ ДО $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с (1-16 л/год).....	12
1.1 Аналіз сучасних технічних засобів, які використовуються для вимірювання та відтворення мікровитрат газу	12
1.1.1 Сучасний стан технічного забезпечення вимірювання мікровитрат газу	12
1.1.2. Теплові витратоміри.....	14
1.1.3. Плівкові витратоміри.....	23
1.1.4. Витратоміри постійного перепаду тиску.....	25
1.1.5. Витратоміри змінного перепаду тиску.....	29
1.2 Аналіз технічної основи метрологічного забезпечення відтворення мікровитрат.....	37
1.2.1. Лічильники барабанного типу.....	37
1.2.2. Критичні сопла.....	39
1.2.3. Дзвонові установки.....	41
1.2.4. Еталонні установки еквівалентного витіснення.....	43
1.3 Аналіз нормативної основи метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат в Україні та інших країнах та перспективи його вдосконалення.....	45
1.4 Обґрунтування напрямку дослідження.....	48
1.5 Висновки до першого розділу.....	49
2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ $0,277 \cdot 10^{-6}$ - $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с (1-16 л/год)	50
2.1 Дослідження конструктивних особливостей ламінарних	50

виратомірів.....	
2.2 Дослідження способів введення температурної компенсації ламінарного виратоміра.....	53
2.3 Розроблення математичної моделі рівняння вимірювань термокомпенсованого ламінарного виратоміра та його конструктивних параметрів.....	57
2.4 Експериментальні дослідження термокомпенсованого ламінарного виратоміра.....	62
2.4.1 Планування експерименту.....	62
2.4.2 Перевірка адекватності моделі.....	71
2.4.3 Визначення параметрів оптимізації.....	73
2.5 Висновки до другого розділу.....	77
3. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДТВОРЕННЯ МІКРОВИТРАТ В ДІАПАЗОНІ $0,277 \cdot 10^{-6}$ - $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с (1-16 л/год) ...	78
3.1 Теоретичні основи метрологічного забезпечення мікровитрат.....	78
3.1.1. Розширення діапазону відтворюваних витрат вторинного еталона об'єму і об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08.....	78
3.1.2. Метод сумування потоків еталонних витрат.....	88
3.2 Метрологічний аналіз та експериментальні дослідження установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати.....	89
3.3 Метрологічний аналіз ламінарного виратоміра.....	94
3.4 Висновки до третього розділу.....	97
4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ТА МЕТОДИЧНОЇ БАЗИ ВИМІРЮВАННЯ ТА ВІДТВОРЕННЯ МІКРОВИТРАТ В ДІАПАЗОНІ $0,277 \cdot 10^{-6}$ - $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с (1-16 л/год)	99
4.1 Розробка технічної бази відтворення мікровитрат - калібратора витрати.....	99
4.2 Практична реалізація робочого еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м ³ /с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с.....	105

4.3 Розробка нормативної бази метрологічного забезпечення	
мікровитрат.....	110
4.3.1. Розробка програми та методики метрологічної атестації установки еквівалентного витіснення в діапазоні витрат $0,277 \cdot 10^{-6}$ - $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с.....	110
4.3.2. Розробка нормативних документів.....	114
4.4 Впровадження результатів досліджень.....	120
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	120
ВИСНОВКИ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ.....	138
Додаток А. Повірочні схеми ЗВТ об'єму та об'ємної витрати газу інших країн.....	139
Додаток Б. Програма мікроконтролера калібратора витрати.....	141
Додаток В. Повідомлення про розроблення проекту національного стандарту в Україні.....	149
Додаток Г. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в ТОВ ІВФ «Темпо»	150
Додаток Д. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»	151
Додаток Е. Робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м ³ /с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с. Програма та методика державної метрологічної атестації.....	152
Додаток Є. Витратоміри газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м ³ /с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с. Програма і методика державної метрологічної атестації.....	168
Додаток Ж. Протокол дослідження установки еквівалентного витіснення в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м ³ /с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с	177

ВСТУП

Вимірювання витрат газів в діапазоні від $0,277 \cdot 10^{-6}$ до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с, або від 0,001 м³/год до 0,016 м³/год (далі мікровитрат) є актуальним питанням, проте супроводж ується певними конструктивними та технологічними труднощами, які не дозволяють використовувати в даному діапазоні прилади, що традиційно застосовуються для більших витрат. Велика кількість обмежень, з якими стикаються конструктори витратомірів для вимірювання мікровитрат, не дозволяє досягнути таких показників якості, як для витратомірів, розрахованих на більші витрати. Тому в даний час як за кордоном, так і в Україні активно розробляються нові методи та прилади, а також оптимізуються існуючі для підвищення точності і динамічного діапазону вимірювання[1].

Стосовно вимірювання мікровитрат газів у нафтогазовій промисловості можна стверджувати про наявність потреби у вимірюваннях порогу чутливості побутових лічильників газу, вимірювання витоку газу при перевірці герметичності об'єктів, що знаходяться під тиском, повірки ЗВТ мікровитрат газу закордонного виробництва. Вирішення цих потреб вимагає створення засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) з заданими метрологічними характеристиками, і обов'язкового створення їх метрологічного забезпечення.

Актуальність теми.

Вимірювання витрат газів в діапазоні від $0,277 \cdot 10^{-6}$ до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с, або від 1 до 16 л/год (далі мікровитрат) необхідно при проведенні метрологічної атестації газоаналітичних засобів вимірювальної техніки, при виготовленні газових сумішей, в технологічних процесах наплення та епітаксії, при повірці та калібруванні ротаметрів, а також при повірці побутових лічильників газу з метою визначення порогу їх чутливості. Крім того, має місце тенденція до використання мікропроб на етапі науково-дослідної роботи для контролю і управління потоками речовини в процесах, що протікають на мікро- та

нанорівневих структурах. Малі витрати газів контролюються при автоматизації технологічних процесів в хімічній, фармацевтичній та електронній галузях промисловості.

У зв'язку з постійним зростанням вартості природного газу, а також тим, що значна частина його споживання припадає на комунально-побутову сферу, контроль порогу чутливості побутових лічильників газу набуває важливого значення. Значення порогу чутливості для побутових лічильників газу знаходиться в діапазоні витрат від 0,001 м³/год до 0,016 м³/год. При цьому основна кількість відмов лічильників газу спричиняється підвищенням похибки вимірювання на нижній границі діапазону вимірювання або підвищенням значення порогу чутливості, який контролюється витратомірами мікровитрат.

Одним з факторів енергетичної безпеки є і точний облік природного газу в побутовій сфері, де існує тенденція до поступової заміни централізованого опалення на індивідуальне. Враховуючи це, комунально-побутова сфера обліку природного газу буде мати тенденцію до збільшення частки споживання природного газу, особливо враховуючи тенденції до заміни газу як палива у централізованих котельнях на інші види палива, а також зменшення споживання природного газу промисловістю України. Цей факт, а також постійно зростаюча вартість природного газу сприяє постійному підвищенню вимог до ЗВТ та їх метрологічного забезпечення для оцінювання метрологічних характеристик побутових лічильників газу при повірці, що неможливо без дослідження їх на мікровитратах.

В умовах глобалізації економіки за умови відсутності ЗВТ мікровитрат власного виробництва відбувається насичення ринку приладами закордонного виробництва. Це спричиняє погіршенню торгівельного балансу України та виникненню залежності споживачів приладів від закордонних виробників та митного законодавства, а також збільшенню виробничих витрат, оскільки на даний момент існує об'єктивна необхідність у таких приладах при відсутності їх власного виробництва. Крім того, такі прилади на даний момент метрологічно не забезпечені. Питання вимірювання мікровитрат є предметом

дослідження як в Україні, так і за кордоном. Такими дослідниками, як Теплюх З.М., Пістун Є.П., Ділай І.В., Парнета О.З., Альвестеффер В., Делажу П., Жерар М. активно розробляються нові методи та прилади, а також оптимізуються існуючі для підвищення їх точності і динамічного діапазону вимірювання. Разом з тим аналіз сучасних закордонних та вітчизняних методів і засобів вимірювання мікровитрат показав, що незважаючи на значне розмаїття застосовуваних принципів, вони, як правило, не забезпечують сукупності високих метрологічних та технічних характеристик, що дозволило б їх застосування в якості еталонного обладнання.

Таким чином, розв'язання завдання метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат газів у діапазоні від $0,277 \cdot 10^{-6}$ до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с підвищить точність та достовірність вимірювань, дозволить конструювати прилади з високими метрологічними характеристиками, які можуть використовуватися в якості еталонних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких знайшли відображення в дисертаційній роботі, виконувались відповідно до плану навчання в аспірантурі на кафедрі "Інформаційно-вимірювальної техніки" Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) та на державному підприємстві "Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації" згідно з тематикою науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт у сфері метрології еталонної бази за темами: "Державна програма розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки" (ДРН 0106U006782), "Створення вторинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні витрат від $1,11 \cdot 10^{-3}$ м³/с до $2,77 \cdot 10^{-1}$ м³/с", "Створення вторинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні витрат від $1,38 \cdot 10^{-2}$ м³/с до $6,94 \cdot 10^{-1}$ м³/с". Автор був відповідальним виконавцем цих робіт.

Мета роботи полягає у вирішенні важливого завдання у галузі метрології – підвищення точності і забезпеченні єдності та достовірності вимірювання мікровитрат газу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку засобів вимірювання мікровитрат, оцінити можливості підвищення метрологічних характеристик ЗВТ мікровитрат, розробити витратомір для діапазону витрат від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ з класом точності 0,5.

2. Удосконалити існуючі методи відтворення мікровитрат газу в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$.

3. Розробити математичні моделі похибок вимірювання та відтворення мікровитрати за допомогою вдосконаленого витратоміра як складову наукової основи метрологічного забезпечення вимірювання та відтворення мікровитрат газу в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$.

4. Розробити та впровадити технічну основу метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат газу в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$

5. Розробити нормативну основу метрологічного забезпечення вимірювання та відтворення мікровитрат газу (методики державної метрологічної атестації витратомірів газу в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$)

6. Розробити зміну до ДСТУ 3336:2007 для розширення нижньої межі діапазону охоплених витрат до $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$

Об'єктом дослідження є процес вимірювання та відтворення мікровитрат газу.

Предметом дослідження є наукова, нормативна і технічна база метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат газу.

Методи досліджень. Для встановлення взаємозв'язків між витратою, зовнішніми факторами та результатом вимірювання використовувалась теорія ламінарного руху середовищ у капілярах Гагена-Пуазейля, статистичні методи,

метод регресійного аналізу, методи математичного моделювання, теорія планування експерименту. Розробка вторинного приладу здійснювалась з використанням схемотехніки та методів програмування мікроконтролерів. Для розробки метрологічного забезпечення відтворення мікровитрат застосовувалися математичні моделі еталонних установок еквівалентного витіснення.

Наукова новизна одержаних результатів визначається тим, що:

- вперше запропоновано спосіб компенсації температурної похибки ламінарного витратоміра шляхом використання в якості чутливого елемента коаксіальних трубок з різними коефіцієнтами лінійного розширення, що дає можливість створити термокомпенсований витратомір в діапазоні витрат від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ з класом точності 0,5;
- вперше одержано математичні моделі похибок термокомпенсованих ламінарних витратомірів як функції зміни тиску, температури та об'ємної витрати із застосуванням теорії планування факторного експерименту, що дає можливість спрогнозувати їх поведінку в реальних умовах роботи;
- знайшов подальший розвиток метод відтворення витрати газу на базі установок еквівалентного витіснення шляхом використання посудини Маріотта для стабілізації рівня рідини, що дозволило усунути один з найбільш суттєвих недоліків установок даного типу – нестабільність витрати за рахунок зміни рівня рідини;
- знайшов подальший розвиток метод стабілізації витрати рідини за допомогою посудини Маріотта, який вдосконалено шляхом повертання торця газовідної трубки у посудині на 180° вгору, що дало можливість точно задати фіксоване значення гідростатичного тиску;
- вперше розроблено математичну модель витрати установки еквівалентного витіснення з стабілізацією витрати за допомогою вдосконаленої посудини Маріотта, що дало можливість враховувати складові сумарної похибки від впливу зовнішніх факторів при метрологічній атестації установок.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розроблений термокомпенсований мікровитратомір, який пройшов апробацію в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» для перевірки чутливості лічильників газу;
2. Спроековано та виготовлено калібратор витрати в діапазоні від 0,001 м³/год до 0,016 м³/год для повірки робочих ЗВТ та визначення порогу чутливості побутових лічильників газу та впроваджено другий контур вторинного еталона об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08, що розширило нижню границю відтворення витрати до 0,001 м³/год;
3. Розроблено нормативні документи, які регламентують методики державної метрологічної атестації робочого еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с та витратомірів газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с;
4. Підготовлено зміну до ДСТУ 3383:2007 «Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу».

Особистий внесок здобувача. Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень здійснена автором самостійно. Інша частина отримана у співпраці з науковим керівником. Особисто автором:

- розроблено термокомпенсований витратомір з мікропроцесорним вторинним приладом [115]
- розроблено універсальний багатоканальний вторинний прилад для дослідження параметрів ламінарного витратоміра [114]

У роботах, опублікованих у співавторстві, використані результати, одержані здобувачем особисто, до яких належать: дослідження існуючих типів витратомірів з метою виявлення оптимального типу для подальших досліджень та новий метод термокомпенсації похибок вимірювання ламінарного витратоміра[95], метрологічний аналіз вимірювального ламінарного елемента [98], використання посудини Маріотта зі стабілізацією рівня у складі установки еквівалентного витіснення [87], розширення діапазону відтворюваних витрат вторинного еталона об'єму і об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08[103], експериментальні дослідження методом теорії планування експерименту[101],

розробка калібратора для повірки витратомірів газу в діапазоні від 0,001 м³/год до 0,016 м³/год[118], вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат газу в Україні[102], метрологічне обґрунтування застосування нормативних документів[129,130].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на четвертій всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (м. Івано-Франківськ, 2005), п'ятій всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (м. Івано-Франківськ, 2007), міжнародній науково-технічній конференції молодих учених «Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії» (м. Івано-Франківськ, 2008), шостій всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (м. Івано-Франківськ, 2009), першій міжнародній науково-технічній конференції пам'яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2011)» (м. Вінниця, 2011), одинадцятій міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи»(м. Київ, 2012).

Публікації. Результати досліджень, що викладені в дисертації, опубліковано в 17 наукових працях, з яких 9 статей (з них 2 статті одноосібно) у фахових наукових виданнях, які входять до переліку ДАК України, 2 нормативних документи України у галузі метрології, 6 публікацій тез науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 123 сторінки основного тексту, 38 рисунків, 6 таблиць, 7 додатків на 36 сторінках, списку використаних джерел із 130 найменувань на 14 сторінках.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ МІКРОВИТРАТ ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ ВІД $0,277 \cdot 10^{-6}$ ДО $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с

1.1 Аналіз сучасних технічних засобів, які використовуються для вимірювання та відтворення мікровитрат газу

1.1.1 Сучасний стан технічного забезпечення вимірювання мікровитрат газу

Сучасні технології вимірювання малих витрат знаходяться під пильною увагою широкого кола споживачів, що пред'являють все більш жорсткі вимоги до ефективності процесу вимірювання. До них можна віднести підприємства енергетичної, хімічної, медичної промисловості, автомобілебудування і т.д. Намагаючись максимально задовольнити ці вимоги, виробники приладів змушені підвищувати точність вимірювань з метою оптимізації технологічних процесів і збільшення їх продуктивності, застосовувати гнучкі методи виробництва при постійному зниженні витрат. В результаті підвищується надійність і зменшується вартість витратомірів, розвиток технологій вимірювання витрати [1].

Технічне забезпечення вимірювання мікровитрат витрат здійснюється за допомогою лічильників та витратомірів фірм Ritter, TeledyneHastings Instruments, Alicat, Meriam Instrument, Brooks, Flow Network, Aalborg Instruments & Controls, Inc., Sierra Instruments, Equflow, Vögtlin Instruments AG та ін. Вітчизняними виробниками практично не випускаються аналогічні прилади, в тому числі через відсутність їх метрологічного забезпечення в Україні. Проте, вітчизняні виробники повірочних установок, наприклад, фірма «Темпо», застосовують витратоміри закордонного виробництва для контролю чутливості побутових лічильників газу.

Для сучасних витратомірів мікровитрат закордонного виробництва характерно широке використання електроніки, наприклад, вбудовані вторинні

пристрої з цифровою обробкою даних, з передаванням даних по HART-протоколу, цифрові дисплеї (рис. 1.1).

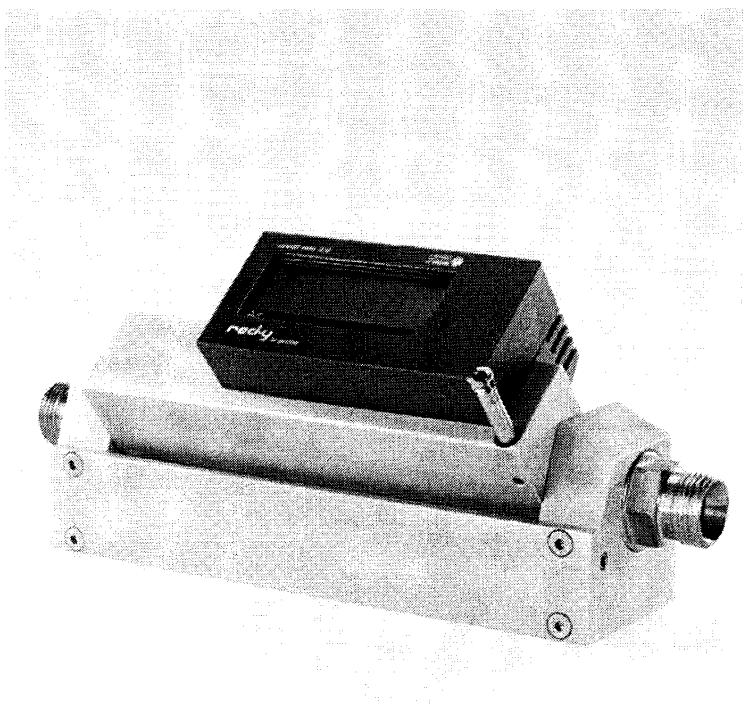


Рис. 1.1 – Тепловий мікровитратомір фірми Vögtlin

Незважаючи на те, що за останні роки збільшилося використання витратомірів, у яких застосовуються сучасні технології, традиційні витратоміри продовжують використовуватися і далі у випадках, де їхні характеристики відповідають поставленим завданням (рис. 1.2).

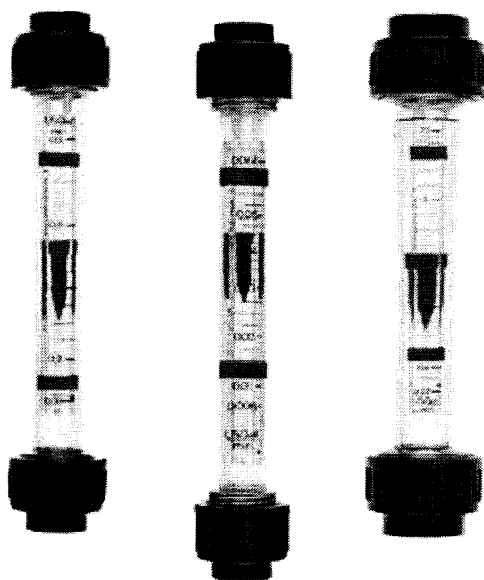


Рис. 1.2 – Ротаметри фірми Flow Network

Як і в інших галузях вимірювань, технічне забезпечення вимірювання мікровитрат інтенсивно розвивається. Це пов'язано з розвитком нанотехнологій, медичної техніки, хімічної промисловості, де постійно підвищуються вимоги до точності вимірювання витрати газів, які застосовуються у все більш складних технологічних процесах.

В Україні реальні вимірювання мікровитрат в лабораторних умовах, наприклад, в хроматографії, в основному здійснюються плівковими витратомірами[2] внаслідок їх конструктивної простоти, а також відсутність на даний момент доступних вітчизняних витратомірів іншого типу та їх нормативного забезпечення.

Основними видами витратомірів, застосовуваних для вимірювання мікровитрат газу в даний час є:

- теплові витратоміри
- плівкові витратоміри
- витратоміри постійного перепаду тиску
- витратоміри змінного перепаду тиску

1.1.2 Теплові витратоміри

Тепловими називаються витратоміри, які працюють на вимірюванні залежності теплового впливу на потік або тіло, що контактує з потоком від витрати[3].

За характером теплової взаємодії з потоком теплові витратоміри підрозділяються на:

- міточні
- калориметричні
- термоконвективні
- термоанемометричні.

Теплові витратоміри дуже широко застосовуються для вимірювання мікровитрат витрати газу і рідше для вимірювання витрати рідини. На даний момент проводяться дослідження теплових витратомірів з метою створення

приладів для специфічних умов застосування [4-11], що підтверджує їх перспективність.

Існує багато різновидів теплових витратомірів, що розрізняються способом нагрівання, розташуванням нагрівача (зовні або всередині трубопроводу) і характером функціональної залежності між витратою і вимірюваним сигналом. Основний спосіб нагрівання - електричний омичний[3]. При електричному омичному нагріванні в калориметричних нагрівач розташований всередині, а в термоконвективних - зовні труби. У калориметричних і термоконвективних витратомірів вимірюється різниця температур газу або рідини (при постійній потужності нагрівання) або ж потужність при сталій різниці температур. У термоанемометрів вимірюється опір R нагрівача, (при постійній силі струму) або ж сила струму (при $R = \text{const}$). Першими тепловими приладами були термоанемометричні для вимірювання місцевих швидкостей потоків, потім калориметричні витратоміри із внутрішнім нагріванням. Пізніше стали розроблятися термоконвективні витратоміри. Завдяки зовнішньому розташуванню нагрівача вони знаходять все більш широке застосування. Вони застосовуються для вимірювання витрати головним чином у трубах невеликого діаметра від 0,5-2,0 до 100 мм.

Калориметричні і термоконвективні витратоміри вимірюють масову витрату за умови незмінності теплоємності вимірюваної речовини, що є їхньою перевагою. Інша перевага термоконвективних витратомірів - відсутність контакту з вимірюваною речовиною. Недолік їх - більша інерційність. Для поліпшення швидкодії застосовують коригувальні схеми, а також імпульсне нагрівання. На відміну від інших теплових витратомірів термоанемометри досить малоінерційні. Приведена похибка термоконвективних витратомірів звичайно лежить у межах $\pm 1,5\%$. У калориметричних витратомірів вона менше і дорівнює $\pm(0,3-1)\%$. Ці відмінності між тепловими витратомірами різних типів вимагають проведення детального аналізу кожного з них.

Міточні витратоміри

Міточними називають витратоміри, принцип дії яких полягає у на вимірі часу переміщення небудь характерної частини (мітки) потоку на контрольній ділянці шляху [6].

Мітку в потоці створюють, як правило, імпульсним нагрівачем[5]. Відповідно різні будуть пристрої для створення мітки і її детектування при проходженні нею контрольної ділянки шляху можуть бути різного типу. У більшості інших випадків мітка утворюється в самому потоці без введення сторонньої речовини. Міточні витратоміри - прилади не безперервної, а дискретної дії, але при високій частоті утворення міток можна практично стверджувати про безперервне вимірювання витрати. В основному міточні витратоміри застосовують не в якості робочих приладів, а для лабораторних і дослідних робіт, і, зокрема при градуюванні і повірці інших витратомірів.

Міточні витратоміри можуть бути з одним або двома детекторами мітки. У першому випадку контрольна відстань вважається відстанню від місця вводу мітки до детектора, у другому - між двома детекторами.

Існують витратоміри, у яких часовий інтервал підтримується постійним шляхом автоматичного переміщення одного з детекторів і зміни таким чином відстані, яку в цьому випадку буде вимірюваною величиною. У цьому випадку досягається лінійність шкали, але ускладнюється конструкція. Такі витратоміри не набули поширення.

Міточні витратоміри при постійній величині відстані можуть бути з постійною частотою утворення міток або з частотою, пропорційною швидкості потоку. У перших вимірюється час або величина, функціонально пов'язана з цим часом, наприклад зсув фаз, у других - частота генерацій міток. Чергова мітка створюється в момент, коли попередня детектується чутливим елементом. Тому період генерації міток дорівнює часу переміщення мітки на ділянці.

Вибір довжини контрольної ділянки залежить насамперед від фізичної природи мітки - тривалості її існування, а також від бажаних точності вимірювання та швидкодії. Мітки пошкоджуються внаслідок передачі тепла

навколишньому середовищу. Потрібно враховувати, що зі збільшенням довжини зростає точність вимірювання, але зменшується швидкодія. У більшості випадків слід віддати перевагу підвищенню точності[7].

Точність вимірювання витрати залежить не тільки від точності вимірювання часу, але також від точності визначення середньої площі поперечного перерізу трубопроводу між контрольними відмітками. У змонтованій труби точне вимірювання внутрішнього діаметру труби і оцінка її еліптичності не завжди можливі. У цьому випадку додаткова похибка в визначенні витрати може становити 1-2%[7]. Крім того, у деяких міток швидкість їх переміщення визначається не тільки швидкістю потоку, але залежить ще і від фізичних властивостей мітки. Наприклад, на швидкість їх переміщення впливає теплопровідність вимірюваної речовини[8].

Калориметричні витратоміри

Принцип дії калориметричних витратомірів полягає в застосуванні залежності середньомасової різниці температур потоку від потужності нагрівання[3]. Калориметричний витратомір складається з нагрівача, розташованого всередині трубопроводу, і двох термоперетворювачів для вимірювання температур до і після нагрівача. Термоперетворювачі розташовуються звичайно на рівних від нагрівача відстанях. Розподіл температур по обидві сторони від джерела нагрівання залежить від витрати речовини[3]. При відсутності витрати $Q_M = 0$ температурне поле симетричне, як це видно із кривої на рис. 1.3, б. З появою витрати ця симетрія порушується. В результаті спочатку з ростом витрати росте різниця температур ΔT (рис. 1.3, в). Але при достатньому збільшенні витрати Q_M температура T_1 стане постійною, рівною температурі речовини, що притікає, у той час як T_2 буде падати (крива III). При цьому різниця температур ΔT буде зменшуватися зі збільшенням витрати Q_M . Ріст ΔT при малих значеннях Q_M майже пропорційний витраті. Потім цей ріст уповільнюється і після досягнення максимуму кривої починається падіння ΔT за гіперболічним законом.

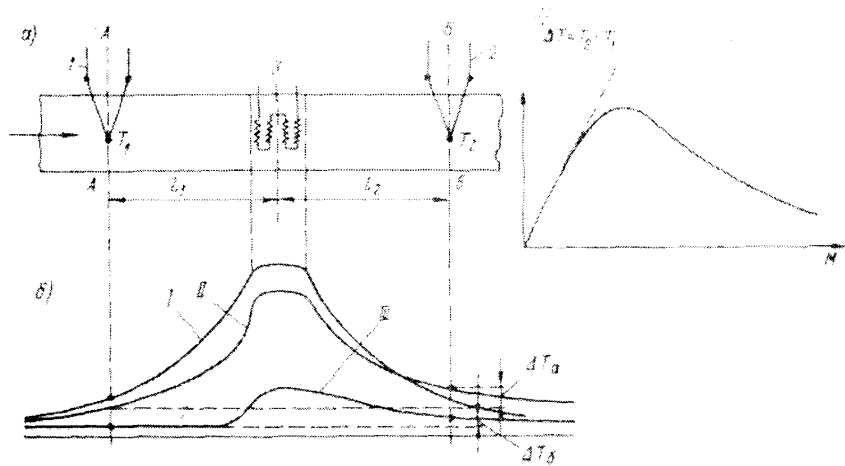


Рис.1.3. Калориметричний витратомір з внутрішнім нагріванням:

а - схема;

б - розподіл температур;

в - залежність ΔT від витрати Q_M при $W = \text{const}$

Калориметричні витратоміри з внутрішнім нагріванням не отримали поширення в промисловості через малу надійність роботи в експлуатаційних умовах нагрівачів і термоперетворювачів, розташовуваних всередині трубопроводу і підходять більше для дослідницьких і експериментальних робіт. Крім того, доцільно застосовувати їх як еталонні прилади для перевірки і градування інших витратомірів. При цьому особливо цінним є те, що вони вимірюють масову витрату, а самі можуть бути проградувані шляхом вимірювання потужності W і різниці температур ΔT . При похибці вимірювання $W \pm(0,1-0,15) \%$, а вимірювання ΔT значеннями $\pm(0,1-0,2) \%$, можна забезпечити вимірювання витрати з похибкою $\pm(0,3-0,5) \%$.

Калориметричні витратоміри із внутрішнім нагріванням працюють звичайно на спадній частині кривої і залежність між W і Q_M знаходиться з рівняння теплового балансу

$$W = kc_p \Delta T Q_M \quad (1.1)$$

звідки

$$Q_M = W / kc_p \Delta T \quad (1.2)$$

де c_p - теплоємність (для газу при постійному тиску) при температурі $(T_1 - T_2)/2$, Дж/кг·К; k - поправочний коефіцієнт, що враховує втрати тепла в навколишнє середовище, похибку вимірювання ΔT через нерівномірність розподілу температур по перетині трубопроводу і можливість підвищення T_1 за рахунок теплопередачі від нагрівача.

З рівняння (1.2) слідує, що при $W = \text{const}$ витрата Q_M обернено пропорційна ΔT , а значить, відповідна функція є гіперболою. При цьому чутливість витратоміра знижується з ростом витрати. Якщо ж автоматично підтримувати $\Delta T = \text{const}$ шляхом зміни потужності W нагрівання, то між Q_M і W буде пряма пропорційність, за винятком області малих швидкостей, де рівняння (1.2) незастосовно. Пропорційність між Q_M і W є перевагою даного методу, але конструкція витратоміра виявляється більш складною.

Градувати калориметричний витратомір можна шляхом вимірювання W і ΔT . Для цього треба оцінити значення коефіцієнта k і зробити його близьким до одиниці. Це досягається ефективною теплоізоляцією тієї ділянки труби, де розташований нагрівач, а також невисокою температурою нагрівача. Крім цього, необхідно забезпечити правильне вимірювання середньомасової різниці температур ΔT . Для цього як нагрівач, так і терморезистори для вимірювання T_1 і T_2 виконують таким чином, щоб вони перекривали рівномірно переріз трубопроводу[3].

Новітні розробки в галузі теплових витратомірів у Таганрогському державному радіотехнічному університеті призвели до створення інтегрального кремнієвого витратоміра КМГА-1[12], який може працювати як калориметричний витратомір, або як термоанемометр (рис. 1.4).

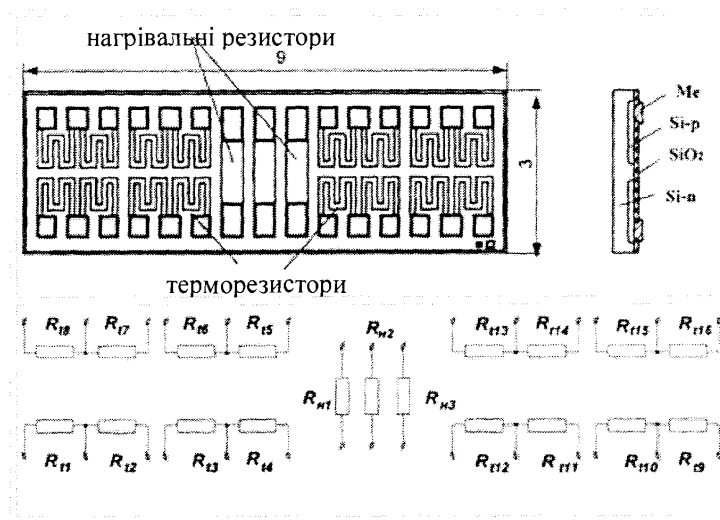


Рис.1.4. Інтегральний кремнієвий витратомір КМТА-1

Класичні теплові витратоміри [13,14] в більшості випадків в якості сенсорного елемента використовують дріт або плівку, виготовлену з матеріалу з високим температурним коефіцієнтом опору - міді, платини, нікелю, яка безпосередньо або через стінку трубопроводу контактує з контрольованим середовищем. У зв'язку з цим необхідно використовувати такі матеріали і технологічні процеси по виготовленню чутливих елементів витратомірів, які не змінювали б властивості матеріалу в результаті корозії і старіння, а також дозволяли б усунути процес індивідуального підбору номіналу підігрівачем і термочутливим елементом при підвищенні метрологічних, а також при зниженні масогабаритних і вартісних показників приладу. Одним з таких матеріалів є кремній. Планарна кремнієва мікроелектронна технологія - відпрацьований і відносно дешевий технологічний процес, що дозволяє виготовляти інтегральні мікроелектронні компоненти з високою геометричною точністю і ідентичністю електрофізичних властивостей. Крім того, монокристалічний кремній має на поверхні захисний шар оксиду, стійкий до численних фізичних і хімічних впливів, має низьку теплоємність і високу теплопровідність і дозволяє за допомогою варіювання концентрації легуючої домішки формувати локалізовані резистивні термочутливі і підігрівачі елементи і тим самим створювати високочутливі схеми на їх основі. В

літературі [13-19] також описані інші варіанти кремнієвих теплових витратомірів, які використовуються для вимірювання мікровитрат.

Термоконвективні витратоміри

Термоконвективними називаються теплові витратоміри, у яких ні нагрівач, ні термоперетворювач не вводяться всередину трубопроводу, а розташовуються зовні[3,9]. Це істотно підвищує експлуатаційну надійність витратомірів і робить їх зручними для застосування. Передача тепла від нагрівача до вимірюваної речовини здійснюється через стінку труби за рахунок конвекції. При малих діаметрах прогривається весь потік, і, аналогічно до калориметричних витратомірів, вимірюється різниця температур потоку з обох сторін нагрівача. Значна частина тепла, що виділяється нагрівачем, поширюється уздовж стінки труби, а не передається потоку. Ця обставина ускладнює використання термоконвективних витратомірів для вимірювання мікровитрат.

Термоанемометри

Термоанемометри використовують залежність між втратою тепла нагрітого тіла від швидкості газу, який проходить повз тіло[3]. Вони можуть використовуватися для вимірювання витрати, коли відоме співвідношення між місцевою і середньою швидкістю потоку, або коли вона безпосередньо вимірюється за допомогою термоанемометра[20,21]. Вихідним сигналом служить величина струму підігріву при стабільній температурі тіла або електричний опір нагрівача при постійному значенні нагріваючого струму.

Як правило, при вимірюванні мікровитрат застосовується симетричне розташування термоперетворювачів щодо нагрівача. Це робиться для того, щоб мати чітко виражену початкову висхідну частину градувальної кривої, при цьому шкала приладу виходить близькою до лінійної[22-26].

До переваг термоанемометрів належать: великий діапазон вимірюваних швидкостей і висока швидкодія. Недолік термоанемометрів із дротяними

чутливими елементами - крихкість і зміна градування через старіння і перекристалізацію матеріалу дроту внаслідок динамічних навантажень і високої температури нагрівання[3].

Первинні перетворювачі термоанемометрів розділяються на: дровові, плівкові і терморезисторні.

Чутливий елемент дротяного перетворювача - тонкий провідник з платини, вольфраму, нікелю. Кінці дротика (термонитки) приварюють до кінців двох манганінових стержнів, закріплених на твердій основі. Найбільшу температуру нагрівання (до 1000 °С) допускає платина. Торійований вольфрам може працювати до $T_n = 600$ °С. Але для уникнення швидкого старіння матеріалу, звичайно провідник нагрівають не більше 400-500 °С. Іноді провідник розміщений на основі, охолоджуваній проточною водою[27]. Для запобігання поломки при великій швидкості газового потоку запропоновано[20] захищати її скляною оболонкою. Теплова потужність W , що втрачається провідником діаметром d і довжиною l при обтіканні її перпендикулярним потоком повітря, що має швидкість v , визначається рівнянням[3]

$$W = (T_n - T_c)l(\lambda + bvn); \quad (1.10)$$

Згідно [28]

$$b = (2\pi\rho cd)0.5 \quad (1.11)$$

$$n = 0.5 \quad (1.12)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності,

c – питома теплоємність

ρ – густина газу

Плівковий перетворювач термоанемометра складається із круглого скляного порожнього стрижня діаметром у кілька міліметрів із клинчастим або конусоподібним кінцем, на яке розпилена тонка плівка платини у вигляді виді невеликої смужки (1x0,2 мм) [21]. Кінці смужки з'єднані із проводами, що проходять всередині скляного стержня. Іноді наноситься ще друга плівка

більшого розміру для температурної компенсації[29]. Плівкові перетворювачі значно міцніші від дровових і можуть служити для вимірювання швидкостей газу від 1,5 м/с до 400-500 м/с при температурах до 500 °С.

Чутливим елементом терморезисторного перетворювача служить мініатюрний напівпровідниковий терморезистор, звичайно у вигляді кульки. Для них характерні простота конструкції, механічна міцність і висока чутливість. Застосування їх для термоанемометрів, призначених для вимірювання швидкостей рідин і газів все більше розширюється [30]. Стала часу в них більша, ніж у дровових і плівкових термоанемометрів, і залежно від розміру терморезистора становить 0,5-2,5 с. Закордонні фірми постійно працюють у напрямку вдосконалення цього типу витратомірів[31-34].

Часто перетворювач термоанемометра складається із двох терморезисторів, один із яких вимірювальний, а інший служить для компенсації зміни температури потоку.

Крім того, зустрічаються термоанемометри, у яких коло нагрівання відділене від кола вимірювання. Терморезистор звичайно розташовується всередині дровового нагрівача. Можливі різні конструкції: наприклад, нагрівач намотаний на рубку, всередині якої перебуває терморезистор, або ж спіраль нагрівача за допомогою скла закріплюється на напівпровідниковій кульці і потім запаюється в скляний капіляр [35].

1.1.3 Плівкові витратоміри

Плівкові витратоміри розробляються виключно тільки для вимірювання мікровитрат газу[2,3,36]. Вони досить широко застосовуються, при градуванні і перевірці інших витратомірів, а також в хроматографії. Конструкція плівкового витратоміра зображена на рис. 1.5.

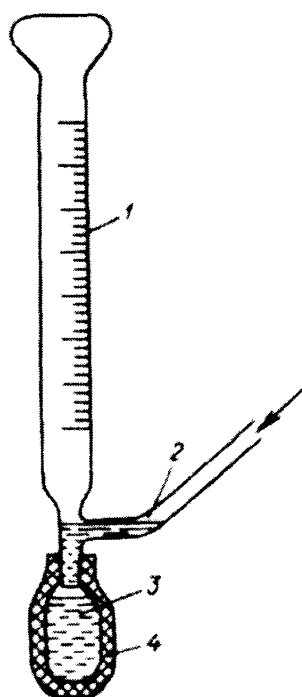


Рис.1.5. Плівковий витратомір

Під скляною вимірювальною бюреткою встановлена посудина 4 з гуми або іншого матеріалу, у якому знаходиться поверхнево-активна речовина 5, наприклад, мильний розчин. Газ, що надходить по трубці 2, проходить через тонкий шар мильного розчину і у вигляді бульбашок, охоплених плівкою розчину, піднімається по бюретці[3]. За допомогою секундоміра, вручну або автоматично, вимірюють час проходження плівки між двома поділками шкали, що перебувають на достатній відстані друг від друга. Витрату визначають шляхом ділення об'єму бюретки між цими поділками на час проходження. Досягаючи верхньої, розширеної частини бюретки, плівка розривається й стікає в посудину 4. Похибка вимірювання витрати залежить від точності вимірювання часу і звичайно складає $\pm(0,5-1,5)\%$. Похибка може зрости, якщо відбувається насичення газу парами води при проході його через водяний затвор, що призведе до збільшення об'єму газу у вимірювальній бюретці. Якщо ж газ, наприклад вуглекислий, вступає в реакцію з мильним розчином, то це призведе до зменшення його об'єму. Це ставить певні вимоги до застосовуваних розчинів. У роботі [37] рекомендується застосовувати рідини з

високою температурою кипіння, наприклад етиленгліколь. Там же вказується, що при правильному виборі поверхнево-активної речовини похибка вимірювання витрати буде не більше 0,7 %.

Новітні дослідження витратомірів даного типу, проведені в національному університеті «Львівська політехніка» [36, 38-41], дозволяють стверджувати, що при використанні певних конструкцій плівкоутворювачів та мірних трубок, забезпеченні нормованого шару рідини на стінках, мікропроцесорних технологій для забезпечення автоматичного вимірювання часу, температури та барометричного тиску, а також автоматичного формування і правильного руйнування плівки, загальна похибка вимірювання може не перевищувати 0,1% для газів, що практично не взаємодіють з плівкоутворювачем при тисках, близьких до атмосферного[39]. У функції мікропроцесорної системи керування входить: визначення готовності системи до виконання вимірювань, запуск генератора плівки, вимірювання часу проходження рідинної плівки між двома фіксованими відмітками мірної трубки, які визначають калібровний об'єм газу, фіксування переміщення рідинної плівки через фіксовані відмітки, опитування давачів температури і тиску, обчислення витрати, запам'ятовування та індикація. Проводилися також роботи з вимірювання витрати природного газу за допомогою плівкових витратомірів [40] та визначення впливу складу рідини на результати вимірювання витратоміра [41].

1.1.4 Витратоміри постійного перепаду тиску

Витратоміри постійного перепаду тиску поділяються на: ротаметри, поплавкові і поршневі (або золотникові). Ротаметри найбільш широко застосовуються в порівнянні про іншими витратомірами постійного перепаду тиску, особливо для вимірювання мікровитрат[3].

Ротаметр складається з конічної (звичайно скляної) трубки, усередині якої переміщається поплавок (рис. 1.6). Шкала, як правило, наноситься

безпосередньо на скляну трубку. Довжина трубки знаходиться в межах від 70 до 600 мм, а діаметр від 1,5 до 100 мм. [42]

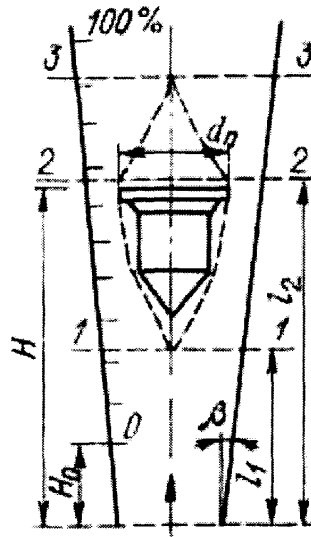


Рис. 1.6 Конструкція ротаметра

Межі застосування звичайних ротаметрів зі скляною трубкою по тиску 0,5-0,6 МПа, по температурі 100-150 °С.

У ротаметрі (рис. 1.6) (як і в перетворювачі витрати зі звужуючим пристроєм) можна виділити три перерізи: 1-1, де починає позначатися збурююча дія поплавка на потік; 2-2 - вузький кільцевий перетин потоку, де виникає максимальна швидкість; 3-3, у якому закінчується збурююча дія поплавка на потік.

На поплавок знизу діють три сили[3]:

а) різниця статичних тисків на носову і кормову поверхні поплавка, що виникає внаслідок переходу частини потенційної енергії у швидкість v у вузькому перерізі 2-2; ця різниця дорівнює $(p_1 - p_2)f$, де f - площа найбільшого поперечного перерізу поплавка;

б) динамічний тиск W потоку, обчислюваний за формулою

$$W = \frac{c\rho v^2 f}{2} \quad (1.13)$$

де c - коефіцієнт опору поплавка;

ρ - густина газу

v - швидкість потоку;

в) сила тертя N потоку об поверхню поплавка.

Сума цих трьох сил урівноважується вагою G поплавка

$$G = Vg\rho_g \quad (1.14)$$

де V – об'єм матеріалу поплавка;

ρ_n – густина матеріалу поплавка.

З рівняння рівноваги слідує, що

$$p_1 - p_2 = (G - W - N)/f \quad (1.15)$$

Якщо знехтувати силами W і N , то одержуємо, що $p_1 - p_2 = G/f = \text{const}$. Це послужило підставою вважати ротаметр витратоміром постійного перепаду тиску. Але ця сталість лише наближена, тому що зі збільшенням витрати зростають як динамічний тиск W , так і сила тертя N . Отже, зі збільшенням витрати перепад тиску $p_1 - p_2$ на поплавку повинен зменшуватися, хоча загальний перепад на ротаметрі з врахуванням втрати в приєднувальних штуцерах при цьому зростає. Експеримент це повністю підтверджує.

Інший метод складання рівняння рівноваги поплавка [43], при якому вважають, що на поплавок діє лише гідродинамічний тиск потоку й вага поплавка у вимірюваній речовині. Тоді отримаємо

$$\frac{c' \rho v^2 f}{2} = V(\rho_n - \rho)g \quad (1.16)$$

де v - характерна швидкість потоку.

Значення коефіцієнта опору c' у цьому рівнянні значно більше, ніж значення коефіцієнта c у попередньому рівнянні.

Вважаючи ротаметр своєрідним витратоміром із звужуючим отвором кільцевого типу, одержимо рівняння витрати для ротаметра у вигляді

$$Q_0 = \alpha_0 f_k [2(p_1 - p_2) / \rho - 2gl]^{0.5} \quad (1.17)$$

де α_0 - коефіцієнт витрати;

f_k - площа кільцевого отвору, утвореного кінцевою трубкою й найбільшим поперечним перерізом поплавка; $l = (l_1 - l_2)/\psi$, причому $\psi = (p'_1 - p'_2)/(p_1 - p_2)$.

З отриманого рівняння витрати слідує пропорційність між витратою Q_0 і кільцевою площею f_k . Але Q_0 не пропорційна ходу поплавка H , а тому, і значенням на шкалі приладу, тому що для конічної трубки f не пропорційне H , хоча відхилення від пропорційності невелике. Строга пропорційність між f і H досягається у випадку параболічного перерізу трубки[3].

Переваги ротаметрів: простота конструкції і експлуатації; наочність показів; надійність у роботі; зручність застосування для вимірювання мікровитрат різних рідин і газів (зокрема, агресивних), а також неньютонових середовищ [44,45]; значний діапазон вимірювання і досить рівномірна шкала.

Недоліки: крихкість і непридатність для вимірювання витрати речовин, що мають значні тиски, прив'язаність приладу до місця вимірювання; показуючий характер приладу (відсутність запису і дистанційної передачі показів); непридатність для вимірювання більших витрат[44].

Більшість із перерахованих недоліків можуть бути усунуті у випадку виготовлення конусної трубки з металу і застосування дистанційної передачі. Але при цьому втрачається простота конструкції і наочність показів, а також різко скорочується хід поплавка і зростає вартість. Такі прилади випускаються в даний час, наприклад, фірмою Krohne (рис. 1.7).

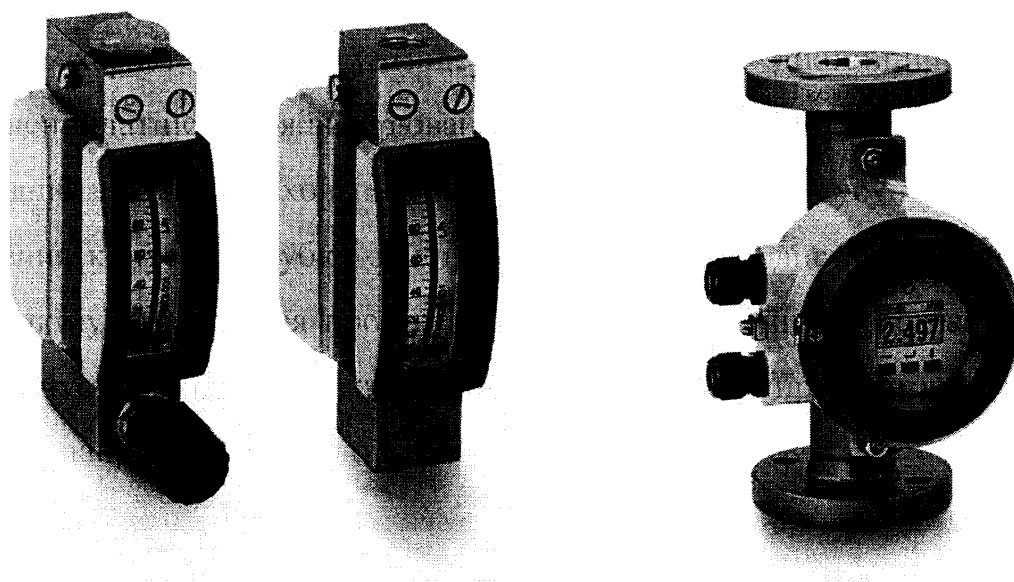


Рис. 1.7 Ротаметри фірми Krohne

Переважає більшість сучасних ротаметрів випускається з відносною похибкою від 2 до 7%. Діапазон вимірюваних витрат ротаметрів фірм починається Krohne, FlowNetwork починається з витрати 1,6 л/г. Типовий сучасний ротаметр Krohne DK32 K 005 (рис. 7, зліва) має такі основні характеристики:

- діапазон робочих температур: -200°C to $+400^{\circ}\text{C}$;
- максимальна витрата: $0,016 \text{ м}^3/\text{г}$;
- діапазон вимірювання витрати: 10:1;
- відносна похибка: 4 % згідно методики VDI/VDE 3513-2.

Враховуючи складність визначення коефіцієнта витрати, а також вплив технологічних допусків, розрахунок параметрів ротаметра здійснюється тільки орієнтовно на стадії проектування, і кожен ротаметр градується заводом-виробником. Для ротаметрів, розрахованих на дуже малі витрати, іноді використовують кулькові поплавки. Поплавки виготовляються з нержавіючої сталі, титану, алюмінієвих сплавів, фторопласту і пластмас. Для ротаметрів характерні високі вимоги щодо вертикальності розміщення конусної трубки. Як показують дані експерименту в [45], при куті відхилення від вертикальної осі всього 3° виникає додаткова похибка в межах 1,5-3,5%. Крім того, необхідні прямі ділянки довжиною 10D до і 5D після ротаметра. Характерним моментом експлуатації ротаметрів є можливість виникнення пульсації поплавка внаслідок коливання тиску або витрати, а також внаслідок періодичного зриву вихорів, переважно у верхній частині шкали. Всі ці особливості призвели до того, що ротаметри широко використовуються в технологічних процесах, як правило, в якості витратомірів, до точності яких не ставляться високі вимоги.

1.1.5 Витратоміри змінного перепаду тиску

З витратомірів змінного перепаду тиску для вимірювання мікровитрат практично застосовуються такі:

на основі мікродіафрагм

витратоміри на основі капілярних трубок (ламінарі)

витратоміри на основі звужених пристроїв

витратоміри на основі газових мостів

Витратоміри на основі звужених пристроїв (мікродіафрагм) для вимірювання мікровитрат відрізняються високою складністю виготовлення, оскільки для досягнення високих технічних і метрологічних характеристик діафрагми необхідно виготовляти з твердих каменів, скла або кераміки. Проте мікродіафрагми мають широке застосування для вимірювання мікровитрат у США, де виробляються фірмами O'Keefe Controls Co, Industrial Jewels Pvt. Ltd, Bird Precision, Small Precision Tools, Inc., Microlap Technologies та ін. Основним матеріалом для виробництва мікродіафрагм є рубін або сапфір. Мікродіафрагми, що випускаються закордонними фірмами, випускаються на діапазон витрат від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$. Похибка вимірювання витрати сучасними мікродіафрагмами складає 2-5%. Зовнішній вигляд сучасної мікродіафрагми зображений на рис. 1.8.

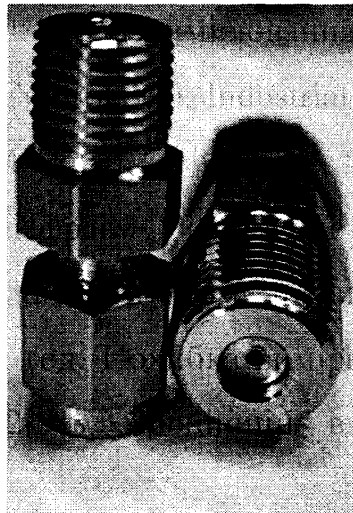
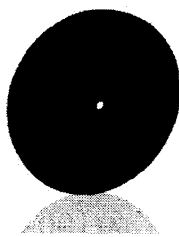


Рис.1.8 – Рубінові мікродіафрагми фірм

Industrial Jewels Pvt. Ltd (зліва) і Bird Precision (справа)

Роботи з дослідження можливості використання звужуючих пристроїв для вимірювання мікровитрат проводилися фірмою "British Petroleum" (діафрагми зі штучних рубінів і сапфірів)[47] та в університеті "Львівська політехніка" (діафрагми з корундових годинникових каменів)[48]. Як і для звужуючих пристроїв, розрахованих на великі витрати, для них характерний малий динамічний діапазон (3-5) і нелінійність залежності перепаду тиску від витрати. Також конструктивні особливості не дозволяють виготовляти діафрагми з твердих матеріалів з достатньою повторюваністю характеристик і спричиняють їх високу вартість. Також необхідне їх індивідуальне градування, спричинене складністю визначення коефіцієнта витрати для малих діаметрів[49].

У лабораторії фірми "British Petroleum" було досліджено велику кількість спеціальних діафрагм різних типів[47]. Проточні частини діафрагм виготовлялися з синтетичних рубінів або сапфірів. Цим забезпечувалась не тільки стійкість, але і взаємозамінність діафрагм. Було доведено, що металеві звужуючі пристрої при малих діаметрах істотно поступаються по надійності спеціальним звужуючим пристроям, ніж витратоміри, виконані з використанням дорогоцінних каменів.

Серед витратомірів змінного перепаду тиску для вимірювання мікровитрат часто застосовуються гідроопори, які працюють в ламінарному режимі при числах $Re < 1500$ для забезпечення лінійної залежності між витратою і перепадом тиску [2,50,51]. В переважній більшості випадків в якості гідроопору застосовується капілярна трубка. Це пов'язано з простотою реалізації гідроопору, можливістю виготовлення капіляра з хімічно стійких матеріалів і його високими метрологічними характеристиками. Втрата тиску по довжині капіляра описується законом Гагена-Пуазейля:

$$\Delta P = \frac{128\mu L Q}{\pi D^4} \quad (1.18)$$

де μ – динамічна в'язкість газу,

L – довжина трубки,

Q – витрата газу,

D – діаметр трубки.

Конструктивно ламінарний витратомір представляє собою капілярну трубку або набір капілярних трубок, розміщених паралельно[3] (рис. 1.9).

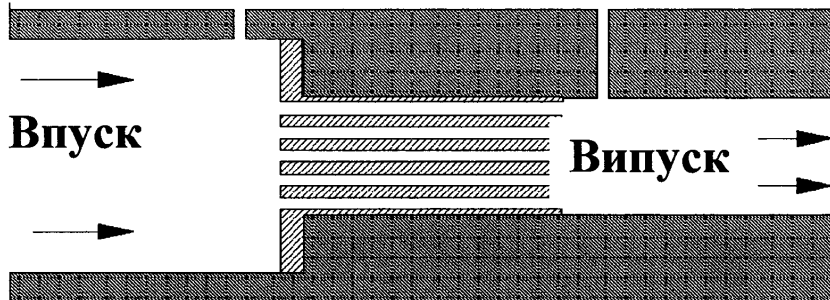


Рис. 1.9 Типова конструкція ламінарного витратоміра

Інша конструкція полягає в поміщенні всередину порожнистого циліндра циліндричного елемента для створення коаксіальної конструкції з кільцевою щілиною з достатньо малою площею поперечного перерізу і максимальною площею поверхні [52]. При умові, що радіус циліндра суттєво більший від ширини зазора, можна представити зазор як велику кількість паралельно розміщених окремих ламінарних елементів. Зовнішній вигляд ламінарного витратоміра зображено на рис. 1.10.



Рис. 1.10 Ламінарний витратомір з кільцевою щілиною

Достатньо простою конструктивно є конструкція з прямокутною щілиною, зображена на рис. 1.11. Робоча область витратоміра представляє собою паралелепіпед, висота якого значно менша за довжину и ширину.

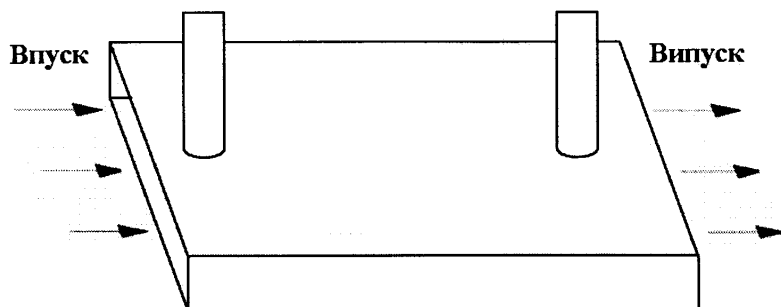


Рис. 1.11 Ламінарний витратомір з прямокутною щілиною

В даний час провідні фірми світу проводять дослідження, спрямовані на вибір оптимального вимірювального перетворювача для вимірювання мікровитрат. Згідно [52], фірма Intel провела незалежні дослідження можливості практичного використання ламінарних елементів для технологічних вимірювань. За результатами досліджень було підтверджено високу лінійність характеристик при умові забезпечення ламінарності потоку. Перспективність ламінарних елементів також підтверджується звірваннями, які були проведені у Франції. Ламінарний елемент був калібрований гравіметричним методом, а через декілька місяців атестований в лабораторії LNE. На всіх точках відхилення не перевищувало 0,3%, що засвідчило високу стабільність характеристик. Згідно даних [3], можна досягнути точності вимірювання витрати порядку 0,2% в діапазоні витрат 1:10. Вагомими перевагами, згідно з [52], є малі розміри, можливість безперервного зчитування, широкий діапазон витрат і висока стабільність.

Ламінарні витратоміри випускаються фірмами TeledyneHastings Instruments, Alicat, Meriam Instrument та ін. Похибка вимірювання витрати сучасних ламінарних витратомірів складає 1-5%.

Загалом ламінарні елементи з метрологічної точки зору є достатньо ефективними пристроями. Їх недоліки слідують з конструктивного вирішення існуючих зразків і в принципі в значній мірі можуть бути усунуті[53,54].

Головними недоліками ламінарних витратомірів є залежність результатів вимірювання від динамічної в'язкості газу, яка в свою чергу залежить від температури (зміна температури на 1 К спричиняє, згідно даних, наведених в [55], додаткову похибку близько 0,3%), індивідуальність градуювальної характеристики кожного витратоміра через технологічні обмеження та вплив забруднення чутливого елемента витратоміра на вид його градуювальної характеристики.

На вході потоку в капіляр частина тиску затрачається на перетворення рівномірного розподілу швидкостей потоку в параболічний. Цей процес здійснюється на вхідній ділянці довжиною

$$l_1 = D \frac{Re}{20} \quad (1.19)$$

Ламінарним потік у капілярі вважається на ділянці капіляра, розміщеній за вхідною ділянкою. Тому, як встановлено в[55], відбір тиску повинен проводитися на відстані від точки входу потоку в капіляр, не меншій від довжини вхідної ділянки.

Перетворювач з однією капілярною трубкою може використовуватись для вимірювання дуже малих витрат. Для збільшення діапазону вимірювання капіляри набираються в пакет.

Отвір в капілярі не рекомендується робити меншим 0,25 мм[56] через можливість забруднення капілярів [56,57]. Тому для отримання достатнього перепаду тиску використовують різні способи. Одним з них є збільшення довжини трубки до довжини порядку 1-10 метрів і компоновка її у вигляді спіралі. За даними [50], в спіральному капілярі зберігається ламінарний режим роботи при числах Re до 15000. Недолік спіральних капілярів – відсутність лінійної залежності між витратою і перепадом тиску внаслідок дії відцентрової сили, яка різко збільшує перепад тиску порівняно з прямим капіляром. При

використанні прямого капіляра відносно великого діаметра зі стержнем всередині вимірюване середовище рухається по кільцевій щілині. Такі перетворювачі використовуються у хімічній промисловості. Крім того, за даними [3,56] наявність внутрішнього стержня попереджує конденсацію газу в трубках малого діаметра. Іноді кільцеву щілину утворюють двома коаксіально утвореними циліндрами.

Ще одним шляхом є утворення капіляра шляхом використання різьбової нарізки в якості каналу проходження вимірюваного середовища [56]. При цьому потрібна прецизійна гвинтова пара з неповною різьбою. Переваги конструкції полягають в можливості регулювання довжини гвинтової частини, що знаходиться в зачепленні. Але внаслідок складної форми зазора між витратою і перепадом тиску відсутня пряма залежність. Основною проблемою вимірювання витрати за допомогою капілярів є залежність результатів вимірювання від в'язкості вимірюваного середовища, яка в свою чергу залежить від температури. Капілярні перетворювачі можуть застосовуватися для вимірювання витрат від $1 \cdot 10^{-6}$ м³/год [3,58]. Похибка вимірювання залежить перш за все від дотримання умов експлуатації, перш за все чистоти капілярів, і може складати до $\pm 0,5\%$. У зв'язку з наявністю недоліків в існуючих конструкціях логічним є проведення дослідницьких робіт, пов'язаних з розробкою нових і удосконаленням існуючих витратомірів [59,33].

Газові мости створюються з чотирьох діафрагм або капілярів [60]. В чотирьох плечах моста створюються різні опори (дроселі). В одну діагональ моста подається потік вимірюваного середовища, а з іншої діагоналі знімається різниця тисків, пропорційна витраті. Шляхом відповідного підбору опорів можна різко знизити залежність результатів вимірювання від в'язкості середовища, що є основною перевагою газових мостів. Цей метод вимагає високоточного підбору дроселів на спеціальних установках і практично дозволяє використовувати в якості опорів лише капілярні трубки, регулюючи їх довжину. Також, відбір тиску в тонкому капілярі конструктивно практично неможливо здійснити за межами ділянки параболічного розподілу швидкостей

поток (що легко досягається, наприклад, в елементі з кільцевим зазором), тому залишається певна нелінійність залежності перепаду тиску від витрати, хоча і значно нижча, ніж в одного капіляра.

Як приклад, мостова дросельна схема (рис. 1.12) утворюється на основі двох подільників тиску. Один з них виконаний на дроселях 1 і 2, а інший – на дроселях 3 і 4. Ці подільники мають загальне живлення (тиск $P_{вх}$ – на вході і тиск $P_{вих}$ – на виході) і працюють на одному середовищі. Ця умова забезпечує можливість перетікання середовища із міждросельної камери одного подільника в міждросельну камеру іншого подільника. Це забезпечує можливість використання вторинного перетворювача з різним вхідним гідравлічним опором. Масові витрати середовища через дроселі 1, 2, 3 і 4, які утворюють мостову схему, і через вторинний прилад 5 позначені на рис.1.12 відповідно через Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 та Q_5 , а загальна масова витрата через міст – через Q_M .

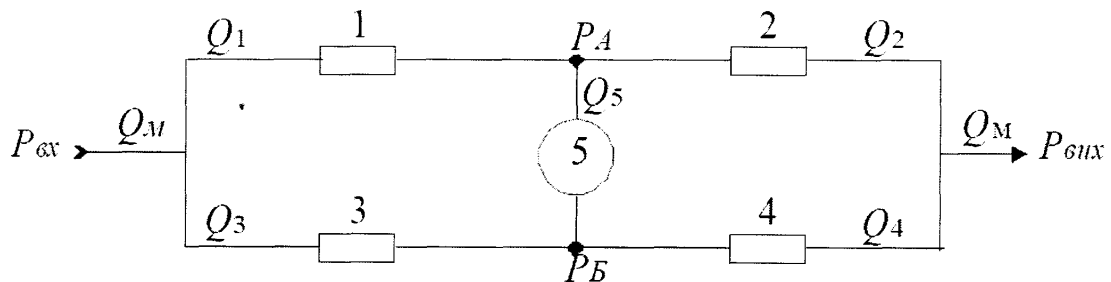


Рис. 1.12. Мостова дросельна вимірювальна схема:

1, 2, 3, 4 – дроселі ; 5 – вторинний перетворювач

В даний час багато публікацій та наукових присвячено завданням побудови, моделювання та проектування газодинамічних дросельних вимірювальних перетворювачів [61–64]. Значного розвитку набули дослідження приладів даного типу у національному університеті «Львівська політехніка», під керівництвом д.т.н. Теплоуха З.М. та д.т.н. Пістуна Є.П.[65-68]. Зокрема, в [64] відзначено, що мостові дросельні вимірювальні перетворювачі мають кращі функціональні властивості порівняно з вимірювальними схемами на одному, двох чи трьох дросельних елементах. Постійно розглядаються нові

підходи до розроблення, проектування і моделювання газогідродинамічних дросельних вимірювальних перетворювачів на основі складених дросельних елементів з використанням теоретико-множинної концепції [61], математичний опис структур побудови схем вимірювальних перетворювачів на базі теорії впорядкованих множин [62], а також наводяться математичні моделі та приклади побудови схем вимірювальних перетворювачів на різній кількості елементів [62–64], що є свідченням перспективності застосування даного методу вимірювання мікровитрат.

1.2 Аналіз технічної основи метрологічного забезпечення відтворення мікровитрат

Відтворення мікровитрат газів здійснюється шляхом використання джерел витрати та витратомірів, а також за допомогою:

- лічильників барабанного типу
- критичних сопел
- дзвонових установок
- еталонних установок еквівалентного витіснення

1.2.1 Лічильники барабанного типу

Основними елементами лічильника газу барабанного типу (рис. 1.13) є корпус, барабан з вимірювальними камерами і лічильний механізм. Металевий барабан, що має чотири вимірювальні камери однакового об'єму, занурений у затворну рідину [69]. Під дією різниці тисків газу у вхідному та вихідному патрубках лічильника барабан обертається, при цьому газ витісняється рідиною з камер барабана. Частота обертання барабана визначається витратою газу. Один повний оборот барабана відповідає сумарному обсягу всіх чотирьох камер.

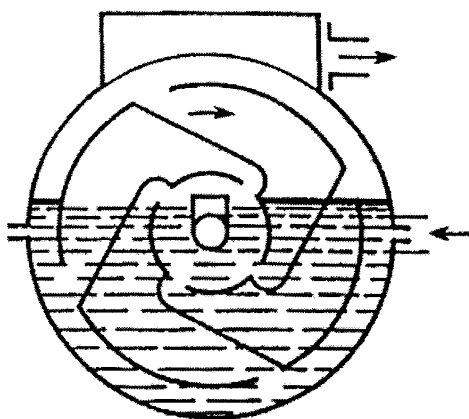


Рис. 1.13 – Схема лічильника газу барабанного типу

Необхідною умовою нормальної роботи лічильника газу барабанного типу є задане положення рівня рідини. Барабанні лічильники застосовуються для градуювальних робіт у лабораторіях, оскільки вимагають постійного контролю та регулювання рівня рідини [70,71]. Замкова рідина має значну теплову інерцію, що спричиняє необхідність тривалої витримки лічильника при зміні температури. Частота обертання барабана вимірюється оптичним датчиком, через який проходить мірний диск, який з'єднаний з валом барабана (лічильники-витратоміри фірм “Темпо”, “Ritter”). Лічильник-витратомір TG 05 фірми “Ritter” (рис. 1.14) має діапазон витрат від 1 до 60 л/год, при основній похибці 0,2%.

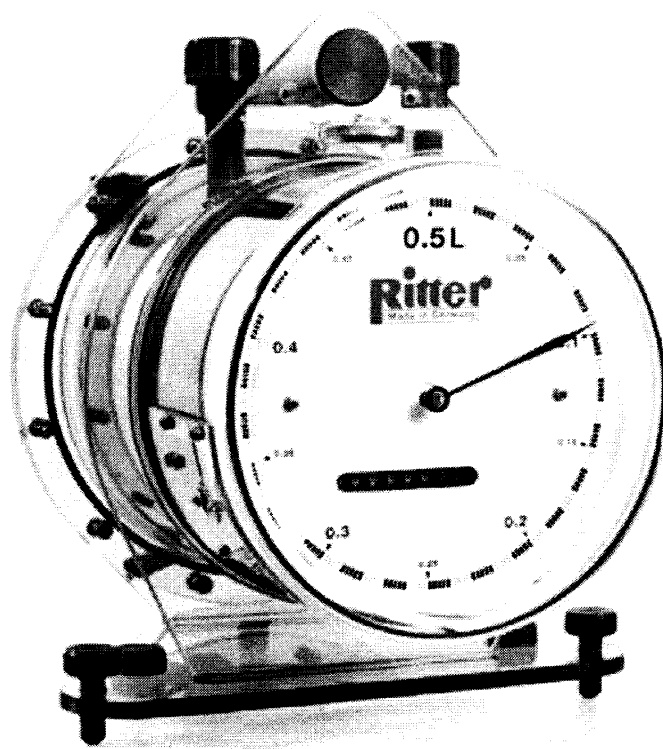


Рис. 1.14. Лічильник-витратомір Ritter TG 05

Переважає більшість лічильників газу барабанного типу європейського виробництва мають, досить високий динамічний діапазон ($Q_{\min}:Q_{\max}=1:100$). Клас точності їх складає 0,15% - 0,5%, що дозволяє застосовувати їх для повірки практично всіх типів робочих приладів вимірювання мікровитрат. Основною причиною виникнення похибки в них є залежність в'язкості мастила від температури, зміна його рівня і тертя в шарнірах[3].

1.2.2 Критичні сопла

Як еталонні засоби можуть використовуватися критичні сопла [71-74]. Вони мають спеціально профільований канал для потоку газу, і якщо для такого сопла створюється перепад тиску між входом і виходом, то витрата газу через сопло спочатку буде зростати, а потім, для деякого співвідношення вхідного і вихідного тисків, яке називається критичним, швидкість газу в найвузшому перерізі сопла стає рівною швидкості звуку [75]. За кордоном критичні сопла є одним з найбільш поширених джерел еталонної витрати газу.

Подальше зниження вхідного тиску не призводить до зростання витрати через сопло. Ця властивість критичного сопла дозволяє використовувати його в якості еталонного засобу. Для створення різних витрат газу розраховуються і виготовляються критичні сопла, що мають у критичному режимі роботи необхідну витрату, або необхідну комбінацію сопел включають паралельно. Установки такого типу виробляються фірмами Темпо, Justur, Elster Group, ЗІП-Магнітоніка. Зовнішній вигляд критичного мікросопла виробництва Elster Group показано на рис. 1.15.

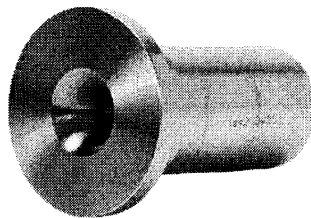


Рис. 1.15. Критичне мікросопло Elster Group

Клас точності установок з критичними соплами знаходиться в межах 0,2% - 1%.

Типовою ознакою всіх повірочних установок на критичних соплах є те, що вони працюють на всмоктування повітря при тиску, близькому до атмосферного[77,78]. Забір повітря здійснюється з приміщення повірочної лабораторії, що ставить високі вимоги до його чистоти[57]. Перевагою повірки на всмоктування є мінімальна температурна похибка, оскільки при повірці повітря не стискується і його температура дорівнює температурі повітря в повірочній лабораторії. Основних недолік – дискретне регулювання відтворюваній витрати шляхом включення різної комбінації сопел.

1.2.3 Дзвонові установки.

Дзвонові установки є одними з найбільш найбільш традиційних, простих та надійних еталонних ЗВТ для здійснення повірки витратомірів в діапазоні від мікровитрат до сотень м³/год. Особливістю установок з точки зору метрології є можливість атестації мірного об'єму різними методами (геометричним, ваговим, об'ємним). Це дає можливість оцінити збіжність та відтворюваність вимірювань об'єму та об'ємної витрати.

Дзвонові установки є загальновизнаним метрологічним засобом для відтворення об'єму та об'ємної витрати газу [79-81]. Основною частиною установки є дзвіна, який нижньою частиною занурюється в резервуар з рідиною. В початковий період випробувань повітря подається під дзвін від стороннього джерела витрати, завдяки чому дзвін піднімається. Після наповнення мірника до необхідного об'єму закривається запірний орган подачі повітря. При відкритті запірного органу в трубопроводі, що з'єднує підзвоновий простір з засобом вимірювань, починається витіснення газу. Об'єм витісненого газу обчислюється по контрольній лінійці. За різницею показів відлікового пристрою ЗВТ та відомому значенню контрольного об'єму визначають його похибку. При випробуванні витратомірів об'єм газу усереднюють за час його витіснення і порівнюють з показами витратоміра.

Дзвонова установка складається з корпусу 1, витіснювача 2 та дзвона 3 циліндричної форми, який розміщений та рухається в щілині між корпусом та витіснювачем, що заповнена мастилом 4. Піддзвоновий простір періодично наповнюється від джерела тиску та витрати 5 повітрям через клапан 6 та трубопровід 7, і вивільнюється при опусканні дзвона 3 через трубопровід 7 та клапан 8. При цьому відтворюваний об'єм повітря протікає через ЗВТ 9, що повіряється або атестується. Вертикальне переміщення дзвона 3 вимірюється системою 10.

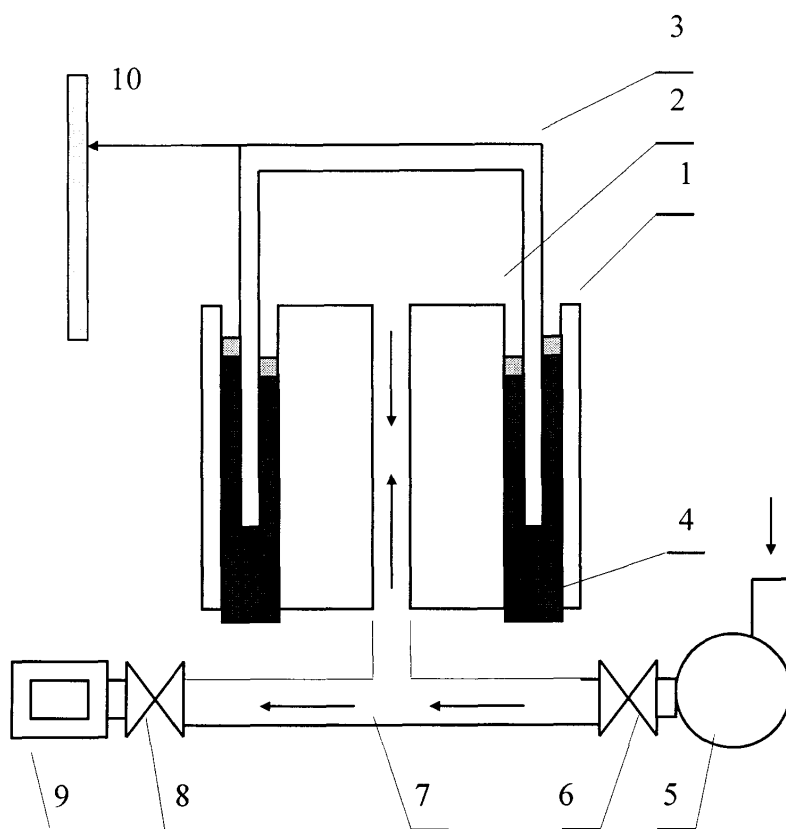


Рис. 1.16 - Схема дзвонової установки

Основним недоліком дзвонових установок є те, що з вимірювального циклу не вилучено неусталений режим роботи як ЗВТ, так і установки[82]. Тому для мінімізації цього впливу потрібно збільшувати час вимірювального циклу. Це, вимагає створення громіздких і дорогих установок зі значним об'ємом мірника. Тому в основним застосуванням установок даного типу є перевірка витратомірів і лічильників газу на порівняно невеликих витратах, в тому числі при градуюванні та повірці побутових лічильників газу [83-85].

Основним джерелом похибок відтворення об'єму ДЕУ є температурні похибки від зміни температури в приміщенні, і зміна лінійних розмірів деталей дзвонового мірника. Ще одним джерелом похибки є похибка від випаровування в рідині, що залежить від тривалості вимірювального циклу, площі змоченої поверхні дзвону і дзеркала рідини, а також вологості повітря. На похибку вимірювань впливає також нестабільність тиску за вимірювальний цикл, оскільки що в процесі опускання дзвона вага останнього змінюється на

величину архімедової сили. Сучасні установки працюють під контролем ПЕОМ, які здійснюють всі необхідні обчислення.

На даний момент первинним еталоном об'єму і об'ємної витрати України є саме дзвонова установка. Переважна більшість установок забезпечує точність відтворення об'єму 0,1%-0,25%, об'ємної витрати – 0,25%-1%.

Використання дзвонових установок доцільно для повірки лічильників, оскільки вони забезпечують високу точність відтворення об'єму газу[82]. Точність відтворення витрати, незважаючи на довгу історію вдосконалення установок даного типу, залишається недостатньою.

1.2.4 Еталонні установки еквівалентного витіснення

Принцип дії установок відтворення витрати методом еквівалентного витіснення полягає у зважуванні об'єму рідини, витісненої газом, який пройшов через засіб вимірювання, що повіряється або випробовується. При цьому для визначення об'ємної витрати газу необхідно знати густину рідини та час її витіснення.

На рис.1.17 детально показано принцип дії установок: рідина виливається в один із баків 4 або 5 в залежності від положення перемикача потоку (дивертора) 3. Витрата рідини задається регулятором витрати 2. В залежності від необхідності кранами 10,11 до контейнера 1 може бути підключений лічильник 7 або еталонний мірник дзвонового типу 9, за допомогою яких фіксується об'єм повітря, що витісняється з контейнера 1. Бак 5 знаходиться на вазі 6. В якості рідини використовується стабільне маловипаровуване спеціальне мастило з малою кінематичною в'язкістю. В зворотному напрямку мастило перекачується насосом 8.

Мастило в баку 5 зважується, і, знаючи його густину при температурі випробувань, визначається його об'єм. З урахуванням тиску в лічильнику 7 та контейнері 1, температури мастила та повітря в контейнері, визначається об'єм повітря, що пройшов через лічильник 7.

В роботі [86] встановлено таке рівняння вимірювання установки еквівалентного витіснення:

$$V_D = \frac{P_\epsilon}{T_\epsilon} \frac{T_D}{P_D} \frac{m}{\rho_m} \left(1 + \frac{\rho_{н.н.}}{\rho_m} \right), \quad (1.20)$$

де V_D – об’єм повітря через дослідну ділянку;

P_D, P_ϵ – тиск повітря на дослідній ділянці і в ємності відповідно;

T_D, T_ϵ – температура повітря на дослідній ділянці і в ємності відповідно;

m – маса масла;

$\rho_{н.н.}$ – густина навколишнього повітря;

ρ_m – густина масла;

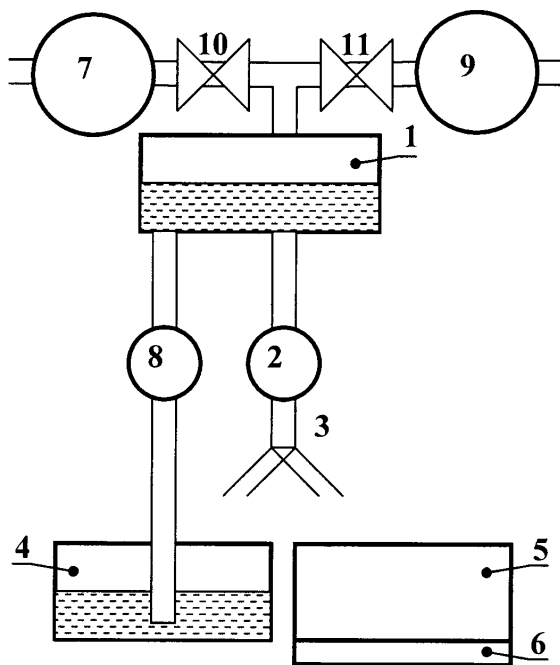


Рис. 1.17 – Схема еталонної установки еквівалентного витіснення

1 – контейнер; 2 – регулятор витрати; 3 – перемикач потоку; 4,5 – баки; 6 – вага; 7 – лічильник; 8 – насос; 9 – еталон витрати газу дзвонового типу; 10,11 – крани

Рівняння вимірювання установки еквівалентного витіснення рідини описується наступним виразом і з врахуванням коефіцієнта лінійного розширення масла має вигляд [82]:

$$V = \frac{P_{\epsilon} \cdot T_{\text{д}}}{T_{\epsilon} \cdot P_{\text{д}}} \cdot \frac{m}{\rho_{0,м} + \alpha(T_{\text{м}} - 273,15)} \cdot \left(\frac{1 - \rho_{\text{н.н.}} / \rho_{\text{с}}}{1 - \rho_{\text{н.н.}} / (\rho_{0,м} + \alpha(T_{\text{м}} - 273,15))} \right), \quad (1.21)$$

де $P_{\epsilon}, T_{\epsilon}$ – тиск та температура повітря в проміжній ємності;

$P_{\text{д}}, T_{\text{д}}$ – тиск та температура повітря в дослідній ділянці;

$T_{\text{м}}$ – температура робочої рідини;

$\rho_{0,м}$ – густина масла при 20 °С,

α – коефіцієнт теплового розширення масла;

$\rho_{\text{с}}$ – густина стандартних зважуваних об'єктів (8000 кг/м³);

$\rho_{\text{н.н.}}$ – густина навколишнього повітря

Аналіз похибок еталонних установок рідинного витіснення показує, що поряд з високою точністю відтворення одиниці об'єму газу (0,15%-0,25%), залишається проблемою стабільність відтворення одиниці об'ємної витрати за рахунок зміни гідростатичного тиску рівня стовпа рідини, що витікає, а також обмежений діапазон відтворення витрати[87].

1.3 Аналіз нормативної основи метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат в Україні та інших країнах та перспективи його вдосконалення

Метрологічне забезпечення вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу забезпечується державною повірочною схемою, яка встановлює метрологічну ієрархію еталонів, еталонних та робочих ЗВТ[88], а також порядок передачі з їх допомогою розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати. Ця повірочна схема є бере початок з колишньої загальносоюзної повірочної схеми для ЗВТ-об'ємної витрати газу в діапазоні від $4,44 \times 10^{-6}$ до $6,94 \times 10^{-1}$ м³/с [89]. В деяких випадках ця повірочна схема не забезпечує зростаючі вимоги до точності вимірювань об'ємної витрати газу робочими ЗВТ, наприклад, в діапазоні мікровитрат.

На даний час в Україні лічильники і витратоміри з діапазоном витрат менше 16 л/год метрологічно не забезпечені, незважаючи на наявність в

експлуатації значної кількості ЗВТ вимірювання об'ємної витрати газу (ротаметри та ін.), в тому числі закордонного виробництва. Проте, в інших країнах, наприклад, в Нідерландах повірочна схема (Додаток А) передбачає відтворення об'ємних витрат в діапазонах від 0,0002 до 12000 м³/год для робочого середовища повітря під атмосферним тиском і має 8 ступенів через відсутність чіткої ієрархії у співвідношенні границь допустимих похибок еталонних та робочих ЗВТ, наприклад 1:3, як це передбачено в інших схемах. Відтворення та передача одиниці об'ємної витрати для робочого середовища повітря здійснюється з допомогою набору робочих еталонів [90,91]. Державна повірочна схема Чехії та Словаччини [92], на відміну від попередніх, характеризується чіткою ієрархією (підпорядкованістю) еталону, еталонних та робочих ЗВТ, співвідношенням границь допустимих похибок, застосуванням прямих методів передачі фізичних одиниць, яким властиві мінімальні похибки. Локальна повірочна схема, що застосовується в компанії "Schlumberger Industries" (Франція)[93] при повірці побутових лічильників газу, базується на робочому еталоні об'єму - скляній колбі з каліброваним об'ємом 50 л, відносна похибка якої складає $\pm 0,05$ %. З допомогою робочого еталону методом прямих вимірювань проходить передача розміру одиниці об'єму еталонній дзвоновій установці із змінними мірними об'ємами і відносними похибками відповідно: 200 л (0,103 %), 150 л (0,113 %), 100 л (0,124 %), 50 л (0,154 %), 20 л (0,414 %). За допомогою дзвонової установки проходить вибіркова державна повірка побутових лічильників, а для їх градування з метою підвищення продуктивності застосовується соплова установка. В якості первинних еталонів у повірочних схемах різних країн застосовуються різні види установок: дзвонові, поршневі, гравіметричні, PVT установки, а також установки еквівалентного витіснення[94]. При цьому значна частина країн мають можливість проводити повірку і калібрування витрат менше 16 л/год.

В Україні, на відміну від багатьох європейських країн, відсутні нормативні документи на методи та засоби повірки ЗВТ об'єму і витрати газу в

діапазоні 1 до 16 л/год. Зважаючи на наявність таких приладів, в основному закордонного виробництва, в експлуатації, необхідно розробити нормативну основу метрологічного забезпечення ЗВТ у даному діапазоні витрат.

Підсумовуючи аналіз технічних засобів, придатних для вимірювання та відтворення мікровитрат, можна виділити особливості кожного з типів витратоміра в даному застосуванні:

1. Теплові витратоміри мають специфічні недоліки, які визначаються наявністю тіла, що нагрівається. Висока інерція та споживання електроенергії, а також постійна зміна характеристик внаслідок старіння зумовлюють їх вузьке використання в спеціальній техніці і для лабораторних вимірювань.

2. Плівкові витратоміри є суто лабораторними приладами, які використовуються для специфічних застосувань, наприклад, в хроматографії. Спроби автоматизації процесу вимірювання неодноразово проводилися різними дослідниками, шляхом автоматичної генерації бульбашок, а також автоматичної реєстрації проходження ними контрольних міток, проте ці прилади так і не набули поширення для загального застосування.

3. Витратоміри постійного перепаду тиску мають просту конструкцію, проте невисоку точність і складність передачі результатів вимірювання. Також складні гідродинамічні процеси, що відбуваються внаслідок взаємодії звуженого потоку з поплавком, що обертається і поступально коливається, дають мало перспектив для підвищення точності цього типу приладів.

4. Витратоміри змінного перепаду тиску можуть бути розроблені для дуже широкого діапазону витрат. Існуючі недоліки (залежність результатів вимірювання від температури та забрудненості вимірюваного середовища, недостатня точність) можуть бути в значній мірі зменшені шляхом оптимізації їх конструкції та метрологічного забезпечення.

5. Установки еквівалентного витіснення мають значні перспективи для використання в діапазоні мікровитрат. Зміна витрати в процесі вимірювання може бути виключена шляхом удосконалення установок.

6. Критичні сопла не дозволяють здійснювати регулювання витрати, і забезпечують повірку витратомірів тільки в декількох дискретних точках.

7. Лічильники барабанного типу можуть використовуватися в якості лабораторних приладів, особливості їх конструкції роблять зручним тільки стаціонарне їх застосування.

8. Дзвоновими установками важко забезпечити стабільність витрати, їхня громіздкість і вартість є серйозним аргументом для пошуку альтернативних рішень.

1.4 Обґрунтування напрямку дослідження

Аналіз показує, що одним з найбільш придатних засобів для вимірювання мікровитрат газу є ламінарний витратомір, принцип роботи якого оснований на вимірюванні гідравлічного опору, створеного капілярною трубкою або набором капілярних трубок. Проте існуючі конструкції ламінарних витратомірів не дозволяють досягти необхідної точності при вимірюванні витрати в лабораторній та повірочній практиці. Тому ставиться завдання подальшого дослідження і вдосконалення ламінарного витратоміра з метою такого підвищення його метрологічних характеристик, яке б дало можливість використовувати його в якості робочого еталона.

Необхідно розробити математичну модель похибки вдосконаленого ламінарного витратоміра, з метою врахування зовнішніх факторів на результат вимірювання, що дасть можливість використовувати його в якості робочого еталона.

Щодо повірочних установок та їх використання в діапазоні мікровитрат, доцільно взяти за основу технічної бази метрологічного забезпечення мікровитрат установки еквівалентного витіснення. Оскільки вимірювання витрати здійснюється через вимірювання маси і часу, які на даний момент можуть бути виміряні з високою точністю у широкому діапазоні, відсутні принципові обмеження застосування установок даного типу в діапазоні мікровитрат.

З врахуванням того, що на даний момент відсутні методи і засоби повірки і калібрування ЗВТ мікровитрат в державній повірочній схемі для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, необхідно розробити методичне забезпечення вимірювання мікровитрат та зміни до повірочної схеми.

1.5 Висновки до першого розділу

Виконано аналіз сучасного стану технічного забезпечення вимірювання мікровитрат газу. Сформульовано особливості використання різних типів засобів вимірювання і відтворення витрати, таких як теплові і плівкові витратоміри, витратоміри постійного перепаду тиску (ротаметри), витратоміри змінного перепаду тиску (мікродіафрагми, ламінарні витратоміри на основі капілярних трубок, витратоміри на основі газових мостів), лічильники барабанного типу, критичні сопла, дзвонові установки, установки еквівалентного витіснення.

Здійснено наліз метрологічного забезпечення вимірювання мікровитрат в Україні та інших країнах та перспективи його вдосконалення. Існуючі прилади систематизовано, проаналізовано їх метрологічні та технічні характеристики, наведені рекомендації щодо можливості їх застосування в якості робочих еталонів. Поставлено завдання подальшого дослідження і вдосконалення ламінарного витратоміра з метою такого підвищення його метрологічних характеристик, яке б дало можливість використовувати його в якості робочого еталона. На підставі викладеного матеріалу сформульовано основні завдання і напрямки дисертаційних досліджень.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ $0,277 \cdot 10^{-6} - 4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ (1-16 л/год)

2.1 Дослідження конструктивних особливостей ламінарних витратомірів

Метою дослідницької роботи є аналіз і вдосконалення ламінарного витратоміра з метою усунення недоліків в конструкції, які не дозволяють досягти вищої точності вимірювання мікровитрат газу.

Зарубіжними фірмами освоєно серійний випуск витратомірів ламінарного типу, принцип дії яких ґрунтується на явищі лінійної втрати тиску на одиницю довжини шляху проходження газу при забезпеченні ламінарності потоку відповідно до закону Гагена-Пуазейля. Відповідно до цього закону витрата газу Q для циліндричної трубки визначається за наступною формулою:

$$Q = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot R^4}{8 \cdot \mu \cdot L}, \quad (2.1)$$

де μ – динамічна в'язкість газу,

L – довжина трубки,

R – радіус трубки.

Звідси, перепад тиску на трубці можна записати як :

$$\Delta P = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4}, \quad (2.2)$$

де D – діаметр трубки.

Враховуючи відхилення від ламінарності потоку, а також вплив густини і коефіцієнта стискуваності та коефіцієнта розширення, рівняння (2) прийме наступний вигляд[55]:

$$\Delta P = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} + \frac{8 \rho Q^2}{\pi^2 D^4} (K_c + K_e), \quad (2.3)$$

де ρ – густина газу,

K_c – коефіцієнт стискуваності газу

K_e – коефіцієнт розширення газу.

В більшості випадків другим доданком можна знехтувати, оскільки його величина не перевищує 4% від сумарного перепаду тиску, і вважати функцію перетворення лінійною.

З формули слідує пряма залежність результатів вимірювання від динамічної в'язкості газу, яка в свою чергу залежить від температури (зміна температури на 1 К спричиняє, згідно даних, наведених в [53], додаткову похибку близько 0,3%), індивідуальність градувальної характеристики кожного окремо взятого витратоміра через технологічні обмеження та вплив забруднення чутливого елемента витратоміра на вид його градувальної характеристики. Температурна залежність є одним з головних недоліків традиційних ламінарних витратомірів.

Для витратоміра з кільцевою щілиною справедливо [55]:

$$\Delta P = \frac{12 \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{n \cdot \pi \cdot r \cdot (\Delta r)^3}, \quad (2.4)$$

де r – радіус порожнистого циліндра,

Δr – різниця радіусів порожнистого циліндра і циліндричного елемента,

n – кількість щілин.

Звідси, прийнявши при умові $r \ll h$, що ширина щілини в поперечному напрямку B еквівалентна довжині периметра кільцевої щілини $2\pi r$, а висота щілини h еквівалентна різниці радіусів Δr , перепад тиску, можна визначити за формулою [95]:

$$\Delta P = \frac{24 \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{B h^3}, \quad (2.5)$$

Важливою проблемою при конструюванні ламінарних витратомірів є забезпечення точності і стабільності розмірів капілярних трубок або кільцевої щілини. Стосовно капілярних трубок можна стверджувати, що їх параметри у значній мірі нестабільні внаслідок впливу градієнту температури по довжині капіляра. При оптимальних діаметрах 0,1 – 0,5 мм жорсткість конструкції виявляється недостатньою для забезпечення прийнятної стабільності параметрів. Також практично неможлива очистка капілярів від забруднення. Конструкція з кільцевою щілиною має перевагу в жорсткості, а також внаслідок

розбірної конструкції дозволяє проводити очистку від забруднення. Недоліком є високі вимоги до центрування циліндричного елемента в порожнистому корпусі і стабільності його положення.

Такі особливості конструкції роблять виготовлення і експлуатацію ламінарних витратомірів трудомісткою і призводять до необхідності індивідуального градуювання кожного витратоміра.

Спроби виконання ламінарних витратомірів з прямокутною щілиною, у яких зменшений вплив зазначених недоліків [96] призводили до появи нелінійності характеристики. Причиною цього є відбір тиску не з самих вимірювальних каналів, а з камер, що знаходяться до і після них.

Суть недоліку детально розглядається у [55]. В загальному, ламінарність потоку в щілині виникає тільки на певній відстані від точки входу потоку (вхідної ділянки), тому відбір тиску повинен проводитися не з самої щілини, а на відстані від точки входу і виходу, що обчислюється за формулою:

$$L = D \frac{Re}{20} \quad (2.6)$$

де D – діаметр капіляра.

Число Рейнольдса обчислюється за формулою:

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi\mu D} \quad (2.7)$$

Звідси випливає, що довжина вхідної ділянки залежить від витрати:

$$L = D \frac{Re}{20} = D \frac{4Q\rho}{20\pi\mu D} = \frac{Q \cdot \rho}{5 \cdot \pi \cdot \mu} \quad (2.8)$$

Практично, вхідна ділянка складає від 1,12 до 19 мм для значень витрат від 0,001 м³/год до 0,016 м³/год. Ламінарний витратомір можна умовно представити як три ділянки (рис. 2.1), що створюють перепад тиску: вхідну ділянку 1, в якій відбувається зміна швидкості потоку і формування його ламінарності, основну частину 2, де перепад тиску практично лінійно залежить від витрати, і вихідну частину 3, в якій потік перестає бути ламінарним.

При виконанні витратоміра у вигляді сукупності капілярів можливість відбору тиску з основної частини ускладнена через високу складність

виготовлення отворів у бокових стінках капіляра. Фірма TetraTec Instruments випускає витратоміри такого типу, у яких відбір тиску здійснюється з одного капіляра. Всі інші капіляри беруть участь тільки в забезпеченні ламінарності потоку, відбір тиску з них не здійснюється. Також, при виконанні витратоміра у вигляді набору прямокутних щілин [96] відбір здійснювався не з основної частини.

Вдосконалена з метою зменшення нелінійності характеристики конструкція витратоміра має відбір тиску з основної ділянки, аналогічно відбору тиску у витратомірах з кільцевим зазором. При цьому забезпечується відбір тиску з усіх вимірювальних пластин (рис. 2.1) шляхом виконання витратоміра у вигляді пакету пластин з отворами. Такий відбір тиску призводить до усереднення перепадів на кожній щілині, зменшуючи вплив їх неідентичності, що фактично еквівалентно усередненню результатів вимірювань великої кількості паралельно включених приладів. Це зменшує середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань і дає можливість підвищити повторюваність характеристик і виключити один з основних недоліків ламінарних витратомірів – необхідність індивідуального градуювання.

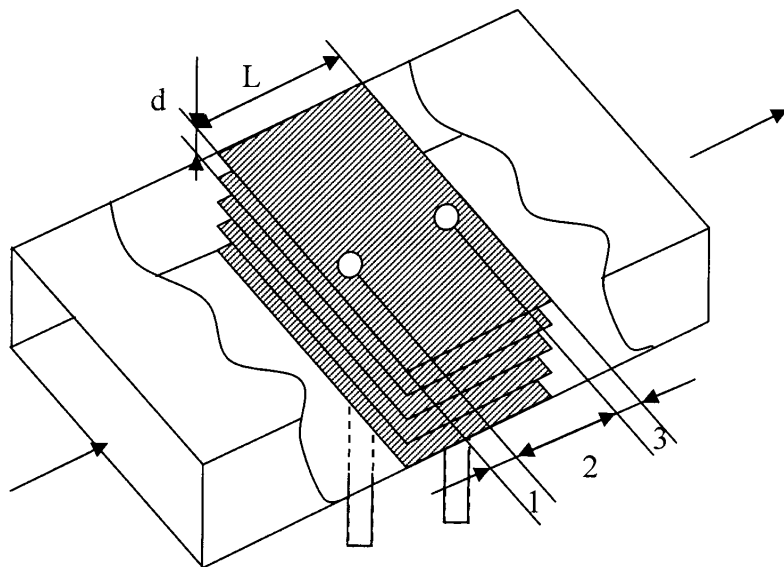


Рис. 2.1 Ламінарний витратомір з серією прямокутних щілин з безпосереднім відбором тиску

Залежність результатів вимірювання від температури складає одну з найбільших проблем при експлуатації ламінарних витратомірів. Причина цього явища випливає з формули (2.2), оскільки перепад тиску прямо пропорційний в'язкості газу, яка залежить від температури.

Для обчислення залежності в'язкості газу від температури можна застосувати формулу Сатерленда[97]:

$$\mu_T = \mu_0 \cdot \frac{273,15 + C_3}{T + C_3} \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right)^{3/2} \quad (2.9)$$

де μ_T – динамічна в'язкість газу при температурі T ,

μ_0 – динамічна в'язкість газу при 0°C ,

C_3 – стала Сатерленда для даного газу (обчислюється за формулою); $C_3 = 1,47 T_{\text{кип}}$, де $T_{\text{кип}}$ - температура кипіння газу.

Емпіричні значення залежності в'язкості повітря від температури наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Залежність динамічної в'язкості повітря від температури

Температура, °C	Динамічна в'язкість μ , Па·с · 10 ⁻⁵
0	1.71
5	1.73
10	1.76
15	1.80
20	1.82
25	1.85
30	1.86
40	1.87
50	1.95
60	1.97
70	2.03
80	2.07
90	2.14
100	2.17

2.2 Дослідження способів введення температурної компенсації

ламінарного витратоміра

Традиційно для лінеаризації характеристики ламінарного витратоміра використовуються електронні коректори, які різко піднімають вартість приладів, знижують їх безпечність і практично виключають можливість створення доступних лабораторних витратомірів для використання в якості робочих ЗВТ. Таким чином постає питання вдосконалення конструкції ламінарного витратоміра шляхом введення механічної корекції.

Аналіз функції (2.5) показує, що для компенсації впливу динамічної в'язкості на результат вимірювання необхідно або змінювати довжину щілини L , або її ширину d , причому перепад тиску залежить від довжини щілини прямо пропорційно, а від ширини – обернено пропорційно її кубу. З цього випливає, що вводити механічну корекцію показів ламінарного витратоміра доцільно шляхом регулювання ширини щілини, оскільки її необхідно змінювати у значно вужчих межах. Нелінійність залежності принципового значення не має через те, що вимірювання витрати лабораторними приладами здійснюються при температурі 293 ± 2 К, і у вузькому діапазоні зміни температури ($\pm 0,7\%$) функцію можна апроксимувати прямою.

Відповідно до таблиці 1, при зміні температури від 15 до 25°C динамічна в'язкість змінюється від $1,80 \cdot 10^{-5}$ до $1,85 \cdot 10^{-5}$ Н с/м², а відносна зміна в'язкості складає 2,7 %, тобто 0,27 % на 1°C. На цю ж величину відповідно змінюються покази ламінарного витратоміра, що практично відповідає даним, наведеним в [52]. Для механічної температурної корекції показів у діапазоні від 18 до 22°C при зміні в'язкості на $\pm 0,54\%$ необхідно або змінювати довжину щілини L на $\pm 0,54\%$, або ширину d відповідно до її впливу на перепад тиску. Відносна зміна ширини щілини для цього випадку при забезпеченні незалежного від температури перепаду тиску і зміні в'язкості на 0,54% становитиме 0,18% згідно (2.4).

Відповідно, в діапазоні температур від 18 до 22°C для компенсації температурної залежності показів ламінарного витратоміра, ширину щілини

потрібно регулювати на $\pm 0,18\%$. Конструктивно автоматичне регулювання довжини або ширини щілини можна здійснювати за рахунок різного теплового розширення пластин, які утворюють щілину.

Запропонована конструкція ламінарного витратоміра (рис. 2.2) дозволяє здійснювати автоматичну механічну корекцію ширини щілини при використанні матеріалів з різним коефіцієнтом лінійного розширення для пластин, які утворюють щілину, та для роздільних пластин. Запропоновано роздільні пластини виготовляти з матеріалу з високим коефіцієнтом лінійного розширення (цинк, алюміній), а пластини, які утворюють щілину – зі скла або кераміки.

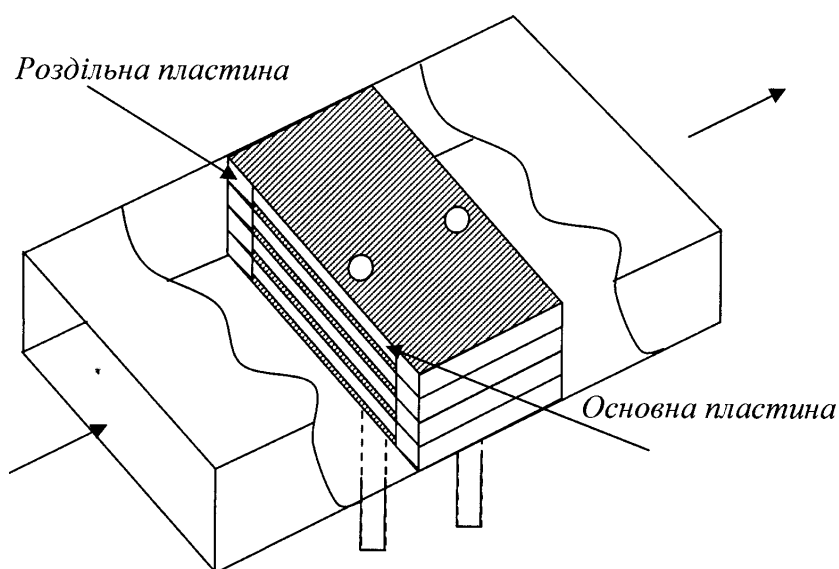


Рис. 2.2 Ламінарний витратомір з серією прямокутних щілин з безпосереднім відбором тиску і температурною корекцією

Разом з тим, недоліком даної конструкції є її низька технологічність, спричинена великою кількістю деталей. Це спонукало до пошуків більш технологічної конструкції, використовуючи попередні напрацювання з температурної компенсації результатів вимірювання. Відповідно, розглянувши існуючі конструкції, вирішено вибрати за основу ламінарний витратомір з кільцевим зазором, виготовивши зовнішній циліндр з алюмінієвої трубки, а

внутрішній циліндр – зі скла, аналогічно застосувавши скляну трубку. При цьому забезпечується таке ж зростання ширини щілини пропорційно температурі, як і при використанні пластин.

Переваги цієї конструкції виявляються у: технологічності, можливості виготовлення з високою точністю за рахунок використання тіл обертання, можливості розбирання для очистки від забруднення, високій механічній жорсткості конструкції за рахунок використання жорсткого зовнішнього циліндра, який служить корпусом (рис 2.3).

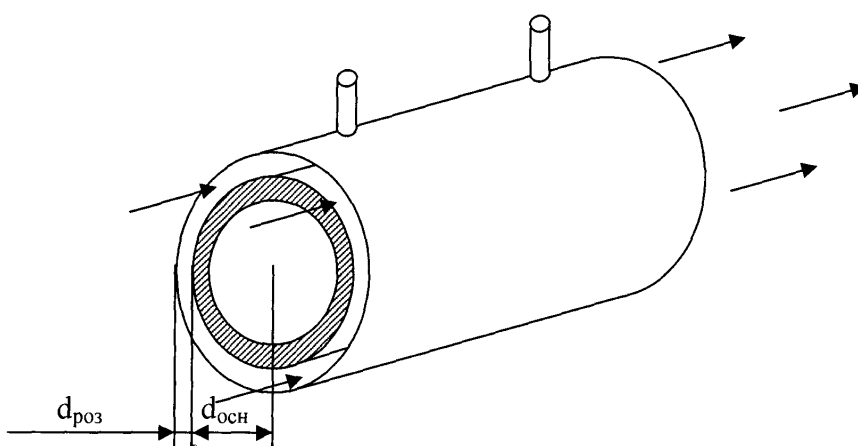


Рис. 2.3 Ламінарний з кільцевою щілиною і температурною корекцією

2.3 Розроблення математичної моделі рівняння вимірювань термокомпенсованого ламінарного витратоміра та його конструктивних параметрів

Для забезпечення ламінарності потоку необхідно витримувати число Рейнольдса в номінальному діапазоні витрат меншим від 2300. Для круглого перерізу капіляра число Рейнольдса обчислюється за формулою (2.7):

$$D_h = \frac{4F}{p}, \quad (2.10)$$

де F – площа перерізу,

p – повний периметр перерізу.

Це дає змогу використовувати для розрахунку потоків через некруглі перерізи математичний апарат, розроблений для розрахунку потоків через труби.

Основним рівнянням вимірювання ламінарного витратоміра є закон Гагена-Пуазейля, що описує втрату тиску по довжині капіляра. Відповідно до цього закону витрата газу Q для циліндричної трубки визначається за формулою (2.1).

Зміна технологічних параметрів і умов зовнішнього середовища (температури, тиску, вологості) значно впливають на показники точності ламінарного витратоміра. Кожний із впливових чинників, зазвичай, може бути вимірний окремо і врахований при одержанні результатів вимірювань, проте у виробничих умовах експлуатації всі їх врахувати практично неможливо. Тому кожний ламінарний витратомір поряд з нормованою чутливістю до вимірюваної величини певним чином реагує на різні чинники, які обумовлюють підвищення його похибки.

Головними недоліками наявних на даний момент ламінарних витратомірів є температурна залежність результатів вимірювання, індивідуальність градуувальної характеристики кожного окремо взятого витратоміра через технологічні обмеження та вплив забруднення чутливого елемента витратоміра на його характеристики.

За допомогою формули Сатерленда[97] досить точно описується залежність в'язкості від температури. Це відображено на рис. 2.4, де суцільна лінія відображає залежність в'язкості повітря від температури, розрахованої за формулою Сатерленда, а пунктирна – табличні значення даної залежності.

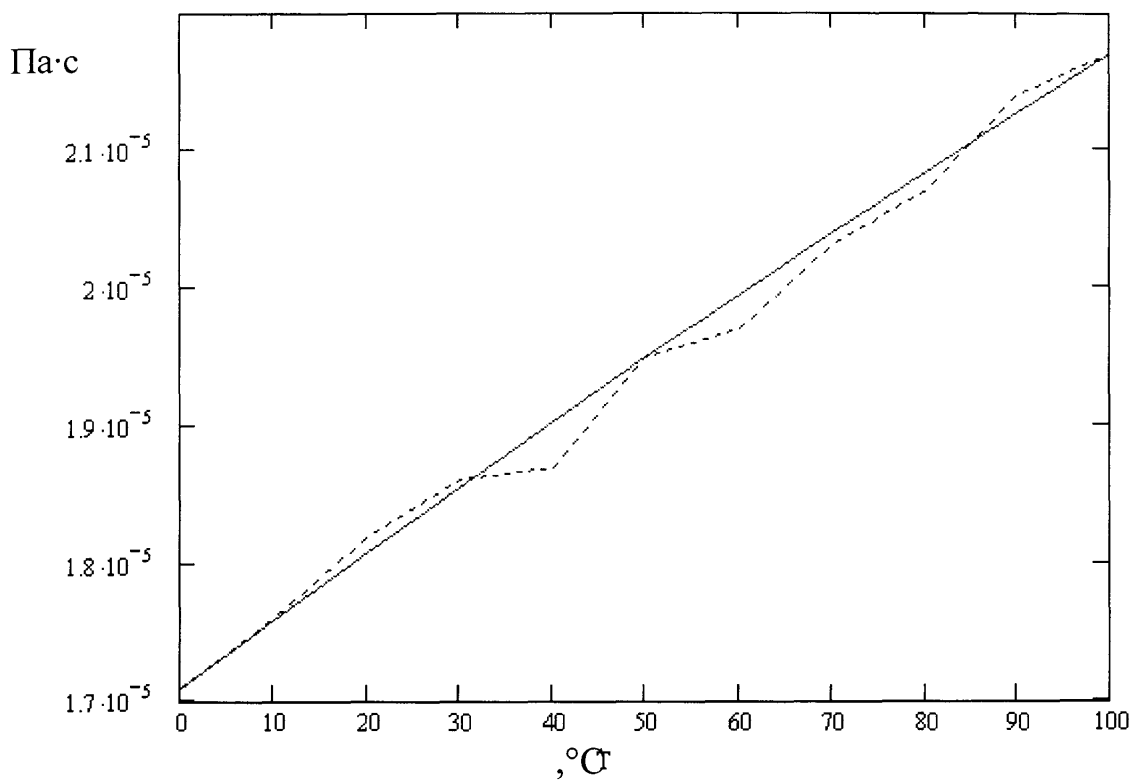


Рис. 2.4. Залежність в'язкості від температури.

Зважаючи на практично пряму залежність в'язкості від температури в діапазоні 0-100 °С, для полегшення метрологічного аналізу ламінарних витратомірів доцільно аналітично описати залежність динамічної в'язкості повітря від температури. На основі даних таблиці 1 побудуємо графік, аналіз якого показує практично прямолінійний характер даної залежності.

Методом найменших квадратів знайдено рівняння апроксимуючої прямої, отже залежність динамічної в'язкості від температури можна описати формулою[98].

$$\mu = k \cdot T + b, \quad (2.11)$$

де $k = 4,51 \cdot 10^{-8} \text{ Па}/(\text{К} \cdot \text{с})$

$b = 4,87 \cdot 10^{-6} \text{ Па}/\text{с}$

На рис. 2.5 точки відображають табличні дані залежності в'язкості повітря від температури, а пряма – апроксимовані дані цієї залежності.

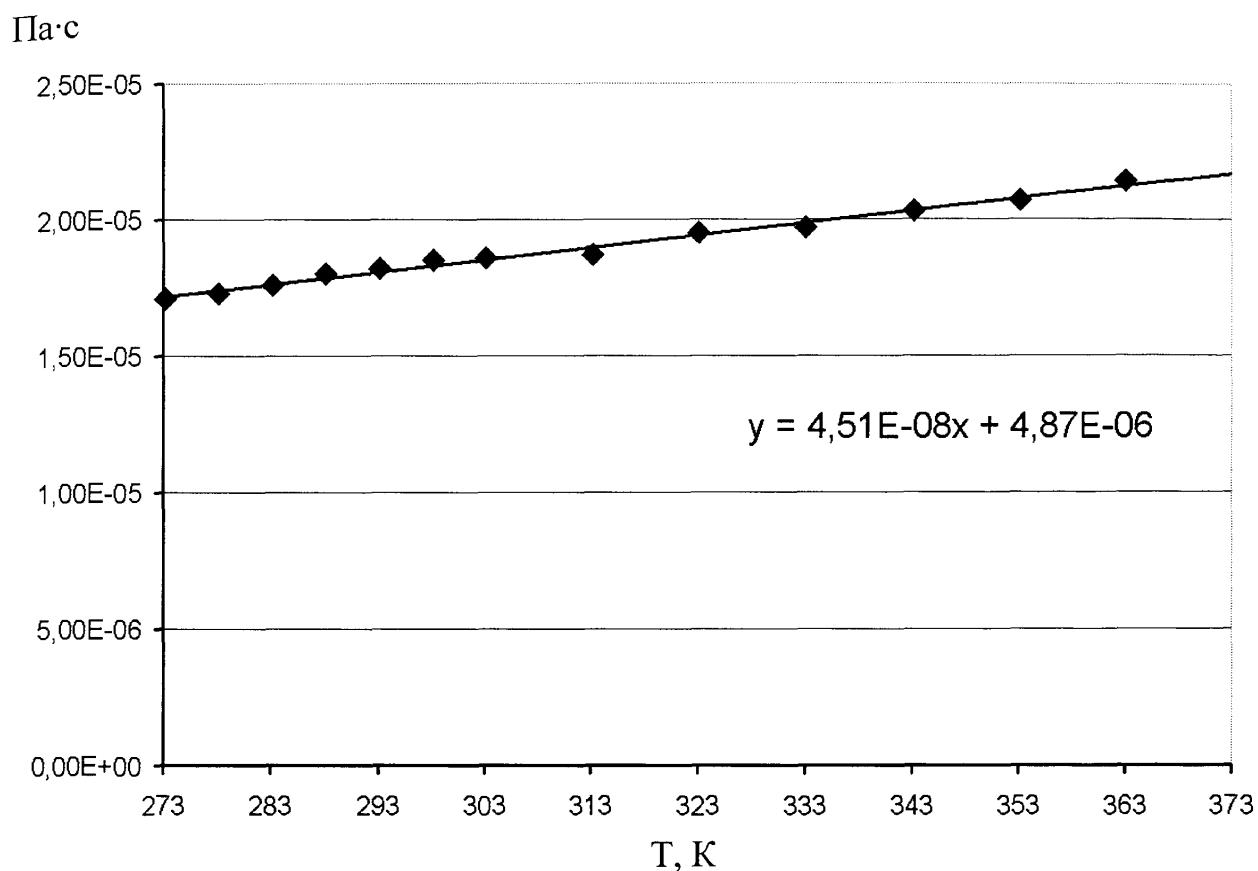


Рис. 2.5 - Залежність в'язкості повітря від температури.

Підставивши рівняння (2.11) в повне рівняння ламінарного витратоміра (2.3), отримаємо математичну модель рівняння вимірювань від температури:

$$\Delta P = \frac{128LQ}{\pi D^4} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) + \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 D^4} (K_c + K_e) \quad (2.12)$$

Для реалізації термокомпенсованого ламінарного витратоміра розрахуємо конструктивні параметри, які забезпечують повну температурну компенсацію.

Товщина пластин, що утворюють витратомір, змінюється від температури за такою залежністю:

$$d_{осн}(T) = d_{осн0} \cdot (1 + \alpha_{осн} \cdot \Delta T) \quad (2.13)$$

$$d_{роз}(T) = d_{роз0} \cdot (1 + \alpha_{роз} \cdot \Delta T), \quad (2.14)$$

де $d_{осн0}$ – товщина пластин, що утворюють щілину при температурі 20 °С,

$d_{роз0}$ – товщина роздільних пластин при температурі 20 °С,

$\alpha_{роз}$ – коефіцієнт лінійного розширення роздільних пластин

$\alpha_{осн}$ – коефіцієнт лінійного розширення пластин, що утворюють щілину
 ΔT – відхилення температури від 20 °С.

Оскільки прилад працює в діапазоні температур від 15 °С до 25 °С, похибка визначення зміни товщини пластин від температури при використанні формул (2.13, 2.14) не перевищує 0,01%.

Оскільки висота щілини визначається різницею товщини пластин,

$$h_0 = d_{роз0} - d_{осн0} \quad (2.15)$$

то відносну зміну висоти щілини запишемо як:

$$\frac{\Delta h(T)}{h_0} = \frac{(d_{роз}(T) - d_{осн}(T)) - (d_{роз0} - d_{осн0})}{d_{роз0} - d_{осн0}} = \Delta T \cdot \frac{\alpha_{роз} \cdot d_{роз0} - \alpha_{осн} \cdot d_{осн0}}{d_{роз0} - d_{осн0}}, \quad (2.16)$$

де $\Delta h(T)$ – зміна висоти щілини від температури,

h_0 – висота щілини при температурі 20 °С.

Оскільки $\frac{\Delta h(T)}{h_0}$ для кожного газу є фіксованим значенням, позначимо

його через K_t .

Таким чином, для розрахунку товщини пластин термокомпенсованого ламінарного витратоміра при заданій ширині щілини та відносній зміні висоти щілини необхідно розв'язати систему рівнянь[98]:

$$\begin{cases} h_0 = d_{роз0} - d_{осн0} \\ K_t = \Delta T \cdot \frac{\alpha_{роз} \cdot d_{роз0} - \alpha_{осн} \cdot d_{осн0}}{d_{роз0} - d_{осн0}} \end{cases} \quad (2.17)$$

Із рівняння (2.15)

$$d_{роз0} = h_0 + d_{осн0} \quad (2.18)$$

підставимо (2.18) в друге рівняння системи (2.17), отримаємо

$$K_t = \Delta T \cdot \frac{\alpha_{роз} \cdot (h_0 + d_{осн0}) - \alpha_{осн} \cdot d_{осн0}}{h_0} \quad (2.19)$$

Розв'язавши рівняння (2.19) відносно змінної $d_{осн0}$, отримаємо

$$d_{осн0} = \frac{h_0 \cdot (K_t - \alpha_{роз0} \cdot \Delta T)}{\Delta T \cdot (\alpha_{роз0} - \alpha_{осн})} \quad (2.20)$$

Відповідно для відомого значення відносної зміни ширини щілини при зміні температури на 1 К, а також висоти щілини з (2.17) і (2.19) можна обчислити параметри пластин витратоміра, які забезпечують практично повну відсутність залежності перепаду тиску від температури. Розрахунок витратоміра з кільцевою щілиною (рис. 2.3) аналогічний розрахунку витратоміра з серією прямокутних щілин (рис. 2.2).

Як попередньо визначано в розділі 2.2, при відхиленні температури на 2 °С відносна зміна висоти щілини повинна складати 0,18%. Для витратоміра, розрахованого на максимальну витрату 0,01 м³/год з параметрами $L=0,2$ м, $h_0=0,9 \cdot 10^{-3}$ м, $B=5 \cdot 10^{-3}$ м при номінальній температурі 20 °С, перепад тиску при витраті $2,778 \cdot 10^{-6}$ м³/с (0,01 м³/год) складає 21,067 Па. При цьому, якщо вибрати в якості матеріалів пластин кварцеве скло з $\alpha_{осн}=0,07 \cdot 10^{-5}$ і алюміній з $\alpha_{розд}=2,4 \cdot 10^{-5}$, основна пластина повинна мати товщину

$$d_{осн0} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot (0,0018 - 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 2)}{2 \cdot (2,4 \cdot 10^{-5} - 0,07 \cdot 10^{-5})} = 3,38 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_{розд0} = 0,9 \cdot 10^{-3} + 3,38 \cdot 10^{-2} = 3,47 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

За розрахованими значеннями геометричних параметрів виготовлено дослідний зразок термокомпенсованого ламінарного витратоміра та проведено його експериментальне дослідження.

2.4 Експериментальні дослідження термокомпенсованого ламінарного витратоміра

2.4.1 Планування експерименту

Як відомо[95], для ламінарних витратомірів характерна необхідність індивідуального градуювання кожного витратоміра. Це підтверджує необхідність експериментальних досліджень витратоміра.

Метою експерименту є порівняльна оцінка впливу температури та інших факторів на ламінарний витратомір традиційної конструкції та на термокомпенсований ламінарний витратомір.

Інженерний експеримент може проводитись у будь-яких умовах залежно від поставленого завдання. Для застереження від можливих недостовірних результатів експерименту необхідно вибирають максимально можливу кількість факторів впливу, що повною мірою характеризують навколишнє середовище, в якому проводиться експеримент. До таких факторів впливу довілля відносять:

- навколишню температуру;
- атмосферний тиск;
- відносну вологість;
- вібрацію;
- магнітне поле;
- електростатичне поле.

Фактори, які прямо не входять у рівняння вимірювань, також повинні досліджуватися для можливого уточнення математичної моделі (в даному випадку це вібрація, магнітне та електростатичне поле). Цей перелік може бути дещо обмежений або розширений залежно від значення параметра впливу на результат експерименту.

З погляду витримування певних умов проведення інженерного експерименту, в тому числі і вимірювального, умови постановки експерименту можна розділити на такі дві групи:

- нормальні умови застосування ламінарного витратоміра;
- робочі умови застосування ламінарного витратоміра;

Щілинний витратомір еквівалентний витратоміру к кільцевою щілиною, у якого різниці радіусів відповідає товщина щілини, а периметру – її ширина [95]. Оскільки витратомір мікровитрат є лабораторним приладом, експеримент повинен проводитися в нормальних умовах. Це визначає вимоги до приладів вимірювання абсолютного тиску і температури, які використовуються при експерименті.

Зміна технологічних параметрів і умов зовнішнього середовища (температури, тиску, вологості) значно впливають на показники точності

ламінарного витратоміра. Кожний із впливових чинників переважно може бути вимірний окремо і врахований при одержанні результатів вимірювань, проте у виробничих умовах експлуатації всі їх врахувати практично неможливо.

Планування інженерного експерименту здійснюється на теоретичних засадах, за схемою повного факторного експерименту[99-101].

Факторний експеримент проведено з використанням еталонної установки на основі методу сумування витрат. В якості еталонів застосовані дзвонова установка як засіб відтворення витрати з похибкою 0,15% та еталонний витратомір типу Ritter (похибка вимірювання витрати $\pm 0,2\%$). Зовнішній вигляд установки, на якій проводилося дослідження, зображено на рис. 2.5.

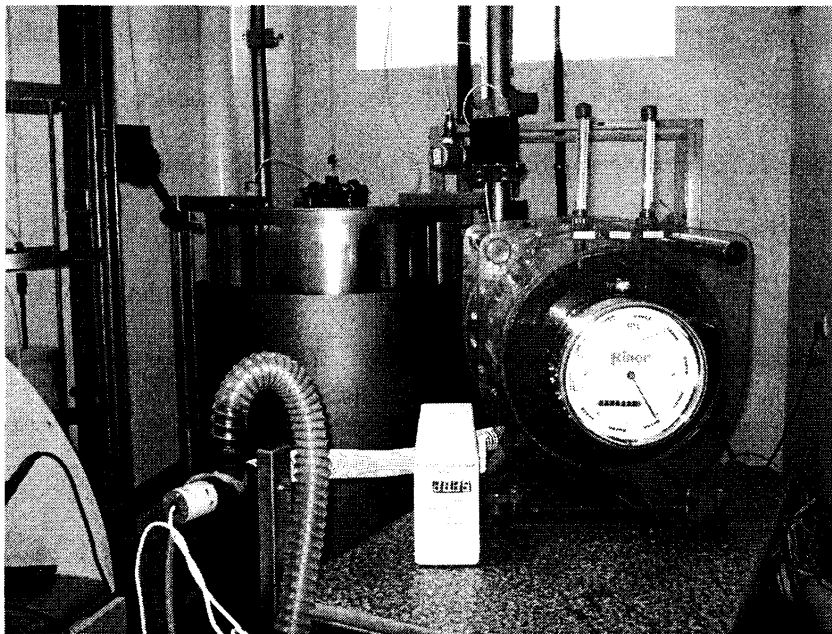


Рис. 2.5 – Експериментальна установка на основі методу сумування витрат

При проведенні дослідження витратомірів дотримувались наступні умови:

- температура навколишнього середовища (20 ± 2) °С.
- відносна вологість повітря не більше 80 %.
- відсутність вібрацій, ударів, трясіння, які впливають на роботу повірочної установки, за допомогою якої досліджують витратомір;

- градієнт температури навколишнього середовища не повинен перевищувати $0,5^{\circ}\text{C}$ відносно геометричних параметрів повірочної установки та змонтованого витратоміра;

- робочим середовищем використовувалось повітря;

Перед проведенням дослідження витратоміра необхідно витримати витратомір та повірочну установку, за допомогою якої проводитиметься визначення основної відносної похибки витратоміра, не менше 12 годин.

Перевірку герметичності витратоміра проводять на повірочній установці, шляхом під'єднання його до повірочної установки, подальшої герметизації виходу витратоміра і створення максимально можливого надлишкового тиску в системі «повірочна установка – витратомір». Витримують в такому стані систему протягом 20 хвилин, при цьому слідкують за зміною показів витратоміра та системи вимірювання установки, що використовується при випробуваннях. Систему і витратомір вважають герметичними, якщо за час дослідження витік повітря з системи менший від двох величин: $0,01 \text{ дм}^3/\text{год}$ або об'єму, що не перевищує $0,1\%$ від пропущеного об'єму за найменшого значення витрати.

Перевірку функціонування витратоміра проводять для перевірки його працездатності. Для цього через витратомір пропускають контрольний об'єм повітря за його максимальної об'ємної витрати $q_{v \text{ max}}$ не менше п'яти раз.

Якщо витратомір працює без збоїв і перетворювач перепаду тиску визначає значення витрати, то результати перевірки функціонування витратоміра вважають позитивними.

Перед проведенням досліджень необхідно не менше 5 раз пропустити контрольний об'єм повітря, за максимального значення об'ємної витрати, через витратомір для досягнення врівноваження температур перед ним та в повірочній установці.

Для кожного i -го вимірювання за даного j -того значення об'ємної витрати проводять наступні обчислення:

– значення об'єму, що пройшов через витратомір:

$$V_{ji} = V_{Ej} \times \frac{P_{aj} + P_{Eji}}{P_{aj} + P_{ji}} \times \frac{T_{ji} + 273,15}{T_{Eji} + 273,15} \quad (2.21)$$

де V_{ji} - значення об'єму газу, розраховане з показів витратоміра, м³;

V_{Ej} - значення об'єму газу, визначене повірочною установкою, м³;

P_{Ei} - надлишковий тиск у повірочній установці, Па;

P_{ji} - тиск перед витратоміром, Па;

T_{Eji} - температура у повірочній установці, °С;

T_{ji} - температури на вході (виході) у витратомір, °С

P_{aj} - атмосферний тиск, Па.

Значення об'єму газу, розраховане з показів витратоміра становить:

$$V_{ji} = q_{v_{ji}} \cdot t_{ji} \quad (2.22)$$

де $q_{v_{ji}}$ - значення об'ємної витрати газу, взяте з показів витратоміра, м³/с;

t_{ji} - значення часу, протягом якого здійснювалось дослідження, с.

Визначення границь сумарної відносної похибки вимірювання.

Спочатку визначають середнє значення об'єму газу згідно формул (2.21), (2.22) за j - того значення об'ємної витрати:

$$\bar{V}_j = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ji}}{n} \quad (2.23)$$

де n - кількість вимірювань за j - того значення об'ємної витрати.

Наступним етапом обчислюють СКВ середнього значення об'єму газу за j - того значення об'ємної витрати:

- в абсолютному вираженні:

$$S_{Vj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ji} - \bar{V}_j)^2}{n(n-1,5)}} \quad (2.24)$$

- у відносному вираженні:

$$\sigma_{Vj} = \frac{S_{Vj}}{\bar{V}_j} \cdot 100, \% \quad (2.25)$$

Довірчі границі сумарної відносної похибки витратоміра визначають в наступній послідовності:

– границі невилученої систематичної похибки витратоміра визначаються,

як δ_{Π} – сумарна похибка повірочної установки, %;

– обчислюють довірчі границі відносної похибки витратоміра для j - того значення об'ємної витрати:

$$\delta_j = \pm t_{\Sigma j} \cdot \sqrt{S_{\delta}^2 + \sigma_{Vj}^2} \quad (2.26)$$

де $t_{\Sigma j}$ – коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової та невилученої систематичної похибок, і визначається, як:

$$t_{\Sigma j} = \frac{\delta_{\Pi} + t_s \cdot \sigma_{Vj}}{S_{\delta} + \sigma_{Vj}}, \quad (2.27)$$

де t_s – квантіль Стюдента для відповідної довірчої ймовірності та кількості вимірювань (для $P=0,95$ $t_s=1,96$); $S_{\delta} = \frac{\delta_{\Pi}}{\sqrt{3}}$

Вибрана схема планування експерименту визначається за моделлю об'єкта дослідження, яка визначається рівнем апріорної інформації про об'єкт дослідження [99,100]. При цьому розрізняють два крайні рівні апріорної інформації про стан моделі:

а) повна відсутність конкретизованої інформації (експериментатор формує своє пізнання про об'єкт від простого до складного з метою побудови математичної моделі);

б) математична модель задана апріорі (експериментатор формує своє пізнання про об'єкт або розширює своє пізнання про об'єкт):

- перебором факторів;
- відбором їх за певними ознаками;
- уточненням математичної моделі додатковими експериментами.

Оскільки відомі базові закономірності поведінки ламінарного витратоміра, можна вважати, що математична модель задана апріорі.

Також іноді доцільно провести дослідження впливу факторів, які не входять в рівняння вимірювання, з метою уточнення математичної моделі

(наприклад, відносної вологості). Проте для проведення глибокого аналізу необхідне отримання початкових результатів експерименту в нормальних умовах, які на основі реплікації дадуть можливість перевірити практично ефект температурної компенсації, а також спланувати план багатofакторного експерименту. Досліджуваними факторами можна вибрати, в першу чергу, температуру і тиск.

З використанням теорії повного факторного експерименту [99-101], в якому використовуються усі можливі комбінації рівнів (умовних кількісних значень) проведемо серію експериментальних досліджень за “планом типу 2^n ”, який характеризується двома рівнями: верхньому значенню варіювання фактору умовно присвоюється рівень (+1), а нижньому – рівень (-1), а також показником k – кількістю факторів. Таким чином, для нашого експерименту серія дослідів n складатиме 2^3 , тобто 8 дослідів. Для зміни (варіювання) рівнів впливових факторів дослідження ламінарного витратоміра проведемо при температурі 15°C і атмосферному тиску 97 кПа (всього 2 дослідів), та при температурі 15°C і атмосферному тиску 100,5 кПа, а також аналогічні дослідження при температурі 25°C (також 4 дослідів) в діапазоні витрат від Q_t до Q_{max} .

Результати досліджень занесено в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Результати досліджень

	15°C	25°C	15°C	25°C	15°C	25°C	15°C	25°C
$P, \text{кПа}$	97	97	97	97	100,5	100,5	100,5	100,5
$q_3, \text{м}^3/\text{год}$	0,01	0,01	0,016	0,016	0,01	0,01	0,016	0,016
$\bar{\delta}, \%$	0,3	0,35	0,05	0,15	0,4	0,45	0,15	0,15

Якщо інтервал варіювання для i -го фактора вибрати таким, що дорівнює

$$\Delta_i = \frac{X_{ih} - X_{il}}{2}, \quad (2.28)$$

де X_{ih} та X_{il} – верхнє та нижнє значення факторів, то його кодовані рівні, що визначаються за формулою

$$X_i = \frac{X_{ihl} - X_{io}}{\Delta_i} \quad (2.29)$$

будуть дорівнювати (+1) для верхнього кодованого рівня і (-1) для нижнього кодованого рівня, тобто

$$(+1) = \frac{X_{ih} - X_{io}}{\Delta_i} \quad (2.30)$$

$$(-1) = \frac{X_{il} - X_{io}}{\Delta_i} \quad (2.31)$$

Нульовий рівень фактора визначається за формулою

$$X_{io} = \frac{X_{ih} + X_{il}}{2} \quad (2.32)$$

За результатами досліджень сформовано матрицю даних факторного експерименту (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Матриця даних факторного експерименту

Рівні факторів та інтервали варіювання	Натуральні значення для кодованих позначень факторів		
	X1 (тиск)	X2 (витрата)	X3 (температура)
Верхній рівень	100,5	0,016	25
Нижній рівень	97	0,010	15
Нульовий рівень X_0	98,75	0,013	20
Інтервал варіювання Δ	1,75	0,03	5

Враховуючи фактори взаємодії як добутки окремо взятих факторів, побудуємо суміщену матрицю плану факторного експерименту типу 2^3 в кодованих значеннях (+1) і (-1) усіх можливих комбінацій рівнів (табл. 2.3):

Суміщена матриця факторного експерименту

№ досліджу	Кодовані значення факторів			Кодовані значення факторів взаємодії				Похибка $\delta, \%$
	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,3
2	+1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,05
3	-1	+1	-1	-1	1	-1	1	0,4
4	+1	+1	-1	1	-1	-1	-1	0,15
5	-1	-1	+1	1	-1	-1	1	0,35
6	+1	-1	+1	-1	1	-1	-1	0,15
7	-1	+1	+1	-1	-1	1	-1	0,45
8	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,15

Математична модель в кодovаних значеннях для факторного експерименту типу 2^3 описується формулою [100] в такому вигляді:

$$\delta = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2.33)$$

Розрахуємо коефіцієнти регресії для математичної моделі в кодovаних значеннях (2.33) за формулами (2.34-2.41):

$$b_0 = \sum_i \delta_i \quad (2.34) \quad b_1 = \frac{\sum_i X1 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.35)$$

$$b_2 = \frac{\sum_i X2 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.36) \quad b_3 = \frac{\sum_i X3 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.37)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_i X1 \cdot X2 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.38) \quad b_{13} = \frac{\sum_i X1 \cdot X3 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.39)$$

$$b_{23} = \frac{\sum_i X2 \cdot X3 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.40) \quad b_{123} = \frac{\sum_i X1 \cdot X2 \cdot X3 \cdot \delta_i}{n} \quad (2.41)$$

і отримаємо їх значення:

$$b_0 = 0.6 \quad b_1 = -0.163 \quad b_2 = 0.088 \quad b_3 = 0.125$$

$$b_{12} = 0.025 \quad b_{13} = 0.063 \quad b_{23} = -0.062 \quad b_{123} = -0.025$$

Математична модель (6) в кодovаних значеннях при підстановці отриманих коефіцієнтів регресії матиме такий вигляд:

$$\delta(X_1, X_2, X_3) = 0.6 - 0.163 \cdot X_1 + 0.088 \cdot X_2 + 0.125 \cdot X_3 + 0.025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.063 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.062 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.025 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2.42)$$

Перехід до математичної моделі у натуральних значеннях здійснюється за формулою (2.29) до кожного з кодованих факторів з врахуванням факторів взаємовпливу:

$$\delta = b_0 + b_1 \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} + b_2 \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} + b_3 \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} + b_{12} \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} + b_{13} \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} + b_{23} \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} + b_{123} \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} \quad (2.43)$$

Зробивши відповідні розрахунки, отримаємо математичну модель в натуральних значеннях:

$$\delta(q, P, T) = 5.149 - 775.23q - 4.514 \cdot 10^{-2} P - 0.484T + 7.429qP + 4.95 \cdot 10^{-3} PT + 48.9 \cdot 10^{-3} qT - 0.495qPT \quad (2.44)$$

2.4.2 Перевірка адекватності моделі

Проведемо перевірку моделі на адекватність, порівнюючи розрахункові дані похибок з похибками, отриманими в ході експериментів. Результати перевірки наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Таблиця перевірки моделі на адекватність

№ досліджу	Розрахункова похибка	Експеримент	Похибка неадекватності
	δ	$\bar{\delta}$	$\Delta_{\delta} = \delta - \bar{\delta}$
1	0.299	0,3	-0.001
2	0,049	0,05	-0.001
3	0,401	0,4	0.001
4	0,151	0,15	0.001
5	0,349	0,35	-0.001
6	0,451	0,15	0.001
7	0,451	0,45	0.001
8	0,149	0,15	0.001

Отримана похибка неадекватності математичної моделі експериментальним даним характеризує її поведінку в точках нижнього та верхнього значень факторів. Для перевірки моделі в інших точках діапазону зміни факторів порівнюємо дані розрахунків похибок з експериментальними:

Таблиця 2.5

Таблиця дослідження адекватності моделювання похибки ламінарного витратоміра

q, м ³ /год	P=97 кПа						P=100.5 кПа					
	Δ _{15°C} , %			Δ _{25°C} , %			Δ _{15°C} , %			Δ _{15°C} , %		
	Експ.	Розр.	Неа- декват.	Експ.	Розр.	Неа- декват.	Експ.	Розр.	Неадекв.	Експ.	Розр.	Неа- декват.
0.01	0,3	0,29	-0,001	0,35	0,349	-0,001	0,4	0,401	0,001	0,45	0,451	0,001
0.012	0,2	0,216	0,016	0,25	0,283	0,033	0,3	0,318	0,018	0,3	0,35	0,05
0.014	0,1	0,132	0,032	0,2	0,217	0,017	0,2	0,234	0,034	0,2	0,25	0,05
0.016	0,05	0,049	-0,001	0,15	0,151	0,001	0,15	0,151	0,001	0,15	0,149	-0,001

Неадекватність моделювання похибки при цьому складає 0,05%.

При підстановці середнього значення тиску (98,75 кПа) у формулу (2.44) отримуємо модель залежності похибки від витрати і температури, яку можна зобразити графічно вигляді 3-вимірного графіка :

$$\delta(q, T) = 0.692 - 41.67q + 5 \cdot 10^{-3} T \quad (2.45)$$

Геометрична інтерпретація отриманої математичної моделі має вигляд (рис. 2.6). На ній відображено залежність похибки від витрати і температури, величина похибка пропорційна температурі кольору.

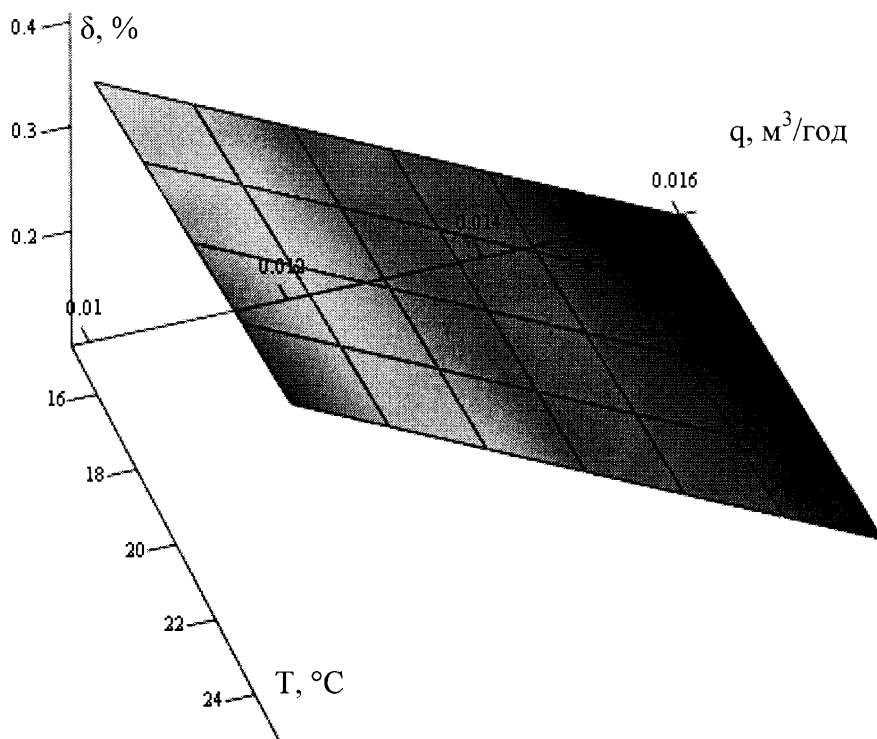


Рис. 2.6 – Геометрична інтерпретація математичної моделі термокомпенсованого ламінарного витратоміра

Оскільки неадекватність моделювання похибки не перевищує 0,05%, можна зробити висновки, що отримана математична модель досить точно описує поведінку ламінарного витратоміра при зміні тиску, витрати і температури.

2.4.3 Визначення параметрів оптимізації

Оцінку показників якості і технічного рівня ламінарного витратоміра, а також ефект від термокомпенсації можна оцінити шляхом визначення параметра оптимізації. Цей параметр дає можливість оцінити найбільш суттєві з метрологічної точки зору характеристики, невелика зміна яких суттєво впливає на залальну точність приладу. Для одержання математичної моделі, кількісною характеристикою якої є параметр оптимізації, розглянуто множину

одиничних показників якості витратоміра газу та вибрано найбільш важливий з них способом оцінки коефіцієнтів парної кореляції.

Для термокомпенсованого ламінарного витратоміра можна оцінити такі параметри:

1. Відносна похибка на витраті Q_{\max} , % - y_1
2. Відносна похибка на витраті Q_{\min} , % - y_2
3. Відносна похибка на витраті $0.4Q_{\max}$, % - y_3
4. СКВ випадкової похибки на витраті Q_t , % - y_4
5. Поріг чутливості, % - y_5

Для зменшення кількості параметрів необхідно оцінити коефіцієнти парної кореляції між ними для знаходження основного параметра оптимізації.

Відповідно, можна побудувати матрицю коефіцієнтів парної кореляції виду 5×5 . Для знаходження коефіцієнтів застосуємо формулу [100]:

$$r_{12} = \frac{\sum (y_1 - \bar{y}_1)(y_2 - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum (y_1 - \bar{y}_1)^2 (y_2 - \bar{y}_2)^2}} \quad (2.46)$$

Виконаємо обчислення у середовищі Mathcad, позначивши ранжованою змінною n - порядковий номер експериментальних даних, k - кількість експериментальних даних, p - кількість досліджуваних параметрів.

$$\begin{aligned} k &= 1 \\ n &= 1..k \\ p &= 5 \end{aligned}$$

Експериментальні дані по кожному параметру заносяться у відповідні їм параметри,

$$y_{-1,n} = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.39 \\ 0.3 \end{bmatrix} \quad y_{-2,n} = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.3 \\ 0.39 \end{bmatrix} \quad y_{-3,n} = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.37 \\ 0.39 \end{bmatrix} \quad y_{-4,n} = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.37 \\ 0.25 \end{bmatrix} \quad y_{-5,n} = \begin{bmatrix} 0.49 \\ 0.31 \\ 0.3 \end{bmatrix}$$

формуючи таким чином матрицю параметрів:

$$y_{-} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.39 & 0.3 \\ 0.39 & 0.3 & 0.39 \\ 0.35 & 0.37 & 0.39 \\ 0.35 & 0.34 & 0.25 \\ 0.49 & 0.31 & 0.3 \end{bmatrix}$$

За допомогою програми обчислюємо коефіцієнти парної кореляції між ними:

$$r(y, \text{row1}, \text{row2}) := \frac{\begin{array}{l} \text{for } j \in 1..k \\ \left| \begin{array}{l} y1_j \leftarrow y_{\text{row1},j} \\ y2_j \leftarrow y_{\text{row2},j} \end{array} \right. \\ \sum_n y1_n \\ y1s \leftarrow \frac{\quad}{k} \\ \sum_n y2_n \\ y2s \leftarrow \frac{\quad}{k} \\ \sum_n [(y1_n - y1s)(y2_n - y2s)] \end{array}}{\sqrt{\left[\sum_n (y1_n - y1s)^2 \right] \cdot \left[\sum_n (y2_n - y2s)^2 \right]}}$$

$r(y_{-,1,1}) = 1$	$r(y_{-,2,1}) = -0.896$	$r(y_{-,3,1}) = -0.554$	$r(y_{-,4,1}) = 0.852$	$r(y_{-,5,1}) = -0.111$
$r(y_{-,1,2}) = -0.896$	$r(y_{-,2,2}) = 1$	$r(y_{-,3,2}) = 0.866$	$r(y_{-,4,2}) = -0.996$	$r(y_{-,5,2}) = -0.54$
$r(y_{-,1,3}) = -0.554$	$r(y_{-,2,3}) = 0.866$	$r(y_{-,3,3}) = 1$	$r(y_{-,4,3}) = -0.908$	$r(y_{-,5,3}) = -0.888$
$r(y_{-,1,4}) = 0.852$	$r(y_{-,2,4}) = -0.996$	$r(y_{-,3,4}) = -0.908$	$r(y_{-,4,4}) = 1$	$r(y_{-,5,4}) = 0.614$
$r(y_{-,1,5}) = 0.111$	$r(y_{-,2,5}) = -0.54$	$r(y_{-,3,5}) = -0.888$	$r(y_{-,4,5}) = 0.614$	$r(y_{-,5,5}) = 1$

За отриманими результатами формуємо матрицю коефіцієнтів парної кореляції:

$$r_{-,i,j} = r(y_{-}, i, j)$$

$$r_{-} = \begin{bmatrix} 1 & -0.896 & -0.554 & -0.852 & -0.111 \\ -0.896 & 1 & 0.866 & -0.996 & -0.54 \\ -0.554 & 0.866 & 1 & -0.908 & -0.888 \\ 0.852 & -0.996 & -0.908 & 1 & 0.614 \\ 0.111 & -0.54 & -0.888 & 0.614 & 1 \end{bmatrix}$$

Для знаходження параметра оптимізації визначаємо суми кожного стовпця матриці коефіцієнтів парної кореляції

$$n_{-1} = \sum_{i=1}^p |r_{-1,i}| \quad n_{-1} = 3.414$$

$$n_{-2} = \sum_{i=1}^p |r_{-2,i}| \quad n_{-2} = 4.298$$

$$n_{-3} = \sum_{i=1}^p |r_{-3,i}| \quad n_{-3} = 4.217$$

$$n_{-4} = \sum_{i=1}^p |r_{-4,i}| \quad n_{-4} = 4.37$$

$$n_{-5} = \sum_{i=1}^p |r_{-5,i}| \quad n_{-5} = 3.153$$

$$n_{-} = \begin{pmatrix} 3.414 \\ 4.298 \\ 4.217 \\ 4.37 \\ 3.153 \end{pmatrix} \quad \sum n_{-} = 19.452$$

Вагові коефіцієнти:

$$\frac{n_{-}}{\sum n_{-}} = \begin{pmatrix} 0.175 \\ 0.221 \\ 0.217 \\ 0.225 \\ 0.162 \end{pmatrix}$$

Відповідно, за результатами аналізу можна сказати, що найбільш визначеним параметром є параметр у4 - СКВ випадкової похибки на витраті Qt, %, а найбільш невизначеним параметром, є параметр у5 – поріг чутливості.

Відповідно, технічні характеристики витратоміра більш невизначені на мінімальних для нього витратах.

З результатів досліджень слідує, що ефект температурної компенсації повністю проявляється у всьому діапазоні витрат, при чому похибка вимірювання витрати в діапазоні температур від 15°C до 25°C не перевищує 0,5%.

2.5 Висновки до другого розділу

Досліджено конструктивні особливості ламінарних витратомірів, які перешкоджають досягненню високих метрологічних характеристик при вимірюванні мікровитрат. Встановлено функцію температурної залежності результатів вимірювання. Вибрано метод компенсації даної залежності і запропоновано два варіанти конструктивного рішення, які його реалізують.

Розроблено математичну модель ламінарного витратоміра і проведений метрологічний аналіз по часткових похідних. Встановлено, що при використанні термокомпенсації можливо істотно підвищити метрологічні характеристики ламінарного витратоміра.

Сплановано та проведено факторний експеримент для експериментальних досліджень універсального витратоміра для діапазону витрат $0,277 \cdot 10^{-6}$ - $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Результатом досліджень стала математична модель похибки ламінарного витратоміра як функція від впливових факторів (витрати, тиску та температури). Оцінка адекватності моделі показала її високу відповідність

3. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДТВОРЕННЯ МІКРОВИТРАТ В ДІАПАЗОНІ $0,277 \cdot 10^{-6}$ - $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с (1-16 л/год)

3.1 Теоретичні основи метрологічного забезпечення мікровитрат

Метрологічне забезпечення мікровитрат розроблялося з урахуванням відсутності на даний момент методів і засобів повірки і калібрування ЗВТ мікровитрат в державній повірочній схемі для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу[102]. Розробка вимірювального обладнання велася в двох напрямках, описаних в п. 3.1.1 та 3.1.2.

3.1.1. Розширення діапазону відтворюваних витрат вторинного еталона об'єму і об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08

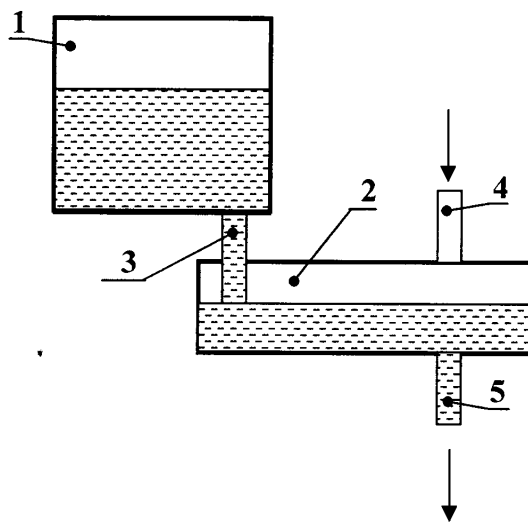
Запропоновано [87,102,103] розширення діапазону відтворюваних витрат вторинного еталона об'єму і об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08, шляхом виготовлення додаткового контура мікровитрат з стабілізацією витрати за допомогою посудини Маріотта та подальшого точного зважування еквівалентної маси витісненої рідини на тензOMETричній вазі. Оскільки метод еквівалентного витіснення не має принципового обмеження нижньої границі відтворюваних витрат, при забезпеченні точного вимірювання маси рідини можливо з високою точністю відтворювати мікровитрати, а стабілізація гідростатичного тиску рідини посудиною Маріотта виключає зміну витрати під час проведення вимірювання.

Оскільки всі канали вимірювання контура мікровитрат аналогічні застосованим в основному контурі, і всі складові сумарної похибки відповідають таким же в основному контурі, сумарна похибка передавання об'єму і об'ємної витрати відповідає цьому ж показнику основного контура (0,15%).

В результаті метрологічного аналізу рівняння вимірювання з урахуванням часткових похідних[98] встановлено, що найбільш вагомими джерелами сумарної похибки вимірювання об'єму є похибка вимірювання температури і

густини масла. Оскільки витратовимірвальне обладнання, як правило, знаходиться в термостатованих приміщеннях, похибка вимірювання температури не перевищує 0,1 К, а густина визначається шляхом використання мірників і ваг 1 розряду, резерви підвищення точності відтворення об'єму практично вичерпані.

Зміна гідростатичного стовпа рідини нелінійно впливає на зміну витрати. Для виключення цього впливу застосовується або регулятор витрати [104], або автоматичний стабілізатор витрати [105]. Автором запропоновано також інший метод [102] - стабілізацію рівня рідини у контейнері за допомогою посудини Маріотта (рис. 3.1).



1 – верхній резервуар; 2 – нижній резервуар; 3 – сполучна трубка; 4 – впуск повітря; 5 - впуск рідини

Рис. 3.1 – Посудина Маріотта

При зниженні рівня рідини у нижньому резервуарі 2 під дією сили тяжіння нижче від краю трубки 3, що сполучає резервуари, повітря з верхнього патрубку 4 потрапляє через трубку у верхній резервуар 1. Воно заміщає рідину, яка через ту ж трубку поступає у нижній резервуар то того моменту, поки рівень рідини не підвищиться до нижнього рівня трубки і не перекриє потік повітря у верхній резервуар. Процес триває до того моменту, поки вся рідина з верхнього резервуара не витече в нижній.

Посудина Маріотта забезпечує стабільне підтримання рівня рідини природним чином, що виключає основну складову нестабільності витрати. Дивертор вторинного еталона розрахований на широкий діапазон витрат (від 0,016 до 4 м³/год) і вимагає ручної заміни насадків для правильного формування потоку. Тому для правильного формування потоку мікровитрат в контурі потоку мастила від посудини Маріотта розроблений і встановлений спеціальний дивертор, розрахований на вузький діапазон витрат (від 0,001 до 0,016 м³). Схема модифікованого еталона ВЕТУ 03-01-01-08 зображена на рис. 3.

Зміну витрати в установках як традиційної конструкції, так і з посудиною Маріотта, можна оцінити, застосувавши формулу Торрічеллі, за якою визначається швидкість витікання рідини з посудини при відомому її рівні:

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad (3.1)$$

де v_1 – швидкість потоку рідини,

g – прискорення вільного падіння,

h – висота стовпа рідини.

При номінальному рівні рідини на початку вимірювання витрата визначається за формулою (3.1). В процесі вимірювання рівень поступово знижується, досягаючи в кінці заміру значення $h - \Delta h$, де Δh – зміна рівня рідини в процесі вимірювання. Відповідно, швидкість потоку складе

$$v_2 = \sqrt{2g(h - \Delta h)}, \quad (3.2)$$

де v_2 – швидкість потоку рідини в кінці заміру,

а зміна швидкості

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \sqrt{2gh} - \sqrt{2g(h - \Delta h)} \quad (3.3)$$

Відповідно, відносна зміна швидкості потоку при зміні рівня визначається:

$$\frac{\Delta v}{v_1} = \frac{\sqrt{2gh} - \sqrt{2g(h - \Delta h)}}{\sqrt{2gh}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\sqrt{2g(h - \Delta h)}}{\sqrt{2gh}}\right) \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Оскільки об'ємна витрата визначається як:

$$Q = v \cdot S, \quad (3.5)$$

де Q – об'ємна витрата,

S – площа перерізу трубопроводу,

а площа перерізу трубопроводу незмінна в процесі вимірювання, то аналогічно зміну витрати в процесі вимірювання можна записати як

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(1 - \frac{\sqrt{2g(h - \Delta h)}}{\sqrt{2gh}} \right) \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Для еталона ВЕТУ 03-01-01-08 зниження рівня масла в контейнері в процесі вимірювання складає 0,25 м при висоті стовпа рідини 2,5 м. Підставивши ці значення у формулу (3.6), розрахункове відхилення витрати від номінального значення в процесі вимірювання складає 5%, що підтверджено вимірюваннями.

При використанні посудини Маріотта відбувається процес заміщення бульбашок повітря краплями рідини, і максимальна зміна рівня рідини визначається максимальним розміром бульбашок (рис. 3.2).

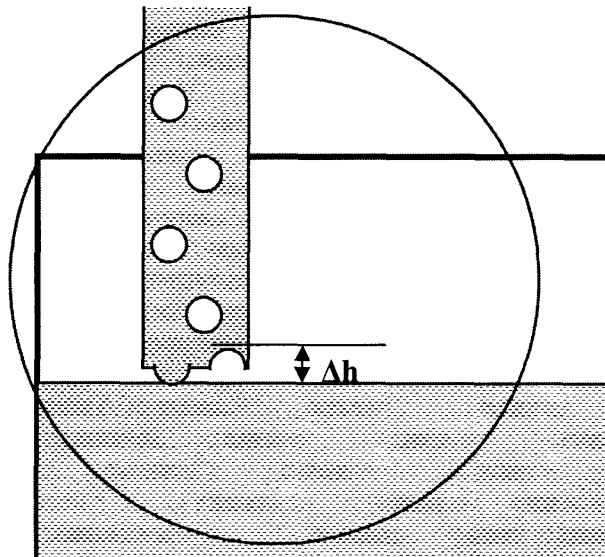
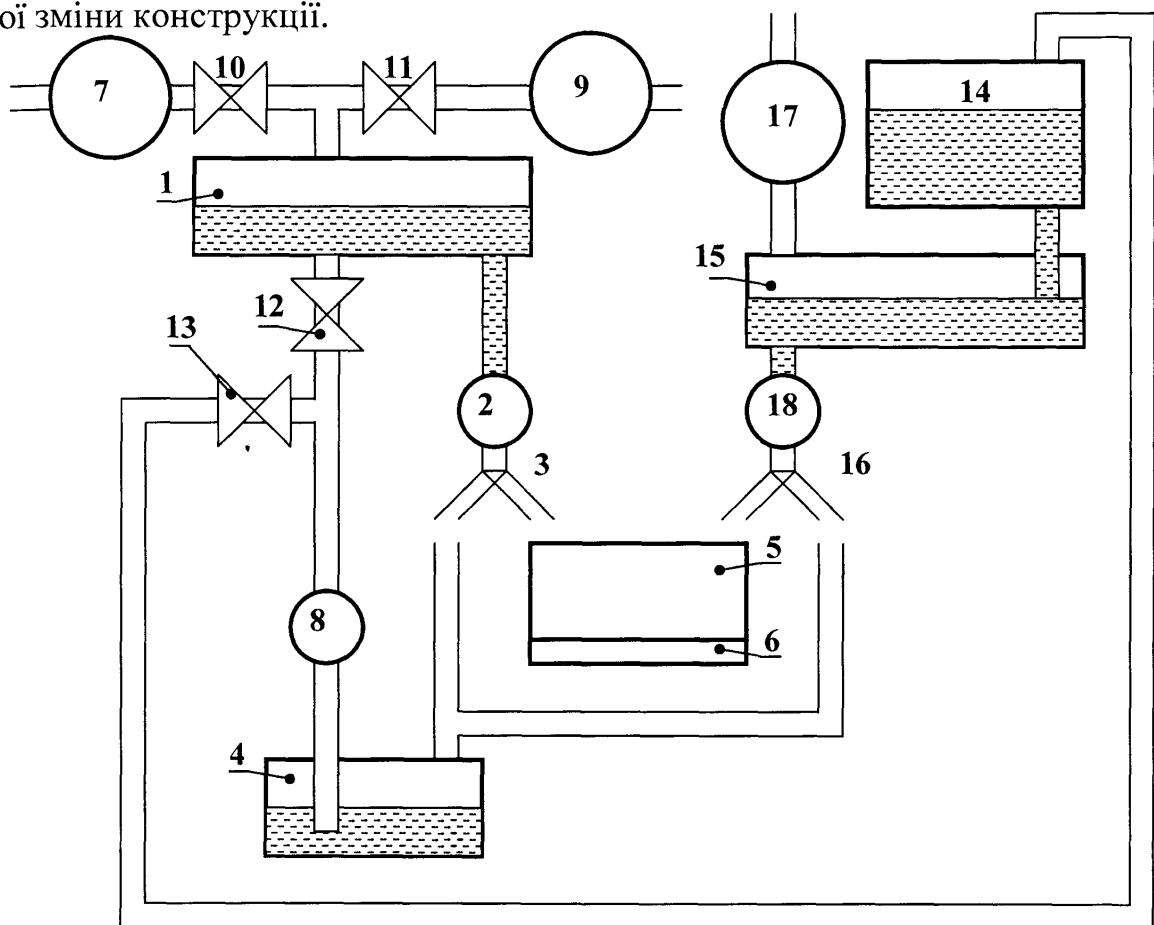


Рис. 3.2 – Процес стабілізації рівня посудиною Маріотта

При зниженні рівня рідини у нижньому резервуарі під дією сили тяжіння до рівня нижчого від краю скляної трубки, що сполучає резервуари, повітря з верхнього патрубку потрапляє через трубку у верхній резервуар у вигляді бульбашок. Воно заміщає рідину, яка через ту ж трубку поступає у нижній резервуар то того моменту, поки рівень рідини не підвищиться до нижнього

рівня трубки і не перекриє потік повітря у верхній резервуар. Процес триває до того моменту, поки вся рідина з верхнього резервуара не витече в нижній. Максимальний діаметр бульбашок визначений експериментально, оскільки він залежить від значної кількості важковраховуваних факторів, і при використанні в якості рідини масла не перевищував 10 мм. Відповідно, зміна витрати за формулою (3.6) складе 0,2%.

Під час аналізування отриманих переваг стала очевидною доцільність застосування даного методу на існуючих установках еквівалентного витіснення (рис. 3.3), отримуючи значне підвищення їх метрологічних характеристик без значної зміни конструкції.



1 – контейнер; 2 – основний регулятор витрати; 3 – основний дивертор; 4,5 – баки; 6 – вага; 7 – лічильник; 8 – насос; 9 – еталон витрати газу дзвонового типу; 10,11,12,13 – крани; 14 – верхній резервуар; 15 – нижній резервуар; 16 – дивертор мікровитрат; 17 – лічильник мікровитрат, 18 – регулятор мікровитрат

Рис. 3.3 – Схема двохконтурної еталонної установки еквівалентного витіснення

Контур вимірювання мікровитрат складається з посудини Маріотта, яка складається з верхнього резервуара 14 та нижнього резервуара 15, лічильника 17, що повіряється, та дивертора мікровитрат 16. Крани 12 і 13 визначають діапазон задання витрати. Робота контура з посудиною Маріотта аналогічна основному контуру.

Оскільки стабілізація рівня в посудині 12 забезпечується шляхом використання рідинного затвора 13, існує певна дискретність зміни рівня Δh , зумовлена розміром бульбашок, що піднімається в контейнер 1. Також було виявлено, що для забезпечення можливості повірки витратомірів, для яких характерний високий перепад тиску (наприклад, ламінарних) необхідно максимізувати висоту стовпа рідини H . Має місце певна конструктивна складність стабілізатора витрати, зумовлена використанням двох контейнерів 1, 12. Тим не менше, даний метод стабілізації витрати показав високу ефективність.

Як відомо, існує два варіанти конструкції посудини Маріотта: постійного рівня і постійної витрати [106]. Описаний вище варіант використання посудини Маріотта забезпечує постійний рівень в ємності 12. Витрата при цьому задається регулятором витрати 2, а стабільний рівень забезпечує постійний гідростатичний тиск на ньому.

Автором запропоновано модернізацію установки щодо усунення вказаних недоліків. Застосовано інший тип посудини Маріотта, який вдосконалено шляхом повертання торця газовідної трубки 14 на 180° вгору. Це дало можливість точно задати фіксоване значення гідростатичного тиску, і одночасно сформувати спрямований потік бульбашок у верхню частину посудини Маріотта (рис. 3.4).

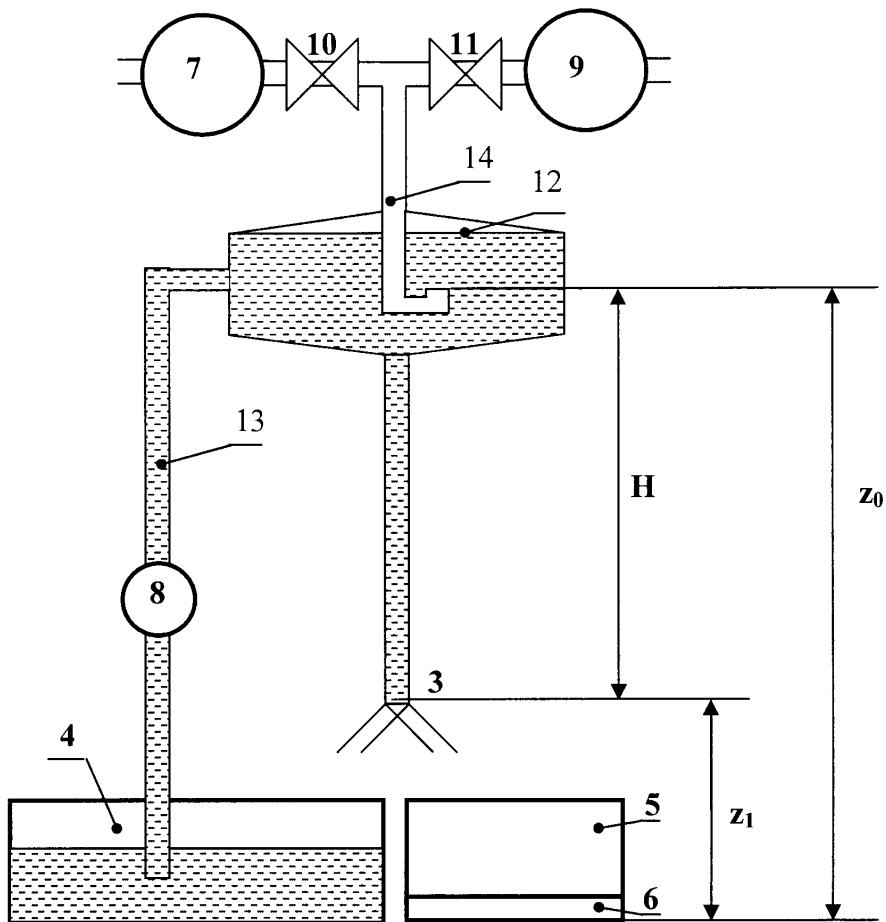


Рис. 3.4 – Схема установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати

3 – дивертор; 4,5 – баки; 6 – вага; 7 – витратомір; 8 – насос; 9 – еталон витрати газу дзвонового типу; 10,11 – крани; 12 – посудина Маріотта; 13 – наповнювальна трубка; 14 – газовідна трубка

Таким чином, маючи повністю визначений розподіл тисків у посудині Маріотта, можна за допомогою рівняння Бернуллі визначити об'ємну витрату рідини через насадок дивертора 3, яка, таким чином, визначається геометричними параметрами посудини 12 і тиском на вході, а також параметрами насадка. Рівняння Бернуллі для такого випадку має вигляд [107]:

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho \cdot g} + \frac{V_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + \left(a + \lambda \cdot \frac{h}{d} \right) \cdot \frac{V_n^2}{2g} \quad (3.7)$$

де z_0 – висота торця газовідної трубки; z_1 – висота торця насадка дивертора; p_0 – абсолютний тиск на виході газовідної трубки; p_1 – абсолютний тиск на виході насадка дивертора; ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння; V_0 – швидкість рідини у посудині Маріотта; V_1 – швидкість рідини на виході з посудини Маріотта; V_n – швидкість рідини у насадку; a – коефіцієнт

кінетичної енергії; λ - коефіцієнт гідравлічного тертя; h – висота насадка; d – діаметр насадка.

В цьому рівнянні (3.7) $z_0 - z_1 = H$, і, оскільки діаметр посудини Маріотта (0,5 м) значно більший від діаметру вихідного насадка дивертора (0,001 м), доданок $\frac{V_0^2}{2g}$, який характеризує швидкісний напір і залежить від швидкості поверхні рідини, можна прийняти рівним нулю [107]. Таким чином, формулу (3.7) можна записати як:

$$H + \frac{p_0 - p_1}{\rho \cdot g} = \frac{\left(a + \lambda \cdot \frac{h}{d}\right) \cdot V_H^2 + V_1^2}{2g} \quad (3.8)$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ для ламінарного потоку визначається з формули Гагена-Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.9)$$

де Re – значення числа Рейнольдса, яке рівне:

$$Re = \frac{V_H \cdot d}{\nu} \quad (3.10)$$

де ν – кінематична в'язкість рідини.

Підставивши рівняння (3.9), (3.10) в рівняння (3.8), отримаємо:

$$H + \frac{p_0 - p_1}{\rho \cdot g} = \frac{\left(a + \frac{64 \cdot \nu \cdot h}{V_H \cdot d^2}\right) \cdot V_H^2 + V_1^2}{2g} \quad (3.11)$$

що можна записати у вигляді:

$$a \cdot V_H^2 \cdot d^2 + 64 \cdot V_H \cdot \nu \cdot h - \frac{d^2}{\rho} \cdot \left[2 \cdot (H \cdot \rho \cdot g + p_0 - p_1) - \rho \cdot V_1^2\right] = 0 \quad (3.12)$$

Тоді, рівняння (3.8), з врахуванням (3.12), розв'язане відносно V_H , буде мати вигляд:

$$V_H = \frac{-\left[32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho - \left(-\rho \cdot (-1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (\rho \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho \cdot V_1^2))\right)^{0,5}\right]}{\rho \cdot a \cdot d^2} \quad (3.13)$$

Об'ємна витрата рідини через насадок при відомій швидкості витікання V_H обчислюється як:

$$Q_n = V_H \cdot \omega_H, \quad (3.14)$$

де Q_n - об'ємна витрата рідини через насадок,

ω_H - площа поперечного перерізу насадка, яка визначається як:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.15)$$

Підставивши формули (3.13) і (3.15) у (3.14), отримаємо робочу формулу визначення одиниці об'ємної витрати рідини для установки еквівалентного витіснення:

$$Q_n = \frac{-\pi \cdot \left[32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho - \left(\rho \cdot (1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho \cdot V_1^2)) \right)^{0.5} \right]}{4 \cdot \rho \cdot a} \quad (3.16)$$

Для визначення оптимальних значень параметрів робочої формули, її розв'язок необхідно проводити у зворотному порядку, а саме: знаючи конкретний діапазон значень одиниць об'ємної витрати рідини, які будуть відтворюватись установкою еквівалентного витіснення і геометричні параметри насадка дивертора, можна, за формулою (3.14), визначити значення швидкості в насадкові.

Отже, діапазон значень одиниць об'ємної витрати рідини становить від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с (від 1 до 16 л/год); діаметри насадка складають від 0,001 м (для максимального значення об'ємної витрати) і 0,00025 м (для мінімального значення об'ємної витрати), тоді значення швидкостей в насадкові (з формул 3.15, 3.16) будуть рівні:

$$V_{H1} = \frac{4 \cdot Q_{\max}}{\pi \cdot d_{\max}^2} = \frac{4 \cdot 4,44 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,001^2} = 5,66 \text{ м/с}$$

$$V_{H2} = \frac{4 \cdot Q_{\min}}{\pi \cdot d_{\min}^2} = \frac{4 \cdot 2,78 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 0,00025^2} = 5,66 \text{ м/с}$$

Ламінарність потоку підтверджується:

$$\text{Re} = \frac{V_H \cdot d}{\nu} = 1258 < 2320 \quad (3.17)$$

Як слідує з формули (3.8), в'язкість рідини впливає на значення витрати через насадок, як $\left(a + \frac{64 \cdot \nu \cdot h}{V_H \cdot d^2}\right) \cdot V_H^2$. Разом з тим, для ламінарного потоку a рівне 2 [107], а для заданих параметрів насадка і в'язкості рідини $4,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с при максимальній витраті:

$$\frac{64 \cdot \nu \cdot h}{V_H \cdot d^2} = 0,025 \quad (3.18)$$

очевидно, що перший доданок значно більший за другий, а тому вплив в'язкості на витрату за даних обставин незначний.

Для визначення наступного параметра V_1 – швидкості рідини на виході з посудини Маріотта, необхідно, ґрунтуючись на законі збереження речовини записати умову нерозривності потоку:

$$V_H \cdot \omega_H = V_1 \cdot \omega_1 \quad (3.19)$$

Відповідно до рівняння (3.19), швидкість V_1 буде визначатись як:

$$V_1 = \frac{V_H \cdot d^2}{d_v^2} = \frac{5,66 \cdot 0,001^2}{0,035^2} 0,0046(\text{м/с})$$

де d_v – діаметр отвору на виході з посудини Маріотта.

При цьому можливо визначити необхідну величину висоти H для заданої витрати з формули (3.13):

$$H = \frac{[-2 \cdot p_0 + 2 \cdot p_1 + \rho \cdot a \cdot V_n^2 + \rho \cdot V_1^2]}{2 \cdot \rho \cdot g} + 32 \cdot V_n \cdot \nu \cdot \frac{h}{g \cdot d^2} = 3,306(\text{м}) \quad (3.20)$$

В результаті проведеного аналізу встановлено, що витрата рідини через насадок дивертора в установці еквівалентного витіснення з посудиною Маріотта даної конструкції залежить від геометричних параметрів установки, густини рідини, перепаду тисків та коефіцієнта кінетичної енергії. Всі ці величини можуть бути визначені з високою точністю, що, таким чином, дає можливість точно задати значення необхідної витрати за допомогою насадка і витримувати його незмінним в процесі проведення заміру. На запропонований спосіб подана заявка на отримання патенту.

Решта обладнання (прецизійна електронна вага, вимірювальні перетворювачі тиску та температури, автоматика тощо) залишається незмінним. Підвищення точності задання витрати дає можливість використовувати вторинний еталон об'єму і об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08 для перевірки лічильників і витратомірів мікровитрат в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$. При розробленні нових установок даного типу доцільно на етапі проектування закладати даний метод стабілізації рівня рідини для підвищення метрологічних характеристик таких установок.

3.1.2. Метод сумування потоків еталонних витрат

Як альтернативу методу еквівалентного витіснення розроблений також метод сумування потоків еталонної витрати, відтворюваної дзвоновим мірником вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08, та досліджуваної витрати, відтворюваної досліджуваним витратоміром, з подальшим вимірюванням витрати робочим еталоном високої точності. (рис. 3.5).

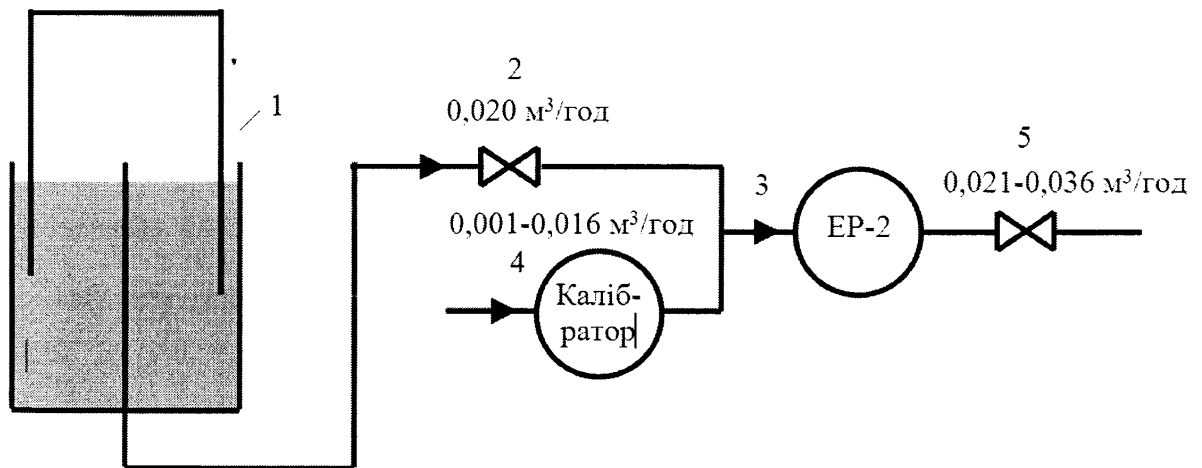


Рис. 3.5 Схема установки для перевірки ЗВТ вимірювання мікровитрат методом сумування витрат

Дзвонова установка [108-113] 1 використовується як засіб відтворення витрати значенням $0,020 \text{ м}^3/\text{год}$ з похибкою $0,15\%$. Витрата регулюється регулятором 2. Оскільки нижня границя діапазону вимірювання для еталонного

витратоміра типу ЕР-2 (похибка вимірювання витрати $\pm 0,2\%$) рівна $0,02 \text{ м}^3/\text{год}$ [69], через нього проходить повітря з витратою, яка рівна сумарній витраті повітря, що надходить з дзвонової установки і калібратора, і є більшою від його нижньої межі вимірювання. В результаті витрата через еталонний витратомір знаходиться в межах його діапазону робочих витрат. Таким чином, досліджувана витрата, відтворювана калібратором, є різницею еталонних витрат, одна з яких виміряна за допомогою еталонного витратоміра типу ЕР-2, а друга відтворена дзвоновим мірником. Витрата на вході калібратора обчислюється через баланс витрат за формулою:

$$Q_k = Q_o \frac{p_o}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_o} - Q_b \frac{p_b}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_b} \quad (3.21)$$

де Q_k – витрата газу через калібратор за стандартних умов;

Q_o – витрата газу на виході дзвонової установки;

Q_b – витрата газу через еталонний витратомір типу ЕР-2;

p_k – абсолютний тиск на вході калібратора;

p_o – абсолютний тиск на виході дзвонової установки;

p_b – абсолютний тиск на виході еталонного витратоміра типу ЕР-2;

T_k – абсолютна температура газу на вході калібратора;

T_o – абсолютна температура газу на вході дзвонової установки;

T_b – абсолютна температура газу на вході еталонного витратоміра типу ЕР-2;

3.2 Метрологічний аналіз та експериментальні дослідження

установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати

Загальне рівняння вимірювання об'єму установкою еквівалентного витіснення рідини описується формулою (1.14). Воно описує об'єм, пропущений установкою еквівалентного витіснення, як функцію пропущеної маси рідини та всіх впливових факторів. За допомогою цього рівняння знаходиться об'ємна витрата газу

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (3.22)$$

де t – час заміру.

Визначивши середнє значення витрати, можна уточнити значення коефіцієнта a . Поділивши формулу (1.21) на t і враховуючи, що об'ємна витрата рідини виражається через масу, густину і час як:

$$Q_n = \frac{m}{t \cdot (\rho_{0,m} + \alpha(T_m - 273,15))}, \quad (3.23)$$

можна підставити формули (3.16, 3.23) у формулу (1.21), і прийнявши $\rho = \rho_{0,m}$, отримаємо рівняння об'ємної витрати газу для установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати:

$$Q_n = \frac{P_c}{T_c} \cdot \frac{T_d}{P_d} \cdot \frac{-\pi \cdot \left[32 \cdot v \cdot h \cdot \rho_{0,m} - (\rho_{0,m} \cdot (1024 \cdot v^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0,m} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0,m} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0,m} \cdot V_1^2)))^{0,5} \right]}{4 \cdot \rho_{0,m} \cdot a} \cdot \left(\frac{1 - \rho_{n,n} \cdot \rho_s}{1 - \rho_{n,n} \cdot (\rho_{0,m} + \alpha(T_m - 273,15))} \right) \quad (3.24)$$

Визначення густини навколишнього повітря здійснюється за формулою [104]:

$$\rho_{n,n} = \frac{0,00348353}{T_a} (P_a - 0,378010 \cdot \varphi \cdot p_{HB}), \quad (3.25)$$

де P_a – атмосферний тиск, Па, T_a – температура навколишнього повітря, К, φ – відносна вологість повітря, %, p_{HB} – тиск насиченої водяної пари:

$$p_{HB} = e^{(XT_a^2 + YT_a + G + JT_a^{-1})} \quad (3.26)$$

де $X = 1,2811805 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}$; $Y = -1,9509874 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$; $G = 34,04926034$; $J = -6,3536311 \cdot 10^3 \text{ K}$.

Спочатку оцінюється похибка визначення густини навколишнього повітря спираючись на рівняння (3.26). Коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial \rho_{n,n}}{\partial T_a} = \frac{-0,00348353}{T_a^2} \cdot (P_a - 0,378010 \cdot \varphi \cdot p_{HB})$$

$$\frac{\partial \rho_{n,n}}{\partial P_a} = \frac{0,00348353}{T_a}$$

$$\frac{\partial \rho_{n,n}}{\partial \varphi} = \frac{-0,001316809}{T_a} \cdot p_{HB}$$

$$\frac{\partial \rho_{n,n}}{\partial p_{HB}} = \frac{-0,001316809}{T_a} \cdot \varphi$$

Значення коефіцієнтів впливу визначаються при номінальному значенні густини повітря та у крайніх точках діапазону температур, вологості, та тиску, при яких проводяться вимірювання.

Визначення НСП густини навколишнього повітря:

$$\Delta_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial T_a} \cdot \Delta T_a\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial P_a} \cdot \Delta P_a\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial \varphi} \cdot \Delta \varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial p_{HB}} \cdot \Delta p_{HB}\right)^2} \quad (3.27)$$

Визначення СКВ густини навколишнього повітря:

$$S_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial T_a} \cdot S_{T_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial P_a} \cdot S_{P_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial \varphi} \cdot S_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial p_{HB}} \cdot S_{p_{HB}}\right)^2} \quad (3.28)$$

Значення НСП і СКВ визначають при номінальних значеннях вхідних параметрів та при крайніх їх значеннях. За кінцеве приймається максимальне значення похибки.

НСП та СКВ відтворення одиниці об'єму газу установкою еквівалентного витіснення рідини визначаються таким чином.

Для зручності введемо заміни:

$$A = \left(\frac{1 - \rho_{н.н.} / \rho_S}{1 - \rho_{н.н.} / (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))} \right)$$

$$B = \frac{-\pi \cdot \left[32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0.M} - (\rho_{0.M} \cdot (1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0.M} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0.M} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0.M} \cdot V_1^2))) \right]^{0,5}}{4 \cdot \rho_{0.M} \cdot a}$$

$$C = (\rho_{0.M} \cdot (1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0.M} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0.M} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0.M} \cdot V_1^2)))^{0,5}$$

Коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial Q_m}{\partial P_{\epsilon}} = \frac{T_D}{P_D \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial T_{\epsilon}} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_D}{P_D \cdot T_{\epsilon}^2} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial T_D} = \frac{P_{\epsilon}}{P_D \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial P_D} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_D}{P_D^2 \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} = \frac{P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}}}{P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = \frac{-8 \cdot P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot \nu \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0M}) \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \nu} = \frac{-8 \cdot P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot h \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0M}) \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d} = \frac{P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot ((-2 \cdot H \cdot g + V_1^2) \cdot \rho_{0M} - 2 \cdot p_0 + 2 \cdot p_1) \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{2 \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{-P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot h \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15)) \cdot ((-2 \cdot a \cdot d^4 \cdot H \cdot g + a \cdot d^4 \cdot V_1^2 - 2048 \cdot h^2 \cdot \nu^2) \rho_{0M} - 2 \cdot a \cdot d^4 \cdot p_0 + 2 \cdot a \cdot d^4 \cdot p_1 + 64 \cdot C \cdot \nu \cdot h)}{8 \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot a^2 \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial H} = \frac{-P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot \rho_{0M} \cdot d^4 \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p_0} = \frac{-P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot d^4 \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p_1} = \frac{P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot d^4 \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V_1} = \frac{P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot \rho_{0M} \cdot d^4 \cdot V_1 \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho_{H.N.}} = \frac{(\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_S) \cdot P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0M}) \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})^2 \cdot \rho_S \cdot a \cdot \rho_{0M} \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot T_\epsilon}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T_M} = \frac{-P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0M}) \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot \rho_{H.N.} \cdot \alpha}{4 \cdot T_\epsilon \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot \rho_{0M} \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})^2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = \frac{P_\epsilon \cdot T_{\mathcal{H}} \cdot \pi \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0M}) \cdot (\rho_{H.N.} - \rho_S) \cdot \rho_{H.N.} \cdot (T_M - 273,15)}{4 \cdot T_\epsilon \cdot P_{\mathcal{H}} \cdot \rho_{0M} \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{H.N.})^2}$$

НСП відтворення одиниці об'єму:

$$\Theta_V = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_\epsilon} \cdot \Delta P_\epsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_{\mathcal{H}}} \cdot \Delta P_{\mathcal{H}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_\epsilon} \cdot \Delta T_\epsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{\mathcal{H}}} \cdot \Delta T_{\mathcal{H}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot \Delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \nu} \cdot \Delta \nu\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot \Delta p_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot \Delta V_1\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{H.N.}} \cdot \Delta \rho_{H.N.}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_M} \cdot \Delta T_M\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \Delta t\right)^2 + \Delta \tau^2} \quad (3.29)$$

СКВ відтворення одиниці об'єму газу:

$$S_V = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_\epsilon} \cdot S_{P_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_d} \cdot S_{P_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_\epsilon} \cdot S_{T_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_d} \cdot S_{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot S_h\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot S_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot S_H\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot S_{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot S_{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot S_{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot S_{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_m} \cdot S_{T_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha} \cdot S_\alpha\right)^2} \quad (3.30)$$

НСП відтворення одиниці об'ємної витрати газу визначається, як:

$$\Theta_q = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_\epsilon} \cdot \Delta P_\epsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_d} \cdot \Delta P_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_\epsilon} \cdot \Delta T_\epsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_d} \cdot \Delta T_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot \Delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial v} \cdot \Delta v\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot \Delta p_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot \Delta V_1\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot \Delta \rho_{н.н.}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_m} \cdot \Delta T_m\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha\right)^2} \quad (3.31)$$

СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу:

$$S_q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_\epsilon} \cdot S_{P_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_d} \cdot S_{P_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_\epsilon} \cdot S_{T_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_d} \cdot S_{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot S_h\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot S_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot S_H\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot S_{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot S_{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot S_{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot S_{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_m} \cdot S_{T_m}\right)^2} \quad (3.32)$$

Розрахунок сумарної похибки відтворення розміру одиниці об'єму газу робочим еталоном здійснюється таким чином.

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

$$\delta_V = t_{\Sigma} \sqrt{S_V^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_V^2}, \quad (3.33)$$

де S_V – СКВ відтворення розміру одиниці об'єму газу, м^3 , Θ_V – НСП відтворення розміру одиниці об'єму газу, м^3 , V – контрольний об'єм, що відтворюється робочим еталоном, м^3 ; t_{Σ} – квантільний множник, який визначається за формулою (2.27).

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

$$\delta_q = t_{\Sigma} \sqrt{S_q^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_q^2}, \quad (3.34)$$

де S_q – СКВ відтворення розміру одиниці об'ємної витрати газу, $\text{м}^3/\text{год}$, Θ_q – НСП відтворення розміру одиниці об'ємної витрати газу, $\text{м}^3/\text{год}$, q – значення витрати, $\text{м}^3/\text{год}$.

Сумарна похибка розраховується для максимальної та мінімальної витрат, які відтворюються робочим еталоном. З множини значень похибок за кінцеве приймається максимальне значення.

Для установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати на основі посудини Маріотта з параметрами: діаметр посудини 0,5 м, висота стовпа рідини 3,5 м, діаметр насадка 0,001 м, в'язкість рідини $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, діапазон робочих температур $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ були проведені експериментальні дослідження, в результаті яких встановлено, що похибка відтворення витрати не перевищує 0,2 %. Протокол дослідження наведено в додатку Ж.

3.3 Метрологічний аналіз ламінарного витратоміра

Проведемо метрологічний аналіз ламінарного витратоміра традиційної конструкції і термокомпенсованих ламінарних витратомірів різних конструкцій.

Метрологічні характеристики ламінарного витратоміра визначаються наступними параметрами:

в'язкістю вимірюваного середовища

діаметром капіляра

довжиною капіляра

Вплив кожного з цих параметрів можна оцінити частковими похідними.

В загальному випадку при опосередкованих вимірюваннях та відомому рівнянні вимірювань $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ величина сумарної похибки вимірювань $\Delta_{Y\Sigma\phi}$ визначається за виразом [98]:

$$\Delta_{Y\Sigma\phi} = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Delta_{x_i\phi} \right]^2}, \quad (3.35)$$

де k – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою ймовірністю P_3 ;

x_i – i -й параметр, виміряний прямим методом;

n – кількість параметрів, виміряних прямим методом;

$\Delta_{x_i\phi}$ – фактичне значення похибки вимірювання i -го параметра, виміряного прямим методом.

В даному випадку рівняння (3.36) можна записати як:

$$\Delta_{Y\Sigma\phi} = 1.1 \sqrt{\left[\frac{\partial P}{\partial T} \Delta_T \right]^2 + \left[\frac{\partial P}{\partial L} \Delta_L \right]^2 + \left[\frac{\partial P}{\partial D} \Delta_D \right]^2} \quad (3.36)$$

Вимірювання параметрів здійснюється при $P_3=95\%$, відповідно, коефіцієнт k приймається рівним 1,1.

Часткова похідна по температурі визначається як:

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{0.57728 \cdot L \cdot Q}{\pi D^4} \quad (3.37)$$

Часткова похідна по довжині капіляра:

$$\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{128Q}{\pi D^4} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) \quad (3.38)$$

Часткова похідна по діаметру капіляра:

$$\frac{\partial P}{\partial D} = -\frac{512LQ}{\pi D^5} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) - 32 \frac{\rho Q^2}{\pi^2 D^5} (K_c + K_e) \quad (3.39)$$

Були проведені експериментальні дослідження витратоміра традиційної конструкції, розрахованого на максимальну витрату $0,01 \text{ м}^3/\text{год}$ з параметрами $L=0,5 \text{ м}$, $D=1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, який працює в лабораторних умовах на повітрі при

номінальній температурі 20 °С при в'язкості $1,808 \cdot 10^{-5}$ Па/с, перепад тиску при витраті $2,778 \cdot 10^{-6}$ м³/с (0,01 м³/год) складає 215,83 Па. При допустимих геометричних відхиленнях довжини капіляра $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, його діаметра $\pm 0,0015 \cdot 10^{-3}$ м і температури $\pm 2^\circ\text{C}$ похибка вимірювання витрати складає

$$\frac{\partial P}{\partial T} \cdot \Delta_T = 1 \text{ Па}$$

$$\frac{\partial P}{\partial L} \cdot \Delta_L = 0.2 \text{ Па}$$

$$\frac{\partial P}{\partial D} \cdot \Delta_D = -0.87 \text{ Па}$$

$$\Delta_{\Sigma\phi} = 1,43 \text{ Па},$$

що при номінальному перепаді тиску 215,83 Па визначає похибку вимірювання витрати

$$\frac{\Delta_{\Sigma\phi}}{\Delta_P} \cdot 100\% = 0.66\%$$

При використанні термокомпенсованого ламінарного витратоміра, який працює з оптимальною термокомпенсацією, складову $\frac{\partial P}{\partial T} \cdot \Delta_T$ можна прийняти рівною нулю за умови повної компенсації зміни в'язкості від температури.

Перепад тиску на такому витратомірі визначається за формулою (2.5), згідно якої часткова похідна по довжині щілини дорівнює:

$$\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{24 \cdot Q \cdot (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6})}{Bh^3} \quad (3.40)$$

Часткова похідна по ширині щілини:

$$\frac{\partial P}{\partial B} = -\frac{24LQ}{\pi B^2 h^3} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) \quad (3.41)$$

Часткова похідна по товщині щілини:

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -\frac{72LQ}{\pi Bh^4} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) \quad (3.42)$$

Відповідно, для термокомпенсованого витратоміра, розрахованого в Розділі 2.3, при вдвічі більших геометричних відхиленнях довжини щілини

$\pm 0,1 \cdot 10^{-3}$ м, ширини і товщини щілини $\pm 0,003 \cdot 10^{-3}$ м похибка вимірювання витрати складе:

$$\frac{\partial P}{\partial L} \cdot \Delta_L = 0.011 \text{ Па}$$

$$\frac{\partial P}{\partial B} \cdot \Delta_B = 0.0032 \text{ Па}$$

$$\frac{\partial P}{\partial h} \cdot \Delta_h = 0.053 \text{ Па}$$

$$\Delta_{\Sigma\phi} = 0.143 \text{ Па}$$

Тоді при інших рівних умовах для даної конструкції досягається похибка вимірювання витрати

$$\frac{\Delta_{\Sigma\phi}}{\Delta_p} \cdot 100\% = 0.28\%$$

Практично це означає можливість створення робочого еталонного витратоміра з класом точності 0,5.

Таким чином, при використанні термокомпенсації можливо підвищити метрологічні характеристики ламінарного витратоміра практично в декілька разів в номінальному діапазоні робочих температур. Ламінарні витратоміри традиційної конструкції доцільно використовувати для технологічних потреб, наприклад при дозуванні захисних газів в процесах напівавтоматичного і автоматичного зварювання, а термокомпенсовані витратоміри можуть використовуватися для перевірки ротаметрів мікровитрат, перевірки порогу чутливості лічильників газу, а також як еталони передавання мікровитрат.

3.4 Висновки до третього розділу

Проведено розробку метрологічного забезпечення термокомпенсованого ламінарного витратоміра, за результатами якої розроблено удосконалені установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати за допомогою посудин Маріотта постійного рівня і постійної витрати. Здійснено метрологічний аналіз удосконаленої установки з посудиною Маріотта постійного рівня, розроблено метод сумування потоків еталонної витрати,

відтворюваної дзвоновим мірником вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08, та досліджуваної витрати, відтворюваної досліджуваним витратоміром, з подальшим вимірюванням витрати робочим еталоном високої точності.

Проведено метрологічний аналіз термокомпенсованого ламінарного витратоміра. Результати аналізу показали, що температурна складова є найбільшою частиною сумарної похибки. Виключення цієї похибки дає можливість знизити сумарну похибку з 0,66% до 0,28%, або у 2,35 рази.

4. РОЗРОБКА ТА ТЕХНІЧНОЇ ТА МЕТОДИЧНОЇ БАЗИ ВИМІРЮВАННЯ ТА ВІДТВОРЕННЯ МІКРОВИТРАТ В ДІАПАЗОНІ $0,277 \cdot 10^{-6} - 4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

4.1 Розробка технічної бази відтворення мікровитрат - задатчика мікровитрати

Розробка задатчика мікровитрати для діапазону витрат $0,277 \cdot 10^{-6} - 4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ актуальна перш за все для таких застосувань:

1. Перевірка порогу чутливості побутових лічильників газу.
2. Повірка витратомірів мікровитрат (в першу чергу ротаметрів).

Відповідно, впровадження приладу заплановане в лабораторіях ТОВ ІВФ «Темпо» та ДП «Івано-Франківськстандартметрологія».

Структурна схема його зображена на рис. 4.1. Оскільки повірка робочих ЗВТ вимагає використання джерела витрати повітря, його було включено у склад задатчика.

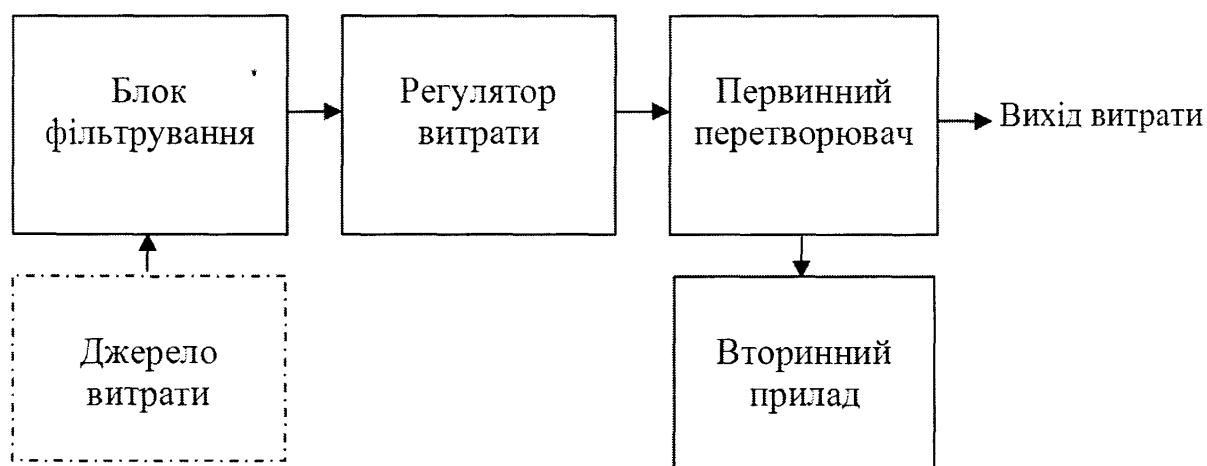


Рис. 4.1 Структурна схема задатчика

В якості джерела витрати застосовано двохкамерний компресор вібраційного типу, його вихідний тиск конструктивно обмежений значенням 10 кПа. Регулювання витрати здійснюється голкоподібним краном компресора. В блоці фільтрування застосований автомобільний паливний фільтр типу Filtron PP905/2 з розміром частинок, що пропускаються, не більше 3 мкм. Використання фільтра, розрахованого для роботи з рідиною, забезпечує на

повітрі мінімальний перепад тиску на фільтрі внаслідок значно меншої його кінематичної в'язкості. Блок фільтрування забезпечує значне зменшення зміни характеристик витратоміра в часі. Наприклад, повірочні устновки часто розміщені на території промислових підприємств, для яких характерна висока запиленість повітря. При використанні повірочних схем, у яких еталонний лічильник або витратомір включений перед приладом, що повіряється, основним джерелом забруднення еталона є пил, який знаходиться в повітрі приміщення, де проводиться повірка. Робочі еталони, чутливі до забруднення (в першу чергу на основі роторних лічильників), втрачають чутливість і збільшується їх похибка вимірювання мікровитрат, що підтверджено практикою ДП «Івано-Франківськстандартметрологія». Первинним перетворювачем є термокомпенсований ламінарний елемент коаксіальної конструкції [95] (рис. 4.2), причому внутрішній скляний циліндр знаходиться у зовнішньому алюмінієвому циліндрі. Через кільцеву щілину між ними проходить вимірюваний потік, а температурна компенсація забезпечується зміною ширини щілини внаслідок різного коефіцієнта лінійного розширення циліндрів.

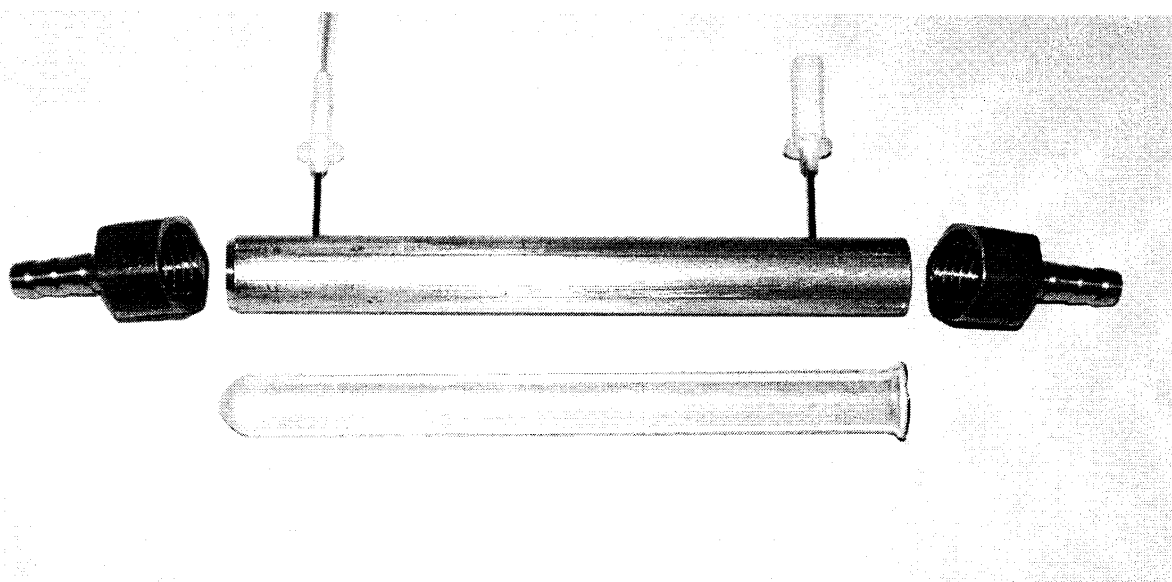


Рис. 4.2 Конструкція чутливого елемента ламінарного витратоміра з кільцевою щілиною і температурною корекцією

Принципова електрична схема приладу зображена на рис. 4.3.

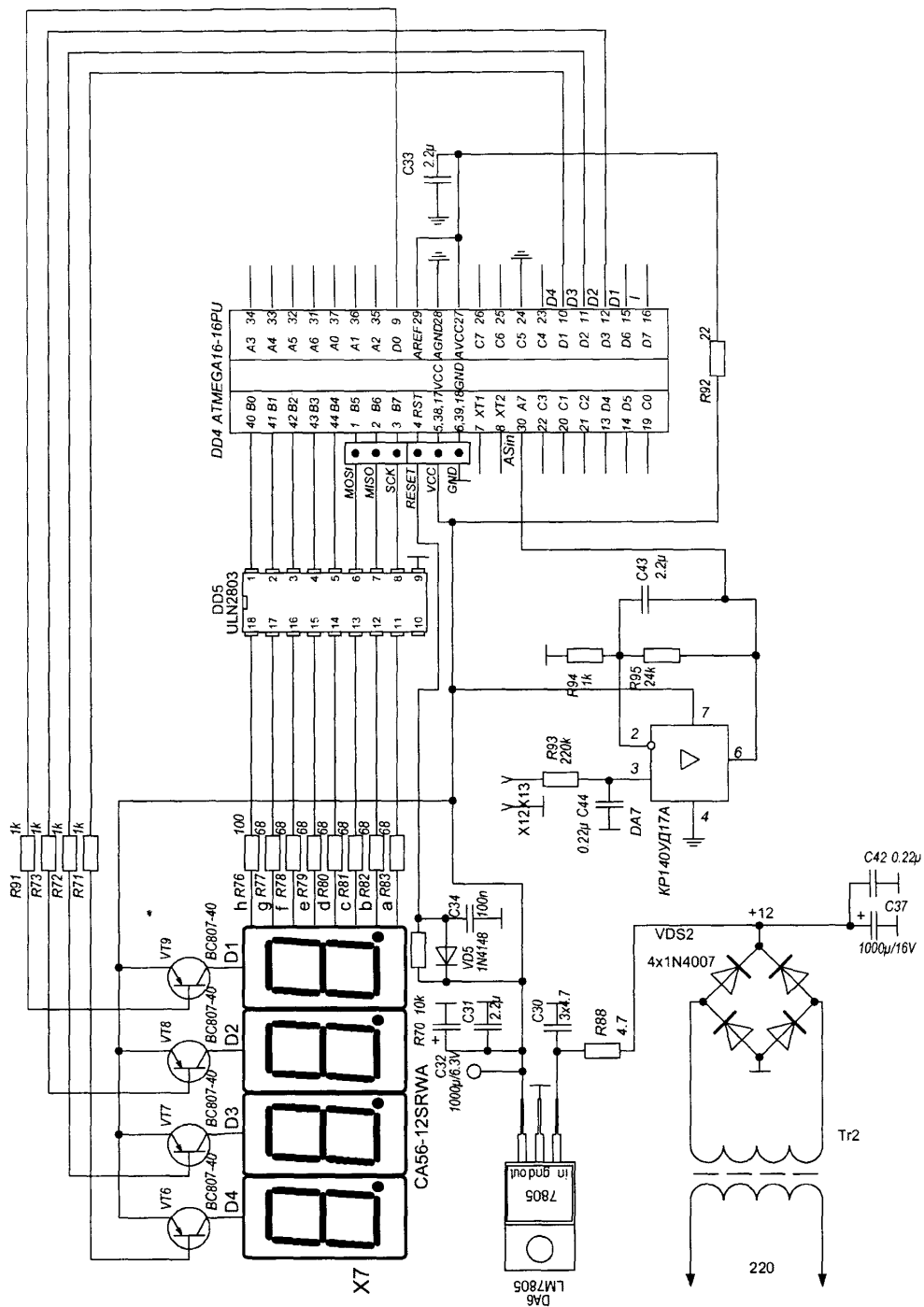


Рис. 4.3 Принципова електрична схема вторинного приладу

Для вимірювання перепаду тиску у даній конструкції застосований вимірювальний перетворювач фірми Freescale. Зростаючі потреби щодо точності та достовірності даних, які отримуються при дослідженнях, вимагають використання вторинних приладів з цифровою обробкою даних [114,115]. За відсутності серійних аналогів спроектовано та розроблено вторинний прилад для роботи з цим вимірювальним перетворювачем, принципова схема якого

наведена на рис 4.3. Основою якого є мікроконтролер фірми Atmel типу ATmega16, який працює на частоті 8 МГц. Багатоканальний АЦП даного мікропроцесора має розрядність 2^{10} , забезпечуючи похибку квантування на рівні 0,1%. Мікроконтролер працює під управлінням внутрішньої програми(додаток Б), написаній на мові високого рівня С[116], що дало можливість забезпечити такі функції:

- перетворення аналогового вхідного сигналу перетворювача тиску в цифрове значення, що відображається на індикаторі;
- статистична обробка результатів вимірювання. Вимірювання по кожному каналу здійснюється з частотою 300 Гц, причому усереднюються дані 64 послідовних вимірювань, і при кожному вимірюванні перераховується середнє арифметичне значення минулих 64 вимірювань. Таким чином різко зменшується випадкова складова похибки, особливо в умовах високого рівня шумів і завад, а також високочастотних пульсацій вимірюваної величини [117];
- автоматична корекція нуля вимірювального перетворювача перепаду тиску.

Конструкція електронного блока вторинного приладу зображена на рис. 4.4.

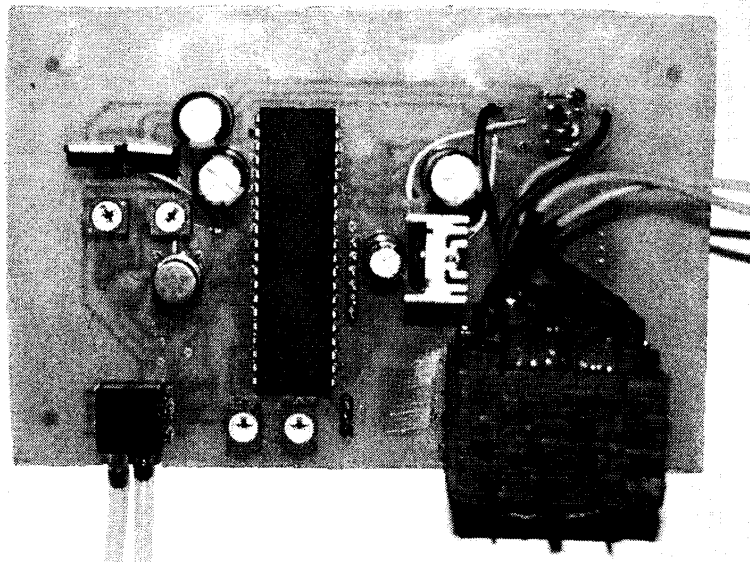


Рис. 4.4. Електронний блок вторинного приладу (вимірювальний перетворювач тиску та мікроконтролер)

В якості диференційного підсилювача вибрана прецизійна мікросхема типу КР140УД17А, як апробоване рішення при проведенні науково-дослідних робіт з розроблення еталонної бази в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» для вимірювання електричних сигналів від перетворювачів тиску. Ця мікросхема є прецизійним операційним підсилювачем, який має низькі значення зміщення нуля, температурного дрейфу та вхідного струму. Вхідний сигнал фільтрується від завад фільтром низьких частот 3-го порядку з частотою зрізу 1 Гц. В результаті цього завади промислової частоти 50 Гц ослабляються на 80 дБ і практично не впливають на результат вимірювання. Перетворення аналогової величини в цифрову здійснюється мікроконтролером, який також забезпечує вивід вимірюваної величини на семисегментний індикатор і статистичну обробку даних.

Загальний вигляд задатчика[118], укомплектованого первинним перетворювачем, електронним блоком та джерелом витрати зображено на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Задатчик мікровитрат для перевірки витратомірів газу в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$

Атестацію приладу, зовнішній вигляд якого зображеного на рис. 4.5, було здійснено методом сумування потоків еталонної витрати, відтворюваної

дзвономим мірником вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08, та досліджуваної витрати, відтворюваної задатчиком мікровитрати, з подальшим вимірюванням витрати робочим еталонном високої точності. Основна похибка відтворення витрати дзвоною установкою не перевищує 0,15%, похибка вимірювання витрати еталонним витратоміром типу EP-2 - не перевищує 0,2%.

Похибка вимірювання температур в процесі вимірювання не перевищує 0,1 К, похибка вимірювання барометричного тиску – 10 Па. Оскільки зміна температури на 1 К спричиняє додаткову похибку вимірювання витрати 0,37% [91], а зміна барометричного тиску на 100 Па спричиняє додаткову похибку вимірювання витрати 0,1% [119], сумарна додаткова похибка не перевищує 0,05%.

Задатчик дозволяє проводити відтворення витрати діапазоні від 0,001 м³/год до 0,016 м³/год з похибкою:

в діапазоні 0,01-0,016 м³/год – 0,5%

в діапазоні 0,001-0,01 м³/год – 1,0%,

Це дає можливість здійснювати перевірку більшості типів ротаметрів мікровитрат, похибка яких складає ±4%. Також можна відтворювати витрати, рівні порогу чутливості побутових лічильників газу[120] з метою перевірки цього показника при їх випробуваннях.

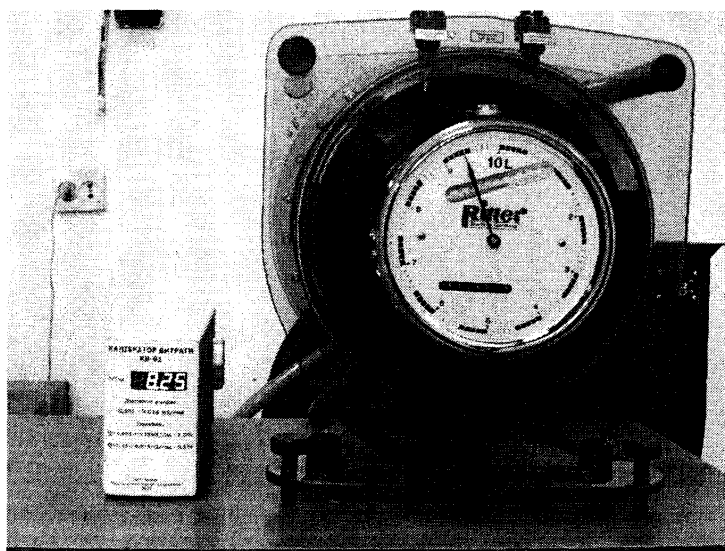


Рис. 4.6. Задатчик мікровитрат для перевірки витратомірів газу у порівнянні з лічильником барабанного типу Ritter

Подальшим розвитком задатчика мікровитрат може бути калібратор витрати, який вдрізняється тим, що значення заданої витрати стабілізується внаслідок зворотнього зв'язку шляхом управління продуктивністю компресора, що дозволяє виключити вплив зовнішніх факторів на стабільність витрати.

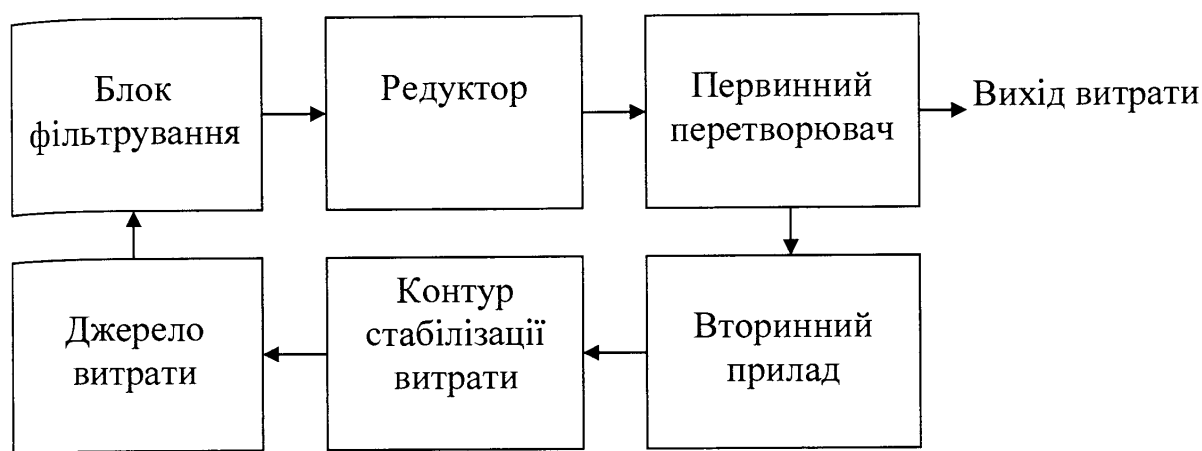


Рис. 4.7 Структурна схема калібратора

4.2 Практична реалізація робочого еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

Робочий еталон представляє собою з установку еквівалентного витіснення рідини з посудиною Маріотта постійної витрати, що, в свою чергу складається з:

- зважувальної ємності;
- проміжної ємності;
- зливної ємності;
- електронної ваги;
- насоса;
- засобів вимірювальної техніки тиску в проміжній ємності тиску на досліджуваному засобі вимірювальної техніки;
- засобів вимірювальної техніки температури в повітряній секції проміжної ємності та в масляній секції проміжної ємності;
- блоку збору та обробки інформації;
- пульта управління;

- перекидного пристрою;
- під'єднувальних трубопроводів та запірно-відсічної арматури.
- блоку збору та обробки інформації;
- пульта керування;
- під'єднувальних трубопроводів та запірно-відсічної арматури;

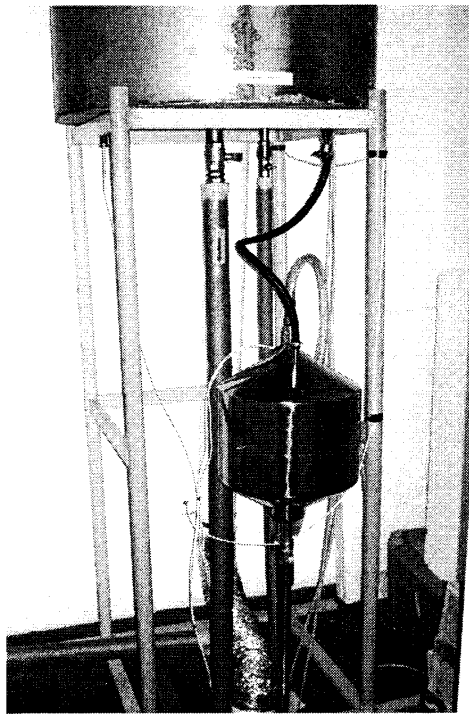
На першому етапі робіт зі створення робочого еталона, як і будь-якого нового засобу, було проведено макетування та експериментальні дослідження фізичної моделі. Фізичну модель було реалізовано з використанням обладнання існуючого вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08, а саме проливної ємності, електронної ваги з границею зважування 12 кг, вимірювача відносної вологості, денсиметрів, мірника рідини 1-го розряду та барабанних лічильників газу EP-2 та Ritter.

Результати досліджень показали, що в діапазоні об'ємних витрат від 0,016 м³/год до 0,032 м³/год розбіжність між дзвоною установкою та установкою еквівалентного витіснення рідини не перевищує 0,2%. За об'ємних витрат менше 0,012 м³/год ця величина сягала до 0,3 %, що зумовлено підвищенням виходом за межі робочого діапазону барабанного лічильника. За результатами досліджень макету еталона було зроблено наступні висновки:

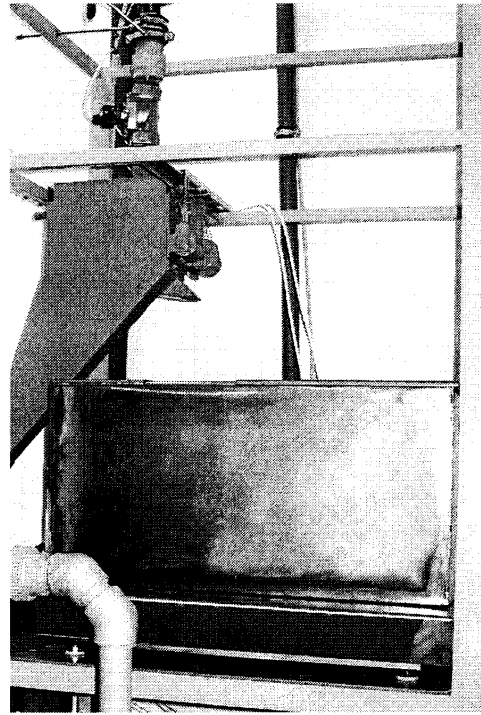
1) система стабілізації витрати за допомогою посудини Маріотта підтвердила свою функціональність. На базі посудини Маріотта доцільно конструювати робочий еталон мікровитрат.

2) витрати менше 0,016 м³/год повинні відтворюватись установкою еквівалентного витіснення з розрахунковим визначенням середньої витрати за час заміру, при цьому повинно проводитися звернення результатів проливу та розрахункових вимірювань на витраті 0,016 м³/год.

Основними компонентами установки є проміжна та зважувана ємності.



а)



б)

Рисунок 4.8. Зовнішній вигляд установки еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати, розміщеної на двох поверхах приміщення (а – другий поверх, б – перший поверх)

Об'єми ємностей вибрано виходячи з наступних міркувань:

- максимальне значення відтвореного об'єму 16 дм^3 ;
- допустиме значення об'єму для стабілізації витрати 2 дм^3 .

Об'єм проміжної ємності вибрано рівним 50 дм^3 для запобігання переливу масла. Об'єм зважуваної ємності 25 дм^3 .

Для забезпечення високої точності відтворення одиниці об'єму та об'ємної витрати газу методом еквівалентного витіснення рідини однією із основних вимог є створення такого перекидного пристрою (дивертора), який би забезпечував невеликий час перекидання потоку у порівнянні з часом наповнення зважуваної ємності. Перекидний пристрій (дивертор) являє собою пересувний прилад, призначений для перенаправлення потоку рідини, що витікає із проміжної ємності по черзі – у зливну ємність або у зважувану ємність, і навпаки.

Існує два способи перекидання потоку рідини (див. рисунок 4.9, де прийняті наступні позначення 1 – вхідний потік; 2 – насадок; 3 – розділювальна

пластина; 4 – вісь обертання; 5 – вихідний потік). При першому способі (рис. 4.9а) перекидання здійснюється за допомогою пересування розділової стінки, що обертається навколо горизонтальної осі. При цьому перекидний пристрій залишається нерухомим, а потік рідини змінює свій напрямок за рахунок відхилення розділової пластини. При другому способі (рис. 4.9б) потік рідини змінює свій напрямок за рахунок переміщення самого приладу. Проаналізувавши два способи з точки зору швидкодії, а також можливості їх технічної реалізації було надано перевагу першому способу.

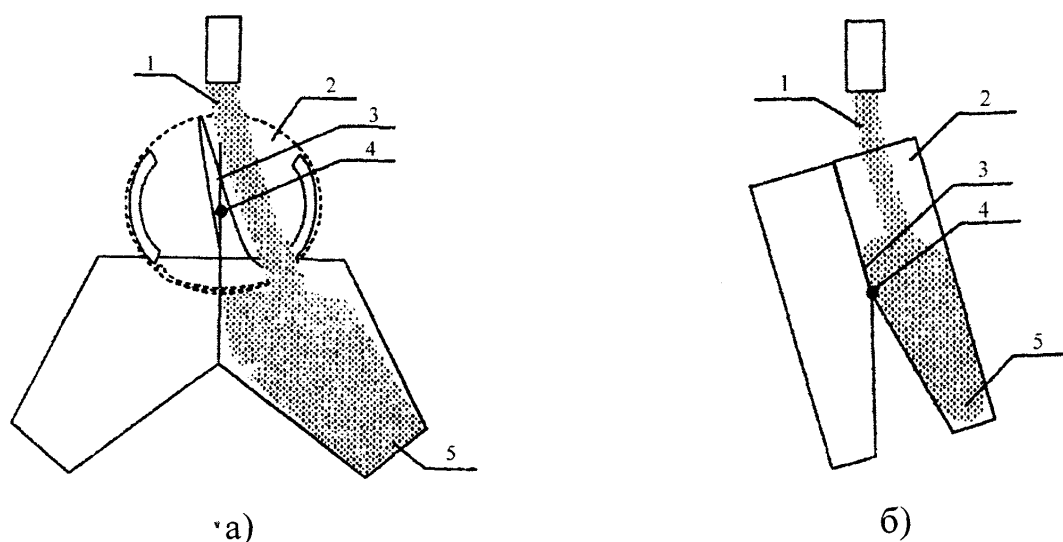


Рисунок 4.9. Основні типи конструкцій перекидного пристрою (дивертора) установки еквівалентного витіснення рідини

Привід дивертора виконано на базі електромагнітів.

Система збору та обробки інформації робочого еталона виконана на базі промислового модуля E14-440 фірми L-Card, як апробоване в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» рішення для вимірювання електричних сигналів і передавання їх на персональний комп'ютер.

В загальному випадку система цифрового керування, збору та обробки інформації складається із наступних компонентів:

- керуючої ПЕОМ;
- каналів обміну інформацією;
- аналогово-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів (АЦП і ЦАП);
- вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів.

Висока частота вибірки призводить до великого завантаження комп'ютера. Всі сигнали вимірювання необхідно фільтрувати від завад.

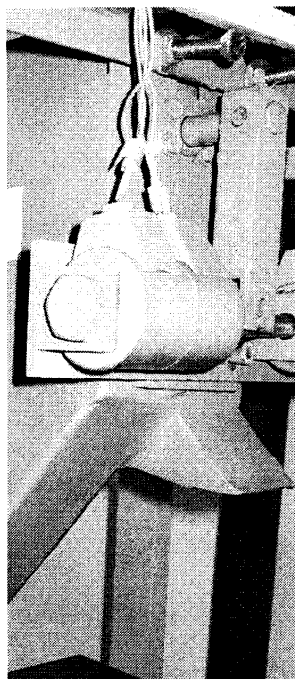


Рисунок 4.10. Електромагнітний привід дивертора

Вимірювальний процес який реалізується робочим еталоном таким чином. Спершу відбувається заповнення посудини Маріотта маслом. Для цього відкривається кран у верхній частині посудини Маріотта, відкривається клапан випуску повітря і проводиться заповнення посудини. Після цього повітряний клапан і кран закриваються. Закривається вихідна засувка зважувальної ємності і проводиться зважування тари (тарування). Коли покази ваги стабілізуються, проводиться серія вимірювань ваги тари, результат яких усереднюється. Далі проводиться відкривання крана проливу масла через насадок для стабілізації витрати. Стабільна витрата досягається пропусканням порції масла від 0,2 до 0,5 л з посудини Маріотта в зливну ємність. Потім, дивертор, керуючись сигналом із системи вимірювання переміщення дзвонової установки, переключає потік у зважувальну ємність. Після проходження заданого системою керування об'єму, потік перемикається в зливну ємність і поступово зупиняється. Далі вичікуються певний час, не менше 30 с, для стабілізації

показів ваги, після чого проводять вимірювання ваги. Далі згідно з методикою проведення вимірювань робочого еталона проводяться необхідні обчислення.

4.3 Розробка нормативної бази метрологічного забезпечення

мікровитрат

4.3.1 Розробка доповнень до повірочної схеми

Для забезпечення можливості метрологічної атестації витратовимірювальної техніки необхідне застосування відповідних теоретичних засад та відповідних нормативних документів. В Україні з 2007 року з впроваджений в дію ДСТУ 3383:2007 „Метрологія. Державна повірочна схема для засобів об'єму та об'ємної витрати газу” [88]. Проте в ньому залишився неохопленим діапазон витрат менше 16 л/год, незважаючи на наявність в експлуатації значної кількості ЗВТ вимірювання об'ємної витрати газу (ротаметри та ін.), в тому числі закордонного виробництва, які на даний момент метрологічно не забезпечені. Вони широко використовуються в народному господарстві (в газоаналітичних засобах вимірювальної техніки, при виготовленні газових сумішей, в медичній техніці, в технологічних процесах зварювання, наплення та епітаксії, в хімічній промисловості, а також при повірці побутових лічильників газу для визначення їх порогу чутливості) [95]. Зважаючи на це, необхідною є розробка нормативних документів щодо їх повірки та калібрування.

Таким чином, постало очевидним питання вдосконалення державної повірочної схеми. Попередні зміни до цього документу були введені у 2007 р.[119] і стосувалися впровадження вторинних еталонів. На даний момент ДП „Івано-Франківськстандартметрологія” займається розробкою змін до ДСТУ 3383:2007 відповідно до повідомлення про розроблення проекту національного стандарту в Україні (додаток В). Перегляд державної повірочної схеми для засобів вимірювальної техніки об'єму та об'ємної витрати газу проводиться з метою оптимізації проведення повірочних робіт. Серед інших

змін автором пропонується розширення мінімальної витрати з $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ (16 л/год) до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ (1 л/год).

Як і в попередній редакції стандарту [88] повірочну схему очолює державний первинний еталон на базі дзвонової установки та інформаційно-вимірjuвального комплексу для збору та обробки інформації з вимірjuвальних каналів тиску, температури, переміщення дзвону, кількості імпульсів.

Вторинні еталони

Як вторинні еталони застосовують установки дзвонового типу, установки еквівалентного витіснення з діапазоном вимірjuвання об'єму від $0,02 \text{ м}^3$ до $0,2 \text{ м}^3$ та об'ємної витрати газу від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ та установки з еталонами передавання з діапазоном вимірjuвання об'ємної витрати газу від $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ до $1,11 \text{ м}^3/\text{с}$. Вторинні еталони застосовують для передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочим еталонам об'єму та об'ємної витрати газу: установкам дзвонового типу, установкам з еталонними лічильниками, установкам з еталонними критичними соплами, поршневого типу, PVTt-типу, ламінарного типу та еталонним витратомірам об'ємної витрати газу та лічильникам об'єму газу і для метрологічної атестації та повірки робочих засобів вимірjuвальної техніки методом безпосереднього звірення або за допомогою компараторів.

Як компаратори застосовують набори еталонних витратомірів (сопла критичні еталонні) об'ємної витрати газу в діапазоні від $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу за допомогою компараторів здійснюється тільки до робочих еталонів: повірочних установок дзвонового типу, поршневого типу, повірочних установок з еталонними критичними соплами.

Робочі еталони

Як робочі еталони використовують: повірочні установки дзвонового типу з діапазоном вимірjuвання об'ємної витрати газу $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $2,77 \text{ м}^3/\text{с}$, повірочні установки з еталонними лічильниками з діапазоном вимірjuвання об'ємної витрати газу від $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $2,77 \text{ м}^3/\text{с}$, повірочні установки з

еталонними критичними соплами з діапазоном вимірювання об'ємної витрати газу від $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $6,94 \cdot 10^{-1}$ м³/с, повірочні установки РVTt-типу з діапазоном вимірювання об'ємної витрати газу $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $1,11 \cdot 10^{-1}$ м³/с, повірочні установки поршневого типу з діапазоном вимірювання об'ємної витрати газу від $4,44 \cdot 10^{-6}$ до $2,77$ м³/с та повірочні установки вантажо-кільцевого типу (ГКУ) з діапазоном вимірювання об'ємної витрати газу від $1,66 \cdot 10^{-6}$ до $4,44 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Границі допустимих відносних похибок Δ_B повірочних установок становлять від 0,3 % до 0,5 %. Повірочні установки застосовують для метрологічної атестації та перевірки робочих засобів вимірювальної техніки методом безпосереднього звірення. Границі відносної похибки методу безпосереднього звірення δ_B робочих засобів вимірювальної техніки з повірочними установками не повинні перевищувати $2 \cdot 10^{-3}$.

Як робочі еталони еталонні об'ємної витрати газу використовуються також: сопла критичні еталонні об'ємної витрати газу в діапазоні від $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с до $8,33 \cdot 10^{-2}$ м³/с, ламінарні витратоміри об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Як еталонні лічильники об'єму газу використовуються лічильники: барабанного типу в діапазоні від $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-3}$ м³/с, роторного типу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-5}$ м³/с до $2,77 \cdot 10^{-1}$ м³/с та турбінного типу в діапазоні від $6,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с до $1,8 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Границі допустимих відносних похибок Δ_B еталонних витратомірів та лічильників становлять від 0,25 % до 0,45 %. Еталонні витратоміри та лічильники застосовують для передавання розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочим засобам вимірювальної техніки методом опосередкованих вимірювань. Границі відносної похибки методу опосередкованих вимірювань δ_B при передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу від еталонних витратомірів та лічильників до робочих засобів вимірювальної техніки не повинні перевищувати $2 \cdot 10^{-3}$.

Такий вигляд повірочної схеми дає можливість здійснити перевірку в діапазоні об'ємних витрат від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $2,77$ м³/с всієї гама робочих ЗВТ (лічильників, витратомірів, лічильників-витратомірів) з межами допустимих

відносних похибок від 0,6% до 4%, які експлуатуються в народному господарстві України.

Таким чином, запропонована зміна до повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати значно підвищує рівень забезпечення єдності вимірювань в галузі витратометрії газу. Фрагмент повірочної схеми зі змінами зміни наведено на рис. 4.11. Додаткові елементи, запропоновані автором, виділені кольором.

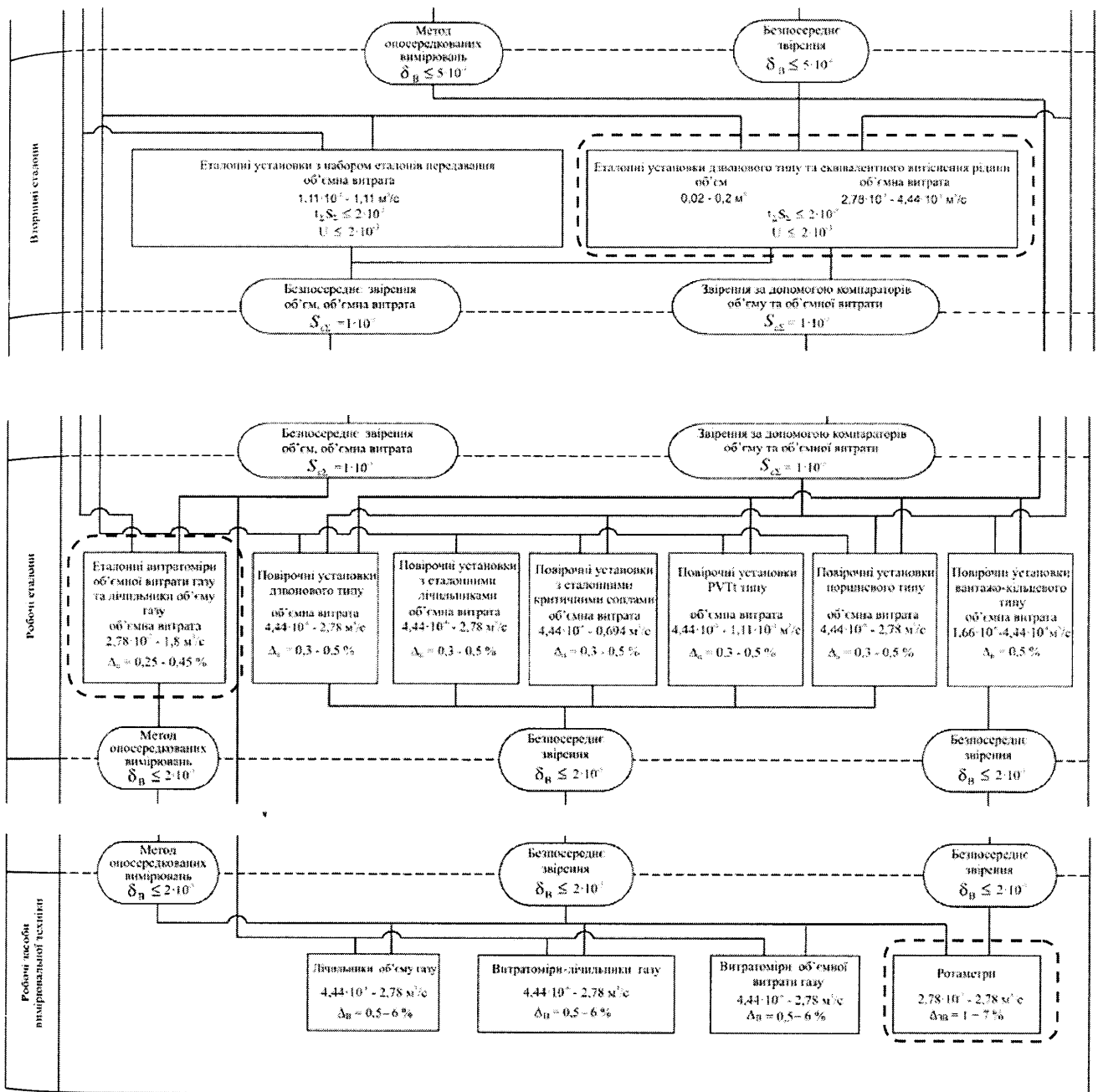


Рис. 4.11. Фрагмент для повірочної схеми для засобів об'єму та об'ємної витрати газу

4.3.2 Розробка нормативних документів

Практична реалізація комплексного підходу до розробки методичної бази вимірювання та відтворення мікровитрат в діапазоні $0,277 \cdot 10^{-6} - 4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ базується на основі метрологічного аналізу запропонованих технічних засобів, а також аналізу існуючої нормативної документації в газузі вимірювання

об'єму і об'ємної витрати газу [120-128]. Проведено розробку двох нормативних документів з метрології: «Робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Програма та методика державної метрологічної атестації»[129] та «Витратоміри газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Програма і методика державної метрологічної атестації»[130]

Методика державної метрологічної атестації робочого еталона

Програма та методика державної метрологічної атестації робочого еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с містить порядок виконання операцій, які здійснюються при метрологічній атестації робочого еталона, та умови їх проведення. Робочим середовищем, що використовується при дослідженнях є повітря і масло. Дослідження проводять за наступних умов: температура робочого середовища і навколишнього повітря (20 ± 2)°С; відносна вологість навколишнього повітря до 80 %; атмосферний тиск від 84,0 до 106,7 кПа; відсутність вібрації, трясіння, магнітних полів (крім земних), які впливають на роботу обладнання, що використовується при дослідженнях; зміна температури навколишнього та робочого середовища не повинна перевищувати 0,2 °С за час одного вимірювання. Робочий еталон та повинен бути витриманий у таких умовах не менше 6 годин.

Перед випробуванням витратомірів необхідно перевірити герметичність робочого еталона з'єднань трубопроводів та запірної арматури. Робочий еталон вважають герметичним, якщо за час дослідження витік повітря з нього менший від двох величин: 0,1 дм³/год або об'єму, що не перевищує 0,1% від пропущеного об'єму за найменшого значення витрати.

Перед проведенням досліджень необхідно не менше 5 раз пропустити контрольний об'єм повітря, за максимального значення об'ємної витрати, через витратомір для досягнення врівноваження температур перед ним та в еталоні одиниці об'єму та об'ємної витрати газу, що застосовується при дослідженнях.

Місця вимірювання тиску та температури на витратомірі визначаються згідно технічної документації на нього.

При зовнішньому огляді робочого еталона перевіряють:

– відповідність робочого еталона вимогам, визначеними паспортом робочого еталона;

відсутність видимих дефектів (вм'ятин, опуклостей) на зовнішній поверхні ємностей установки еквівалентного витіснення, перекидного пристрою, зважувальної платформи.

Під час опробування робочого еталона, необхідно:

– перевірити функціонування програмного забезпечення;

– перевірити функціонування засобів управління на пульті управління;

– перевірити можливість регулювання та контролю значення об'ємної витрати повітря;

– перевірити функціонування пристрою перемикання потоку масла;

– перевірити можливість вимірювання значень тиску в установці.

– перевірити можливість вимірювання значень температури в установці.

Функціонування робочого еталона вважають задовільним, якщо:

– забезпечується можливість регулювання об'ємної витрати в усьому діапазоні витрат, що відтворюються робочим еталоном;

вимірюється тиск та температура в установці.

Атестації підлягають наступні ЗВТ надлишкового тиску:

– на виході газовідної трубки;

– на виході насадка дивертора;

– в проміжній ємності;

– перед досліджуваним ЗВТ об'єму газу.

Атестацію каналів вимірювання тиску ведуть у наступній послідовності.

Від'єднують ЗВТ тиску від робочого еталона і під'єднують їх до засобу створення надлишкового тиску. Тиск в діапазоні задається та вимірюється манометром МПА-15 або багатфункціональним калібратором MC2R.

Задатчиком тиску задають певне значення тиску і підтримують його протягом часу, необхідного для опитування комп'ютером 20 разів. Проводять запис 20 значень тиску, вимірних каналом вимірювання тиску, що входять в комплект робочого еталона. Операцію запису значень тиску проводять автоматично за допомогою ПЕОМ. Після цього тиск в системі змінюють і створюють інше значення тиску.

Кількість досліджуваних значень тиску повинна бути не менше 5 (з певним кроком) в діапазоні вимірювань тиску від 0 до P_{\max} , де P_{\max} – максимальне значення абсолютного або надлишкового тиску в установці. В діапазоні вимірювань тиску від 84,0 до 106,7 кПа.

Атестації підлягають наступні канали вимірювання температури:

- повітря в проміжній ємності;
- масла в проміжній ємності;
- робочого середовища на вході (виході) досліджуваного ЗВТ об'єму газу.

Атестацію каналів вимірювання температури проводять у наступній послідовності. Проводять демонтаж ЗВТ температури робочого еталона і занурюють їх в ванну термостата. Задають і застабілізують одне із значень температури. Термостат витримують при заданій температурі протягом часу, зазначеного в паспорті на термостат.

Після стабілізації температури проводять запис 20 значень температури, вимірних ЗВТ температури, що входять в комплект робочого еталона. Контроль температури ведуть за допомогою термометра ртутного ТР або термометра термостата.

Атестацію каналів вимірювання температури проводять за наступних значень температур: 17, 19, 20, 21, 23 °С з відхиленням $\pm 0,2$ °С.

Операцію запису значень температури проводять автоматично за допомогою ПЕОМ. Атестацію каналу вимірювання інтервалів часу здійснюють за допомогою двох частотомірів-хронометрів типу ЧЗ-54 у наступній послідовності. Виводять з ПЕОМ робочого еталона сигнал „старт-стоп” і

під'єднують його на вхід частотомера ЧЗ-54. За допомогою ПЕОМ подають певний фіксований проміжок часу на частотомір.

На кожному фіксованому проміжку часу проводять по 20 вимірювань часу. Кількість досліджуваних проміжків часу повинна бути не менше 5 значень з діапазону, границі якого відповідають найменшому і найбільшому значенню часу вимірювання контрольного значення об'єму за найбільшої і найменшої витрати відповідно.

Визначення похибки, зумовленої швидкістю спрацювання перекидного пристрою здійснюється шляхом обробки 20-ти повторних переключень потоку за фіксовані проміжки часу. Проміжки часу вибираються відповідно до значень об'єму, які відтворюються установкою еквівалентного витіснення за найбільшої і найменшої витрати відповідно (від 1 дм³ до 16 дм³).

Отримавши всі вихідні дані, проводять обчислення характеристик робочого еталона відповідно до [129]. Текст розробленої методики наведено в додатку Е.

Методика державної метрологічної атестації витратомірів

Програма і методика державної метрологічної атестації витратомірів газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с описує порядок виконання операцій, та умови їх проведення метрологічній атестації робочого витратомірів мікровитрат.

Атестація витратомірів починається з розгляду технічної документації (технічне завдання (надалі - ТЗ) на розробку витратоміра або документ, який його заміняє, експлуатаційна документація (надалі - ЕД) на витратомір (паспорт, керівництво з експлуатації, тощо), ЕД на засоби вимірювальної техніки, що входять до складу витратоміра). При цьому перевіряється відповідність метрологічних та технічних характеристик наведених в ЕД вимогам ТЗ та інших нормативних документів, що поширюються на витратомір і оцінка ЕД щодо зручності користування нею споживачів.

Методикою регламентується, що перед проведенням досліджень необхідно не менше 5 разів пропустити контрольний об'єм повітря за

максимальної об'ємної витрати, через витратомір для досягнення вирівнювання температур перед ним та в еталонній установці[130].

Місця вимірювання тиску та температури на витратомірі визначаються згідно технічної документації на нього.

Значення об'ємної витрати для кожного i -го вимірювання за даного j -того значення об'ємної витрати проводять наступні обчислення:

– значення об'єму, що пройшов через витратомір:

$$V_{ji} = V_{Ej} \times \frac{P_{aj} + P_{Eji}}{P_{aj} + P_{ji}} \times \frac{T_{ji} + 273,15}{T_{Eji} + 273,15} \quad (1)$$

де V_{ji} - значення об'єму газу, розраховане з показів витратоміра, м³;

V_{Ej} - значення об'єму газу, визначене повірочною установкою, м³;

P_{Ei} – надлишковий тиск у повірочній установці, Па;

P_{ji} – тиск перед витратоміром, Па;

T_{Eji} – температура у повірочній установці, °С;

T_{ji} – температури на вході (виході) у витратомір, °С

P_{aj} – атмосферний тиск, Па.

Значення об'єму газу, розраховане з показів витратоміра становить:

$$V_{ji} = q_{v_{ji}} \cdot t_{ji} \quad (2)$$

де $q_{v_{ji}}$ - значення об'ємної витрати газу, взяте з показів витратоміра, м³/с;

t_{ji} - значення часу, протягом якого здійснювалось дослідження, с.

Визначення границь сумарної відносної похибки вимірювання проводиться згідно методики[130].

Результати атестації вважаються позитивними, якщо значення довірчих границь відносної похибки витратоміра на всіх точках задання витрати не перевищує допустимі значення, наведені в ЕД. Текст розробленої методики наведено в додатку Є.

4.4 Впровадження результатів досліджень

Результати дисертаційної роботи впроваджені у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» та ТОВ ІВФ «Темпо» при дослідженні метрологічних характеристик витратомірів об'єму та об'ємної витрати газу. Мають практичне застосування результати дослідження впливу температури на похибки ламінарного витратоміра. Розроблений робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ та його нормативне забезпечення застосовується в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія».

Результати проведених теоретичних, експериментальних і метрологічних досліджень витратомірів малих витрат, а також застосування посудини Маріотта для стабілізації мікровитрат, які відображені в дисертаційній роботі знайшли практичне застосування при розробленні та виготовленні повірочних установок типу «Темпо» для побутових лічильників газу.

Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи у ТОВ ІВФ «Темпо» та ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» наведено в додатках Г, Д.

Розроблення змін до повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу схеми встановлює вимоги, які є обов'язковими для дотримання при виготовленні і експлуатації лічильників газу та витратомірів в Україні. Автор був виконавцем НДР по розробленню змін до повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, яка виконувалася в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» впродовж 2011-2012р.

Розроблені нормативні документи з метрології [129,130] занесені до Державного реєстру України методик виконання вимірювань та реєстру організаційно-методичних документів з метрології, що свідчить про їх практичне впровадження у сфері Держспоживстандарту України.

4.5 Висновки до четвертого розділу

Розроблений метод калібрування витратомірів мікровитрат дає можливість знизити границю відтворюваних витрат нижче від мінімальної

границі вимірюваної витрати еталонних витратомірів, що забезпечує відтворення витрат нижче від значення, визначеного державною повірочною схемою для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, при використанні витратомірів, що охоплюються цією схемою.

Розроблений калібратор для повірки витратомірів газу в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ не має аналогів в Україні і, завдяки компактності конструкції, дає можливість проводити атестацію і повірку витратомірів газу у вказаному вище діапазоні на місці їх експлуатації.

Створено і зареєстровано методичні документи з метрології – «Робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Програма та методика державної метрологічної атестації»[99] та «Витратоміри газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Програма і методика державної метрологічної атестації»[100]. Документи розроблені у відповідності до вимог ДСТУ 3215[96] і ДСТУ 3383[60].

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень метрологічного забезпечення мікровитрат здійснено вдосконалення наукової, нормативної та технічної та основ метрологічного забезпечення мікровитрат газу, розроблені відповідні нормативні документи. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Розроблено спосіб компенсації температурної похибки ламінарного витратоміра шляхом використання в якості чутливого елемента коаксіальних трубок з різними коефіцієнтами лінійного розширення, що дає можливість створити термокомпенсований витратомір в діапазоні витрат від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ з класом точності 0,5.

2. Удосконалено існуючий метод відтворення витрати газу – метод еквівалентного витіснення шляхом використання посудини Маріотта для стабілізації рівня рідини, що дозволило усунути один з найбільш суттєвих недоліків установок даного типу – нестабільність витрати за рахунок зміни рівня рідини. Метод стабілізації витрати рідини за допомогою посудини Маріотта удосконалено шляхом повертання торця газовідної трубки у посудині на 180° вгору, що дало можливість сформувати спрямований потік бульбашок у верхню частину посудини Маріотта, і одночасно точно задати фіксоване значення гідростатичного тиску.

3. Розроблено математичну модель рівняння витрати установки еквівалентного витіснення з стабілізацією витрати за допомогою вдосконаленої посудини Маріотта, що дало можливість обґрунтувати модернізацію установки еквівалентного витіснення, та математичну модель похибки вимірювання витрати газу термокомпенсованим ламінарним витратоміром, встановлено її залежність від зміни тиску, температури та витрати шляхом використання теорії планування експерименту, що підтвердило дію механізму температурної компенсації в діапазоні температур $15\text{-}25^\circ\text{C}$.

4. Створено технічну основу метрологічного забезпечення вимірювання витрати в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ –установку еквівалентного витіснення зі стабілізацією витрати та джерело відтворення мікровитрат – калібратор мікровитрат в діапазоні від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$, що розширило нижню границю відтворення витрати до $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$. Для мінімізації впливу зміни рівня рідини на відтворювану витрату в установках еквівалентного витіснення розроблено два методи стабілізації витрати на основі посудини Маріотта, що дало можливість виключити складову сумарної похибки, викликану зміною витрати в процесі заміру.

5. Розроблено нормативну основу метрологічного забезпечення вимірювання та відтворення мікровитрат в діапазоні $2,77 \cdot 10^{-7}$ - $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ у вигляді двох нормативних документів з метрології: «Робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Програма та методика державної метрологічної атестації» та «Витратоміри газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Програма і методика державної метрологічної атестації»

6. Підготовлено зміну до ДСТУ 3383:2007 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу», що дає можливість розширити нижню границю вимірюваних витрат до $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Polischuk T. Flowmetering: New and traditional solutions break new ground // Instrumentation & control systems Y. 1998, vol. 71, No. 11, pages 36-43 [8 pages]
2. Теплох З.М., Парнета О.З. Високоточний плівковий витратомір // Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація / Вісник НУ «ЛП» № 506, 2004, с.275-282.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. - Л.: Машиностроение, 1989. -701с.
4. Соколов ГА, Сягаев НА, Тугушев К.Р. Измерение расходов газа методом тепловых меток // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2001.-с.345-349
5. Соколов ГА, Сягаев НА, Тугушев К.Р. Совершенствование импульсных тепловых расходомеров методом структурной избыточности // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы 14-й Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2001.-С.275-277
6. Соколов ГА, Сягаев НА, Тугушев К.Р. Современное состояние измерений расхода веществ тепловыми методами // Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара: Материалы 12-й Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2001.-е. 104-106
7. Соколов Г.А., Сягаев Н.А., Тугушев К.Р. Источники погрешностей измерения расхода веществ импульсным тепловым методом // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы 16-й Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2002.-С.389-393
8. Соколов ГА, Сягаев НА, Тугушев К.Р. Моделирование процессов переноса и деформации тепловой метки потоком газа. - Математические методы в техники и технологиях // Тезисы докладов. - Тамбов, 2002.-е. 119-120

9. Соколов Г.А., Сягаев Н.А., Тугушев К.Р. Деформация и перенос метки у термоконвективных расходомеров газов // Совершенствование измерений расхода, регулирование и коммерческий учет энергоносителей: Материалы 3-го Международного научно-практического форума - Санкт-Петербург, 2003.-с.155-158

10. Соколов Г.А., Сягаев Н.А., Тугушев К.Р. Расходомер газа с разделенными зонами генерации и измерения теплового импульса // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы 19-й Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2004,-с.313-318

11. Соколов Г.А., Новичков Ю.А., Масько А.П., Тугушев К.Р. Идентификация нестационарностей при измерении расхода тепловыми методами // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы 19-й Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2004.-с.319-322

12. В.Н. Котов, И.И. Черепяхин, Интегральный кремниевый микротермоанемометр для расхода жидких и газообразных сред // Микросистемная техника, №8/2003

13. Katz I.M., Shaughnessy E.J. Digital temperature compensation of a thermistor flowmeter // J. Phys. E. Sci. Instrum. 1987. Vol. 20. № 6. P. 561-564.

14. Hohenstatt M. Thermal mass flow sensors for gases // Discharge and Velocity Measurements. 1988. P. 65-73.

15. Грудин О.М., Иванов П.Д., Кацан И.И. и др. Микроэлектронный датчик для измерения малых перепадов давления // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 2. С. 193-197.

16. Lyman J. How Micro Switch's new kind of air-flow sensor does it // Electron. – 1987. Vol. 60. № 20. P. 85-86.

17. Habokotte E., Apel V., Warkowski F. Interierbare Funktionsblöcke und Systeme // Elektronik. 1990. № 1. P. 80-87.

18. Van Putten A. Anemometer productions a silicon success story // Sensor Rev. 1989. 9. № 1. P. 47-51.

19. Котов В.Н., Черепахин И.И. Твердотельный микротермоанемометр для жидких и газообразных сред // Труды науч. -техн. конф. "Электроника и информатика 2002". М.: МИЭТ. 2002.

20. Карбе Ю.В. Термоанемометр для измерения высоких скоростей газовых потоков // Приборы и системы управления, 1969, №3, с. 8-9

21. Морозов-Ростовский Г.П. Термоанемометрические пленочные преобразователи // Измерительная техника, 1968, № 5 с. 99

22. Fortschritte bei der thermischen Massenflub - Mebtechnik/ Wagner Ph./Wagen und Dosier - 1996 -27. №4 - с.3-6.

23. Vorrichtung zur Bestimmung des Drucksatzes eines stromenden Mйdiums: Заявка 19609579, Германия, МПК6 G01F1/696/ Kleinhans J.; Robert Bosch GmbH/ - №196095794; Заявл. 12.3.96. Оpubл. 18.9.97.

24. Flow rate and direction measurement system: Пат. 5929333 США МПК6 G01F1/68/ Nair R.M. Cambridge AccuSense, Inc. - №08/892529. Заявл. 14.07.1997. Оpubл. 27.07.1999; НПК 73/204.11

25. Устройства для измерения расхода газов: Докл. на Всероссийской научно-технич. конфёр. "Фундаментальные исследования для гиперзвуковых технологий", Жуковский. 20-23 окт, 1998. Евсеев Н.И., Жилин Ю.В., Шамимурин А.А. Тр. ЦАТИ; 1997, №2636 - с.613-618,4 ил.

26. Gas Flow meter: Пат. 5448919 США МКИ6 G01F1/708/ Fawcett Lyman W. (Jz), Ansel Michael A., Pham Chi; Ametek, Inc. - №987442. Заявл. 7.12.92. Оpubл. 12.9.95; НКИ 73/861.03

27. New solutions to flow measurement problems // Chem. Process Vol.18 N 21 P75-76

28. King L.V. On the convection of heat from small cylindres in a stream of fluid determination of the concection constents of small platinum wires with applications ho the hot-wire anemometry // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 214, 1984, P. 393-432.

29. Корякова О.Н., Кузьмин В.А. Термоанемометры постоянной температуры // Измер. расх. жидкости, газа, пара М., 1967, с. 229-240

30. Whiller A. An anemometer for the continuous measurement of air speed in miles // Intern. T. Rock Mech. and Mining Sci. 1999, vol. 6. N 1, P13-20
31. Termoanemometrinis duju skaitiklis Davidonis V., Neugasimovas V. // Elektron. ir elektrotech. (Lietuva) - 1996 - №1 - с.73,77,80.
32. Hot wire anemometric sensors/ Kielbasa Jan, Peleszczgk Elzbieta, Rysz Jozef // MST News Pol. - 1997 - №1 - с.11-17.
33. Flow sensor: Пат. 5406841 США, МКИ⁶ G01F1/68/ Kimura M., Ricoh Seiki CO., Ltd - №33783. Заявл. 17.3.93. Опубл. 18.4.95. Приор. 17.3.92, №4\091599 (Япония); НКИ 73/204.26
34. Flow sensor: Пат. 5423212 США МКИ⁶ G01F1/68/ Manaka J.; Ricoh Seiki CO., Ltd - №79134. Заявл. 18.6.93. Опубл. 13.6.95; НКИ 73/204.26
35. Виленкина Р.И., Новиков В.Н. Терморезисторы для измерения скорости потоков газов и жидкостей // Приборы и системы управления, 1967 №8, с. 34-36
36. Теплюх З.М., Парнета О.З. Пристрої рідинного контуру у плівковому витратомірі // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація / Вісник НУ «ЛП» № 476, -2003, с.37-42.
37. Keller P.G. Metering low flows // Chem. Eng. 1964 Vol. 71 N20 P134
38. Теплюх ЗМ, Парнета ОЗ. Генератори плівок мікровитратоміра газу // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація / Вісник НУ «ЛП» №460, - 2002, с.78-81.
39. Теплюх З.М., Парнета О.З. Аналіз похибок плівкового витратоміра газу // Вимірювальна техніка та метрологія / Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 62, Львів: НУ «ЛП», 2003, с.123-130.
40. Теплюх З.М., Парнета О.З. Вимірювання мікровитрат природного газу плівковим методом // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація / Вісник НУ «ЛП» №452, -2002, с. 204-207.
41. Теплюх З.М., Парнета О.З. Вплив високомолекулярних домішок на якість плівок у мікровитратомірах // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація / Вісник НУ «ЛП» №404, -2000, с. 103-105.

42. Вимірювання витрати та кількості газу: довідник / [М.П.Андріішин, С.О.Канєвський, О.М.Карпаш, Я.С.Марчук, І.С.Петришин, А.А.Руднік, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський]; за ред. О.М.Карпаша. - Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004. - 160 с

43. Ruppel G., Umpfenbach K.I. Stromungstechnische Untersuchungen an Schwimmermessern // Tech. Mech Therm 1990 Bd1, N6, S225-233.

44. Mori Y., Maki M., Nishivaki N. On float-area type flow meters (Non-newtonien fluid) // Bull. ISME. 1969 Vol. 12N 52 P. 810-818

45. Robin Gledhill. Variable Area Flowmeters offer economy and value <http://www.blwhite.com/artvariablearea.htm>

46. Миронов Ю.С. Фрейдгейм Н.И. Влияние наклона ротаметра на изменение его показаний // Измерительная техника, 1972, №4, с. 43-44

47. Тугушев, Камиль Равильевич Методы и средства измерения малых расходов газа с применением тепловых меток : Дис. канд. техн. наук : 05.11.13 СПб. 2004

48. Пистун Е.П., Теплюх З.Н., Стасюк И.Д. Применение часовых камней для измерения микрорасходов газов // Измерител. техника. - 1983. - №1. - с.22-24.

49. Середюк О.Є. Експериментальне визначення коефіцієнта витрати спеціальних звужувальних пристроїв / О.Є. Середюк, А.Г. Винничук // Приладобудування 2011: стан і перспективи: 10-та міжнар. наук.-техн. конф, 19-20 квітня 2011 р, Київ: зб. наук, праць - Київ: ПБФ, НТУУ "КПІ", 2011.-С. 230-231.

50. Современные средства измерений расхода и количества газа. Личко А.А., Суслов В.Я., Смирнов И.В. Мир измерений, 2001, №5, стр.4-13, 5 ил, 3 табл.

51. Андрианов С.Г., Боголюбов В.Б., Кириенко Г.А. Измерение малых расходов при помощи преобразователей с гидравлическими сопротивлениями // Материалы науч.-техн. семинара: Повышение точности измерения расхода. - Л., 1988. - с.38-40.

52. Pierre Delajoud and Martin Girard. A high accuracy, portable calibration standard for low mass flow. Presented 1994 September 06 at the XIII IMEKO World Congress of Metrology, Torino ITALY Aristov P.A., Evsjutkin V.S., Khilst V.A. possibility of active oscillator use for small gas flowrate measurement // FLOMEKO 1996. - p.319- 323.

53. Pierre Delajoud and Martin Girard. The need for evolution in standards and calibration to improve process measurement and control of low mass flow. Presented 1996 August 27 at the 1996 NCSL Workshop and Symposium Monterey CA

54. Tison, S. A. and Bendt, L., High Differential Pressure Laminar Flow Meter, Proceedings of the 1997 ASME Fluids Engineering Summer Meeting, June, 1997, Vancouver, Canada.

55. William J. Alvesteffer and Lawrence W. Eget. A laminar flow element with a linear pressure drop versus volumetric flow ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Proceedings of FEDSM'98:19982.

56. Powell H.N., Brown W.G. Use of coil capillaries in a convenient laboratory flowmeter // Rev. Scient. Instr. 1957, vol 28 N 2 P138-141

57. Wright, J. D., The Long Term Calibration Stability of Critical Flow Nozzles and Laminar Flowmeters, NCSL Workshop and Symposium, Albuquerque, U.S.A., 1998, pp.443-462.

58. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 1. - 5-е изд. перераб. и доп. - СПб.: Политехника, 2002. - 409 е.: ил.

59. Clement C. Mesure de faibles debits gazeux sous pression dans des reacteurs industriels // Chimie analytique, 1996, vol.48 N2 P98

60. Теплох З.М. Газодинамічні дросельні методи та пристрої аналізу і синтезу газових сумішей [Текст] : Дис. д-ра техн. наук: 05.11.13 / Теплох Зеновій Миколайович ; Національний ун-т "Львівська політехніка". - Л., 2005. - 328 арк.:

61. Пістун Є.П. Газогідродинамічні вимірювальні перетворювачі на складених дросельних елементах / Є. П. Пістун, Г. Ф. Леськів // Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація: Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2002. – №460. – С.81-88.

62. Пістун Є.П. Математичний опис структур побудови схем вимірювальних перетворювачів / Є. П. Пістун, Г. Ф. Леськів // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Вимірювальна техніка та метрологія". – 2002. – Вип.61. – С.87–92.

63. Пістун Є.П. Побудова та моделювання газогідродинамічних вимірювальних схем на двох дросельних елементах / Є. П. Пістун, Г. Ф. Леськів // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 9. – С.35–38.

64. Пістун Є.П. Побудова та моделювання газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових дросельних схемах / Є. П. Пістун, Г. Ф. Леськів // Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація: Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2003. – № 476. – С.18–26.

65. Теплюх З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування". – Львів, 2006. – №551. – С.87–94.

66. А. с. 1760406 СССР, МКИ5 G05L 7/00. Спосіб підбора дроселей с равными газодинамическими сопротивлениями / Е.П. Пистун, З.Н. Теплюх, И.В. Дилай. – Бюлл. изобретений № 33, 1992.

67. Теплюх З., Пістун Є., Ділай І. Пристрої для встановлення рівності опору дроселів синтезатора газових сумішей // Вимірювальна техніка та метрологія / Міжвідомчий наук.-техн. зб. – Вип.59, – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2002. 2 – С.178–182.

68. Івахів О.В., Теплюх З.М. Підгонка опору дроселів з допомогою газодинамічного моста // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування". – Львів. 2003. – №476. – С.15–21

69. Etalonovy plynomer EP-2, EP-15. Проспект фірми GMR (Gas-mezení, regulace, a.s.).- Skutec, 1995.

70. Правила випробувань лічильників газу ПТБ.- ФРН, 1982.- Т.4.
71. Технічний опис установки фірми "Rombach".- Німеччина, 1994.
72. МИ 1538-86. ГСИ. Критические расходомеры. Методика выполнения измерений массового расхода газа. Методические указания. - Казань, 1986.
73. Петришин І.С., Дмитрусь М.М., Бестелесний А.Г. Пристрій градування критичних витратомірів газу. Заявка на патент. Пріоритет від червня 1997р.
74. Раинчик С.В. Стенд для градуировки критических микросопел // Измерительная техника. - 1986. - №1. - С. 9-10.
75. Bignell, N. and Choi, Y. M., Thermal Effects in Small Nozzles, Flow Meas. Instrum., 2002, Vol. 13, 17 – 22.
76. Wright, J. D. and Mattingly, G. E., NIST Calibration Services for Gas Flowmeters: Small Gas Flow Facilities, NIST SP250 Supplement, in press.
77. Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles, ASME/ANSI MFC-7M-1987, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1987.
78. Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles, ISO 9300 : 1990 (E), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1990.
79. Петришин І.С., Бестелесний А.Г. Алгоритм оцінки похибок державного спеціального еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу // Методи та прилади контролю якості.-1997.-№1.-С.75-79.
80. Cignolo Giorgio, Cichy Marian. Rozwoj urzadzen laboratoryjnych do statycznego wzorcowania przeplywomierzy // Pomiaru, autom. kontrol. - 1987. - №1, -4-6-28.
81. Wright, J. D. and Mattingly, G. E., NIST Calibration Services for Gas Flowmeters: Small Gas Flow Facilities, NIST SP250-49 Supplement, in press.
82. Петришин І. С. Науково-методологічні та технічні засади забезпечення точності вимірювань витрати природного газу [Текст]: дис. ...

докт. техн. наук: 22.02.07 / Петришин Ігор Степанович. - Івано-Франківськ, 2007. - 381с.

83. Bruggeman Swen. Grundlagen und Entwicklung der Pruftechnik von Nieder - und Hochdruckprufaulagen // GWE. Gas/Eragas. - 1986. - Vol.127, №3. - S. 113-119.

84. Середюк О.Є. Сучасний стан метрологічного забезпечення побутових лічильників газу / О.Є. Середюк, А. Г. Винничук, Л.А. Витвицька, З.П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. - 2011. - №26. - С. 65-70. 28.Пат. 42275 С2 Україна, МІЖ 7 G 01 F 25/00.

85. Бродин Ю. І. Дводзвонова установка відтворення та вимірювання об'єму газу для повірки лічильників газу: автореф. дис. на здобуття наук.ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.01 «Прилади та методи вимірювання механічних величин» / Ю. І. Бродин. - Львів, 2002. - 19 с.

86. Петришин І. С. Метрологічне забезпечення вимірювань об'єму та об'ємної витрати природного газу в комунально-побутовій сфері (діапазон витрат від $2,8 \times 10^{-6}$ до $4,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) (від 0,01 до 16 $\text{м}^3/\text{год}$) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 20.04.97 / Петришин Ігор Степанович. - Івано-Франківськ, 1997. - 200с.

87. Присяжнюк Т.І. Спосіб стабілізації витрати газу в установках еквівалентного витіснення рідини / Т.І. Присяжнюк, І.С. Петришин // Метрологія та прилади : наук.-виробн. журн. - 2011 - N 3 - с.27-29

88. 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).

89. ГОСТ 8.143-75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объемного расхода газа в диапазоне 10^{-6} - $10^2 \text{ м}^3/\text{с}$.

90. Jongerins P.F.M., M.P. van der Beek and J.G.M. van der Grinten. Calibration facilities for industrial gas flow meters in the Netherlands. // Flow Meas. Instrum. - 1993. - №2. - P.p. 77-84.

91. Bellinga H. Facility for calibration under operating conditions of gas flow metering equipment. In "Flow measurement of fluids. Processings of FLOMEKO 1978, North-Holland, Amsterdam, 1978". - P. 109-116.

92. CSN 99 6801. Schema nadvaznosti meradiel prietoku a pretecheneho objemu plunu v rozsahu prietoku 0,001 az 10000 m³/h-1. Ceskoslovenska statna norma. Ucinuost od 1.08.1990.

93. Матеріали державних приймальних випробувань лічильників фірми "Schlumberger Industries".- Держстандарт України, 1995.

94. John D.Wright. What is the "Best" Transfer Standard for Gas Flow? //www.cstl.nist.gov.

95. Петришин І.С. Удосконалення конструкції та підвищення точності ламінарних витратомірів / І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк // Український метрологічний журнал - 2008 - №2 – с.42-45.

96. Патент США № 6,601,460 Flowmeter based on pressure drop across parallel geometry using boundary layer flow including Reynolds numbers above the laminar range / R.A. Materna (США), заявлено 09.06.1999, опубліковано 05.08.2003, Appl. No. 09/328,730 - 29 стор.

97. Журин Сергей Викторович. Методика численного моделирования конвективного теплообмена на телах сложной формы с использованием метода эффективной длины автореферат дис. кандидата физико-математических наук : 05.13.18 Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) Москва 2010 Количество страниц: 21

98. Петришин І.С. Метрологічний аналіз термокомпенсованих ламінарних витратомірів / І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк. // Методи та прилади контролю якості - 2009 - №22 – с.52-56.

99. В.М. Засименко. Основи теорії планування експерименту, «Львівська політехніка» – 2000. – с. 34

100. Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента – М.: Наука, 1971. – 287 с.

101. Петришин Н.І. Планування факторного експерименту досліджень засобів обліку природного газу в умовах реального середовища / Н.І. Петришин, Т.І. Присяжнюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу – 2010 – №2 – с. 125-130.

102. Петришин І.С. Розроблення метрологічного забезпечення вимірювання малих витрат газу в Україні / І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк. // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2011) зб. тез доповідей - Вінниця: КІВЦ ВНТУ 2011. - с. 127.

103. Петришин І.С. Розширення діапазону відтворюваних витрат вторинного еталона об'єму і об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08 / І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк, Н.І. Петришин // Методи та прилади контролю якості - 2010 - №24 – с.69-72.

104. Вторинний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу. Програма та методика державної метрологічної атестації. Івано-Франківськ, 2007

105. Grinten J.G.M.: The primary standard for gas flow measurement in the Netherlands, The Flomeko '93 conference 26-28 October 1993, Seoul, Korea

106. Б. Д. Степин Техника лабораторного експеримента в химии: Учеб. пособие для вузов. М.: Химия, 1999. - 600 с: ил. ISBN 5-7245-0955-5.

107. Н.З. Френкель. Гидравлика – М. 1956, 456 с.

108. Пат. 27563 U Україна, МІЖ (2006) G 01 F 25/00. Дзвонова установка для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк Д.О., Винничук А.Г., Середюк О.Є, Чеховський С.А.; заявник і патентовласник Івано-Франківський націон. техн.ун-т нафти і газу. - № и200705883; заявл. 29.05.07; опубл. 12.11.07, Бюл. №18.

109. Чеховский С.А. Исследование и разработка автоматизированной колокольной испытательной расходоизмерительной установки.: Дисс. на соиск. Уч. степ. канд. техн. наук. - Ивано-Франковск, 1978.-180 с.

110. Бродин І.С., Чеховський С.А., Івашиненко В.В. Исследование колокольного мерника в качестве источника стабильного расхода газа // Измерительная техника. - 1976. - №5. - С. 29-31.

111. Бродин І.С., Середюк О.Е. Колокольная расходоизмерительная установка РКДУ-0,44.- Ивано-Франковский ЦНТИ, 1987.- Информационный листок о передовом производственно-техническом опыте, №87-045.

112. Середюк О.Е. Испытательная расходоизмерительная установка со стабилизацией давления под колоколом.:Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.-г.Ивано-Франковск,1990.-254 с.

113. Пат. 42275 С2 Україна, МІЖ 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. - № 2000127353; заявл. 20.12.00; опубл. 15.02.05, Бюл. №2.

114. Присяжнюк Т.І. Універсальний багатоканальний вторинний прилад для вимірювання постійної напруги амплітудою до 100 мВ / Т.І. Присяжнюк // Метрологія та прилади – 2010 - №2 – с.48-50.

115. Присяжнюк Т.І. Термокомпенсований витратомір з мікропроцесорним вторинним приладом / Т.І. Присяжнюк // Метрологія та прилади – 2010 - №4 – с.30-32

116. Ю.А. Шпак - Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров –, К.: «МК Пресс», 2006 – 400 с.

117. Володарський Є.Т. Статистична обробка даних: навч. посіб. для студ. вищих навч. закл. / Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева - Київ: НАУ, 2008. -308 с.

118. Петришин І.С. Калібратор для повірки витратомірів газу в діапазоні від 0,001 до 0,016 м³/год / І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк // Вісник інженерної академії України – 2011 - №1 – с. 266-269.

119. Метрологія. Лічильники газу побутові. Методи та засоби повірки: Р50-071-98. - [Чинний від 1998-03-27]. - К.: Держстандарт України, 1998. - III, 20 с - (Рекомендації).

120. Присяжнюк Т.І. Вдосконалення способу стабілізації витрати газу в установках еквівалентного витіснення рідини / Т.І. Присяжнюк, О.А. Бас, І.С. Петришин // Український метрологічний журнал – 2012 - №4 – подано до друку.

121. Лічильники газу побутові. Правила приймання та методи випробувань: ДСТУ 3607-97. - [Чинний від 1998-07-01]. - К.: Держстандарт України, 1997. - 24 с. - (Державний стандарт України).

122. МДУ-02 "МПА-03-01-2001. Програма та методика державної метрологічної атестації робочих еталонів об'єму газу." Розробники: І.С. Петришин, Бестелесний А.Г.

123. Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 2708: 2006. - [Чинний від 2006-07-01]. - К.: Держспоживстандарт України, 2006. - III, 13 с. - (Національний стандарт України).

124. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. - [Введен с 1997-07-01]. - М.: Изд-во стандартов, 1997.-54 с. - (Межгосударственный стандарт).

125. ДСТУ 3215-95. Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 3215-95.- [Чинний від 1996-07-01; із змінами №1 чинний від 2000-01-01]. - К.: Держстандарт України, 2000. -10с- (Державний стандарт України).

126. ДСТУ OIML D5:2007 Метрологія. Повірочні схеми для засобів вимірювальної техніки. Правила розроблення, Київ. Держспоживстандарт 2010

127. Метрологія. Установки повірочні дзвонового типу. Типова програма та методика державної метрологічної атестації: МДУ-025/03-2006. / І.С.Петришин, М.В. Кузь, Я.В. Безгачнюк [та ін.] - [Чинна від 2006-05-18]. - Івано-Франківськ: ДП «Ішно-Франківськстандартметрологія», Укрметртесістандарт, 2006. - II, 45 с. - (Методичний документ з метрології Держспоживстандарту України: Методика).

128.ГОСТ 8.061-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. Москва. Введен в действие 01.01.1981

129. Робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Програма та методика державної метрологічної атестації / Петришин І.С., Присяжнюк Т.І., Бас О.А. [Чинна від 2012-03-27] Наказ № 131 ДП "Івано-Франківськстандартметрологія" від 27.03.2012

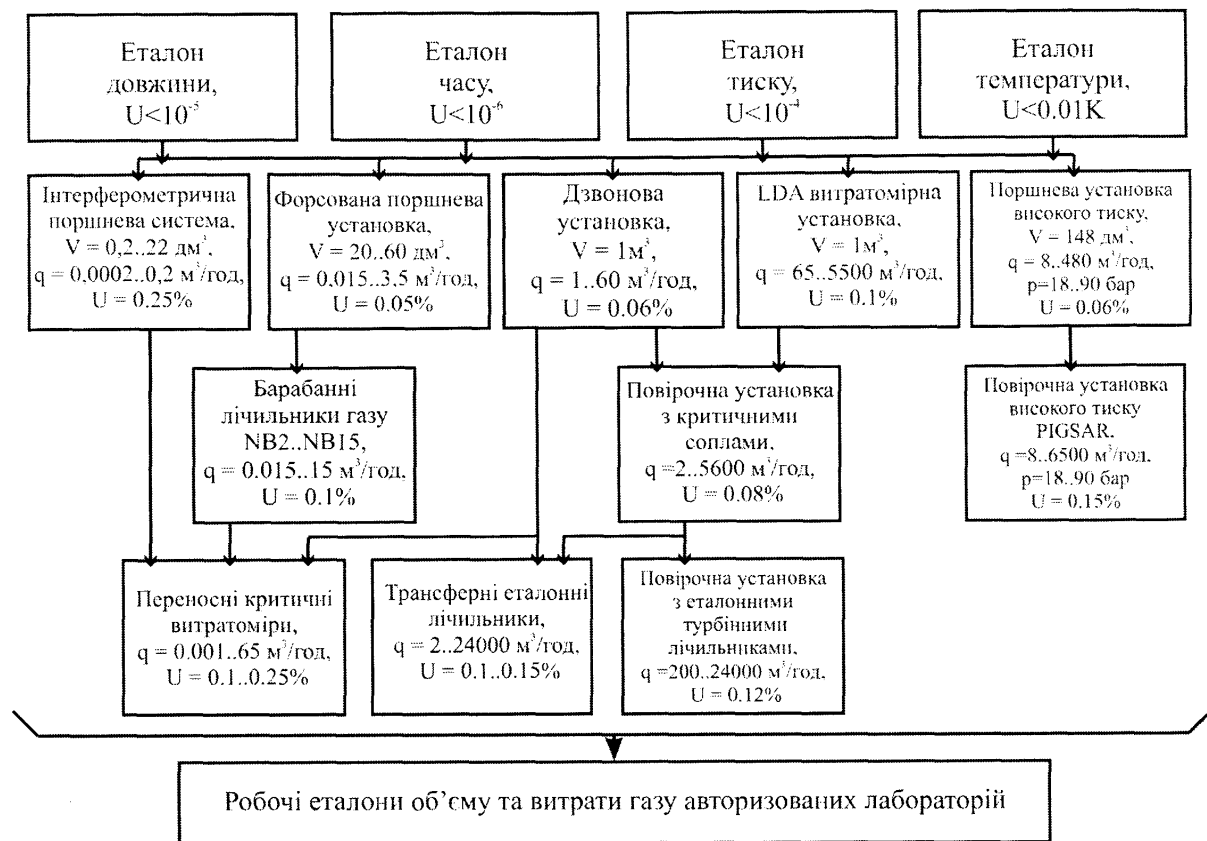
130. Витратоміри газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Програма і методика державної метрологічної атестації / Петришин І.С., Присяжнюк Т.І., Бас О.А. [Чинна від 2012-06-18] Наказ № 219 ДП "Івано-Франківськстандартметрологія" від 18.06.2012.

ДОДАТКИ

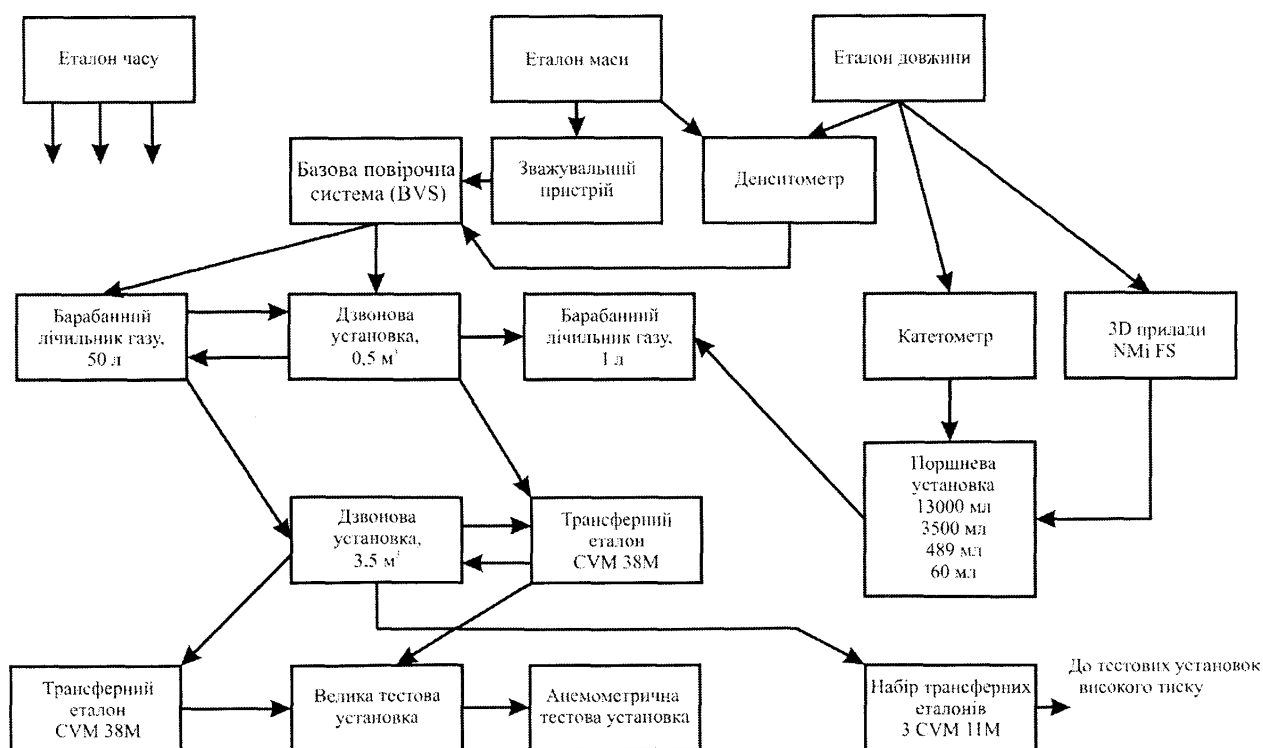
Додаток А

Повірочні схеми ЗВТ об'єму та об'ємної витрати газу інших країн

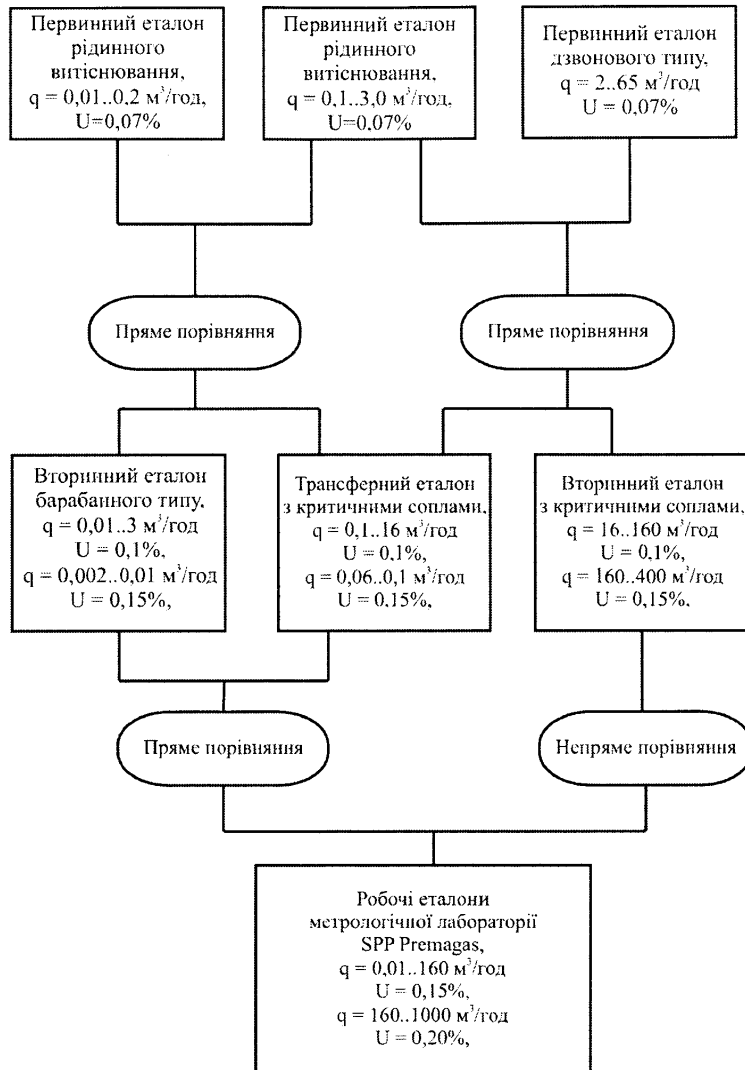
1) PTB, Німеччина



2) NMI, Нідерланди



3) SMU, Словацька Республіка



Додаток Б

Програма мікроконтролера калібратора витрати

```
/******
```

```
This program was produced by the  
CodeWizardAVR V1.25.5 Professional
```

```
Project :
```

```
Version :
```

```
Date   : 12.02.2010
```

```
Author : CSM
```

```
Company : CSM
```

```
Comments:
```

```
Chip type      : ATmega16
```

```
Program type   : Application
```

```
Clock frequency : 8,000000 MHz
```

```
Memory model   : Small
```

```
External SRAM size : 0
```

```
Data Stack size : 256
```

```
*****/
```

```
#include <mega16.h>
```

```
//#include <m8_128.h>
```

```
//#include <math.h>
```

```
#include <delay.h>
```

```
#include <7seg.h>
```

```
#define OUT PORTC.2
```

```
#define Select PINB.2
```

```
unsigned int Ind = 12;
```

```

unsigned int temp1_array[64], P_in, P1_in;

// External Interrupt 0 service routine

// Timer 2 overflow interrupt service routine

// Read the AD conversion result
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
    // Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage
    delay_us(10);
    // Start the AD conversion
    ADCSRA|=0x40;
    // Wait for the AD conversion to complete
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCW;
}

long int time;

char* p_time;
char anod;

char LED(unsigned int hex_data, char Digit) // hex_data - число в межах 0-999
{
    // digit - старші 2 біти -
    char d[5]; // номер цифри від молодшого розряду

    if (hex_data < 999)
    {
        d[0] = hex_data%10; // перевести число і занести в масив
        hex_data /= 10;
    }
}

```

```

d[1] = hex_data%10;
hex_data /= 10;
d[2] = hex_data%10;
hex_data /= 10;
}
else
{
d[0] = 0x0F;
d[1] = 0x0F;
d[2] = 0x0B;
}

```

```

d[1] |= 1<<7; // крапка після 2 цифри (7 біт-h)

```

```

return LED_symbol(d[Digit]); // повернути символ з заданим номером
};

```

```

unsigned int median(unsigned int x_old, unsigned int x)
{
x = x_old - ((x_old)>>6) + x;
return x;
};

```

```

unsigned int median8(unsigned int median_array[8], unsigned int current_value, char
current_number)
{
char median_i = 0;
unsigned int median_summ = 0;
median_array[current_number] = current_value;
for(median_i = 0; median_i < 8; median_i++)
{
median_summ = median_summ + median_array[median_i];
}
}

```

```

};
return median_summ>>3;
};

```

```
// Declare your global variables here
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
delay_ms(500);
```

```
p_time = (char*)&time;
```

```
// Declare your local variables here
```

```
// Input/Output Ports initialization
```

```
// Port B initialization
```

```
// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=In Func1=In
```

```
Func0=Out
```

```
// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=P State1=T State0=0
```

```
PORTB=0x04;
```

```
DDRB=0xF9;
```

```
// Port C initialization
```

```
// Func6=In Func5=Out Func4=In Func3=In Func2=Out Func1=In Func0=In
```

```
// State6=T State5=0 State4=T State3=T State2=0 State1=T State0=T
```

```
PORTC=0x00;
```

```
DDRC=0x24;
```

```
// Port D initialization
```

```
// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=In Func1=Out
```

```
Func0=Out
```

```
// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=T State1=0 State0=0
```

```
PORTD=0x00;
```

```
DDRD=0xFB;
```



```

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 7,813 kHz
TCCR0=0x05;
TCNT0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 125,000 kHz
// Mode: Normal top=FFFFh
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer 1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x03;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 2 Stopped
// Mode: Normal top=FFh

```

```

// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;

/*

// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 31,250 kHz
// Mode: Normal top=FFh
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x06;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;
*/

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: On
// INT0 Mode: Rising Edge
// INT1: Off
GICR|=0x40;
MCUCR=0x03;
GIFR=0x40;

/*

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: Off
// INT1: Off
MCUCR=0x00;

*/

```

```

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x40;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;
SFIOOR=0x00;

// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 62,500 kHz
// ADC Voltage Reference: AREF pin
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0x87;

// Global enable interrupts
#asm("sei")

while (1)
{
if (TIFR&0x01)
{
//виконувати по таймеру
TCNT0 = 0xF3;//DF; // частота опитування 300 Гц
TIFR = 0x01;

P_in = median(P_in,(read_adc(1)));
P1_in = median8(temp1_array,(P_in>>5),(char)*(p_time) & 0b00000111);
anod++;
}
}

```

```

if (anod == 3) anod = 0;
A = 0; //a > f
B = 0; //b > e
C = 0; //c > c
D = 0; //d > b
E = 0; //e > a
F = 0; //f > g
G = 0; //g > a
H = 0; //h > d
anodes(anod); // включити відповідний анод

LED(Ind, anod); //Вивести на індикатор
//delay_ms(100);

if (((char)*(p_time)&0b11111111)==0b10000000) // Виводити періодично 3 Гц
    {
        Ind = (5*(float)P1_in/(6.29937));
    };
time++;

}

};

}

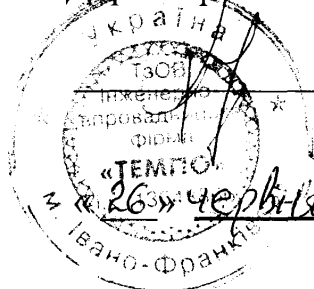
```

ПОВІДОМЛЕННЯ
про розроблення проекту національного стандарту в Україні

- 1. Розробник:** ТК 146 “Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості” (ТК 146), ДП «Івано-Франківськстандартметрологія».
- 2. Відповідальний орган:** Держспоживстандарт України.
- 3. Повідомляють відповідно до статті 2.9.2 Угоди ТВТ.**
- 4. Охоплювана продукція:** засобів вимірювальної техніки об’єму та об’ємної витрати газу.
- 5. Назва документа:** проект національного стандарту ДСТУ 3383:20__ Державна повірочна схема для засобів вимірювання об’єму та об’ємної витрати газу, 15 сторінок, українська мова.
- 6. Опис змісту документа:** вимоги до передачі розмірів одиниць об’єму та об’ємної витрати газу від Державного первинного еталона до робочих засобів вимірювальної техніки – лічильників та витратомірів газу.
- 7. Мета і обґрунтування:** перегляд державної повірочної схеми для засобів вимірювальної техніки об’єму та об’ємної витрати газу з метою оптимізації проведення повірочних робіт.
- 8. Актуальні (пов’язані) документи:** міжнародного аналога немає.
- 9. Запропонована дата прийняття стандарту:** 2011–12–15
Запропонована дата початку чинності стандарту: 2012–06–01
- 10. Найпізніша дата подання зауваг і пропозицій:** 2011–11–15
- 11. Проект стандарту можна отримати:** у Національному інформаційному центрі ISONET [+] за адресою:
Україна, 03680, МСП, м.Київ–150,
вул. Горького, 174;
dstu@dstu.gov.ua;
тел. 8 10 (38044) 268 91 58,
факс. 8 10 (38044) 269 70 60.

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ ІВФ «Темпо»



М.В. Руденко

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Присяжнюка Т.І. :
«Методи та прилади вимірювання витрати газів в діапазоні від 0.003 до
0.016 м³/год», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних
наук

Результати проведених теоретичних, експериментальних і метрологічних досліджень витратомірів малих витрат, які відображені в дисертаційній роботі Присяжнюка Т.І. на тему: «Методи та прилади вимірювання витрати газів в діапазоні від 0.003 до 0.016 м³/год» знайшли практичне застосування при розробленні та виготовленні повірочних установок типу «Темпо» для побутових лічильників газу.

Вклад здобувача Присяжнюка Т.І. стосується проведення досліджень метрологічного забезпечення вимірювання малих витрат, розробку нормативної і технічної бази метрологічного забезпечення, що дало можливість оптимізувати конструкцію повірочних установок та покращити їх метрологічні характеристики шляхом збільшення їх динамічного діапазону.

Головний інженер _____

В.В. Хохряков

Головний метролог _____

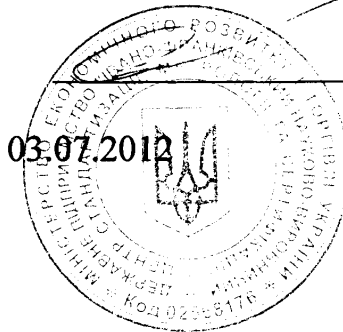
О.В. Деркач

Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора
ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»

В.В. Соколовський



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Присяжнюка Т.І.:
«Удосконалення методів та пристроїв забезпечення оцінювання відповідності засобів для обліку природного газу», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі: начальника відділу наукового забезпечення вимірювань ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» Джочка П.Я., наукового співробітника Середюка Д.О., та молодшого наукового співробітника Лемішки В.І. Склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Присяжнюка Т.І. на тему: «Методи та прилади вимірювання витрати газів в діапазоні від 0.003 до 0.016 м³/год» впроваджені у метрологічну практику діяльності Державного підприємства «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації» при метрологічних дослідженнях витратомірів мікровитрат.

Розроблена нормативна та технічна база метрологічного забезпечення забезпечує можливість повірки витратомірів мікровитрат в діапазоні від 1 до 16 л³/год.

Начальник відділу НЗВ

П.Я. Джочко

Науковий співробітник

Д.О. Середюк

Молодший науковий співробітник

В.І. Лемішка

Метрологія

**РОБОЧИЙ ЕТАЛОН
ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ
В ДІАПАЗОНІ ВІД $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с ДО $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с**

Програма та методика державної метрологічної атестації

Видання офіційне

Івано-Франківськ

2012

ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНО Державним підприємством „Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації” (ДП „Івано-Франківськстандартметрологія”) – Головною організацією Мінекономрозвитку України з вимірювання об’єму та об’ємної витрати газу

РОЗРОБНИКИ: І. Петришин, д.т.н., проф., Т. Присяжнюк, О. Бас

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказом № 131 ДП “Івано-Франківськстандартметрологія” від 27 березня 2012 року

3 ВВЕДЕНО ВПЕРШЕ

Цей документ не може бути повністю або частково відтворений, тиражований і розповсюджений як офіційне видання без дозволу ДП "Івано-Франківськстандартметрологія"

II

Метрологія

**РОБОЧИЙ ЕТАЛОН
ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ
В ДІАПАЗОНІ ВІД $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/год ДО $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/год**

Програма та методика державної метрологічної атестації

Чинна від 2012-03-27

Дана програма та методика державної метрологічної атестації (далі – програма) поширюється на робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с (далі – робочий еталон) та встановлює програму та методику його державної метрологічної атестації (далі – ДМА).

Робочий еталон складається із установки еквівалентного витіснення рідини.

Метою ДМА робочого еталона є визначення його метрологічних характеристик при передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу до робочих засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.

Програма розроблена у відповідності з вимогами ДСТУ 3215 та ДСТУ 3383.

1 ТЕХНІЧНА ДОКУМЕНТАЦІЯ

1.1 На ДМА робочого еталона повинна бути подана наступна документація:

- паспорт робочого еталона;
- паспорти та інструкції з експлуатації на первинні та проміжні перетворювачі, засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), що входять до складу робочого еталона;
- свідоцтва про перевірку або атестацію ЗВТ, що використовуються при ДМА робочого еталона.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 При ДМА робочого еталона повинні бути виконані операції, перелік яких наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Перелік операцій при ДМА робочого еталона

Назва операції	Пункт програми	ЗВТ, що застосовуються при ДМА
1. Зовнішній огляд	3.3	–
2. Перевірка герметичності робочого еталона	3.4	ЗВТ, що входять до складу робочого еталона, задавач об'єму дзвонового типу
3. Перевірка функціонування робочого еталона	3.5	ЗВТ, що входять до складу робочого еталона, робочий засіб вимірювання об'єму газу, задавач об'єму дзвонового типу
4. Визначення геометричних параметрів установки	3.6	Нутромір індикаторний НИ150-1250 ГОСТ 10-58, похибка 0,05 мм;

Назва операції	Пункт програми	ЗВТ, що застосовуються при ДМА
еквівалентного витіснення рідини		Мікроскоп універсальний вимірвальний УИМ-23, границі допустимої основної похибки ($1,0 \pm L/100$), мкм; Мікрометр МК-75 ГОСТ 6507-78, похибка 0,005 мм; Штангенциркуль ШЦ-11-150/0,05 ГОСТ 166-80, похибка 0,05 мм
5. ДМА каналів вимірювання тиску	3.7	Мікроманометр МПА-15 (діапазон вимірювань від 133 Па до $4 \cdot 10^5$ Па, похибка $0,02 \cdot 10^{-2}$), багатофункціональний калібратор MC2R №13412 $\pm (0,002+0,00025P)$
6. ДМА каналів вимірювання температури	3.8	Термостат Julabo FK30-SE № 10101474 (діапазон температури від -30°C до 200°C , стабільність підтримання температури $0,005^\circ\text{C}$), термоперетворювач опору Testo №01419166/710, 2 розряду (границі допустимої абсолютної похибки відтворення температури в діапазоні від -40 до 300°C – $\pm 0,02^\circ\text{C}$), Термометр ртутний TP-1 №2324, 2 розряду, діапазон вимірювань від 16 до 20°C , Термометр ртутний TP-1 №3011, 2 розряду, діапазон вимірювань від 20°C до 24°C
7. ДМА каналу вимірювання інтервалів часу	3.9	Частотомір-хронометр ЧЗ-54 (відносна похибка вимірювання інтервалу часу $3 \cdot 10^{-5}$ с)
11. Визначення похибки, зумовленої швидкістю спрацювання перекидного пристрою	3.10	Частотомір-хронометр ЧЗ-54 (відносна похибка вимірювання інтервалу часу 0,03 с)
12. Визначення метрологічних характеристик робочого еталона	4	–
13. Розрахунок сумарної похибки відтворення розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочим еталоном	6	–
14 Розрахунок похибки передачі одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочим еталоном		Робочий еталон, еталон порівняння $t_\Sigma \cdot S_\Sigma = 1,2 \cdot 10^{-3}$ задавач об'єму дзвонового типу

2.2 Всі ЗВТ, що застосовуються при ДМА, повинні бути повірені або атестовані в органах державної метрологічної служби.

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 ДМА робочого еталона проводять за наступних умов:

- температури робочого середовища і навколишнього повітря (20 ± 2) $^\circ\text{C}$;
- відносна вологість навколишнього повітря до 80 %;
- атмосферний тиск від 84,0 до 106,7 кПа;
- відсутність вібрації, трясіння, магнітних полів (крім земного), які впливають на роботу робочого еталона;
- робоче середовище – повітря, масло;

- градієнт температури навколишнього середовища не повинен перевищувати $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ по всій висоті робочого еталона;
- різниця температур масла в проміжній ємності і навколишнього середовища не повинна перевищувати $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3.2 Підготовка до ДМА

3.2.1 Перед проведенням ДМА робочого еталона необхідно перевірити наявність відбитків повірочних тавр або свідоцтв про повірку (ДМА) ЗВТ, що застосовуються під час ДМА.

3.2.2 Робочий еталон та ЗВТ до початку ДМА повинні бути витримані в умовах, зазначених в 3.1 цієї програми, не менше 6 годин.

3.2.3 Засоби ДМА та робочий еталон повинні бути підготовлені до роботи згідно вимог ГД, яка на них поширюється.

3.2.4 При проведенні ДМА робочого еталона повинні бути виконані всі заходи техніки безпеки.

3.3 Зовнішній огляд

3.3.1 При зовнішньому огляді робочого еталона перевіряють:

- відповідність робочого еталона вимогам, визначеними паспортом робочого еталона;
- відсутність видимих дефектів (ум'ятин, опуклостей) на зовнішній поверхні ємностей установки еквівалентного витіснення, перекидного пристрою, зважувальної платформи, дзвонового мірника

3.4 Перевірка герметичності робочого еталона

3.4.1 Перевірці герметичності підлягають установка еквівалентного витіснення рідини з під'єднувальними трубопроводами, запірні арматура, задавач об'єму дзвонового типу.

3.4.2 При визначенні герметичності робочого еталона необхідно, щоб зміна температури навколишнього повітря в ємностях установки не перевищувала $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ за час дослідження.

3.4.3 Перевірку герметичності необхідно вести в наступній послідовності. Наповнюють дзвоновий мірник повітрям, для чого дзвоновий мірник піднімають у верхнє положення, але до положення, при якому працює система переміщення дзвонового мірника, після чого закривають запірну арматуру. Далі закривають відсікаючий клапан насадка дивертора установки еквівалентного витіснення рідини і відкривають подачу повітря від дзвонового мірника до установки еквівалентного витіснення рідини.

Через 10 – 15 хв. записують покази системи вимірювання переміщення дзвонового мірника і протягом 5 хв. спостерігають за його зміною.

Робочий еталон вважають герметичним, якщо за час дослідження витік повітря з нього менший від двох величин: $0,1 \text{ дм}^3/\text{год}$ або об'єму, що не перевищує $0,1\%$ від пропущеного об'єму за найменшого значення витрати.

3.5 Перевірка функціонування робочого еталона

3.5.1 Під час опробування робочого еталона, необхідно:

- перевірити функціонування програмного забезпечення;
- перевірити функціонування засобів управління на пульті управління;
- перевірити можливість регулювання та контролю значення об'ємної витрати повітря;
- перевірити функціонування пристрою перемикання потоку масла;
- перевірити можливість вимірювання значень тиску в установці.
- перевірити можливість вимірювання значень температури в установці.

Функціонування робочого еталона вважають задовільним, якщо:

- забезпечується можливість регулювання об'ємної витрати в усьому діапазоні витрат, що відтворюються робочим еталоном;
- вимірюється тиск та температура в установці.

3.6 Визначення геометричних параметрів установки еквівалентного витіснення рідини
Для забезпечення відтворення значень контрольних витрат виготовлено посудину з вмонтованою газовідною трубкою (посудина Маріотта), схематичне зображення якої наведено на рисунку А.1 (додаток А).

Основні геометричні параметри, які забезпечують відтворення одиниці витрати:

h – висота насадка дивертора;

d – діаметр насадка дивертора;

H – висота рівня від торця газовідної трубки в посудині Маріотта до торця насадка дивертора.

3.6.1 Вимірювання висоти насадка дивертора проводиться штангенциркулем або мікроскопом. Проводиться не менше 20 вимірювань значень висоти.

За одержаними результатами вимірювання:

– обчислюють середнє значення висоти насадка дивертора:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \quad (1)$$

де h_i - i - ий результат вимірювання висоти насадка дивертора, м; n – кількість вимірювань ($n = 20$);

– обчислюють оцінку СКВ вимірювання середнього значення висоти насадка дивертора:

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (2)$$

– за НСП вимірювання висоти насадка дивертора Δh приймається похибка штангенциркуля.

3.6.2 Вимірювання діаметра насадка дивертора проводиться штангенциркулем або мікроскопом. Проводиться не менше 20 вимірювань значень діаметра.

За одержаними результатами вимірювання:

– обчислюють середнє значення діаметра насадка дивертора:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad (3)$$

де d_i - i - ий результат вимірювання діаметра насадка дивертора, м, n – кількість вимірювань ($n = 20$);

– обчислюють оцінку СКВ вимірювання середнього значення діаметра насадка дивертора:

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (4)$$

– за НСП вимірювання діаметра насадка дивертора Δd приймається похибка штангенциркуля.

3.6.3 Вимірювання висота рівня від торця газовідної трубки в посудині Маріотта до торця насадка дивертора проводиться за допомогою нутроміра або штангенциркуля. Кількість вимірювань повинна бути не менше 20.

За одержаними результатами вимірювання:

– обчислюють середнє значення висоти рівня:

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}, \quad (5)$$

де H_i - i -ий результат вимірювання висоти рівня, n – кількість вимірювань ($n = 20$);
 – обчислюють оцінку СКВ середнього значення висоти рівня:

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n(n-1)}}. \quad (6)$$

– за НСП вимірювання діаметра насадка дивертора ΔH приймається похибка нутроміра.

3.7 ДМА каналів вимірювання тиску

3.7.1 ДМА підлягають наступні ЗВТ надлишкового тиску:

- на виході газовідної трубки;
- на виході насадка дивертора;
- в проміжній ємності;
- перед досліджуванним ЗВТ об'єму газу.

3.7.2 ДМА каналів вимірювання тиску ведуть у наступній послідовності. Від'єднують ЗВТ тиску від робочого еталона і під'єднують їх до засобу створення надлишкового тиску згідно додатку А (рисунок Б.1). Тиск в діапазоні задається та вимірюється манометром МПА-15 або багатофункціональним калібратором МС2R.

Задатчиком тиску задають певне значення тиску і підтримують його протягом часу, необхідного для опитування комп'ютером 20 разів. Проводять запис 20 значень тиску, вимірянних каналом вимірювання тиску, що входять в комплект робочого еталона. Операцію запису значень тиску проводять автоматично за допомогою ПЕОМ. Після цього тиск в системі змінюють і створюють інше значення тиску.

Кількість досліджуваних значень тиску повинна бути не менше 5 (з певним кроком) в діапазоні вимірювань тиску від 0 до P_{\max} , де P_{\max} – максимальне значення абсолютного або надлишкового тиску в установці. В діапазоні вимірювань тиску від 84,0 до 106,7 кПа.

За одержаними значеннями тиску обчислюють середнє арифметичне значення тиску для кожного ЗВТ тиску, на кожній точці, за формулою:

$$\bar{P}_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij}}{n}, \quad (7)$$

де P_{ij} - i -те вимірне значення тиску, n – кількість вимірювань ($n = 20$).

Обчислюють оцінку СКВ результатів вимірювань:

$$S_{P_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{ij} - \bar{P}_j)^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

Обчислюють систематичну похибку каналу:

$$\Delta P_{C_j} = \bar{P}_j - P_{зад_j}, \quad (9)$$

де $P_{зад}$ – задане значення тиску, кПа.

Сумарне НСП j -ого вимірювання тиску визначається, як:

$$\Delta P_j = \Delta P_{C_j} + \Delta P_E, \quad (10)$$

де ΔP_E – НСП засобу вимірювання, що застосовуються при визначенні похибки каналу вимірювання тиску.

З множини отриманих значень СКВ та систематичних похибок для відповідного каналу вибирають максимальні значення.

3.8 ДМА каналів вимірювання температури

3.8.1 ДМА підлягають наступні канали вимірювання температури:

- повітря в проміжній ємності;
- масла в проміжній ємності;
- робочого середовища на вході (виході) досліджуваного ЗВТ об'єму газу.

3.8.2 ДМА каналів вимірювання температури проводять у наступній послідовності. Проводять демонтаж ЗВТ температури робочого еталона і занурюють їх в ванну термостата згідно з додатком А (рисунок Б.2). Задають і застабілізують одне із значень температури. Термостат витримують при заданій температурі протягом часу, зазначеного в паспорті на термостат.

Після стабілізації температури проводять запис 20 значень температури, виміряних ЗВТ температури, що входять в комплект робочого еталона. Контроль температури ведуть за допомогою термометра ртутного ТР або термометра термостата.

ДМА каналів вимірювання температури проводять за наступних значень температур: 17, 19, 20, 21, 23 °С з відхиленням $\pm 0,2$ °С.

Операцію запису значень температури проводять автоматично за допомогою ПЕОМ.

За одержаними значеннями температури обчислюють середнє арифметичне значення температури для кожного ЗВТ температури на кожній точці за формулою:

$$\bar{T}_j = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ij}}{n}, \quad (11)$$

де T_{ij} – i – те вимірне значення температури, n – кількість вимірювань ($n = 20$).

Обчислюють оцінку СКВ результатів вимірювань:

$$S_{T_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_j)^2}{n(n-1)}} \quad (12)$$

Обчислюють систематичну похибку каналу:

$$\Delta T_{Cj} = \bar{T}_j - T_{задj}, \quad (13)$$

де $T_{зад}$ – задане значення температури, °С.

Сумарне НСП j -ого вимірювання тиску визначається, як:

$$\Delta T_J = \Delta T_{Cj} + \Delta T_E, \quad (14)$$

де ΔT_E – НСП засобу вимірювання, що застосовуються при визначенні похибки каналу вимірювання температури.

З множини отриманих значень СКВ та систематичних похибок для відповідного каналу вибирають максимальні значення.

3.9 ДМА каналу вимірювання інтервалів часу

3.9.1 ДМА каналу вимірювання інтервалів часу проводиться за допомогою двох частотомірів-хронометрів типу ЧЗ-54.

3.9.2 ДМА каналу вимірювання часу проводять у наступній послідовності. Виводять з ПЕОМ робочого еталона сигнал „старт-стоп” і під'єднують його на вхід частотоміра ЧЗ-54. За допомогою ПЕОМ подають певний фіксований проміжок часу на частотомір.

На кожному фіксованому проміжку часу проводять по 20 вимірювань часу. Кількість досліджуваних проміжків часу повинна бути не менше 5 значень з діапазону, границі якого відповідають найменшому і найбільшому значенню часу вимірювання контрольного значення об'єму за найбільшої і найменшої витрати відповідно.

За одержаними значеннями вимірювання інтервалів часу для кожного проміжку обчислюють середнє арифметичне значення за формулою:

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ij}}{n}, \quad (15)$$

де $t_{ij} - i$ – те вимірне значення інтервалу часу, n – кількість вимірювань ($n = 20$).
Обчислюють оцінку СКВ результатів вимірювань:

$$S_{t_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_j)^2}{n(n-1)}} \quad (16)$$

Обчислюють систематичну похибку каналу:

$$\Delta t_{C_j} = \bar{t}_j - t_{зад_j}, \quad (21)$$

де $t_{зад}$ – значення інтервалу часу вимірне частотоміром-хронометром, с.

Сумарне НСП j -ого вимірювання тиску визначається, як:

$$\Delta t_j = \Delta t_{C_j} + \Delta T_E, \quad (17)$$

де Δt_E – НСП засобу вимірювання, що застосовуються при визначенні похибки каналу вимірювання температури.

З множини отриманих значень СКВ та систематичних похибок вибирають максимальні значення.

3.10 Визначення похибки, зумовленої швидкістю спрацювання перекидного пристрою

Оцінка відтворюваності перекидання потоку здійснюється шляхом 20-ти повторних переключень потоку за фіксовані проміжки часу. Проміжки часу вибираються відповідно до значень об'єму, які відтворюються установкою еквівалентного витіснення за найбільшої і найменшої витрати відповідно (від 1 дм³ до 16 дм³).

За результатами досліджень визначають:

– середній час переключення потоку в кожну сторону:

$$\bar{\tau}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \tau_{ij}}{n}, \quad (18)$$

– СКВ результатів вимірювання:

$$S_{\tau_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\tau_{ij} - \bar{\tau}_i)^2}{n(n-1)}} \quad (19)$$

– ступінь асиметрії перекидного пристрою:

$$\Delta \tau = \bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2, \quad (20)$$

де $\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2$ – середній час переключення перекидного пристрою в напрямку зливної та зважувальної ємності, відповідно.

4 Визначення метрологічних характеристик робочого еталона

4.1 Визначення НСП та СКВ відтворення одиниці об'єму газу установкою еквівалентного витіснення рідини

4.1.1 Коефіцієнти впливу по кожному вимірному параметру робочого еталону об'єму та об'ємної витрати газу визначають шляхом диференціювання алгоритму, що описує основне рівняння вимірювання від вище наведених та вимірних параметрів.

Об'єм газу визначається за формулою:

$$V = Q_m \cdot t, \quad (21)$$

де Q_m – значення об'ємної витрати газу, t – час, за який здійснюється вимірювання об'єму газу

Відповідно, значення об'ємної витрати газу визначається як:

$$Q_m = \frac{P_c \cdot T_d}{T_c \cdot P_d} \cdot \frac{-\pi \cdot \left[32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0,m} - (\rho_{0,m} \cdot (1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0,m} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0,m} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0,m} \cdot V_1^2)))^{0.5} \right]}{4 \cdot \rho_{0,m} \cdot a} \cdot \left(\frac{1 - \rho_{н.н} \cdot \rho_s}{1 - \rho_{н.н} \cdot (\rho_{0,m} + \alpha(T_m - 273,15))} \right) \quad (22)$$

де P_c, T_c – тиск, температура повітря в проміжній ємності; P_d, T_d – тиск, температура повітря в дослідній ділянці; T_m – температура робочої рідини; $\rho_{0,m}$ – густина масла при 20 °С, ν – кінематична в'язкість рідини, h – висота насадка, d – діаметр насадка, H – висота рівня від торця газовідної трубки в посудині Маріотта до торця насадка дивертора, a – коефіцієнт кінетичної енергії, V_1 – швидкість рідини на виході з посудини Маріотта, p_0 – абсолютний тиск на виході газовідної трубки; p_1 – абсолютний тиск на виході насадка дивертора; g – прискорення вільного падіння ($g = 9,8085$ м/с²), α – коефіцієнт теплового розширення масла; ρ_s – густина стандартних зважуваних об'єктів (8000 кг/м³); $\rho_{н.н.}$ – густина навколишнього повітря.

$$\rho_{н.н.} = \frac{0,00348353}{T_a} (P_a - 0,378010 \cdot \varphi \cdot p_{НВ}), \quad (23)$$

P_a – атмосферний тиск, Па, T_a – температура навколишнього повітря, К, φ – відносна вологість повітря, %, $p_{НВ}$ – тиск насиченої водяної пари:

$$p_{НВ} = e^{(XT_a^2 + YT_a + G + JT_a^{-1})} \quad (24)$$

де $X = 1,2811805 \cdot 10^{-5}$ К⁻²; $Y = -1,9509874 \cdot 10^{-2}$ К⁻¹; $G = 34,04926034$; $J = -6,3536311 \cdot 10^3$ К.

Спочатку оцінюється похибка визначення густини навколишнього повітря спираючись на рівняння (23). Коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial T_a} = \frac{-0,00348353}{T_a^2} \cdot (P_a - 0,378010 \cdot \varphi \cdot p_{НВ})$$

$$\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial P_a} = \frac{0,00348353}{T_a}$$

$$\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial \varphi} = \frac{-0,001316809}{T_a} \cdot p_{НВ}$$

$$\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial p_{НВ}} = \frac{-0,001316809}{T_a} \cdot \varphi$$

Значення коефіцієнтів впливу визначаються при номінальному значенні густини повітря та у крайніх точках діапазону температур, вологості, та тиску, при яких проводяться вимірювання.

Визначення НСП густини навколишнього повітря:

$$\Delta_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial T_a} \cdot \Delta T_a \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial P_a} \cdot \Delta P_a \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial \varphi} \cdot \Delta \varphi \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial p_{НВ}} \cdot \Delta p_{НВ} \right)^2} \quad (25)$$

Визначення СКВ густини навколишнього повітря:

$$S_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial T_a} \cdot S_{T_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial P_a} \cdot S_{P_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial \varphi} \cdot S_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{н.н.}}{\partial P_{HB}} \cdot S_{P_{HB}}\right)^2} \quad (26)$$

Значення НСП і СКВ визначають при номінальних значеннях вхідних параметрів та при крайніх їх значеннях. За кінцеве приймається максимальне значення похибки.

4.1.2 Визначаємо коефіцієнти впливу для основного рівняння (21)

Для зручності введемо заміни:

$$A = \left(\frac{1 - \rho_{н.н.}/\rho_S}{1 - \rho_{н.н.}/(\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))} \right)$$

$$B = \frac{-\pi \cdot \left[32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0.M} - (\rho_{0.M} \cdot (1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0.M} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0.M} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0.M} \cdot V_1^2))) \right]^{0,5}}{4 \cdot \rho_{0.M} \cdot a}$$

$$C = (\rho_{0.M} \cdot (1024 \cdot \nu^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0.M} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0.M} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0.M} \cdot V_1^2)))^{0,5}$$

Коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial Q_m}{\partial P_{\epsilon}} = \frac{T_{\mathcal{L}}}{P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial T_{\epsilon}} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}}}{P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon}^2} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial T_{\mathcal{L}}} = \frac{P_{\epsilon}}{P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial P_{\mathcal{L}}} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}}}{P_{\mathcal{L}}^2 \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} = \frac{P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}}}{P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon}} \cdot B \cdot A$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = \frac{-8 \cdot P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot \nu \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0.M}) \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \nu} = \frac{-8 \cdot P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot h \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0.M}) \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d} = \frac{P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot ((-2 \cdot H \cdot g + V_1^2) \cdot \rho_{0.M} - 2 \cdot p_0 + 2 \cdot p_1) \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{2 \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot h \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15)) \cdot ((-2 \cdot a \cdot d^4 \cdot H \cdot g + a \cdot d^4 \cdot V_1^2 - 2048 \cdot h^2 \cdot \nu^2) \rho_{0.M} - 2 \cdot a \cdot d^4 \cdot p_0 + 2 \cdot a \cdot d^4 \cdot p_1 + 64 \cdot C \cdot \nu \cdot h)}{8 \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot a^2 \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial H} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot \rho_{0.M} \cdot d^4 \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p_0} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot d^4 \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p_1} = \frac{P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot d^4 \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V_1} = \frac{P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot \rho_{0.M} \cdot d^4 \cdot V_1 \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon} \cdot C \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho_{н.н.}} = \frac{(\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_S) \cdot P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0.M}) \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15))}{4 \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})^2 \cdot \rho_S \cdot a \cdot \rho_{0.M} \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot T_{\epsilon}}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T_M} = \frac{-P_{\epsilon} \cdot T_{\mathcal{L}} \cdot \pi \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0.M}) \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_S) \cdot \rho_{н.н.} \cdot \alpha}{4 \cdot T_{\epsilon} \cdot P_{\mathcal{L}} \cdot \rho_{0.M} \cdot a \cdot \rho_S \cdot (\rho_{0.M} + \alpha(T_M - 273,15) - \rho_{н.н.})^2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = \frac{P_{\epsilon} \cdot T_{д} \cdot \pi \cdot (-C + 32 \cdot \nu \cdot h \cdot \rho_{0,м}) \cdot (\rho_{н.н.} - \rho_{S}) \cdot \rho_{н.н.} \cdot (T_{м} - 273,15)}{4 \cdot T_{\epsilon} \cdot P_{д} \cdot \rho_{0,м} \cdot a \cdot \rho_{S} \cdot (\rho_{0,м} + \alpha(T_{м} - 273,15) - \rho_{н.н.})^2}$$

4.1.3 НСП відтворення одиниці об'єму газу установкою еквівалентного витіснення рідини розраховується за наступною формулою:

$$\Theta_V = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_{\epsilon}} \cdot \Delta P_{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_{д}} \cdot \Delta P_{д} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{\epsilon}} \cdot \Delta T_{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{д}} \cdot \Delta T_{д} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot \Delta h \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \nu} \cdot \Delta \nu \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \cdot \Delta a \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot \Delta p_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot \Delta p_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot \Delta V_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot \Delta \rho_{н.н.} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_{м}} \cdot \Delta T_{м} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \Delta t \right)^2 + \Delta \tau^2} \quad (27)$$

де $\Delta \nu, \Delta a, \Delta \alpha$ – похибки визначення значень сталих величин, взяті з довідкової літератури.

4.1.4 СКВ відтворення одиниці об'єму газу дзвоною установкою розраховується за наступною формулою:

$$S_V = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_{\epsilon}} \cdot S_{P_{\epsilon}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_{д}} \cdot S_{P_{д}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{\epsilon}} \cdot S_{T_{\epsilon}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{д}} \cdot S_{T_{д}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot S_h \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot S_d \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot S_H \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot S_{p_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot S_{p_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot S_{V_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot S_{\rho_{н.н.}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_{м}} \cdot S_{T_{м}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot S_t \right)^2} \quad (28)$$

За значення СКВ відповідних параметрів взяті максимальні значення з пунктів вимірювання геометричних параметрів та ДМА каналів системи.

4.2 НСП та СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу установкою еквівалентного витіснення рідини

4.2.1 Рівняння вимірювання об'ємної витрати газу установки еквівалентного витіснення рідини описується формулою (22).

Для визначення НСП і СКВ відтворення об'ємної витрати газу використовуються коефіцієнти впливу, визначені з п.4.1.2.

4.2.2 НСП відтворення одиниці об'ємної витрати газу визначається, як:

$$\Theta_q = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_{\epsilon}} \cdot \Delta P_{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_{д}} \cdot \Delta P_{д} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{\epsilon}} \cdot \Delta T_{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{д}} \cdot \Delta T_{д} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot \Delta h \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \nu} \cdot \Delta \nu \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \cdot \Delta a \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot \Delta p_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot \Delta p_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot \Delta V_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot \Delta \rho_{н.н.} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_{м}} \cdot \Delta T_{м} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha \right)^2} \quad (29)$$

4.2.3 СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу:

$$S_q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial P_\epsilon} \cdot S_{P_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial P_d} \cdot S_{P_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_\epsilon} \cdot S_{T_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_d} \cdot S_{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot S_h\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial d} \cdot S_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot S_H\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_0} \cdot S_{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_1} \cdot S_{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_1} \cdot S_{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_{н.н.}} \cdot S_{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_m} \cdot S_{T_m}\right)^2} \quad (30)$$

5 Розрахунок сумарної похибки відтворення розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочим еталоном

5.1 Розрахунок сумарної похибки відтворення розміру одиниці об'єму газу робочим еталоном

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

$$\delta_V = t_\Sigma \sqrt{S_V^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_V^2}, \quad (31)$$

де S_V – СКВ відтворення розміру одиниці об'єму газу, Θ_V – НСП відтворення розміру одиниці об'єму газу, t_Σ – квантільний множник, який визначається за формулою:

$$t_\Sigma = \frac{\Theta + t_s \cdot S}{S_\Theta + S}, \quad (32)$$

t_s – квантіль Стюдента для відповідної довірчої ймовірності та кількості вимірювань.

5.2 Розрахунок сумарної похибки відтворення розміру одиниці об'ємної витрати газу робочим еталоном

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

$$\delta_q = t_\Sigma \sqrt{S_q^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_q^2}, \quad (33)$$

де S_q – СКВ відтворення розміру одиниці об'ємної витрати газу, Θ_q – НСП відтворення розміру одиниці об'ємної витрати газу.

Сумарна похибка розраховується для максимальної та мінімальної витрат, які відтворюються робочим еталоном. З множини значень похибок за кінцеве приймається максимальне значення.

6 Розрахунок похибки передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочого еталона

6.1 Для визначення похибки передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу використовується еталон порівняння (компаратор).

6.2 Монтують еталон порівняння на робочому еталоноі на місце для перевірки лічильника газу і проводять визначення відхилення від номінального коефіцієнта в наступній послідовності.

Перед проведенням вимірювань необхідно протягом не менше 10 хвилин пропускати повітря через еталон порівняння для досягнення врівноваження температур між еталоном порівняння та робочим еталоном.

6.3 Визначення відхилення від номінального значення коефіцієнта перетворення еталона порівняння проводять шляхом пропускання через еталон передавання не менше 0,01 м³.

На кожній витраті контрольний об'єм пропускають не менше 13-ох разів.

Значення об'ємної витрати задається із відхиленням не більше $\pm 1\%$.

6.4 Відхилення від номінального значення коефіцієнта перетворення еталона порівняння визначають за наступних значень об'ємної витрати від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ з кроком $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$.

6.5 За кожного значення об'ємної витрати визначають відхилення від нормованого значення коефіцієнта перетворення еталона порівняння і обчислюють (згідно алгоритму розрахунку похибки робочого еталона):

– середнє значення відхилення за j – того значення об'ємної витрати:

$$\bar{\delta}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{ji}}{n}, \quad (34)$$

де n – кількість вимірювань за j – того значення об'ємної витрати, δ_{ji} - відхилення від нормованого значення коефіцієнта перетворення еталона порівняння, визначене на робочому еталоні при i – тому вимірюванні за j – того значення об'ємної витрати;

– обчислюють СКВ результату вимірювань за j – того значення об'ємної витрати:

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{ji} - \bar{\delta}_j)^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (35)$$

– оцінку суми НСП і СКВ вказують у вигляді СКВ $S_{\varepsilon\Sigma}$, яке розраховують по формулі:

$$S_{\varepsilon\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \Theta_\varepsilon^2 + S_\varepsilon^2} \quad (36)$$

де Θ_ε – похибка відтворення засобу передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу (робочого еталона).

8 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДМА РОБОЧОГО ЕТАЛОНА

8.1 За результатами МА робочого еталона складають протокол.

8.2 Метрологічні характеристики робочого еталона заносять в паспорт робочого еталона та журнал обробки результатів вимірювань.

Додаток А
(обов'язковий)

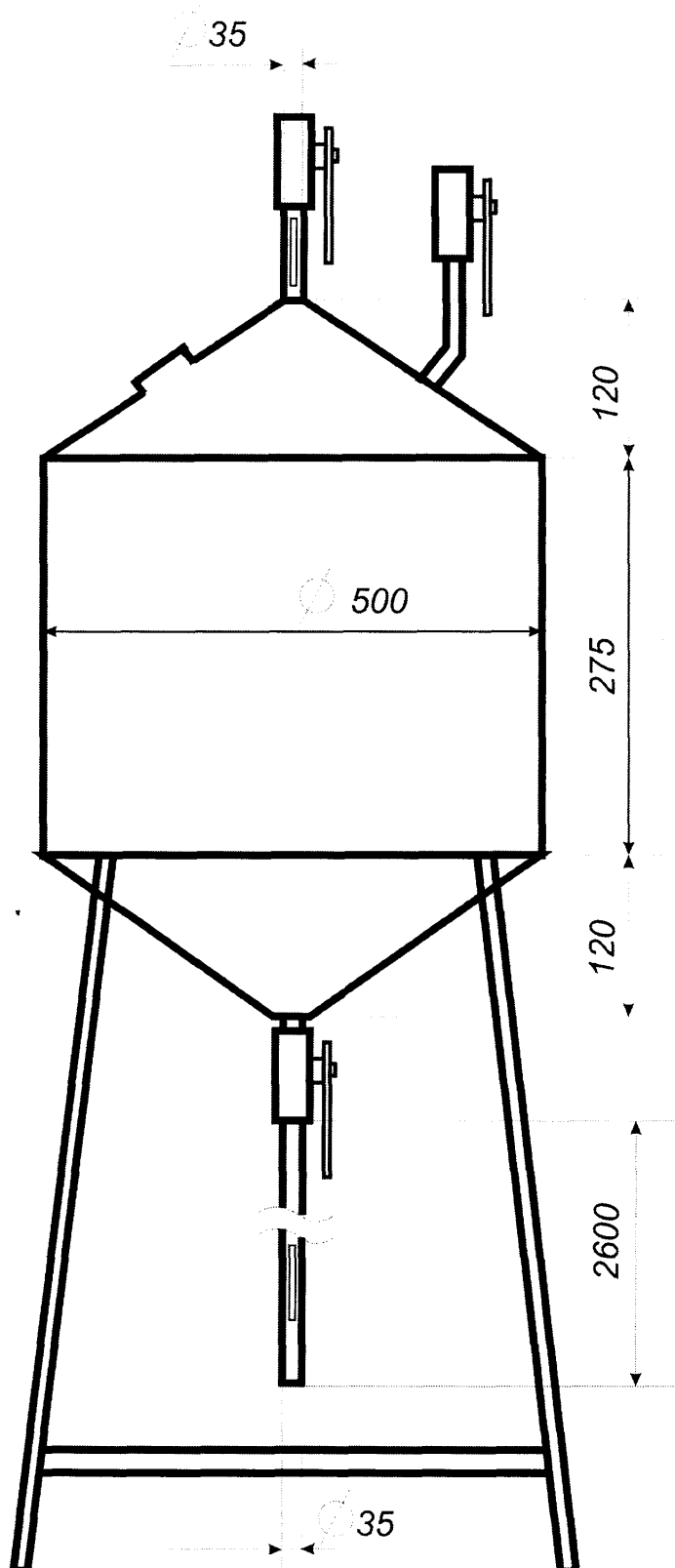


Рисунок А.1 – Схематичне зображення частини установки еквівалентного витіснення рідини

Додаток Б
(обов'язковий)

Схема ДМА каналів вимірювання тиску робочого еталона

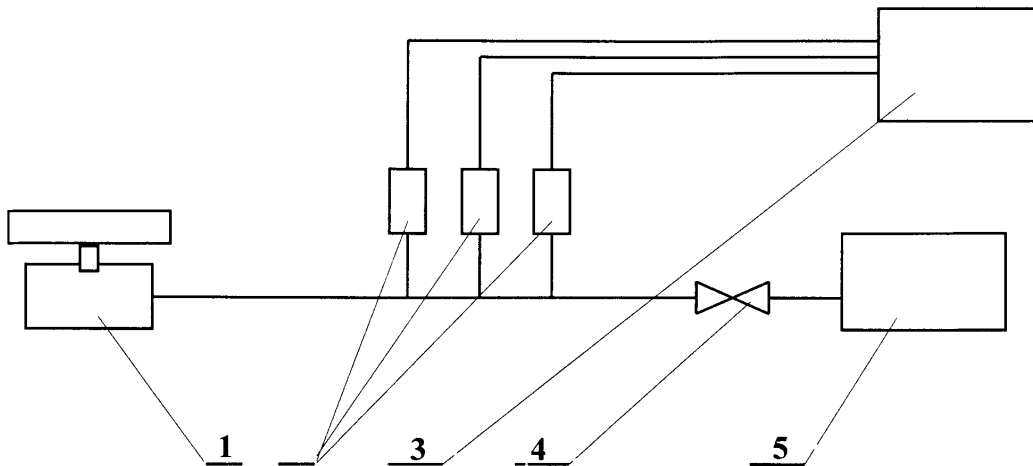


Рисунок Б.1

Умовні позначення:

1 - Засіб створення надлишкового тиску; 2 - ЗВТ тиску робочого еталона; 3 - ПЕОМ; 4 - Кран запірний; 5 - Робочий еталон тиску.

Схема ДМА каналів вимірювання температури робочого еталона

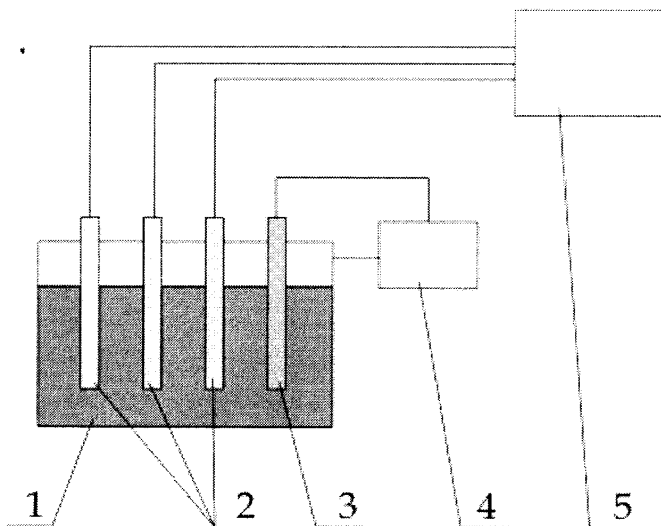


Рисунок Б.2

Умовні позначення:

1 – Термостат; 2 – ЗВТ температури робочого еталона; 3 – Термометр термостата; 4 - Пульт керування та індикації термостата; 5 – ПЕОМ

Додаток Є
МЕТОДИЧНИЙ ДОКУМЕНТ З МЕТРОЛОГІЇ

Метрологія

**ВИТРАТОМІРИ ГАЗУ
В ДІАПАЗОНІ ВІД $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с ДО $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с**

Програма і методика державної метрологічної атестації

МДУ

Видання офіційне

Івано-Франківськ
2012

ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНА Державним підприємством "Івано-Франківським регіональним науково-виробничим центром стандартизації метрології і сертифікації" (ДП "Івано-Франківськстандартметрологія")

2 ЗАТВЕРДЖЕНА ТА ВВЕДЕНА В ДІЮ наказом № 219 ДП "Івано-Франківськстандартметрологія" від 18 червня 2012 року

3 РОЗРОБНИКИ: І. Петришин, д.т.н., проф., Т. Присяжнюк, О. Бас

4 ВВЕДЕНА ВПЕРШЕ

©ДП "Івано-Франківськстандартметрологія"

Цей документ не може бути повністю або частково відтворений, тиражований і розповсюджений як офіційне видання без дозволу ДП "Івано-Франківськстандартметрологія"

**ВИТРАТОМІРИ ГАЗУ
В ДІАПАЗОНІ ВІД $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с ДО $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с**

Програма і методика державної метрологічної атестації

Чинна від 2012-06-18

Дана програма та методика державної метрологічної атестації (надалі – програма) поширюється на витратоміри газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м³/с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м³/с (надалі – витратоміри) та встановлює програму та методику їх державної метрологічної атестації (надалі – ДМА).

Програма розроблена у відповідності з вимогами ДСТУ 3215.

1 РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

1.1 На ДМА витратоміра повинна бути подана наступна документація:

- технічне завдання (надалі - ТЗ) на розробку витратоміра або документ, який його заміняє;
- експлуатаційна документація (надалі - ЕД) на витратомір (паспорт, керівництво з експлуатації, тощо);
- ЕД на засоби вимірювальної техніки (надалі - ЗВТ), що входять до складу витратоміра;

1.2 Під час розгляду технічної документації здійснюється:

- перевірка відповідності метрологічних та технічних характеристик наведених в ЕД вимогам ТЗ та інших нормативних документів, що поширюються на витратомір;
- оцінка ЕД щодо зручності користування нею споживачів.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 При ДМА витратоміра повинні бути виконані операції, перелік яких наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 - Перелік операцій при ДМА витратоміра

Назва операції	Пункт програми	ЗВТ, що застосовуються під час ДМА
1 Зовнішній огляд	3.3	Візуально
2 Перевірка герметичності витратоміра	3.4	ЗВТ, що входять до складу повірочної установки та допоміжне обладнання
3 Перевірка функціонування витратоміра	3.5	Повірочна установка з діапазоном відтворення об'ємних витрат газу в діапазоні від $2,77 \cdot 10^{-7}$ м ³ /с до $4,44 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с, $\delta_{\text{п}} \leq 0,2\%$
4 Визначення границь сумарної похибки витратоміра	3.6	—

2.2 При негативних результатах будь-якої з операцій ДМА витратоміра припиняють.

2.3 Допускається застосовувати для проведення ДМА інші ЗВТ, які за своїми метрологічними та технічними характеристиками задовольняють вимоги цього документа.

2.4 Всі ЗВТ, що застосовуються при ДМА, повинні бути повірені або атестовані в органах державної метрологічної служби.

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 При проведенні ДМА витратомірів повинні дотримуватись наступні умови проведення ДМА:

- температура навколишнього середовища (20 ± 2) °С.
- відносна вологість повітря не більше 80 %.
- відсутність вібрацій, ударів, трясіння, які впливають на роботу повірочної установки, за допомогою якої досліджують витратомір;
- градієнт температури навколишнього середовища не повинен перевищувати 0,5°С відносно геометричних параметрів повірочної установки та змонтованого витратоміра;
- робочим середовищем повинно використовуватись повітря;
- виставлене значення об'ємної витрати не повинно відрізнятися від заданого не більше ніж на $\pm 5\%$.

3.2 Перед проведенням ДМА витратоміра необхідно виконати наступні роботи:

3.2.1 Перед проведенням ДМА витратоміра необхідно перевірити наявність діючих відбитків повірочних тавр або свідоцтв про повірку та свідоцтв про ДМА ЗВТ, що використовується під час ДМА.

3.2.2 Витратомір та повірочна установка, за допомогою якої проводитиметься визначення основної відносної похибки витратоміра, до початку досліджень повинні бути витримані в умовах, зазначених в 3.1 цієї програми, не менше 12 годин.

3.2.3. Засоби ДМА та витратомір повинні бути підготовлені до роботи згідно вимог ТД, яка на них поширюється.

3.2.4 При проведенні ДМА витратоміра обслуговуючий персонал повинен суворо дотримуватись вимог техніки безпеки.

3.3 Зовнішній огляд

3.3.1 При зовнішньому огляді витратоміра перевіряють:

- відповідність його вимогам, визначеним в ЕД на витратомір;
- комплектність, маркування і пломбування згідно вимог ЕД на витратомір;
- відсутність видимих дефектів та пошкоджень корпусу та інших елементів витратоміра, які перешкоджають його правильній роботі.

3.4 Перевірка герметичності витратоміра

Перевірку герметичності витратоміра проводять на повірочній установці, що використовується при ДМА витратоміра, шляхом під'єднання його до повірочної установки, подальшої герметизації виходу витратоміра і створення максимально можливого надлишкового тиску в системі «повірочна установка – витратомір». Витримують в такому стані систему протягом 20 хвилин, при цьому слідкують за зміною показів витратоміра та системи вимірювання установки, що використовується при ДМА.

Систему і витратомір вважають герметичними, якщо за час дослідження витік повітря з системи менший від двох величин: 0,01 дм³/год або об'єму, що не перевищує 0,1% від пропущеного об'єму за найменшого значення витрати.

3.5 Перевірка функціонування витратоміра

Перевірку функціонування витратоміра проводять для перевірки його працездатності. Для цього через витратомір пропускають контрольний об'єм повітря за його максимальної об'ємної витрати $q_{v \max}$ не менше п'яти раз.

Якщо витратомір працює без збоїв і перетворювач перепаду тиску визначає значення витрати, то результати перевірки функціонування витратоміра вважають позитивними.

3.6 Визначення відносної похибки вимірювання

3.6.1 Перед проведенням досліджень необхідно не менше 5 раз пропустити контрольний об'єм повітря, за максимального значення об'ємної витрати, через витратомір для досягнення врівноваження температур перед ним та в повірочній установці, що застосовується при ДМА.

Значення об'ємної витрати задається відповідно до ТЗ на витратомір із відхиленням не більше $\pm 5\%$.

3.6.2 Для кожного i -го вимірювання за даного j -того значення об'ємної витрати проводять наступні обчислення:

– значення об'єму, що пройшов через витратомір:

$$V_{ji} = V_{Ej} \times \frac{P_{aj} + P_{Eji}}{P_{aj} + P_{ji}} \times \frac{T_{ji} + 273,15}{T_{Eji} + 273,15} \quad (1)$$

де V_{ji} - значення об'єму газу, розраховане з показів витратоміра, м³;

V_{Ej} - значення об'єму газу, визначене повірочною установкою, м³;
 P_{Ei} - надлишковий тиск у повірочній установці, Па;
 P_{ji} - тиск перед витратоміром, Па;
 T_{Eji} - температура у повірочній установці, °С;
 T_{ji} - температури на вході (виході) у витратомір, °С
 P_{aj} - атмосферний тиск, Па.

Значення об'єму газу, розраховане з показів витратоміра становить:

$$V_{ji} = q_{v_{ji}} \cdot t_{ji} \quad (2)$$

де $q_{v_{ji}}$ - значення об'ємної витрати газу, взяте з показів витратоміра, м³/с;
 t_{ji} - значення часу, протягом якого здійснювалось дослідження, с.

3.6.3 Визначення границь сумарної відносної похибки вимірювання.

Спочатку визначають середнє значення об'єму газу згідно формул (1), (2) за j -того значення об'ємної витрати:

$$\bar{V}_j = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ji}}{n} \quad (3)$$

деп – кількість вимірювань за j -того значення об'ємної витрати.

Наступним етапом обчислюють СКВ середнього значення об'єму газу за j -того значення об'ємної витрати:

– в абсолютному вираженні:

$$S_{V_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ji} - \bar{V}_j)^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

– у відносному вираженні:

$$\sigma_{V_j} = \frac{S_{V_j}}{\bar{V}_j} \cdot 100, \% \quad (5)$$

Довірчі границі сумарної відносної похибки витратоміра визначають в наступній послідовності:

- границі невилученої систематичної похибки витратоміра визначаються, як δ_{Π}
- сумарна похибка повірочної установки, %;
- обчислюють довірчі границі відносної похибки витратоміра для j -того значення об'ємної витрати:

$$\delta_j = \pm t_{\Sigma j} \cdot \sqrt{S_{\Theta}^2 + \sigma_{V_j}^2} \quad (6)$$

де $t_{\Sigma j}$ – коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової та невилученої систематичної похибок, і визначається, як:

$$t_{\Sigma j} = \frac{\delta_{\Pi} + t_s \cdot \sigma_{V_j}}{S_{\delta} + \sigma_{V_j}}, \quad (7)$$

де t_s – квантіль Стюдента для відповідної довірчої ймовірності та кількості вимірювань (для $P=0,95$ $t_s=1,96$); $S_{\delta} = \frac{\delta_{\Pi}}{\sqrt{3}}$.

Результати ДМА вважаються позитивними, якщо значення довірчих границь відносної похибки витратоміра на всіх точках задання витрати не перевищує допустимі значення, наведенні в ЕД.

4 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АТЕСТАЦІЇ

4.1 За результатами ДМА витратоміра оформляється свідоцтво згідно ДСТУ 3215

4.2 Метрологічні характеристики витратоміра заносяться в паспорт витратоміра.

4.3 Витратоміри, що не пройшли ДМА, до застосування не допускаються.

4.4 Міжповірочний інтервал витратомірів – 2 роки.

**Протокол дослідження установки еквівалентного витіснення в діапазоні
від $2,77 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$**

м. Івано-Франківськ

листопад 2012 р.

Належить

Державному підприємству
„Івано-Франківський науково-виробничий центр
стандартизації, метрології та сертифікації” (ДП „Івано-
Франківськстандартметрологія”)

За результатами атестації інформаційно-вимірювальних каналів та геометричних параметрів робочого еталону визначено наступні значення:

- висота насадка – 0,0005 м,

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} = 0,00049 \quad (1)$$

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (h_i - \bar{h})^2}{n \cdot (n-1)}} = 0,000015 \quad (2)$$

$$\Delta h = 0,00005 \quad (3)$$

- діаметр насадка – 0,001 м,

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = 0,00102 \quad (4)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (d_i - \bar{d})^2}{n \cdot (n-1)}} = 0,000025 \quad (5)$$

$$\Delta d = 0,00005 \quad (6)$$

- висота рівня від торця газовідної трубки в посудині Маріотта до торця насадка дивертора – 3,5 м,

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} = 3,504 \quad (7)$$

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n(n-1)}} = 0,001 \quad (8)$$

$$\Delta H = 0,0005 \quad (9)$$

- інформаційно-вимірювальний канал тиску – 101,325

$$\bar{P}_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij}}{n} = 101,322 \quad (10)$$

$$S_{P_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{ij} - \bar{P}_j)^2}{n(n-1)}} = 0,003 \quad (11)$$

$$\Delta P_{C_j} = \bar{P}_j - P_{зад_j} = 0,005 \quad (12)$$

$$\Delta P_E = 0,002 \quad (13)$$

$$\Delta P_J = \Delta P_{C_j} + \Delta P_E = 0,007 \quad (14)$$

– інформаційно-вимірювальний канал температури – 293,15

$$\bar{T}_j = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ij}}{n} = 293,17 \quad (15)$$

$$S_{T_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_j)^2}{n(n-1)}} = 0,037 \quad (16)$$

$$\Delta T_{C_j} = \bar{T}_j - T_{зад_j} = 0,095 \quad (17)$$

$$\Delta T_E = 0,02 \quad (18)$$

$$\Delta T_J = \Delta T_{C_j} + \Delta T_E = 0,115 \quad (19)$$

– інформаційно-вимірювальний канал часу – 1800

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ij}}{n} = 1799,89 \quad (20)$$

$$S_{t_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_j)^2}{n(n-1)}} = 0,062 \quad (21)$$

$$\Delta t_{C_j} = \bar{t}_j - t_{зад_j} = 0,064 \quad (22)$$

$$\Delta T_E = 0,03 \quad (23)$$

$$\Delta t_J = \Delta t_{C_j} + \Delta T_E = 0,094 \quad (24)$$

– похибка, зумовлена швидкістю спрацювання перекидного пристрою

$$\Delta \tau = \bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2 = 0,1 \quad (25)$$

Визначення НСП та СКВ відтворення одиниці об'єму газу установкою еквівалентного витіснення рідини.

Об'єм газу визначається за формулою:

$$V = Q_m \cdot t, \quad (26)$$

де Q_m – значення об'ємної витрати газу, t – час, за який здійснюється вимірювання об'єму газу

Відповідно, значення об'ємної витрати газу визначається як:

$$Q_m = \frac{P_c}{T_c} \cdot \frac{T_d}{P_d} \cdot \frac{-\pi \cdot \left[32 \cdot v \cdot h \cdot \rho_{0m} - (\rho_{0m} \cdot (1024 \cdot v^2 \cdot h^2 \cdot \rho_{0m} - a \cdot d^4 \cdot (2 \cdot (-\rho_{0m} \cdot H \cdot g - p_0 + p_1) + \rho_{0m} \cdot V_1^2)))^{0.5} \right]}{4 \cdot \rho_{0m} \cdot a} \cdot \left(\frac{1 - \rho_{н.н.} / \rho_S}{1 - \rho_{н.н.} / (\rho_{0m} + \alpha(T_m - 273,15))} \right) \quad (27)$$

де $P_{\epsilon}, T_{\epsilon}$ – тиск, температура повітря в проміжній ємності; $P_{\mathcal{L}}, T_{\mathcal{L}}$ – тиск, температура повітря в дослідній ділянці; T_m – температура робочої рідини; $\rho_{0,m}$ – густина масла при 20 °С, ν – кінематична в'язкість рідини, h – висота насадка, d – діаметр насадка, H – висота рівня від торця газовідної трубки в посудині Маріотта до торця насадка дивертора, a – коефіцієнт кінетичної енергії, V_1 – швидкість рідини на виході з посудини Маріотта, p_0 – абсолютний тиск на виході газовідної трубки; p_1 – абсолютний тиск на виході насадка дивертора; g – прискорення вільного падіння ($g = 9,8085 \text{ м/с}^2$), α – коефіцієнт теплового розширення масла; ρ_s – густина стандартних зважуваних об'єктів (8000 кг/м^3); $\rho_{н.н.}$ – густина навколишнього повітря.

$$\rho_{н.н.} = \frac{0,00348353}{T_a} (P_a - 0,378010 \cdot \varphi \cdot p_{HB}), \quad (28)$$

P_a – атмосферний тиск, Па, T_a – температура навколишнього повітря, К, φ – відносна вологість повітря, %, p_{HB} – тиск насиченої водяної пари:

$$p_{HB} = e^{(XT_a^2 + YT_a + G + JT_a^{-1})} \quad (29)$$

де $X = 1,2811805 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-2}$; $Y = -1,9509874 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$; $G = 34,04926034$; $J = -6,3536311 \cdot 10^3 \text{ К}$.

Спочатку оцінюється похибка визначення густини навколишнього повітря спираючись на рівняння (28). Попередньо оцінено, що вплив похідних величин не суттєвий, тому добуток похідних на похибки замінено відносними значеннями НСП впливових величин.

$$\Delta_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_a}{T_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_a}{P_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_{HB}}{p_{HB}}\right)^2} \quad (30)$$

$$\Delta_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{0,115}{293,15}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,007}{101,325}\right)^2 + \left(\frac{1,5}{75}\right)^2} = 0,03 \quad (31)$$

$$S_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{S_{T_a}}{T_a}\right)^2 + \left(\frac{S_{P_a}}{P_a}\right)^2 + \left(\frac{S_{\varphi}}{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{S_{p_{HB}}}{p_{HB}}\right)^2} \quad (32)$$

$$S_{\rho_{н.н.}} = \sqrt{\left(\frac{0,037}{293,15}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,003}{101,325}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{75}\right)^2} = 0,01 \quad (32)$$

Значення НСП і СКВ визначають при номінальних значеннях вхідних параметрів.

НСП відтворення одиниці об'єму газу установкою еквівалентного витіснення рідини розраховується за наступною формулою:

$$\Theta_V = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\epsilon}}{P_{\epsilon}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\mathcal{L}}}{P_{\mathcal{L}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{\epsilon}}{T_{\epsilon}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{\mathcal{L}}}{T_{\mathcal{L}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_0}{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_1}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_{н.н.}}{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_m}{T_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2} \quad (33)$$

де $\Delta\nu, \Delta a, \Delta\alpha$ – похибки визначення значень сталих величин, взяті з довідкової літератури.

$$\Theta_{\nu} = 1,1 \sqrt{4 \cdot \left(\frac{0,007}{101,325}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{0,115}{293,15}\right)^2 + \left(\frac{0,00005}{0,0005}\right)^2 + \left(\frac{0,00000001}{0,0000045}\right)^2 + \left(\frac{0,00005}{0,001}\right)^2 + \left(\frac{0,002}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,0005}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{0,0000462}{0,0046}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{1,2}\right)^2 + \left(\frac{0,00001}{0,01}\right)^2 + \left(\frac{0,094}{1800}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{1800}\right)^2} = 0,126 \quad (34)$$

СКВ відтворення одиниці об'єму газу дзвоною установкою розраховується за наступною формулою:

$$S_{\nu} = \sqrt{\left(\frac{S_{P_c}}{P_c}\right)^2 + \left(\frac{S_{P_d}}{P_d}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_c}}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_d}}{T_d}\right)^2 + \left(\frac{S_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{S_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{S_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{S_{p_0}}{p_0}\right)^2 + \left(\frac{S_{p_1}}{p_1}\right)^2 + \left(\frac{S_{V_1}}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{S_{\rho_{н.н.}}}{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_m}}{T_m}\right)^2 + \left(\frac{S_t}{t}\right)^2} \quad (35)$$

$$S_{\nu} = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{0,003}{101,325}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{0,037}{293,15}\right)^2 + \left(\frac{0,000025}{h}\right)^2 + \left(\frac{0,000035}{d}\right)^2 + \left(\frac{0,0001}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{0,0000235}{0,0046}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{1,2}\right)^2 + \left(\frac{0,062}{1800}\right)^2} = 0,061 \quad (36)$$

НСП відтворення одиниці об'ємної витрати газу визначається, як:

$$\Theta_{\nu} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\Delta P_c}{P_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_d}{P_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_c}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_d}{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_0}{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_1}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_{н.н.}}{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_m}{T_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2} \quad (37)$$

$$\Theta_{\nu} = 1,1 \sqrt{4 \cdot \left(\frac{0,007}{101,325}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{0,115}{293,15}\right)^2 + \left(\frac{0,00005}{0,0005}\right)^2 + \left(\frac{0,00000001}{0,0000045}\right)^2 + \left(\frac{0,00005}{0,001}\right)^2 + \left(\frac{0,002}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,0005}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{0,0000462}{0,0046}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{1,2}\right)^2 + \left(\frac{0,00001}{0,01}\right)^2} = 0,12 \quad (38)$$

СКВ відтворення одиниці об'ємної витрати газу:

$$S_{\nu} = \sqrt{\left(\frac{S_{P_c}}{P_c}\right)^2 + \left(\frac{S_{P_d}}{P_d}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_c}}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_d}}{T_d}\right)^2 + \left(\frac{S_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{S_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{S_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{S_{p_0}}{p_0}\right)^2 + \left(\frac{S_{p_1}}{p_1}\right)^2 + \left(\frac{S_{V_1}}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{S_{\rho_{н.н.}}}{\rho_{н.н.}}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_m}}{T_m}\right)^2 + \left(\frac{S_t}{t}\right)^2} \quad (39)$$

$$S_V = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{0,003}{101,325}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{0,037}{293,15}\right)^2 + \left(\frac{0,000025}{h}\right)^2 + \left(\frac{0,000035}{d}\right)^2 + \left(\frac{0,0001}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{0,0000235}{0,0046}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{1,2}\right)^2} = 0,06 \quad (40)$$

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

$$\delta_V = t_\Sigma \sqrt{S_V^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_V^2}, \quad (41)$$

де S_V – СКВ відтворення розміру одиниці об'єму газу, Θ_V – НСП відтворення розміру одиниці об'єму газу, t_Σ – квантільний множник, який визначається за формулою:

$$t_\Sigma = \frac{\Theta + t_s \cdot S}{S_\Theta + S}, \quad (42)$$

t_s – квантіль Стюдента для відповідної довірчої ймовірності та кількості вимірювань ($t_s = 1,96$).

$$t_\Sigma = \frac{0,126 + 1,96 \cdot 0,061}{\frac{0,126}{\sqrt{3}} + 0,061} = 1,82 \quad (43)$$

$$\delta_V = 1,82 \cdot \sqrt{0,061^2 + \frac{1}{3} \cdot 0,126^2} = 0,17 \quad (44)$$

Сумарна похибка відтворення розміру одиниці об'ємної витрати газу робочим еталоном:

$$\delta_q = t_\Sigma \sqrt{S_q^2 + \frac{1}{3} \sum \Theta_q^2}, \quad (33)$$

$$t_\Sigma = \frac{0,12 + 1,96 \cdot 0,06}{\frac{0,12}{\sqrt{3}} + 0,06} = 1,81 \quad (43)$$

$$\delta_V = 1,81 \cdot \sqrt{0,06^2 + \frac{1}{3} \cdot 0,12^2} = 0,17 \quad (44)$$

Розрахунок похибки передачі розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу робочого еталона:

– обчислюють СКВ результату вимірювань за j – того значення об'ємної витрати:

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{ji} - \bar{\delta}_j)^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (45)$$

– оцінку суми НСП і СКВ вказують у вигляді СКВ $S_{\varepsilon\Sigma}$, яке розраховують по формулі:

$$S_{\varepsilon\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \Theta_\varepsilon^2 + S_\varepsilon^2} \quad (46)$$

де Θ_ε – похибка відтворення засобу передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу (робочого еталона).

$$S_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{ji} - \bar{\delta}_j)^2}{n \cdot (n-1)}} = 0,01 \quad (47)$$

$$S_{\varepsilon\Sigma} = \sqrt{\frac{0,12^2}{3} + 0,01^2} = 0,1 \quad (48)$$

