

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

На правах рукопису

БЕЗГАЧНЮК ЯРОСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 006.91:681.121

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ПРОСТЕЖУВАНOSTІ ВИМІРЮВАНЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ
ГАЗУ

Спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та
метрологічне забезпечення

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

*Цей рукопис
дисертації скерований за
змістом з іменем Науковий керівник
приписувати до Петришин Ігор Степанович
даніми до доктор технічних наук, професор
Олексій радчак 20.05.2013
Всемим секретар М. Франчук
25.06.2013*

Івано-Франківськ – 2013



ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ ТА ПЕРЕДАВАННЯ РОЗМІРУ ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ.....	13
1.1 Загальні підходи до забезпечення простежуваності результатів вимірювань.....	13
1.2 Аналіз методологічних підходів при передаванні розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.....	17
1.2.1 Аналіз повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в Україні.....	18
1.2.2 Аналіз схеми передавання розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в Німеччині.....	20
1.2.3 Аналіз схеми передавання розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в Нідерландах.....	22
1.3 Сучасний стан технічного забезпечення передавання розміру одиниць вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.....	24
1.3.1 Еталони передавання на базі еталонних лічильників газу.....	25
1.3.1.1 Лічильники газу роторного типу.....	26
1.3.1.2 Лічильники газу барабанного типу.....	30
1.3.1.3 Лічильники газу турбінного типу.....	32
1.3.1.4 Лічильники газу ультразвукового типу.....	34
1.3.2 Еталони передавання на базі критичних сопел.....	36
1.3.3 Еталони передавання на базі ламінарних витратомірів.....	39
1.4 Нормативні основи забезпечення простежуваності та передавання розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.....	40
1.5 Висновки до першого розділу та обґрунтування напрямку дослідження.....	42
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОПЕЛ КРИТИЧНОГО ВИТОКУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ЇХ ЯК	

ЕТАЛОНІВ ПЕРЕДАВАННЯ.....	44
2.1 Вибір конструкції критичних сопел для застосування їх як еталонів передавання.....	45
2.2 Удосконалення рівнянь вимірювання для застосування критичних сопел як еталонів передавання.....	47
2.3 Удосконалення методології розрахунку геометричних розмірів критичного сопла.....	56
2.4 Експериментальні дослідження впливу тиску на виході критичного сопла на величину коефіцієнта витoku.....	61
2.5 Чисельне моделювання впливу тиску на виході критичного сопла на величину коефіцієнта витoku.....	66
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ РОЗМІРУ ОДИНИЦІ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ.....	84
3.1 Розроблення методу передавання з використанням паралельного під'єднання критичних сопел.....	84
3.1.1 Метрологічний аналіз методу з використанням паралельного під'єднання критичних сопел.....	92
3.2 Удосконалення методу передавання з використанням послідовного під'єднання критичних сопел.....	98
3.2.1 Аналіз невизначеності вимірювань за методом послідовного під'єднання критичних сопел.....	101
3.3 Удосконалення методу передавання з використанням паралельного під'єднання критичних сопел та еталонного лічильника газу.....	103
3.3.1 Метрологічний аналіз методу з паралельним застосуванням набору критичних сопел та еталонного лічильника газу.....	110
3.4 Розроблення ланцюга простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу.....	111
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НОРМАТИВНОЇ	

БАЗИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTI РЕЗУЛЬТАТИВ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ПЕРЕДАВАННІ РОЗМІРУ ОДИНИЦІ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ.....	115
4.1 Удосконалення повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу.....	115
4.2 Розроблення нормативного документа для калібрування критичних сопел.....	117
4.2.1 Процедура визначення номінального значення об'ємної витрати сопла.....	121
4.2.2 Процедура визначення максимально допустимого критичного відношення тисків на соплі.....	126
4.2.3 Процедура визначення коефіцієнту витоку критичного сопла.....	126
4.2.4 Оцінювання невизначеності.....	128
4.3 Розроблення методики калібрування еталонів передавання на базі лічильників газу.....	129
4.3.1 Процедура визначення коефіцієнтів перетворення еталонного лічильника та апроксимаційного полінома.....	133
4.3.2 Оцінювання невизначеності еталона передавання.....	137
4.4 Впровадження результатів досліджень.....	138
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143
Додаток А.....	156
Додаток Б.....	160
Додаток В.....	165
Додаток Г.....	170

ВСТУП

Останнім часом у світі спостерігається тенденція подорожчання енергоносіїв, в тому числі природного газу. Це зумовлює потребу в підвищенні точності його обліку для економного споживання і для недопущення непорозумінь між споживачами і постачальниками.

При розрахунках за спожитий газ виникає питання про взаємовизнання результатів вимірювань здійснених на різних пунктах обліку природного газу, в тому числі в різних країнах. Взаємовизнання результатів вимірювань не можливе без чіткої простежуваності засобів вимірювань усіх споживачів та постачальників газу до фундаментальних одиниць системи СІ.

Тому важливим питанням є впровадження концепції метрологічної простежуваності при обліку природного газу.

Актуальність теми. Процеси глобалізації світової економіки зумовлюють необхідність усунення технічних бар'єрів в міжнародній торгівлі, зокрема і в торгівлі енергоносіями. Останнім часом Україна є об'єктом дорікань зі сторони АТ «Газпром» стосовно об'ємів споживання природного газу. З метою усунення протиріч між постачальниками і споживачами газу актуальним питанням є впровадження концепції метрологічної простежуваності засобів вимірювань до фундаментальних одиниць системи СІ через неперервні ланцюги простежуваності з одночасним впровадженням концепції невизначеності при оцінюванні точності вимірювань.

Питання простежуваності вимірювань у витратометрії природного газу стикається із рядом принципових труднощів, які зумовлені відмінністю принципів первинної реалізації одиниці вимірювань об'ємної витрати газу в різних країнах. Ще однією актуальною проблемою, яка потребує вирішення – це проблема забезпечення простежуваності робочих засобів вимірювання, діапазон вимірювань яких охоплює від кількох літрів за годину до кількох тисяч метрів кубічних за годину, до державного первинного еталона, який

має обмежений діапазон вимірювань. Тому необхідним є вибір технічних засобів та розроблення методів забезпечення прямої простежуваності до первинного еталона для забезпечення неперервності ланцюга простежуваності.

Незважаючи на значний вклад у розробку метрологічного, технічного та нормативного забезпечення у витратометрії природного газу та еталонних і робочих ЗВТ І.С.Бродина, Є.П.Пістуна, І.С.Петришина, О.Є. Середюка, С.А.Чеховського, В.С.Вощинського (Україна), П.П.Кремльовського, А.Н.Павловського, А.А.Тупіченкова, М.А.Данілова, (Російська Федерація), Д.Допхайде, Р.Крамера, Б.Міккана (Німеччина), М. Ван дер Біка, Г. Дістельбергена (Нідерланди), М. Такамото, С. Накао (Японія), Г.Маттінглі, А.Джонсона (США) та інших, досліджувані ними проблеми практично не стосувалися забезпечення прямої простежуваності вимірювань об'ємної витрати газу в широкому діапазоні вимірювань до первинного еталона, що потребує подальшого вивчення у вказаних вище напрямках досліджень.

Крім того, враховуючи світову тенденцію до переходу до калібрування робочих засобів вимірювання об'єму та витрати природного газу в реальних умовах експлуатації потребує вирішення питання метрологічної прив'язки новостворюваних еталонних пристроїв, що працюють при умовах близьких до умов експлуатації засобів обліку газу до державного первинного еталона, який є верхнім щаблем в ієрархічній схемі передавання розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.

Таким чином, розроблення ланцюга простежуваності та удосконалення методів та пристроїв забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу до державного первинного еталона є актуальними завданнями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких знайшли відображення в дисертаційній роботі, виконувались здобувачем відповідно до плану навчання в аспірантурі на кафедрі інформаційно-вимірювальної техніки Івано-Франківського

національного технічного університету нафти і газу та апробовані на Державному підприємстві «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації» згідно з тематикою науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт у сфері метрології та розвитку еталонної бази за темами: «Державна програма розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки» (ДРН 0106U006782), автор був співвиконавцем цієї роботи та «Розроблення наукових засад передачі одиниці об'ємної витрати газу від державного первинного еталону робочим еталонам на базі критичних сопел», згідно договору №1202030/16.02.01.06-11 з Держспоживстандартом України, автор був відповідальним виконавцем цієї роботи. Дисертаційні дослідження також пов'язані з виконанням теми КОOMET; (Євро-Азійського співробітництва державних метрологічних установ) № 585/UA/12 „Сличения критических сопел – эталонов переносчиков единицы расзода газа „, автор є координатором цієї роботи.

Мета роботи полягає у вирішенні науково-прикладного завдання забезпечення простежуваності вимірювань об'ємної витрати природного газу шляхом удосконалення методів, пристроїв та розроблення нормативної бази забезпечення простежуваності розміру одиниці вимірювання об'ємної витрати газу робочих засобів вимірювання до державного первинного еталона.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз відомих методів та засобів забезпечення простежуваності та передавання розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу;
- здійснити теоретичні та експериментальні дослідження критичних сопел для використання їх як еталонів передавання;
- удосконалити методологію розрахунку геометричних розмірів критичного сопла, для підвищення точності відтворення значення об'ємної витрати;

- розробити та дослідити методи для забезпечення простежуваності розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу до державного первинного еталона в діапазоні вимірювань відмінному від діапазону відтворюваних ним витрат;

- розробити ланцюг простежуваності для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу;

- розробити та впровадити нові нормативні документи, для реалізації калібрування критичних сопел та еталонів передавання на базі лічильників газу, і технічні засоби для забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення простежуваності вимірювання кількості природного газу шляхом передавання розміру одиниці об'ємної витрати газу від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки.

Предметом дослідження є наукова, нормативна та технічна бази забезпечення простежуваності вимірювань об'ємної витрати газу.

Методи досліджень. Теоретичний аналіз, проведений в дисертаційній роботі ґрунтується на використанні положень теорії гідро- та газодинаміки. Чисельне моделювання впливу відношення тисків на критичному соплі здійснювалось методами обчислювальної гідродинаміки із врахуванням теорії турбулентності та теорії граничного шару. Метрологічний аналіз методів передавання проводився з використанням теорії похибок та невизначеностей, методів математичної статистики і ймовірнісних методів сумування складових сумарної похибки.

Експериментальні дослідження критичних сопел здійснювались з використанням методів теорії вимірювань, регресійного аналізу, математичної статистики і теорії імовірності, методів числової обробки результатів експериментів із використанням ПЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено метод передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу до робочих засобів вимірювань в діапазоні нижче мінімальної витрати відтворюваної державним первинним еталоном шляхом використання паралельного під'єднання критичних сопел, який дозволяє забезпечувати неперервний ланцюг простежуваності до державного первинного еталона в діапазоні витрат від $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ до $4 \text{ м}^3/\text{год}$.

2. Набула подальшого розвитку методологія моделювання впливу відношення тисків на критичному соплі на величину його коефіцієнта витоку, що на відміну від існуючих методологій дозволяє визначити причину появи ефекту зниження коефіцієнта витоку критичного сопла за відношень тисків на ньому від 0,4 до 0,55 і відповідно підвищити точність вимірювань при забезпеченні простежуваності до державного первинного еталона в діапазоні об'ємних витрат від $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ до $4 \text{ м}^3/\text{год}$ на величину до 0,3% шляхом врахування цього ефекту.

3. Удосконалено рівняння вимірювання об'ємної витрати повітря з використанням критичних сопел шляхом врахування впливу вологості повітря та введення градуовального коефіцієнта на базі коефіцієнта витоку, функції критичного потоку та площі горловини сопла, що на відміну від існуючих залежностей виключає необхідність вимірювання діаметра горловини сопла та обчислення параметрів реального газу та дозволяє підвищити точність вимірювань при передаванні розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу.

4. Удосконалено методологію розрахунку геометричних розмірів критичного сопла при його проектуванні у складі повірочних установок як джерела стабільної витрати шляхом уточнення та розширення діапазону застосування емпіричної залежності коефіцієнта витоку критичного сопла від числа Рейнольдса, що дозволило підвищити точність їх виготовлення у відповідності до технічних завдань на установки для повірки лічильників газу.

5. Удосконалено методи передавання розміру одиниці об'ємної витрати газу з використанням послідовного та паралельного під'єднання критичних сопел з лічильником газу та іншим критичним соплом, що дало можливість калібрувати критичні сопла при різних вхідних тисках, забезпечувати простежуваність до державного первинного еталона калібрувальних установок, що працюють на реальному робочому середовищі та підвищити точність відтворення об'ємної витрати газу при передаванні розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати до робочих засобів вимірювання.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено ланцюг простежуваності вимірювань від державного первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу до робочих засобів вимірювань з нормованими значеннями невизначеностей по всій ієрархії передавання розміру одиниці витрати газу.

2. Розроблені і впроваджені у метрологічну практику України нормативні документи, які регламентують методики проведення калібрування для забезпечення простежуваності вимірювань:

- сопел критичних (Метрологія. Сопла критичні. Методика калібрування. Затверджена наказом головної організації Держспоживстандарту України з вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу лічильниками та витратомірами-лічильниками ДП „Івано-Франківськстандартметрологія” №93 від 05.03.2012р.);

- еталонів передавання на базі лічильників газу (Метрологія. Еталони передавання на базі лічильників газу. Методика калібрування. Затверджена наказом головної організації Держспоживстандарту України з вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу лічильниками та витратомірами-лічильниками ДП „Івано-Франківськстандартметрологія” №93 від 05.03.2012р.);

Дані нормативні документи пройшли експертизу фахівцями КООМЕТ, а саме Словацького метрологічного інституту (SMU) та науково-дослідного інституту ВНИИФТРИ (Російська Федерація) в рамках аудиту системи якості

калібрувальної лабораторії ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», за результатами якого видано сертифікат про визнання №QSF-R28 від 23 квітня 2013 р.

3. Розроблено та впроваджено пересувну лабораторію для забезпечення простежуваності робочих засобів вимірювання до Державного первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03–01–96 та проведення калібрування, метрологічної атестації та повірки еталонних витратовимірювальних установок та еталонних лічильників та витратомірів газу в діапазоні об'ємних витрат від $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ до $2500 \text{ м}^3/\text{год}$.

4. Розроблено рекомендації щодо застосування критичних сопел як робочих еталонів та еталонів передавання і алгоритму розрахунку геометричних розмірів, який впроваджений на підприємстві-виробнику критичних сопел та повірочних установок ТОВ ВКФ „Курс”, м. Дніпропетровськ.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати роботи отримані автором самостійно і стосуються: експериментальних досліджень та чисельного моделювання впливу тиску на виході критичного сопла на його характеристики [80]; методології передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу від первинного еталона до еталона на природному газі [66]; методу забезпечення простежуваності вимірювань витрати газу в діапазоні нижче мінімальної відтворюваної державним первинним еталоном [95,97]; методу калібрування критичного сопла за допомогою іншого критичного сопла [100].

У роботах, опублікованих у співавторстві, використані результати, одержані здобувачем особисто, до яких належать: апробація ідентифікації закону розподілу похибок вимірювальних каналів еталона з використанням методу топографічної класифікації [5]; обґрунтування показників точності методів передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу [8,105]; вибір та застосування поліноміальної апроксимації коефіцієнта перетворення еталона передавання [10,22]; аналіз бюджету невизначеностей вторинних

еталонів [11,13]; аналіз причин виникнення похибок лічильників газу [23, 30]; постановка завдань досліджень [26]; виведення залежностей для оцінювання похибки вимірювання лічильниками газу в реальних умовах експлуатації [31]; методологія оцінювання сумарної похибки та оцінювання невизначеності [56-58]; обґрунтування застосування ефективної площі критичного перерізу в якості характеристики критичних сопел [67]; застосування установки з паралельним під'єднанням критичних сопел для забезпечення простежуваності [99]; обґрунтування застосування форкамери для монтування критичного сопла [101]; методологія визначення характеристик критичних сопел [109]; обґрунтування діапазону вимірювань еталонів передавання [110].

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювалися на 3 міжнародних і 3 всеукраїнських науково-технічних конференціях: V, VII міжнар. наук.-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка» м. Харків, 2006, 2010р.р., 5 наук.-техн. конф. та 12 міжнародна наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи» м. Київ, 2006, 2013 р.р.; 6,7 всеукраїнські наук.-техн. конф. «Вимірювання витрати та кількості газу» м. Івано-Франківськ, 2009, 2011р.р.

Крім того матеріали роботи доповідались на наукових семінарах кафедри інформаційно-вимірювальної техніки ІФНТУНГ впродовж 2004-2011рр.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 24 наукових працях, з яких 10 - статті (із них 2 одноосібні) у фахових наукових виданнях, які входять до переліку ДАК України, 5 нормативних документів України у галузі метрології, 1 державний стандарт України, 2 патенти України та 6 публікацій (із них 3 одноосібних) за матеріалами праць науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 130 сторінок основного тексту, 47 рисунків, 7 таблиць, 4 додатки на 16 сторінках, список використаних джерел із 112 найменувань на 13 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ ТА ПЕРЕДАВАННЯ РОЗМІРУ ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ

1.1 Загальні підходи до забезпечення простежуваності результатів вимірювань

Для взаємного визнання результатів вимірювань отриманих різними національними метрологічними інститутами чи калібрувальними лабораторіями, тощо, дуже важливим є впровадження концепції метрологічної простежуваності.

Метрологічна простежуваність до одиниць вимірювання, згідно визначення наведеного у [1] – це властивість результату вимірювань, за допомогою якої результат можна співставити зі значенням еталона через документально підтверджений безперервний ланцюг калібрувань, що зумовлюють невизначеність вимірювань. Тобто всі засоби вимірювань кінцевих споживачів повинні простежуватись до міжнародних еталонів фундаментальних одиниць системи СІ, що реалізується через безперервний ланцюг простежуваності.

Слід відмітити, що згідно директив ЄС [2] не рекомендується експлуатувати засоби вимірювань, для яких відсутній безперервний ланцюг простежуваності розміру одиниці, що не забезпечує співставності результатів вимірювань.

В основу ланцюга простежуваності ставиться національний первинний еталон, що має найвищі метрологічні характеристики, метрологічна модель якого складається з повністю описуваних складових і спирається на добре вивчене рівняння вимірювань. Нижньою ланкою ланцюга простежуваності є робочі засоби вимірювань та відповідні методика виконання вимірювань з їх застосуванням (див. рис. 1.1). Методика виконання вимірювань кінцевого

споживача описує вимірювальну систему та процедури виконання вимірювань для досягнення відповідної точності вимірювань.

Отже, фактично ланцюг простежуваності є системою передавання розміру одиниці вимірювань від первинного еталона до робочих засобів вимірювань.

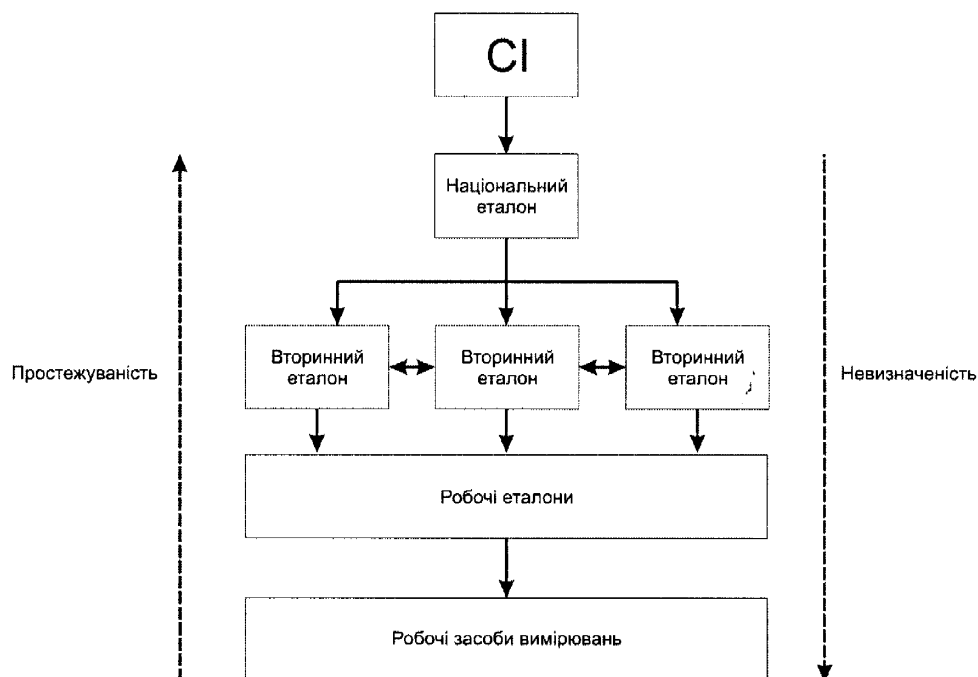


Рис. 1.1 Типовий ланцюг простежуваності

В свою чергу передавання розміру одиниці вимірювання – зведення одиниці фізичної величини, яка відтворюється чи зберігається засобом вимірювань, що калібрується (повіряється), до розміру одиниці, яка відтворюється чи зберігається еталоном, що здійснюється при їхньому звіренні чи калібруванні.

Отже, простежуваність вимірювань реалізується при передаванні розміру одиниці вимірювань, яке здійснюється шляхом калібрування, метрологічної атестації чи повірки засобів вимірювань.

Згідно [3], передбачені чотири категорії методів передавання розмірів одиниць:

- 1) безпосереднє звірення (без засобів порівняння, тобто без використання допоміжних засобів);
- 2) звірення за допомогою компаратора або інших засобів звірення;

3) метод прямих вимірювань;

4) метод непрямих (опосередкованих) вимірювань.

Метод безпосереднього звірення полягає в одночасному вимірюванні засобом, якому передається розмір одиниці, та еталоном від якого здійснюється передавання, однієї і тієї ж фізичної величини. Тобто вимірювальна система повинна містити генератор фізичної величини, яку вимірюють одночасно два засоби, еталонний і дослідний.

Метод звірення за допомогою компаратора застосовується коли неможливо безпосередньо звірити два засоби. При цьому у вимірювальну систему вводиться додатковий засіб – компаратор. Основна вимога до компаратора – однаково реагувати на сигнали еталонного та дослідного засобу вимірювань.

Метод прямих вимірювань полягає у прямому вимірюванні засобом, якому передається розмір одиниці, значення фізичної величини, що відтворюється еталоном від якого здійснюється передавання.

Окремо слід розглянути метод опосередкованих вимірювань.

При опосередкованих вимірювань, як відомо, значення вимірюваної фізичної величини визначається на основі прямих вимірювань інших фізичних величин, тобто [4]:

$$\varphi = f(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n) \quad (1.1)$$

Із (1.1) з врахуванням рівняння прямих вимірювань видно, що при таких вимірюваннях апріорна вимірювальна інформація міститься тільки про одиниці інших фізичних величин. Звідси слідує, що рівняння (1.1) може бути тільки рівнянням відтворення даної одиниці.

З вище сказаного слідує, що для забезпечення простежуваності вимірювань слід використовувати методи прямих вимірювань або ж метод з використанням компаратора.

Важливим елементом метрологічної простежуваності є калібрування, що є сукупністю операцій, які встановлюють, при певних умовах, відповідність між значеннями величин, які відображаються засобами

вимірювань чи вимірювальною системою, чи значеннями, представленими мірою, чи стандартним зразком і відповідними значеннями, що відтворюються еталонами.

Ланцюг простежуваності та ієрархія калібрування базується на таких принципах:

- ланцюг простежуваності має бути встановленим до початку вимірювання й повинна бути описана ієрархія калібрування, що сходиться у протилежному напрямку, тобто від метрологічно вищого еталона до результату вимірювання кінцевого споживача;

- кожний рівень в ієрархії калібрування має бути представлений методикою калібрування або ж еталоном;

- кожний еталон з приписаними йому характеристиками має слугувати вихідним еталоном для еталона нижчого рівня згідно відповідної методики калібрування;

- значення, приписане еталону на кожному рівні ієрархічної схеми, має супроводжуватися невизначеністю результату вимірювання. При обчисленні невизначеності необхідно враховувати невизначеності всіх послідовно еталонів з вищих щаблів ієрархічної схеми і відповідних методик калібрування.

Другим важливим елементом забезпечення метрологічної простежуваності є оцінка невизначеності вимірювань [1], яка визначається як невід'ємний параметр, що характеризує дисперсію кількісної величини, яку можна приписати вимірюваній величині на основі інформації, що використовується. На кожному етапі передавання розміру одиниці вимірювань повинен проводитися аналіз бюджету невизначеностей. При складанні бюджету невизначеностей важливо чітко ідентифікувати вид закону розподілу невизначеностей усіх впливових величин [5], при цьому слід врахувати, що невизначеність підпорядкованого засобу повинна включати у свій бюджет невизначеність вищого за ієрархією засобу вимірювань згідно правила накопичення невизначеностей.

1.2 Аналіз методологічних підходів при передаванні розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу

Контроль та визначення метрологічних характеристик лічильників та витратомірів газу проводиться за допомогою еталонних установок різних типів. Для забезпечення простежуваності та єдності вимірювань всі вони повинні простежуватись до національного первинного еталона одиниць об'єму та витрати газу ДЕТУ 03-01-96 [6], який в свою чергу повинен простежуватись до основних одиниць міжнародної системи фізичних величин СІ.

Одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу є похідними одиницями від одиниці вимірювання довжини і часу або від одиниці вимірювання маси і часу.

Через лінійні вимірювання розмірність об'єму та об'ємної витрати запишеться так:

$$V = L^3 \quad (1.2)$$

$$q_v = L^3 T^{-1}. \quad (1.3)$$

Об'єм та об'ємна витрата газу через масу визначаються наступними співвідношеннями:

$$V = \frac{m}{\rho}; \quad (1.4)$$

$$q_v = \frac{m}{\rho T} \quad (1.5)$$

З другого боку, відомо, що хоч і об'єм газу визначається геометричними розмірами посудини, в якій він знаходиться, але його густина залежить від температури та тиску, тобто, при різних температурах та тисках кількість газу в одному і тому ж об'ємі буде різною, згідно рівняння газового стану [7]:

$$\rho = \frac{p}{tRZ} \quad (1.6)$$

Тому еталонні установки повинні також простежуватись до первинних еталонів одиниць температури та тиску.

Згідно фізичних принципів визначення кількості та витрати газу можна сформулювати наступне, що побудова повірочних схем для засобів обліку газу може базуватись або на одиниці довжини, або на одиниці маси, що відповідно впливає на первинну реалізацію одиниці вимірювання, що відтворюватиметься первинним еталоном.

Другим важливим моментом є забезпечення передавання розміру одиниці вимірювання від первинного еталона до робочих засобів вимірювання, лічильників та витратомірів газу.

Передавання розміру одиниці вимірювання може реалізуватись як методом прямих вимірювань так і з використанням компаратора. Так як кількість робочих засобів вимірювання об'єму та витрати газу є досить велика, то практично неможливо забезпечити простежуваність безпосередньо до первинного еталона, тому використовуються вторинні та робочі еталони, за посередництвом яких робочі засоби вимірювань простежуються до первинного еталона.

Проаналізуємо ієрархічні схеми передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу, які на сьогодні реалізовані та діють у світі та в Україні, зокрема.

1.2.1 Аналіз повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в Україні

Для забезпечення єдності вимірювань в галузі обліку газу та забезпечення належного рівня точності вимірювань повинні чітко визначатись та нормуватись вимоги до засобів та методів передавання розміру одиниці вимірювання від первинного еталона до робочих засобів вимірювань. В Україні в галузі обліку газу ці вимоги встановлюються [8].

Основою державної повірочної схеми є державний первинний еталон ДЕТУ 03-01-96 [6], що реалізований на базі дзвонової витратовиміральної установки з границями відтворюваних витрат від 4 до 200 м³/год та з наступними метрологічними характеристиками: невилучена систематична похибка – 5·10⁻⁴ та середньоквадратичне відхилення при 40 незалежних спостереженнях – 9·10⁻⁴. Найкраща вимірвальна здатність занесена в СМС-таблиці бази даних КСДВ міжнародного бюро мір та ваг ВІРМ характеризується невизначеністю 0,1% [9].

Наступним ступенем схеми є еталони передавання, які отримують розмір одиниці вимірювань від первинного еталона шляхом прямих вимірювань [10].

Далі за їх допомогою розмір одиниці передається вторинним еталонам. При чому в діапазоні витрат вище 200 м³/год передавання здійснюється шляхом паралельного включення еталонів передавання [11]. Перевагою паралельного включення еталонів передавання є зменшення випадкової складової похибки пропорційно кореню квадратному із кількості еталонів включених паралельно [12].

Але проблемним місцем повірочної схеми є простежуваність в діапазоні витрат нижче 4 м³/год. В цьому діапазоні витрат розмір одиниці вимірювань об'єму та об'ємної витрати отримується шляхом опосередкованих вимірювань величин з інших повірочних схем для засобів вимірювань маси, довжини, густини, тощо. Зокрема вторинний еталон ВЕТУ-03-01-01-08, який в діапазоні витрат від 0,016 м³/год до 4 м³/год реалізований на основі установки еквівалентного витіснення рідини, отримує розмір одиниці вимірювань з повірочних схем для засобів вимірювання маси та густини шляхом опосередкованих вимірювань за рівнянням вимірювання [13]:

$$V_D = \frac{P_c}{T_c} \cdot \frac{T_D}{P_D} \cdot \frac{m}{\rho_m} \cdot \left(1 + \frac{\rho_{n.n.}}{\rho_m} \right), \quad (1.7)$$

де P_c, T_c – тиск, температура та коефіцієнт стисливості повітря в ємності; P_d, T_d – тиск, температура та коефіцієнт стисливості повітря в дослідній ділянці; $\rho_{н.н.}$ – густина навколишнього повітря в лабораторії; ρ_m – густина масла.

При такому підході порушується принцип простежуваності вимірювань через неперервний ланцюг, так як деякі вторинні еталони в діапазоні витрат нижче 4 м³/год отримують розмір одиниці з інших повірочних схем.

Також суттєвим недоліком підходу описаної державної повірочної схеми є те, що еталони одного рівня точності, як наслідок вище описаного, можуть і на практиці, як правило, таке трапляється, відтворювати одиниці вимірювань із систематичними відхиленнями один стосовно іншого, які в свою чергу досить важко виявити так як еталони працюють в різних діапазонах витрат.

1.2.2 Аналіз схеми передавання розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в Німеччині

Перш за все слід зауважити, що у світовій метрологічній практиці в переважній більшості не використовується поняття „повірочна схема”, а використовуються терміни „ланцюг простежуваності” або ж „схема передавання розміру одиниці вимірювання”.

Як представлено на рис. 1.2 [14] в Німеччині первинна реалізація одиниць об'єму та об'ємної витрати газу здійснена з використанням п'яти первинних еталонів для покриття всього діапазону вимірювань згідно потреб народного господарства. Як і у випадку повірочної схеми України недоліком такої схеми є можливість наявності систематичних розбіжностей між розмірами одиниць вимірювань, що реалізуються різними еталонами і які досить складно оцінити. Також слід відмітити, що для засобів обліку газу, що

працюють за високих тисків вимірюваного середовища існує окремий первинний еталон.

В той же час кожна з віток ланцюга простежуваності замикається аж на базових одиницях системи СІ. Хоч це і не порушує базові принципи забезпечення простежуваності, але специфіка реалізації одиниць вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу полягає в тому, що відтворення цих одиниць залежить від гідродинамічних параметрів потоку вимірюваного середовища [15], які в багатьох випадках досить важко оцінити і як наслідок можуть виникати систематичні розбіжності між первинними реалізаціями одиниць вимірювань в різних первинних еталонах.

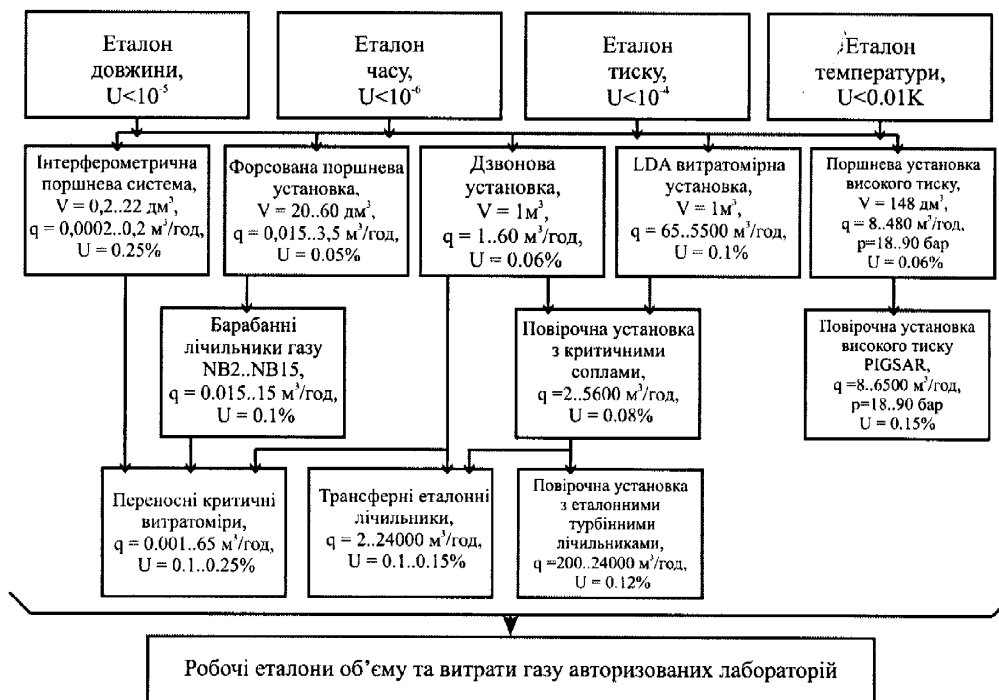


Рис. 1.2 Ланцюг простежуваності розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу Німеччини [14]

Стосовно простежуваності в діапазоні великих витрат (вище 60 м³/год), то в цьому діапазоні вона реалізується нарощенням витрат шляхом паралельного під'єднання еталонних засобів, що попередньо калібровані на первинному еталоні дзвонового типу [16]. Це дозволяє зменшити випадкову складову сумарної невизначеності і не вимагає створення великовитратних первинних еталонів. Але цей процес реалізується в кілька етапів. Спершу на первинному еталоні дзвонового типу калібруються еталонні критичні сопла в

діапазоні витрат від 1 до 60 м³/год. Далі за допомогою паралельного під'єднання критичних сопел калібруються еталонні трансферні лічильники, за допомогою яких калібруються критичні сопла більшого номіналу. Далі критичні сопла калібровані на першому та другому етапах монтуються в калібрувальну установку на базі критичних сопел. За допомогою цієї установки калібруються два еталонні лічильники з максимальною сумарною витратою 24000 м³/год [17]. При цьому декларується досить висока точність, фактично протягом п'яти ступенів передавання точність зменшується тільки в 2,5 рази, що викликає певний сумнів у коректності застосованих підходів з оцінювання точності вимірювань.

1.2.3 Аналіз схеми передавання розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в Нідерландах

Ланцюг простежуваності розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в Нідерландах на відміну від ланцюга простежуваності Німеччини ґрунтується на використанні одного первинного еталона витрати газу, який простежується до базових одиниць системи СІ. Інші еталони ієрархії простежуються до первинного еталона витрати і всі вітки ланцюга замикаються на ньому (див. рис. 1.3).

Первинний еталон витрати реалізований на принципі еквівалентного витіснення рідини. Діапазон витрат [18] складає від 1 до 50 м³/год за атмосферного тиску та від 1 до 10 м³/год за тиску 0,9 МПа. Передавання розміру одиниць між ступенями ланцюга здійснюється з використанням еталонів передавання – компараторів, в якості яких використовуються об'ємні лічильники газу SVM типу та барабанного типу, в останні роки національним метрологічним інститутом Нідерландів NMI введено еталонний комплекс IRPP на базі роторних лічильників IRM-Duo [19].

За допомогою первинного еталона калібрується еталонний барабанний лічильник та еталонна дзвонова установка з номінальним об'ємом 0,5 м³.

Калібрування здійснюється тільки в діапазоні витрат первинного еталона. При цьому робиться припущення, що отримані характеристики барабанного лічильника та дзвонової установки справедливі у всьому їхньому діапазоні вимірювань.

Далі за допомогою барабанного лічильника калібрується дзвонова установка з об'ємом $3,5 \text{ м}^3$, за допомогою першої дзвонової установки калібрується трансферний еталон – лічильник газу, за допомогою якого калібрується дзвонова установка $3,5 \text{ м}^3$ у вищому діапазоні витрат.

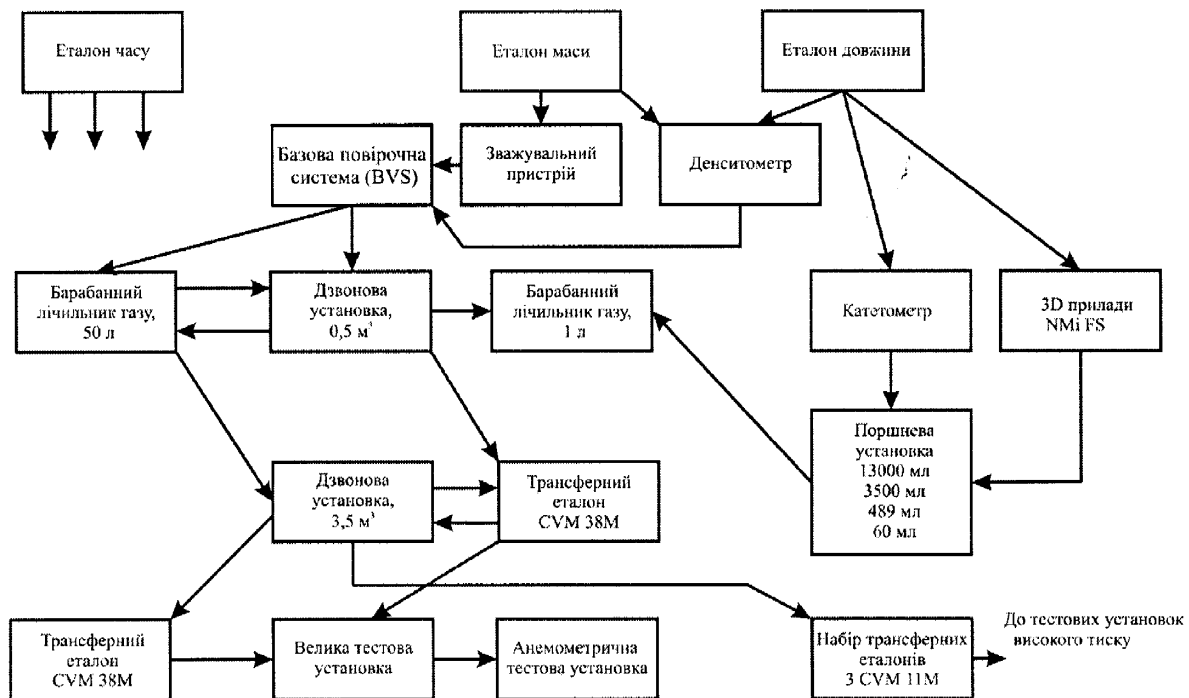


Рис. 1.3 Ланцюг простежуваності розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу Нідерланди

Далі за допомогою цієї дзвонової установки калібрується набір трансферних еталонів – лічильників газу, які також калібруються при робочому тиску $0,9 \text{ МПа}$ з використанням первинного еталона.

З використанням набору трансферних еталонів здійснюється передавання до робочих еталонів як національного метрологічного інституту так і газових компаній.

Однією із переваг ланцюга простежуваності Нідерландів є наявність зворотних зв'язків між ступенями, що дозволяє відстежувати появу систематичних відхилень. Про те недоліком цього ланцюга простежуваності

є значна кількість проміжних етапів, що призводить до зростання невизначеності на кінцевій ступені ланцюга, хоча це і компенсується задекларованою високою точністю первинного еталона.

Ланцюг простежуваності Нідерландів тривалий час удосконалювався. На сьогодні ланцюг коротший і основний акцент зроблений для реалізації одиниць вимірювання за умов близьких до робочих умов застосування засобів обліку газу кінцевих споживачів [20,21].

1.3 Сучасний стан технічного забезпечення передавання розміру одиниць вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу

Передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу здійснюється як методом прямого вимірювання так і методом з використанням компаратора. Методом прямого вимірювання можливо здійснювати передавання тільки від еталонів до робочих засобів вимірювань, передавання ж від еталонів вищого розряду до еталонів нижчого розряду можливо тільки з використанням компаратора – еталона передавання, в силу того, що еталони об'єму та об'ємної витрати газу, як правило це стаціонарні установки, які не транспортабельні.

До еталонів передавання висуваються наступні вимоги [22].

Перш за все, для забезпечення вищого рівня точності, кожен еталон передавання підлягає індивідуальному калібруванню. Відтворюваність метрологічних характеристик еталона передавання, яка характеризує довгострокову стабільність (як мінімум протягом міжпівічного інтервалу), повинна бути не гірше $\pm 0,05$ %. Градувальна характеристика еталона передавання повинна періодично контролюватись, обов'язково після його транспортування або після тривалого зберігання.

Для усунення складової невизначеності вимірювань зумовленої нелінійністю градувальної характеристики еталона передавання,

оптимальним є лінійний її характер, при цьому допустима величина не лінійності не повинна перевищувати $\pm 0,05\%$ у всьому діапазоні витрат.

Рівняння вимірювань для еталона передавання повинно спиратись на добре вивчену фізичну модель. При можливості впливу на характеристики еталона передавання зміни температури, умов монтажу, параметрів вимірювального середовища, необхідно усунути вплив цих параметрів або ж цей вплив повинен бути передбачуваним, щоб можна було його враховувати і виконувати необхідні коригувальні дії.

Еталон передавання повинен бути стійким до механічних пошкоджень в процесі його транспортування та експлуатації. Доцільно виконувати еталони передавання у вигляді модульної конструкції.

Важливою вимогою до еталонів передавання є їх електрична, механічна, та гідродинамічна сумісність з державним первинним, вторинними та робочими еталонами.

Для підвищення надійності еталонів передавання їх укомплектовують самодіагностуючими компонентами, для прикладу дублюючими імпульсними перетворювачами та системою збору та обробки інформації.

Крім того, еталони передавання не повинні чинити впливу еталони, що звіряються, тобто не створювати пульсацій та завихрень потоку вимірювального середовища.

В якості еталонів передавання в Україні та в світі використовуються наступні засоби: еталонні лічильники газу різних типів, сопла критичного витоку, ламінарні витратоміри. Розглянемо детальніше кожний з типів еталонів передавання.

1.3.1 Еталони передавання на базі еталонних лічильників газу

Як еталони передавання використовують, як правило, лічильники газу роторного, барабанного та турбінного типів. Кожен з типів лічильників має свої переваги та недоліки і межі застосування.

1.3.1.1 Лічильники газу роторного типу

Роторний лічильник газу є об'ємним лічильником газу. Принцип дії роторного лічильника газу полягає в обертанні під дією перепаду тиску на лічильнику роторів, як правило вісімкової форми, при цьому за повний цикл обертання відміряється один циклічний об'єм газу.

Лічильники цього типу демонструють достатню хорошу довгострокову стабільність метрологічних характеристик. Проте слід відмітити ряд недоліків пов'язаних із застосуванням роторних лічильників.

Основним джерелом похибки роторного лічильника є наявність перетоків в щілинних зазорах між торцями роторів та роторами і корпусом лічильника [23]. Другим важливим джерелом похибки роторного лічильника газу є зусилля, що гальмують рух роторів. Ці зусилля як правило викликані зміною тертя в синхронізуючих шестернях та в системі “вал – підшипник” внаслідок забруднення, старіння, тощо.

В загальному перетоки між роторами та роторами і корпусом можна наступною формулою:

$$q_{\text{перетоки}} = A Q + \frac{C \Delta P h^3}{\mu}, \quad (1.8)$$

де C – константа, що визначається геометричними розмірами щілинного зазору.

Як наслідок, похибка лічильника може бути виражена наступним виразом:

$$\delta = \frac{(Q_{\text{вим}} - Q)}{Q} = \frac{(Q - q_{\text{перетоки}})}{Q} - 1 = A - \frac{C \Delta P h^3}{Q \mu}, \quad (1.9)$$

де $Q_{\text{вим}}$ – виміряна лічильником витрата, Q – дійсна витрата.

Виробники при конструюванні лічильників намагаються максимально зменшити перетоки шляхом мінімізації зазорів між роторами та роторами і корпусом.

Проте основним недоліком є генерування лічильником пульсацій потоку вимірюваного середовища [24].

Ефект пульсацій є двоякий. В першому випадку, пульсації призводять до резонансу з трубопроводом, який проявляється у видимих змінах градуовальної характеристики, для прикладу, коли роторний лічильник градуюється еталонном дзвоногового типу, то градуовальна характеристика завжди буде нелінійною, тільки окремі точки будуть повторюватися з високою точністю. Однак, коли використовуються різні варіанти встановлення лічильника, резонанси будуть траплятися при різних значеннях витрати і градуовальні характеристики будуть різними [25]. Другий ефект полягає у впливі пульсацій на лічильник, що повіряється [26].

При роботі роторного лічильника газу, об'єм замкнутий між роторами (див. рис. 1.4), точками ковзання і площиною на вході, змінюється при повороті роторів на кут $d\alpha$.

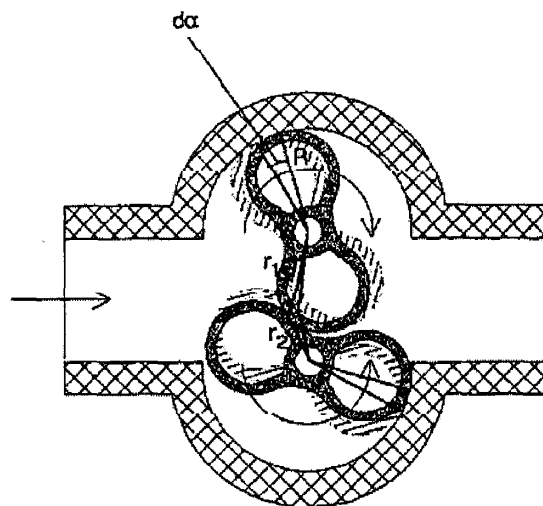


Рис. 1.4 Визначення переміщення роторів

Об'єм камери між ротором і зовнішньою стінкою рівний $R^2 \cdot d\alpha/2$. Для двох роторів об'єм камери становить $R^2 \cdot d\alpha$. Точка, в якій ротори дотикаються змінює позицію зі зміною α . Об'єм вимірювальної камери буде рівний $r_1^2 \cdot d\alpha/2 + r_2^2 \cdot d\alpha/2$, де r_1^2 і r_2^2 - функції α .

Звідси, повний об'єм, що витісняється двома роторами буде наступний:

$$dV = R^2 d\alpha - (r_1^2 \cdot d\alpha/2 + r_2^2 \cdot d\alpha/2) \quad (1.10)$$

Витрата, таким чином, може бути записана, так:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(R^2 - (r_1^2/2 + r_2^2/2))d\alpha}{dt} = (R^2 - (r_1^2/2 + r_2^2/2))\omega \quad (1.11)$$

Типова форма функції $\frac{dV}{dt}$ представлена на рис. 1.6 і представляє собою синусоїдальну пульсацію з амплітудою близько 11% від середньої величини витрати. Для типових роторних лічильників [24] форма пульсації асиметрична (див. рис. 1.5).

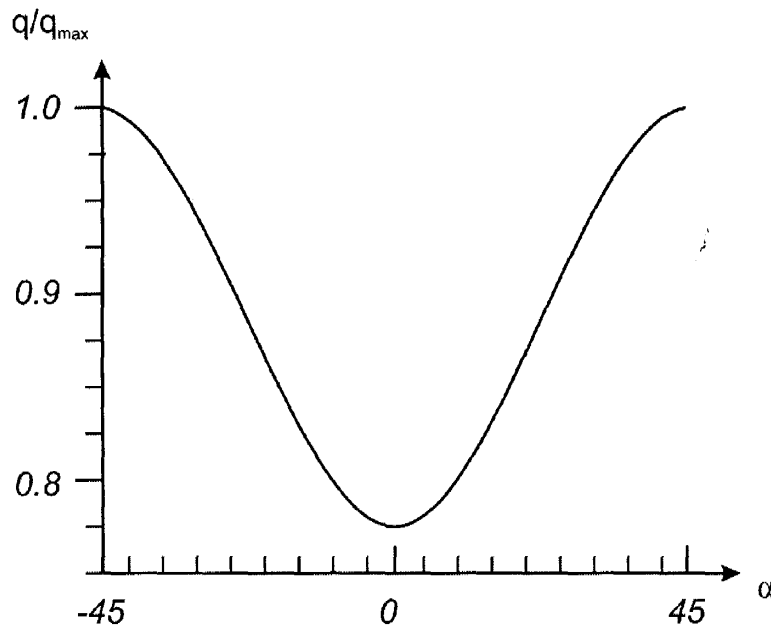


Рис. 1.5 Типова форма пульсації зумовленої роботою роторного лічильника

При певних частотах обертання роторів виникають резонансні явища, які призводять до поширення вверх і вниз по потоку пульсацій, які впливають як на сам роторний лічильник, так і на засіб вимірювання розташований перед або після нього. У зв'язку із цим звичайні роторні лічильники з роторами вісімкоподібної форми в якості еталонів передавання не доцільно застосовувати. На рис. 1.6 представлені результати досліджень, проведені автором, роторного лічильника РЛ G4, які проводились на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-01-08 та повірочній установці з еталонними критичними соплами TZKD-16.

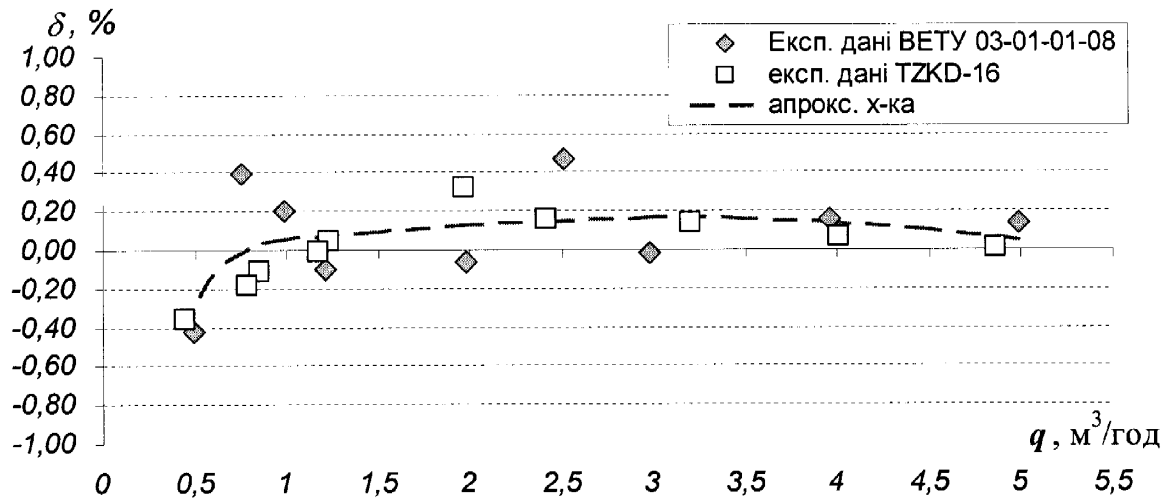


Рис. 1.6 Градувальна характеристика роторного лічильника РЛ G4

На сьогодні поряд виробників розроблено безрезонансні конструкції роторних лічильників газу, це роторні лічильники IRM-Duo та Delta S-Flow. В Україні вже протягом 7 років застосовуються в якості еталонів передавання роторні лічильники газу Delta S-Flow. Ці лічильники відрізняються від типових роторних лічильників конструкцією роторів. Ротор цього лічильника має три лопасті, при цьому вони закручені по гвинту по довжині ротора. Частота пульсацій таких лічильників набагато вища, а амплітуда коливань набагато менша, в результаті при роботі лічильника не проявляються резонансні явища, як видно з результатів досліджень проведених фахівцями ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» (див. рис. 1.7).

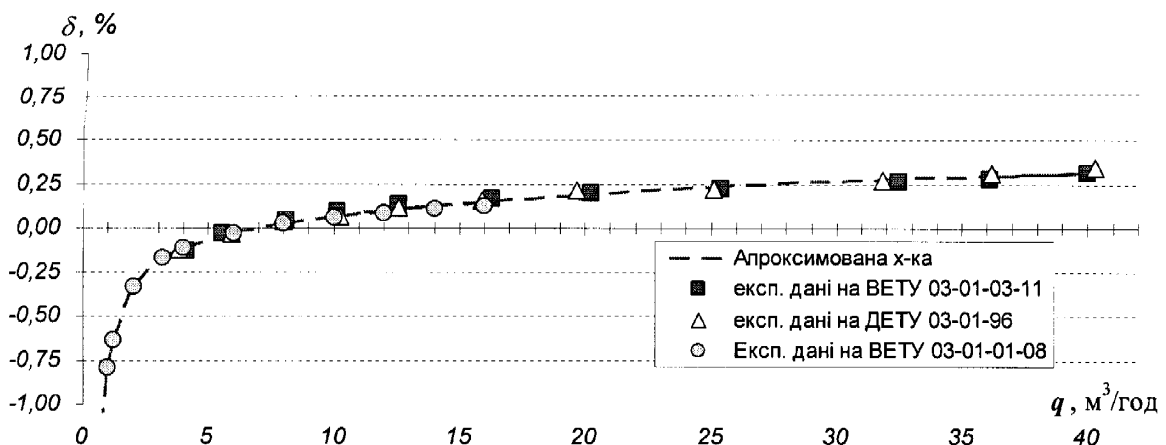


Рис. 1.7 Градувальна характеристика роторного лічильника Delta S-Flow G25

1.3.1.2 Лічильники газу барабанного типу

В діапазоні витрат від 0,001 до 2 м³/год в Україні, Нідерландах, Німеччині застосовують еталонні лічильники барабанного типу. Основними елементами лічильника газу барабанного типу (рис. 1.8) є корпус, барабан з вимірювальними камерами і лічильний механізм. Вимірювальний барабан, що має чотири камери однакового об'єму, занурений у замкову рідину [27]. 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 оберт барабана відповідає сумарному об'єму всіх чотирьох камер.

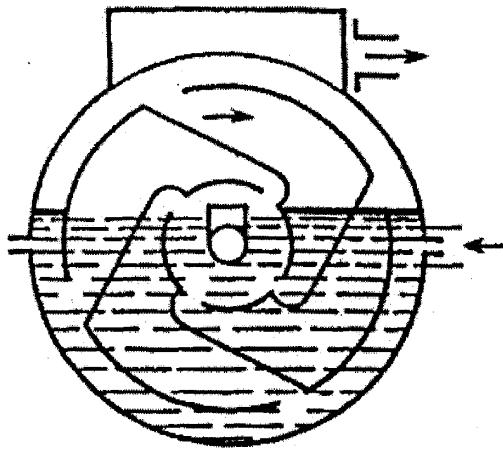


Рис. 1.8 Схема лічильника газу барабанного типу

Головною перевагою барабанних лічильників газу у порівнянні з лічильниками інших типів є те, що об'єм газу вимірюється безпосередньо і параметри та склад газу не впливають на точність вимірювання.

По друге вони володіють досить широким динамічним діапазоном вимірювання та хорошою точністю. Так в переважній більшості динамічний діапазон вимірювань становить 1:100 при границях відносної похибки від 0,15 до 0,50 %.

Проте є ряд недоліків, які обмежують їх застосування як еталонів передавання.

В першу чергу це взаємодія вимірюваного середовища із замковою рідиною із-за процесів випаровування та розчинення:

- 1) поглинання випаровуваних частинок замкової рідини газом;
- 2) розчинення газу в замковій рідині до границі насичення.

Похибки зумовлені розчинністю, можна зменшити, якщо до проведення вимірювань газ розчинити в замковій рідині до границі насичення.

Другим фактором є взаємодія замкової рідини із вимірювальним барабаном, а саме, в'язке тертя, та змочування барабана.

Чим менша в'язкість замкової рідини, тим менший опір чинить рідина обертанню барабана. Поверхневий натяг замкової рідини зумовлює нерівномірний рух вимірювального барабана, що проявляється у формі градуовальної характеристики, як видно з результатів досліджень проведених автором на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-01-08 (див. рис. 1.9).

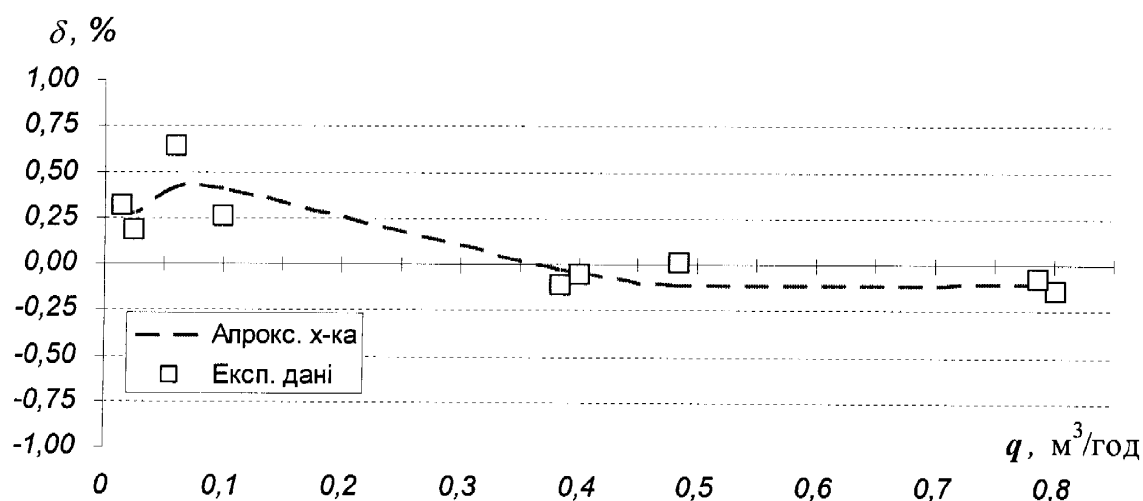


Рис. 1.9 Градувальна характеристика барабанного лічильника газу РГ7000М (замкова рідина: дистильована вода)

Використання як замкової рідини малов'язких мастил з низьким коефіцієнтом поверхневого натягу і з низьким тиском насиченого пару дозволяє вирішити вищепераховані проблеми (див. рис. 1.10) [28].

Третім важливим фактором є низька стійкість до транспортування. В результаті транспортної тряски можуть виходити з ладу осі та лопаті вимірювального барабана.

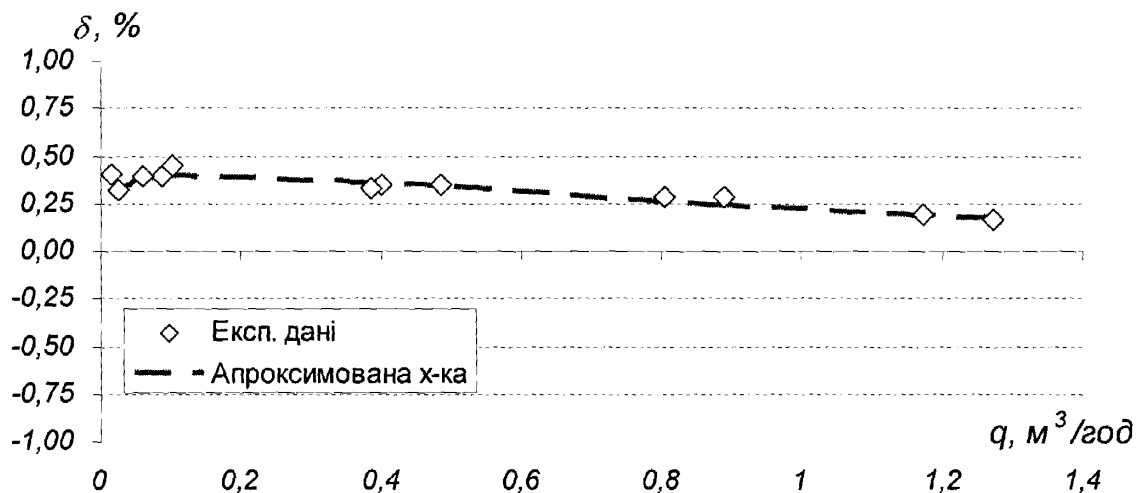


Рис. 1.10 Градувальна характеристика барабанного лічильника Ritter TG05/5 (замкова рідина: малов'язке мастило Shell Ondina (Autin-B)) (результати експериментальних досліджень на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-01-08)

З вище сказаного випливає, що для використання барабанного лічильника газу як еталона передавання слід використовувати відповідну замкову рідину, дотримуватись температурного режиму, як при умовах його первинного калібрування, а також акуратно транспортувати його.

1.3.1.3 Лічильники газу турбінного типу

В діапазоні великих витрат від 160 і вище найчастіше застосовують турбінні лічильники газу. Вони володіють хорошою лінійністю характеристики, проте з низькою довгостроковою стабільністю [29].

Лінійність еталонів передавання на базі турбінних лічильників не перевищує 0,25%. На рис. 1.11 представлено результати досліджень турбінного лічильника TZ/Fluxi G1600 отримана на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-04-12 проведені в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія».

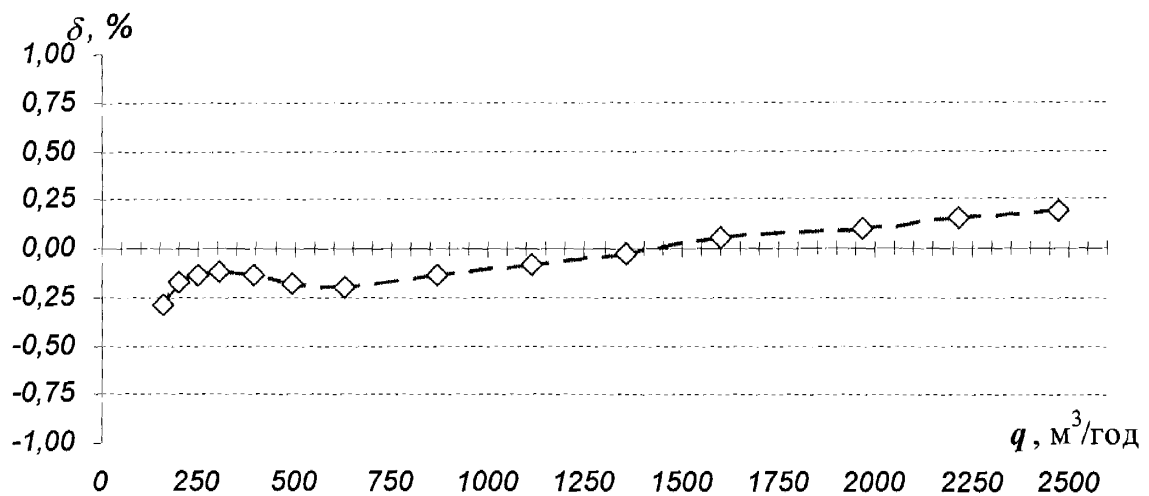


Рис. 1.11 Градувальна характеристика турбінного лічильника TZ/Fluxi G1600 отримана на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-04-12

Для досягнення довгострокової стабільності метрологічних характеристик турбінних лічильників газу слід дотримуватись чистоти вимірювального середовища, так як бруд потрапляючи в підшипники, забруднює їх і призводить до зростання сил опору, які змінюють вид градувальної характеристики. Крім того бруд налипає на лопатки турбіни і тим самим призводить до зміни маси турбіни, а отже спричиняє зміну інерційності турбіни, внаслідок чого також змінюється градувальна характеристика лічильника.

Перевагою турбінних лічильників газу є можливість здійснювати передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу з використанням так званої процедури «балансування Рейнольдса» [30] від еталонів, що працюють за атмосферного тиску на повітрі еталонним установкам, що працюють за вищих значень тиску та на природному газі. Крім того, застосування згаданої процедури дозволяє робити прогнозування та оцінювання похибки вимірювання за умов відмінних від умов первинної повірки [31].

Одним із недоліків турбінних лічильників є вплив на їх роботу збурень структури потоку на їх вході [32]. Тому при використанні їх як еталонів передавання повинні використовуватись відповідні прямі ділянки трубопроводів з пристроями підготовки потоку.

1.3.1.4 Лічильники газу ультразвукового типу

Останнім часом є спроби використання як еталонних ультразвукових лічильників газу.

В [33] описується застосування 8 – канального ультразвукового лічильника газу в якості еталонного.

Принцип дії ультразвукового часо-імпульсного лічильника газу ґрунтується на методі вимірювання часу проходження прямого t_f та зворотного t_r ультразвукового променя.

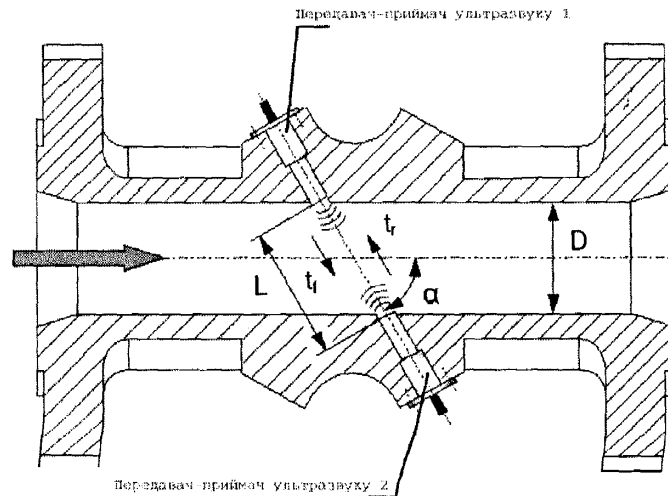


Рис. 1.12. Будова та принцип дії ультразвукового лічильника газу

Знаючи довжину акустичного каналу L (див. рис. 1.12) можна визначити середню швидкість потоку у площині розміщення давачів:

$$v_p = \frac{L}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left(\frac{1}{t_f} - \frac{1}{t_r} \right) \quad (1.14)$$

Для підвищення точності вимірювань в ультразвукових лічильниках використовується кілька каналів [33, 34]. Тому значення об'ємної витрати визначається за наступним співвідношенням:

$$q_v = \frac{\pi D_i^2}{4} \sum_i w_i v_{pi}, \quad (1.15)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт для i – того акустичного каналу.

Геометрична конфігурація розміщення акустичних каналів ультразвукових лічильників вибирається з можливістю компенсувати збурення профілю швидкостей потоку газу. Найбільш вдалою є так звана «Х-конфігурація». Завдяки тому, що кути акустичних каналів на кожному рівні обернені один до одного, неосьові складові швидкості вимірюються з протилежними знаками. Це дозволяє точно визначити ці складові швидкості.

Потік газу, як правило, можна розкласти на дві складові: осьову та обертову (див. рис. 1.13).

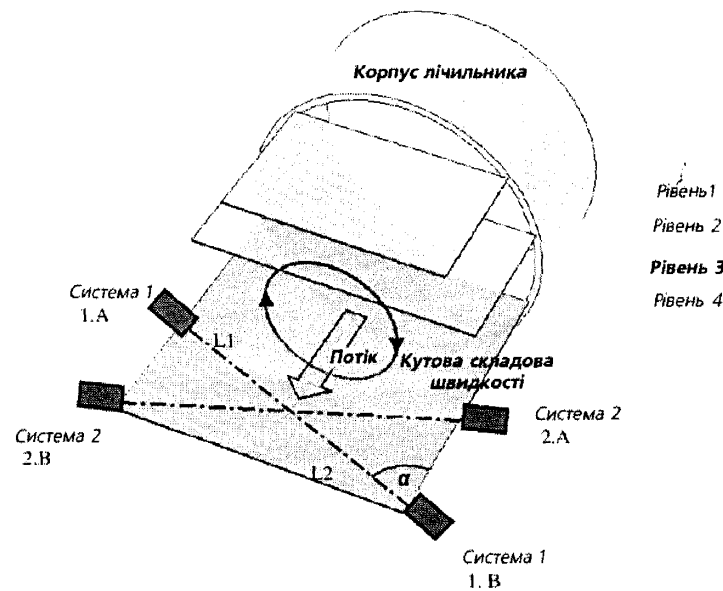


Рис. 1.13. Ілюстрація зменшення впливу кутової складової швидкості потоку

Осьова складова основна для визначення витрати потоку. Неосьова складова характеризує закрутку, збурення потоку. Як згадувалось раніше, закрутка потоку спричиняється розташуванням перед лічильником місцевих опорів.

Так звана Х-конфігурація акустичних каналів ультразвукового лічильника [33, 34] дозволяє вимірювати обидві складові швидкості потоку, що дозволяє зменшити вплив кутової складової швидкості на результуючий вихідний вимірювальний сигнал до мінімуму.

Швидкості потоку виміряні системами 1 та 2 (див. рис. 1.13) визначаються співвідношеннями:

$$v_1 \cong v_{oc.} + v_{кут.} \cdot tg\alpha \quad (1.16)$$

$$v_2 \cong v_{oc.} - v_{кут.} \cdot tg\alpha \quad (1.17)$$

Визначивши, дві незалежно виміряні швидкості потоку газу, можна визначити осьову і кутову складову швидкості потоку:

$$v_{oc.} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (1.18)$$

$$v_{кут.} = ctg\alpha \cdot \frac{v_1 - v_2}{2} \quad (1.19)$$

Невизначеність вимірювання 8-канальним ультразвуковим лічильником в лабораторних умовах не перевищує 0,2% [33, 35].

Враховуючи переваги ультразвукових лічильників при накопиченні достатнього експериментального досвіду їх застосування, можливе застосування їх як еталонів передавання.

На жаль, більшість ультразвукових лічильників газу вітчизняного виробництва не володіють хорошою довгостроковою стабільністю. Крім того, сумнівним є застосування ультразвукових лічильників в діапазоні ламінарного режиму потоку.

1.3.2 Еталони передавання на базі критичних сопел

Сопло критичного витoku є досить простим засобом для вимірювання витрати газу. Створивши на соплі критичний перепад тиску, швидкість газу в горловині сопла досягає місцевої швидкості звуку, при цьому значення масової витрати залишається незмінним. Для визначення значення витрати потрібно тільки виміряти тиск та температуру перед соплом, а параметри газу в горловині сопла розраховуються через термодинамічні співвідношення для адіабатного процесу.

Сопло критичного витoku є одним із найстабільніших еталонних засобів, оскільки в ньому немає механічних рухомих частин, а при

дотриманні чистоти внутрішньої поверхні, воно може як завгодно довго зберігати свої характеристики.

Величина критичного перепаду тиску r^* , тобто відношення статичного тиску в критичному січенні сопла p_* до тиску ізоентропійно заторможеного газу на вході в сопло p_0 , визначається із термодинамічних властивостей вимірюваного середовища [36]:

$$\left(\frac{p_*}{p_0}\right)^* \approx \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = r^*, \quad (1.20)$$

де κ – показник адіабати.

Для практичних цілей користуються поняттям максимально допустима ступінь дроселювання [37] або максимально допустиме відношення тиску на виході сопла p_2 до тиску ізоентропійно заторможеного газу на вході в сопло p_0 , це величина, при якій ще зберігається критичний режим течії через сопло (див. рис. 1.14).

Для критичних сопел Вентурі з тороїдальною горловиною та з вихідним дифузоров при числах Рейнольдса для горловини сопла більше $2 \cdot 10^5$ максимально допустиме відношення тисків знаходиться в межах 0,7 – 0,9 і визначає геометричними параметрами сопла [38].

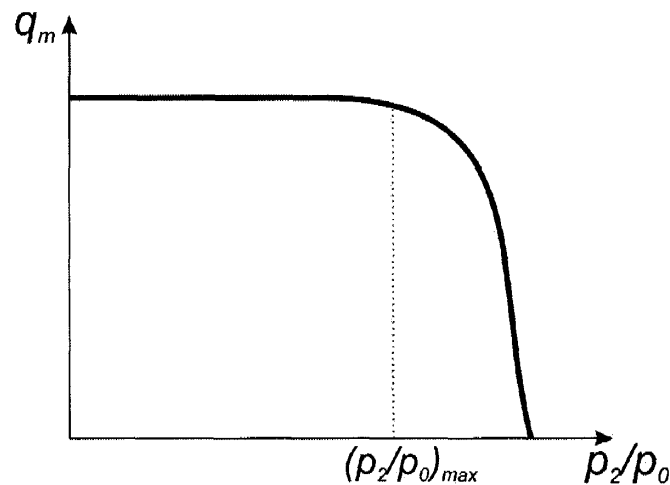


Рис. 1.14. Максимально допустима ступінь дроселювання

Для критичних сопел з прямими твірними з вихідним дифузоров максимально допустиме відношення тисків складає 0,84, а для сопел без вихідного дифузора ця величина складає 0,6 [37].

Із-за високої довгострокової стабільності характеристик сопла критичного витоку застосовують як робочі еталони та еталони передавання [38].

Проте є ряд проблем пов'язаних із застосуванням критичних сопел. Одна з проблем полягає у тому, що сопло критичного витоку відтворює за певних умов тільки одне значення витрати, по-друге, застосування критичних сопел вимагає більших енергетичних затрат, що пов'язано із високими втратами енергії, що йдуть на прискорення потоку в соплі до швидкості звуку [39]. Зазначені проблеми не мають стосунку безпосередньо до метрології. Стосовно метрології суттєвою проблемою є складність визначення метрологічних характеристик сопел з діаметром горловини менше 1 мм, це пов'язано в першу чергу з неточністю визначення геометричних розмірів, а також з тим, що в таких сопел на величину витрати суттєвим є вплив сил в'язкого тертя. Застосування таких критичних сопел вимагає індивідуального градуювання кожного сопла, проте існуючі способи градуювання таких сопел критичного витоку вимагають тривалих вимірювань, за яких складно втримати незмінними умови в лабораторії із-за чого знижується точність.

Застосування критичних сопел як еталонів передавання описується в працях Середюка О. [15], Петришина І. [40], Райта Дж.[41], Джонсона А.[42], Вуловіча Ф.[43], Накао С., Такамото М. [44,45], Кіма Дж., Кіма Х. [46] Беляєва, Б. Вагіна В., Патрікеєва В. [47]. Проте на сьогодні є ще ряд питань пов'язаних із застосуванням критичних сопел, недостатньо вивчених і які потребують подальшого вивчення.

Одним із проблемних питань є вплив зміни тиску на виході критичного сопла на його коефіцієнт витоку [48]. За результатами досліджень проведених в лабораторії CEESI виявлено ефект зниження коефіцієнта витоку критичного сопла за відношення тисків, за якого згідно теоретичних розрахунків режим течії повинен бути критичним. Проте дослідники не пояснюють виникнення цього явища, а просто констатують факт його

наявності, крім того виявлено залежність величини цього ефекту від складу газу. Подібні дослідження наведені в [49], однак аналогічно не проаналізовано причини зниження коефіцієнта витoku критичного сопла в діапазоні відношень тисків нижче максимально допустимого їх відношення.

Ще однією з проблем пов'язаною із застосуванням критичних сопел є точність розрахунку їх діаметра горловини при проектуванні за номінального значення заданої об'ємної витрати менше $0,06 \text{ м}^3/\text{год}$. Згідно вимог нормативних документів на повірку лічильників газу для прикладу [50] значення витрати задається із допустимими відхиленнями:

- мінус 5 % для значення об'ємної витрати q_{max} ;
- плюс 5 % для значень об'ємної витрати q_{min} ;
- плюс-мінус 5 % для значення об'ємної витрати $0,2 q_{\text{max}}$.

Відомий метод розрахунку геометричних розмірів критичного сопла [36], який полягає у визначенні оціночного значення діаметра горловини і подальшим уточненням його за результатами обчислення коефіцієнта витoku ітераційним методом. Проте цей метод спирається на емпіричну модель коефіцієнта витoku, межі застосування якої обмежені діапазоном чисел Рейнольдса від $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^7$. Екстраполяція цієї моделі для менших чисел Рейнольдса зумовлює відхилення фактичного значення витрати відтвореного критичним соплом від розрахункового від 0,85% для сопел з номінальною витратою $0,06 \text{ м}^3/\text{год}$ до 5% для сопел з номінальною витратою $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$.

1.3.3 Еталони передавання на базі ламінарних витратомірів

Ламінарні витратоміри досить часто використовуються для передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні витрат від $0,001 \text{ м}^3/\text{год}$ до $1 \text{ м}^3/\text{год}$ [51, 52].

Конструктивно ламінарний витратомір представляє собою капілярну трубку або набір капілярних трубок, розміщених паралельно [27].

Для ламінарного витратоміра виготовленого на основі круглих капілярних трубок рівняння вимірювання матиме вигляд [46]:

$$\Delta P = \left[\left(\frac{8R_u}{\pi PM} \right) \left(\frac{C_\mu \mu l T}{r^4} \right) \right] q_m + \left[\left(\frac{R_u}{\pi^2 PM} \right) \left(\frac{C_{KE} T}{r^4} \right) \right] q_m^2, \quad (1.21)$$

де μ - динамічна в'язкість газу, l - довжина трубки, r - радіус трубки, C_μ - в'язкісний калібрувальний коефіцієнт, C_{KE} - калібрувальний коефіцієнт, що враховує втрати кінетичної енергії.

Недоліки ламінарних витратомірів залежать в основному від їх конструкції, які тим чи іншим чином можуть бути усунуті [53, 54]. Проте основним недоліком ламінарних витратомірів є досить сильно виражена залежність результатів вимірювання від динамічної в'язкості вимірюваного середовища, яка в свою чергу залежить від температури, згідно даних, наведених в [55], додаткова похибка зумовлена впливом температури складає близько 0,3% на один градус. Також, градувальна характеристика кожного окремого ламінарного витратоміра визначається геометричними розмірами конкретного екземпляра та впливом забруднення прохідного перерізу.

1.4 Нормативні основи забезпечення простежуваності та передавання розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу

На сьогодні ланцюг простежуваності вимірювань визначається повірочною схемою для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати [8], яка не достатньо забезпечує вимоги до ланцюгів простежуваності, а також не в повній мірі забезпечено нормативно всі етапи простежуваності від первинного еталона до засобів вимірювань кінцевих споживачів, тобто питання розроблення нормативної основи простежуваності розміру одиниць вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу є актуальним.

Розробку нормативного забезпечення простежуваності доцільно проводити спираючись на діючі нормативні документи, які регламентують передавання розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.

Основним нормативним документом, що регламентує передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу є державна повірочна схема для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу [8]. Також до нормативної основи забезпечення передавання відносяться методичні документи, що регламентують методи та засоби повірки чи державної метрологічної атестації відповідних засобів вимірювань згідно ієрархічної структури представленої в повірочній схемі.

Ієрархічну систему простежуваності та передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу очолює державний первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-96. Атестація еталона здійснюється за методикою атестації [56]. Атестація первинного еталона здійснюється шляхом вимірювання його геометричних розмірів та атестації вимірювальних каналів тиску, температури та частоти. Тобто цією методикою забезпечується простежуваність державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 до первинних еталонів базових одиниць системи СІ.

Передавання розміру одиниці вимірювань від державного первинного еталона до вторинних та робочих еталонів регламентується наступними методичними документами розробленими за участю автора: [57 – 60].

Проте важливою проблемою є відсутність нормативного та технічного забезпечення безпосередньої простежуваності до державного первинного еталона засобів вимірювань в діапазоні витрат менше $4 \text{ м}^3/\text{год}$. Діючою повірочною схемою в цьому діапазоні витрат передавання розміру здійснюється з повірочних схем інших фізичних величин, що порушує принцип простежуваності вимірювань.

1.5 Висновки до першого розділу та обґрунтування напрямку дослідження

В першому розділі здійснено аналіз методологічних підходів при передаванні розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу та технічних засобів для забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу.

Проаналізовано схеми передавання розміру одиниць вимірювання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу України, Німеччини та Нідерландів.

Проаналізовано конструктивні особливості, а також переваги та недоліки різних типів еталонів передавання, які застосовуються в Україні та закордоном.

Проаналізувавши світовий та вітчизняний досвід у використанні технічних засобів для передавання розміру одиниць вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, зроблено висновок про доцільність використання як еталони передавання еталонні лічильники газу роторного типу на основі безрезонансної конструкції, лічильники газу турбінні в діапазоні витрат вище 200 м³/год, лічильники газу барабанні з малов'язким і низьковипаровуваним маслом із низьким коефіцієнтом поверхневого натягу та сопла критичного витоку.

При чому слід надавати перевагу саме соплам критичного витоку в зв'язку з тим, що саме сопло по своїй суті є фактично засобом створення витрати.

На підставі проведеного аналізу здійснено обґрунтування необхідності проведення таких напрямків досліджень:

- з метою гарантування правильності та співставності результатів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу при його обліку необхідно на основі державної повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу розробити ланцюг простежуваності та внести

відповідні зміни до державної повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу;

- незважаючи на велику кількість відомих теоретичних та експериментальних досліджень сопел критичного витоку з метою їх застосування як еталонів передавання для забезпечення простежуваності вимірювань безпосередньо до державного первинного еталона потребують подальшого розвитку дослідження фізичних процесів, які відбуваються в критичних соплах, і які впливають на їх метрологічні характеристики;

- для підвищення точності вимірювань при забезпеченні простежуваності вимірювань з використанням критичних сопел потребує удосконалення рівняння вимірювання з метою вилучення найбільш вагомих джерел невизначеності;

- з метою забезпечення безпосередньої простежуваності вимірювань до державного первинного еталона в діапазоні витрат нижче $4 \text{ м}^3/\text{год}$ необхідно розробити та удосконалити існуючі методи та засоби передавання розміру одиниці вимірювань;

- необхідною умовою забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу є розроблення нормативних документів для забезпечення простежуваності із врахуванням оцінювання невизначеності вимірювань при передаванні розміру одиниць вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу;

- для підвищення точності виготовлення критичних сопел у відповідності до вимог технічних завдань необхідно уточнити емпіричну модель коефіцієнта витоку критичного сопла для розширення меж його застосування.

На підставі викладеного в розділі сформовано основні завдання і обґрунтовано напрямки дисертаційних досліджень.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОПЕЛ КРИТИЧНОГО ВИТОКУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ЇХ ЯК ЕТАЛОНІВ ПЕРЕДАВАННЯ

Сопло критичного витоку застосовується як робочий еталон масової та об'ємної витрати газу вже досить давно. В деяких країнах сопла критичного витоку застосовуються для забезпечення передавання розміру одиниці витрати газу від первинного еталона еталонам нижчим по ієрархії.

Для забезпечення високої точності вимірювань та оцінювання їх невизначеності при передаванні розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу з використанням сопел критичного витоку необхідно проаналізувати впливові фактори, що впливають на їх метрологічні характеристики. Також необхідно розробити математичну модель, яка б враховувала вплив цих факторів на характеристики критичних сопел.

2.1 Вибір конструкції критичних сопел для застосування їх як еталонів передавання

В метрологічній практиці у світі та в Україні, як регламентується в [36-38] застосовуються три типи сопел критичного витоку:

- з тороїдальною горловиною [37,38];
- з циліндричною горловиною [37,38];
- з прямими твірними або конічне сопло [37].

Геометричні розміри різних конструкцій наведено на рис. 2.1-2.3.

В загальному форма сопел усіх конструкцій представляє собою осесиметричний конфузур, що переходить у дифузур. Сопла різних конструкцій відрізняються внутрішнім контуром.

Для перших двох конструкцій сопел вхідна частина представляє собою в перерізі дугу кола з постійним радіусом, що переходить у горловину сопла.

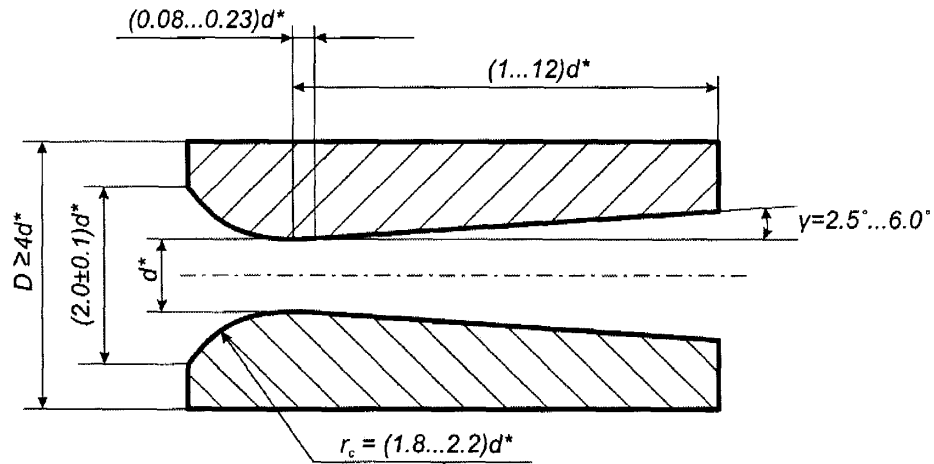


Рис. 2.1 Критичне сопло з тороїдальною горловиною

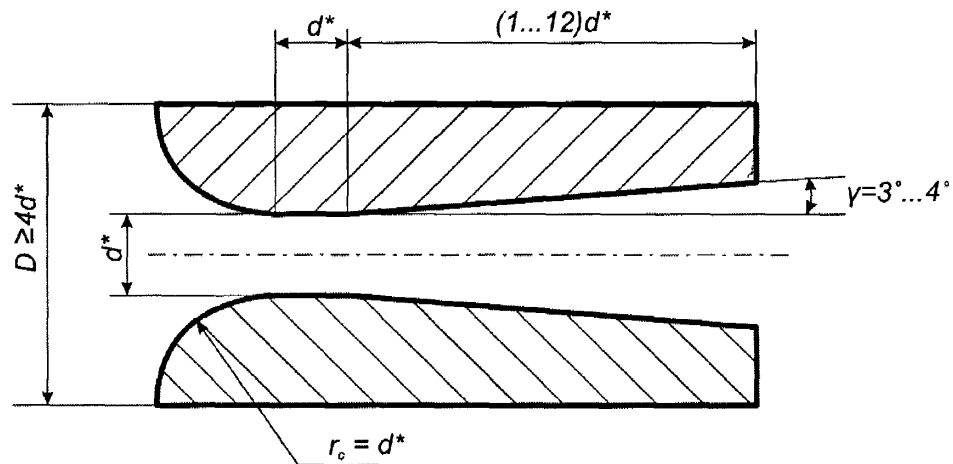


Рис. 2.2 Критичне сопло із циліндричною горловиною

Принципова різниця між цими конструкціями полягає у формі та геометрії переходу від вхідної конічної частини через горловину у вихідний дифузор. Для сопла з циліндричною горловиною переходи між областями різкі.

Критичні сопла третьої конструкції (рис. 2.3) найбільш поширені на теренах Російської Федерації та Білорусі, а також досить часто застосовуються в маловитратних повітряних установках в Україні.

Для третьої конструкції - вхідна частина представляє собою правильний конус з прямими твірними. Горловина має форму циліндра, який переходить різко у вихідний дифузор.

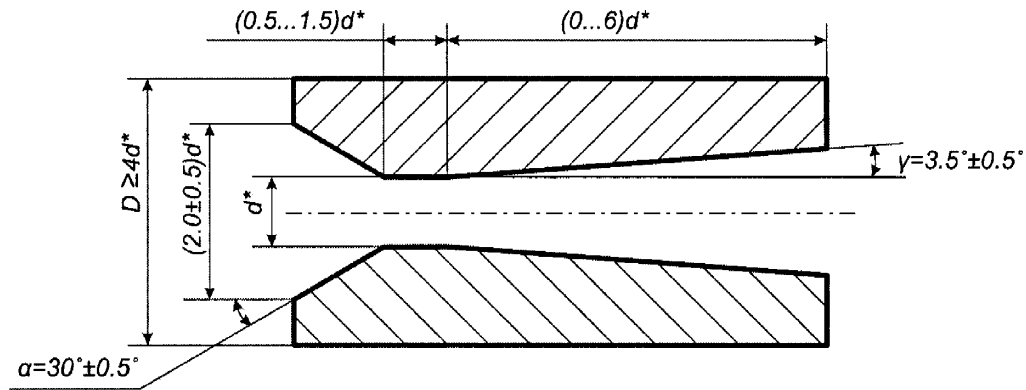


Рис. 2.3 Критичне сопло з прямими твірними

Різкі переходи від криволінійної поверхні вхідного конуса до горловини в циліндричному соплі та соплі з прямими твірними, як зазначається в [61] можуть зумовити появу небажаного градієнту тиску, що призведе до потовщення граничного шару або ж до локального відриву потоку від стінки.

Тому найбільш вдалою конструкцією критичних сопел для використання їх як еталонів передавання є конструкція з тороїдальною горловиною.

2.2 Удосконалення рівнянь вимірювання для застосування критичних сопел як еталонів передавання

Основне рівняння вимірювання масової витрати за допомогою сопла критичного витоку при умові критичного режиму течії отримується з аналітичного розв'язку одновимірного рівняння Ейлера. При умові, що газ є ідеальним, тобто питома ізобарна теплоємність $c_p = const$ та $p = \rho \frac{R_u}{M} T$, масова витрата через сопло визначається наступним співвідношенням [38,62]:

$$q_m = S \cdot C^* \cdot \frac{p_0}{\sqrt{\frac{R_u}{M} T_0}}, \quad (2.1)$$

де S – площа горловини сопла, p_0 – тиск ізоентропійно заторможеного газу на вході в сопло, R_u – універсальна газова стала, M – молярна маса, T_0 –

температура ізоентропійно заторможеного газу на вході в сопло, C^* – функція критичного потоку, яка визначається як:

$$C^* = \sqrt{k} \cdot \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(1-k)}}, \quad (2.2)$$

де k – показник адіабати.

При розрахунку функції критичної витрати для повітря показник адіабати k приймають рівним відношенню питомих теплоємностей γ , який дорівнює:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (2.3)$$

де c_v – питома ізохорна теплоємність.

Тоді (2.2) перепишеться як:

$$C^* = \sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(1-\gamma)}} \quad (2.4)$$

Для ідеального газу $c_p = const$ та $c_v = const$, тоді $\gamma = const$.

Для повітря при атмосферному тиску $k = \gamma = 1.4$, тоді $C^* = 0.68473$.

Застосування рівняння (2.4) для реального газу знижує точність вимірювання, враховуючи, що значення питомих теплоємностей c_p, c_v залежать від тиску та температури і складу газу згідно таблиць довідкових даних для повітря [63,64].

За результатами розрахунку C^* за значеннями питомих теплоємностей c_p, c_v в діапазоні абсолютних тисків від 86 кПа до 105 кПа та температур від 18 °С до 22 °С отримано відхилення від значення функції критичної витрати розрахованої за $\gamma = const$ у вказаному діапазоні тисків та температур 0,06%.

Для підвищення точності вимірювання витрати газу критичним соплом при передаванні розміру одиниці вимірювання автором здійснено апроксимацію табличних даних наведених в [63] методом найменших квадратів в діапазоні тисків від 86 кПа до 106 кПа та температур від 17 °С до

23 °С, за результатами якої отримано рівняння для розрахунку відношення питомих теплоємностей γ_0 для сухого повітря:

$$\gamma_0 = 1,3993 + 6,152 \cdot 10^{-5} \cdot p_0 + 3,348 \cdot 10^{-9} \cdot p_0^2 + 3,575 \cdot 10^{-5} \cdot T_0 - 1,071 \cdot 10^{-7} \cdot T_0^2 - 1,502 \cdot 10^{-7} \cdot p_0 \cdot T_0 \quad (2.5)$$

Якість апроксимації характеризується коефіцієнтом детермінації який становив 0,9998. Максимальне відхилення від табличних даних наведених в [63] не перевищує 0,002 % при невизначеності вхідних даних [63] 0,02 %.

Звідки модифікована функція критичної витрати, як функція тиску та температури ізоентропійно заторможеного газу визначатиметься як:

$$C^*(p_0, T_0) = \sqrt{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_0 + 1}{2} \right)^{\frac{(\gamma_0 + 1)}{2(1 - \gamma_0)}}, \quad (2.6)$$

З врахуванням (2.6) рівняння (2.1) переписеться як:

$$q_m = S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot \frac{p_0}{\sqrt{\frac{R_u}{M} T_0}} \quad (2.7)$$

Точність рівняння (2.7) невисока, так як похибка вимірювань при його застосуванні складає від 1 до 10 % залежно від числа Рейнольдса [42] враховуючи, що реальний потік в соплі не є одновимірним, у пристінковій зоні наявне прилипання потоку вимірюваного середовища до стінки сопла, тобто присутній вплив в'язкості.

Для врахування реальних умов потоку в рівняння (2.7) вводиться коефіцієнт витіку C [41, 42, 61], який є відношенням дійсної витрати до витрати розрахованої за (2.7).

Тоді рівняння (2.7) запишеться у наступному вигляді:

$$q_m = C \cdot S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot \frac{p_0}{\sqrt{\frac{R_u}{M} T_0}} \quad (2.8)$$

Для об'ємної витрати рівняння (2.8) набуде вигляду:

$$q_v = C \cdot S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} \cdot T_0} \quad (2.9)$$

При калібруванні критичного сопла визначається коефіцієнт витoku C , який з рівняння (2.9) визначається за наступною формулою:

$$C = \frac{q_v}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} T_0}} \quad (2.10)$$

Оскільки значення об'ємної витрати при різних тисках та температури відрізняється, необхідно здійснити її нормування шляхом приведення до умов ізоентропійно загальмованого газу перед соплом:

$$q_{v,0} = q_v \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (2.11)$$

де ρ, ρ_0 – густини газу за робочих умов та умов ізоентропійно загальмованого газу, відповідно.

Враховуючи (2.10) та (2.11) рівняння для визначення коефіцієнта витoku при калібруванні критичного сопла на еталоні набуде вигляду:

$$C = \frac{q_{v,e} \cdot \rho_e}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \sqrt{\frac{R_u}{M} T_0} \cdot \rho_0}, \quad (2.12)$$

де $q_{v,e}$ – об'ємна витрата відтворена еталоном за робочих умов, ρ_e – густина газу в еталоні за робочих умов.

Використовуючи атмосферне повітря як робоче середовище для визначення коефіцієнта витoku критичного сопла слід враховувати вплив наявності певної кількості водяної пари. В [65] наводиться поправка до значення коефіцієнта C^* , яка враховує вплив вмісту водяної пари в атмосферному повітрі на величину швидкості звуку в соплі. Із врахуванням поправки наведеної в [65] автором запропоновано визначати коефіцієнт витoku за наступною формулою [66]:

$$C = \frac{q_{v,e} \cdot \rho_e}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} T_0} \cdot \rho_0} \quad (2.13)$$

де $q_{v,e}$ – об'ємна витрата відтворена еталоном; x_v – молярна частка водяної пари у повітрі.

Точність калібрування критичного сопла за рівнянням (2.13) визначається точністю еталона та точністю вимірювання діаметра горловини критичного сопла. Точність вимірювання діаметра горловини критичного сопла визначається точністю засобу вимірювання та ексцентриситетом отвору. Точність мікроскопа універсального УИМ-23, який використовується в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» для вимірювання діаметрів отворів складає 1 мкм. Ексцентриситет горловини критичного сопла, як правило, зумовлений технологією виготовлення і найбільше проявляється для сопел малих діаметрів менше 1 мм. Вплив ексцентриситету частково усувається шляхом застосування ефективного значення діаметра горловини, який визначається шляхом обчислення кореня квадратного з результату ділення площі отвору горловини, яка визначається посегментно, на число π .

Оцінимо невизначеність коефіцієнта витoku отриманого за (2.13).

$$U(C) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial q_{v,e}} \cdot u(q_{v,e})\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho_E} \cdot u(\rho_e)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho_0} \cdot u(\rho_0)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial C^*(p_0, T_0)} \cdot u(C^*(p_0, T_0))\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial x_v}\right) \cdot u^2(x_v) + \left(\frac{\partial C}{\partial T_0} \cdot u(T_0)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial S} \cdot u(S)\right)^2} \quad (2.14)$$

Складовими невизначеності універсальної газової сталої та молярної маси сухого повітря нехтуємо із-за їх малості.

Невизначеність площі горловини критичного сопла визначається із невизначеності вимірювання діаметра горловини за наступною формулою:

$$u(S) = \frac{1}{2} \pi \cdot d \cdot u(d) \quad (2.15)$$

Виведемо вагові коефіцієнти по кожній вхідній величині рівняння (2.14), приймаючи універсальну газову сталу рівною 8314,472 Дж/(моль·К) та молярну масу сухого повітря 0,028966 кг/моль.

$$\frac{\partial C}{\partial q_{v,e}} = \frac{0,059054 \cdot \rho_e}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v) \sqrt{T_0} \rho_0}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_e} = \frac{0,059054 \cdot q_{v,e}}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v) \sqrt{T_0} \rho_0}$$

$$\frac{\partial C}{\partial S} = \frac{0,059054 \cdot q_{v,e} \cdot \rho_e}{S^2 \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v) \sqrt{T_0} \rho_0}$$

$$\frac{\partial C}{\partial C^*(p_0, T_0)} = \frac{0,059054 \cdot q_{v,e} \cdot \rho_e}{S \cdot C^{*2}(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v) \sqrt{T_0} \rho_0}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_v} = \frac{0,0998 \cdot q_{v,e} \cdot \rho_e}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v)^2 \sqrt{T_0} \rho_0}$$

$$\frac{\partial C}{\partial T_0} = \frac{0,02953 \cdot q_{v,e} \cdot \rho_e}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v) T_0^{3/2} \rho_0}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_0} = \frac{0,059054 \cdot q_{v,e} \cdot \rho_e}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169x_v) \sqrt{T_0} \rho_0^2}$$

За результатами розрахунку розширених невизначеностей коефіцієнтів витоку критичних сопел з діаметрами горловин 1,888 мм; 1,196 мм; 0,835 мм; 0,335 мм; 0,224 мм та 0,172 мм при умові їх калібрування на державному первинному еталоні побудований графік залежності розширеної невизначеності (2.14) коефіцієнта витоку розрахованого за (2.13), який представлено на рис. 2.4.

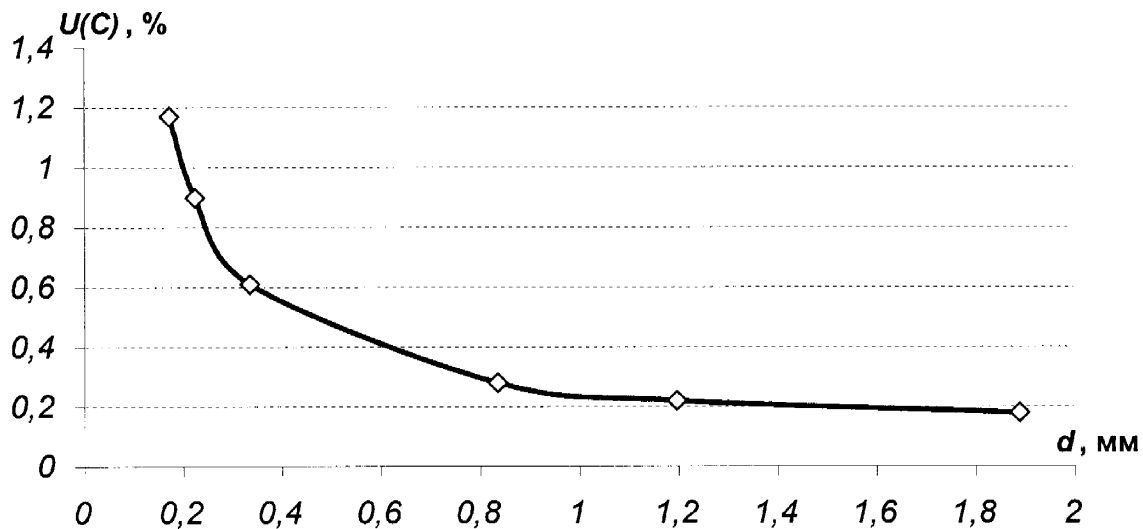


Рис. 2.4. Залежність розширеної невизначеності коефіцієнта витоку від діаметра горловини критичного сопла

З рис. 2.4. очевидно, що для критичних сопел з діаметром горловини менше 0,8 мм невизначеність визначення коефіцієнта витоку значно зростає.

Для вирішення цієї проблеми автором запропоновано об'єднати площу горловини сопла S , яку у діапазоні температур застосування критичного сопла від $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ можна приймати величиною постійною, з коефіцієнтом витoku, тобто замінити добуток коефіцієнта витoku на площу горловини сопла градувальним коефіцієнтом сопла K [67].

В результаті рівняння (2.13) приведеється до виду:

$$K = \frac{q_{v,e} \cdot \rho_e}{C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} T_0} \cdot \rho_0} \quad (2.16)$$

Градувальний коефіцієнт K аналогічно як і коефіцієнт витoku C залежить від числа Рейнольдса, яке для умов горловини сопла визначається як:

$$Re = \frac{4 \cdot q_{v,e} \cdot \rho_0}{\pi \cdot d^* \cdot \mu_0}, \quad (2.17)$$

де d^* – діаметр горловини критичного сопла.

Коефіцієнт (2.16) є фактично функцією тиску ізоентропійно загальмованого газу на вході в критичне сопло. Перевагою застосування градувального коефіцієнта K є відсутність необхідності вимірювати діаметр горловини сопла, точність вимірювання якого при його значеннях менше 1 мм є досить невисокою, оскільки технологічні труднощі зумовлюють появу суттєвої еліпсності та інакших відхилень від форми круга [68], які зумовлюють неточність визначення коефіцієнта витoku.

Забезпечення простежуваності повірочних установок шляхом звірення їх з використанням критичних сопел як компараторів – еталонів передавання реалізується через використання формули (2.16) в наступній послідовності. Спочатку на кожній установці, що звіряється визначається за формулою (2.16) градувальний коефіцієнт критичного сопла K . Наступним кроком є порівняння отриманих на кожній установці градувальних коефіцієнтів, відхилення між якими слугує мірою близькості відтворюваних установками одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. Якщо одна з установок є вищою за ієрархією, то за отриманим відхиленням градувальних коефіцієнтів

коригують значення одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що відтворюється підпорядкованою установкою.

Для порівняння результатів звірянь можна скористатися одним із відомих статистичних методів [69, 70]. З використанням методології описаної в [69] оцінюється рівень еквівалентності еталонів, що порівнюються, який є фактично нормованим відхиленням одного еталона від іншого, при цьому нормуючим параметром виступає стандартна невизначеність цього відхилення. Невизначеність відхилення оцінюється за оцінками невизначеностей вимірювання еталонів, що звіряються. Досить репрезентативним методом оцінки результатів звірення є метод описаний в [70], який полягає в побудові діаграми Юдіна, яка дозволяє оцінити візуально і чисельно у вигляді відношення середньоквадратичних відхилень статистичних вибірок результатів вимірювань здійснених на двох еталонах, що звіряються.

При застосуванні критичного сопла за умов ідентичних умовам його калібрування на первинному еталоні, а саме за однакової температури газу та тиску на вході в сопло з відхиленнями не більше 1 °С та 2 кПа, відповідно, автором пропонується модифікувати градувальний коефіцієнт сопла K шляхом включення до нього функції критичного потоку, яка очевидно буде постійною при дотриманні умов застосування сопла однаковими з умовами його калібрування. Тоді (2.16) набуде вигляду:

$$K^* = \frac{q_{v,e} \cdot \rho_e}{(1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} T_0} \cdot \rho_0} \quad (2.18)$$

Перевагою градувального коефіцієнта (2.18) є по-перше відсутність необхідності вимірювати діаметр горловини сопла, як і у випадку застосування формули (2.16), так і відсутність необхідності враховувати вплив параметрів реального газу, так як вони враховуються безпосередньо в самому коефіцієнті.

Застосування формули (2.18) дозволяє проводити звірення установок, які працюють за однакових умов на вході в критичне сопло, а саме еталонних установок дзвонового типу, або еталонних установок PVTt типу.

Забезпечення простежуваності повірочних установок шляхом звірення їх з використанням критичних сопл як компараторів – еталонів передавання реалізується через використання формули (2.18) у послідовності аналогічно описаній для випадку застосування формули (2.16).

Поряд з описаними характеристиками можна застосовувати описану в [36, 67] характеристику критичного сопла, а саме значення об'ємної витрати на соплі приведеної до температури 20 °C та відносної вологості 0% – $q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}$, яка визначається при градуюванні сопла на еталоні;

$$q_{\Sigma v,20^{\circ}\text{C},0\%} = \frac{\rho_E}{\rho_0} \frac{1}{1 + 0,169x_v} \sqrt{\frac{293,15}{T_0}} q_E, \quad (2.19)$$

де T_0 – температура газу перед соплом; q_E – значення об'ємної витрати відтворюваної (вимірної) еталонном; ρ_E, ρ_0 – густини повітря в еталоні і перед соплом, відповідно; x_v – молярна частка водяної пари у повітрі перед соплом.

Застосування характеристики (2.19) можливе при умовах ідентичних умовам калібрування сопла, так як вона не враховує зміни тиску газу та фізико-хімічних параметрів вимірюваного середовища.

Врахувати вплив тиску вимірюваного середовища, можна ввівши у рівняння (2.19) коефіцієнт, що враховує вплив тиску $k(p)$, при цьому значення витрати треба додатково нормувати при певному значенні абсолютного тиску перед соплом, наприклад 100 кПа.

При застосуванні сопла у вузькому діапазоні зміни вхідного тиску, для прикладу, не більше 5 кПа можна визначати коефіцієнт, що враховує вплив тиску на об'ємну витрату шляхом лінійної інтерполяції даних калібрування сопла на первинному еталоні, як мінімум, за двох значень вхідного тиску.

Для визначення величини впливу вхідного тиску на величину номінальної витрати необхідно перш за все визначити відношення зміни витрати від зміни тиску на вході $\Delta q/\Delta P$:

$$\frac{\Delta q}{\Delta P} = \frac{(q_{v,20,0\%,P_{\max}} - q_{v,20,0\%,P_{\min}})}{P_{CK_{\max}} - P_{CK_{\min}}} \quad (2.20)$$

де $q_{v,20,0\%,P_{\max}}$ та $q_{v,20,0\%,P_{\min}}$ – номінальні значення об'ємної витрати визначені за (2.19) за максимального $P_{CK_{\max}}$ та мінімального тиску $P_{CK_{\min}}$ на вході критичного сопла, відповідно.

Номінальне значення об'ємної витрати сопла приведеної до абсолютного тиску 100 кПа $q_{v100\text{кПа},20^\circ\text{C},0\%}$ розраховують із врахуванням (2.19) та (2.20) за наступною формулою:

$$q_{v100\text{кПа},20^\circ\text{C},0\%} = q_{v,20,0\%,P_{\max}} - \frac{\Delta q}{\Delta P} \cdot (P_{CK_{\max}} - 100000) \quad (2.21)$$

Коефіцієнт, що враховує вплив тиску на об'ємну витрату k_p отже розраховують за наступним співвідношенням:

$$k_p = \frac{\Delta q}{\Delta P \cdot q_{v100\text{кПа},20^\circ\text{C},0\%}} \quad (2.22)$$

Тоді значення об'ємної витрати за робочих умов визначатиметься як:

$$q_{v,P} = q_{v100\text{кПа},20^\circ\text{C},0\%} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_p} \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \sqrt{\frac{T_0}{293,15}} \times [1 - k_p \cdot (p_0 - 100000)] \quad (2.23)$$

де ρ_p – густина повітря за робочих умов.

Врахування поправки на зміну вхідного тиску дозволить підвищити точність вимірювання приблизно на 0,01% на кожні 100 Па.

2.3 Удосконалення методології розрахунку геометричних розмірів критичного сопла

Враховуючи те, що критичні сопла відтворюють тільки конкретне значення масової, а отже і об'ємної витрати, важливим є точне виготовлення

критичних сопел заданих номіналів для виконання вимог до точності відтворення витрати наведені в [50].

Основними геометричними розмірами критичного сопла є:

- діаметр горловини сопла d^* ;
- радіус вхідного скруглення r_c ;
- діаметр вхідного отвору сопла d_1 ;
- діаметр вихідного отвору сопла d_2 ;
- довжина вихідного дифузора $L_{\text{диф}}$;
- загальна довжина сопла L .

Відомий алгоритм розрахунку геометричних розмірів критичного сопла детально описаний в [36]. Вихідними даними для розрахунку є номінальне значення об'ємної витрати газу q_{v3} , значення абсолютного тиску та температури перед соплом, параметри газу, що вимірюватиметься, газова стала та показник адіабати, у випадку повітря також вказується середнє значення відносної вологості повітря.

Для розрахунку діаметра горловини критичного сопла використовується ітераційний алгоритм. На початку розраховується оціночне значення діаметра горловини, яке потім уточнюється з використанням емпіричної моделі коефіцієнта витoku сопла як функції числа Рейнольдса. Межі застосування цієї моделі обмежені діапазоном чисел Рейнольдса від $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^7$. Відхилення фактичного значення витрати відтворюваного критичним соплом від розрахункового за згаданим алгоритмом складає від 0,85% для сопел з номінальною витратою $0,06 \text{ м}^3/\text{год}$ до 5% для сопел з номінальною витратою $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$.

Для підвищення точності відомого алгоритму розрахунку геометричних розмірів критичного сопла проведено експериментальні дослідження критичних сопел з діаметрами горловин від 0,17 мм до 4,25 мм. В ході досліджень визначалась номінальна витрата критичного сопла згідно (2.19) та вимірювався ефективний діаметр горловини сопла, а також

визначався коефіцієнт витoku критичного сопла за (2.13) та число Рейнольдса за (2.17).

Значення коефіцієнта витoku додатково визначалось за відомими моделями, а саме за моделями наведеними в [36,38] та комбінованою аналітичною моделлю [71], яка враховує вплив в'язкості середовища в граничному пристінковому шарі [72,73] та нелінійність профілю швидкостей в горловині сопла [74,75].

Дослідження проводилось на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-01-08, розширена невизначеність якого не перевищує 0,15 % [11], за схемою представленою на рис. 2.5.

Досліджуване критичне сопло 3 монтувалось в дослідну секцію вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08 1. Критичне сопло 3 монтувалось у форкамеру. Тиск, температура та відносна вологість вимірюваного середовища перед соплом вимірювались у ємності форкамери, так що параметри ізоентропійно загальмованого газу приймались рівними тиску та температурі у форкамері. Перед дослідною секцією встановлювався регулятор тиску 2. На виході сопла 3 через два відсічних пневматичних клапани, для забезпечення надійної герметичності, під'єднувався вакуумний насос.

Перед вакуумним насосом 5 для регулювання величину тиску після сопла використано байпасний кран зв'язку з атмосферою 4. За допомогою регулятора тиску 2 задавалось певне значення тиску на вході в критичне сопло 3 і далі проводились визначення коефіцієнта витoku сопла. Тиск на виході критичного сопла підтримувався постійним. Всі дослідження проводились при відношенні тисків на соплі рівним 0,2 для гарантування критичного режиму течії.

За результатами досліджень автором уточнено емпіричну залежність для оціночного значення діаметра критичного сопла:

$$d_o^* = 1,358 \cdot q_{v,3}^{0,497} \quad (2.24)$$

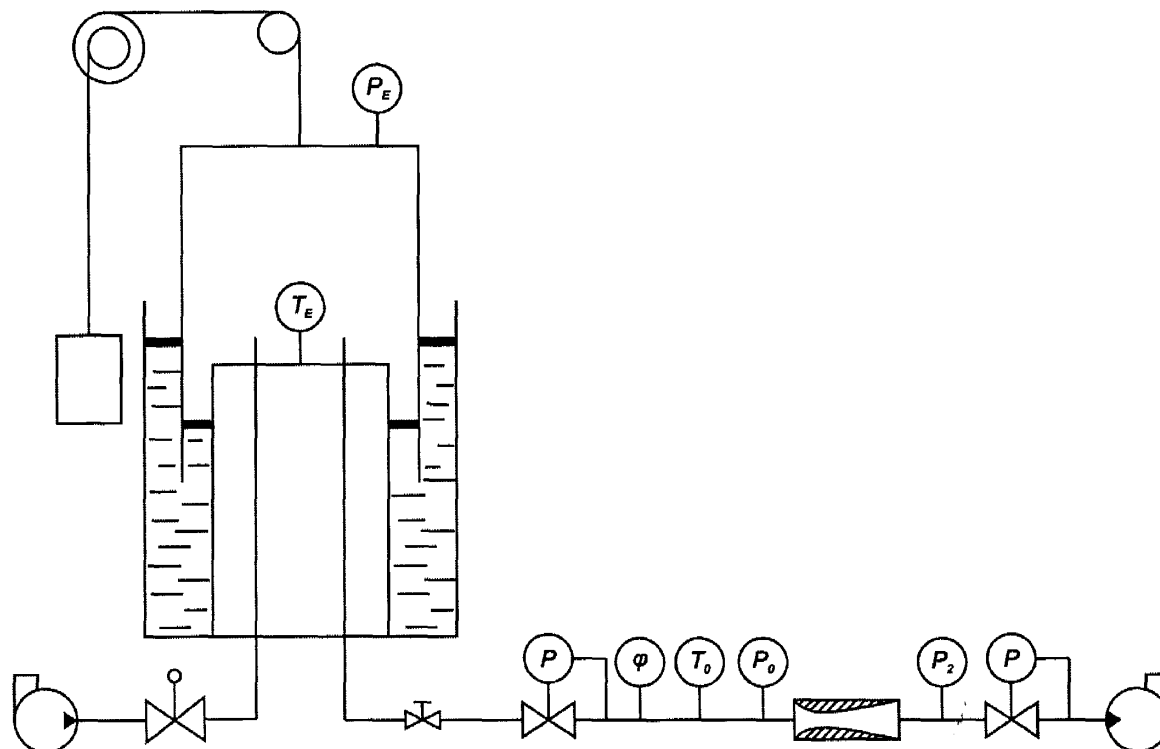


Рис. 2.5 Схема досліджень критичних сопел на вторинному еталоні ВЕТУ 03-01-01-08

В результаті відхилення оціночного діаметра горловини від фактичного значення не перевищує 3%, в той час як для алгоритму запропонованого в [36] відхилення перевищують 6%. Застосування уточненого рівняння (2.24) дозволяє покращити збіжність ітераційного розрахунку геометричних розмірів критичного сопла.

Також за результатами досліджень методом найменших квадратів автором отримано емпіричну модель коефіцієнта витoku, як функції числа Рейнольдса в розширеному діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 56000, що охоплює діапазон витрат від 0,016 м³/год до 10 м³/год:

$$C(\text{Re}) = -14412,41016 \cdot \text{Re}^{-1,5} + 316,8535 \cdot \frac{1}{\text{Re}} - 4,94573 \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{Re}}} + 1,00036 \quad (2.25)$$

На рис. 2.6 представлено результати порівняння розробленої емпіричної моделі коефіцієнта витoku критичного сопла з відомими аналітичними та емпіричними моделями. З результатів порівняння очевидно,

що застосування моделей представлених [36, 71] з прийнятною точністю можливе тільки в діапазоні чисел Рейнольдса від 4000, а моделі з [38] від 10000.

Результати експериментальних досліджень для досліджуваних критичних сопел наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Результати експериментальних досліджень критичних сопел

№ сопла	Ефективний діаметр горловини, мм	C	Відхилення емпір. моделі від результатів експериментів, %	Невизначеність вимірювань, %
1	0,172	0,88900	0,03	1,17
2	0,224	0,91704	-0,06	0,91
3	0,335	0,94594	0,04	0,62
4	0,835	0,97035	-0,11	0,28
5	1,196	0,97118	0,24	0,22
6	1,888	0,97879	-0,10	0,18
7	2,688	0,98170	-0,14	0,17
8	4,250	0,98300	0,10	0,16

Невизначеність вимірювання ефективного діаметра горловини складала 2 мкм.

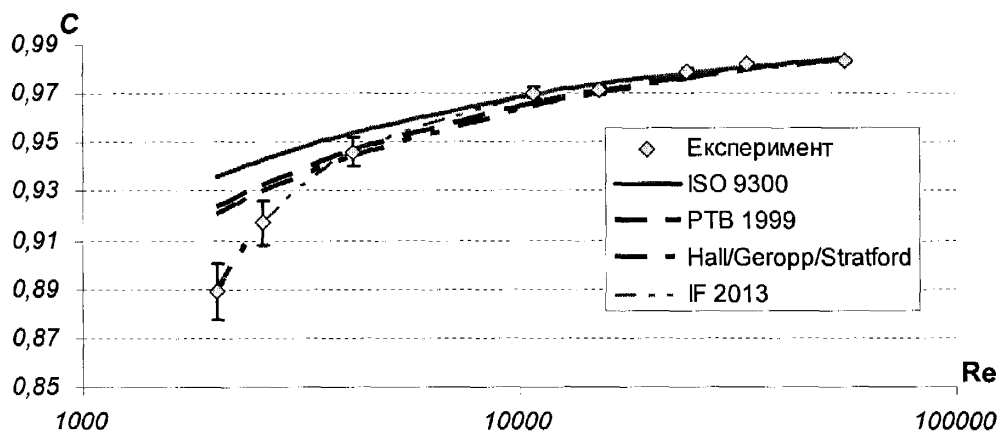


Рис. 2.6. Результати порівняння розробленої емпіричної моделі (позначена IF 2013) коефіцієнта витoku критичного сопла з відомими емпіричними та аналітичними моделями

Результати експериментальної перевірки розробленої емпіричної моделі засвідчують можливість застосування її при розрахунку геометричних розмірів критичних сопел з номінальними діаметрами горловин від 0,17 до 4,25 мм.

Алгоритм розрахунку геометричних розмірів критичного сопла наведено в Додатку А.

2.4 Експериментальні дослідження впливу тиску на виході критичного сопла на величину коефіцієнта витoku

Значення відношення тисків, за якого потік в соплі набуває критичного режиму називається максимально допустимим критичним відношенням тисків [36 – 38, 76].

Подальше зниження тиску за соплом зумовлює появу у вихідному дифузорі надзвукового потоку та виникнення стрибків ущільнення [37, 62, 77], які теоретично не повинні чинити впливу на масову витрату через сопло, так як згідно положень газодинаміки збурення потоку поширюються зі швидкістю звуку і тому вони не можуть поширюватись проти набігаючого надзвукового потоку.

На величину максимально допустимого критичного відношення тисків впливає відношення площі вихідного отвору сопла до площі критичного січення. Чим більше це відношення тим кращим є відновлення тиску за соплом. Це в свою чергу дозволяє досягати критичного режиму течії при більших значеннях ступеня дроселювання.

При відношенні площі 1:1 максимально допустиме критичне відношення тисків перед і після сопла визначається згідно (1.20), і для повітря, при $k \approx 1,4$, $r^* \approx 0,528$.

Для критичних сопел з більшим відношенням площі вихідного перерізу дифузора до площі критичного перерізу (рис. 2.7) максимально допустиме

критичне відношення при числах Рейнольдса для горловини сопла більше $2 \cdot 10^5$ визначається за формулою [36,38,62,78]:

$$\left(\frac{p_2}{p_0}\right)_{\max} = 0,8 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)_i - r^*\right] + r^* \quad (2.26)$$

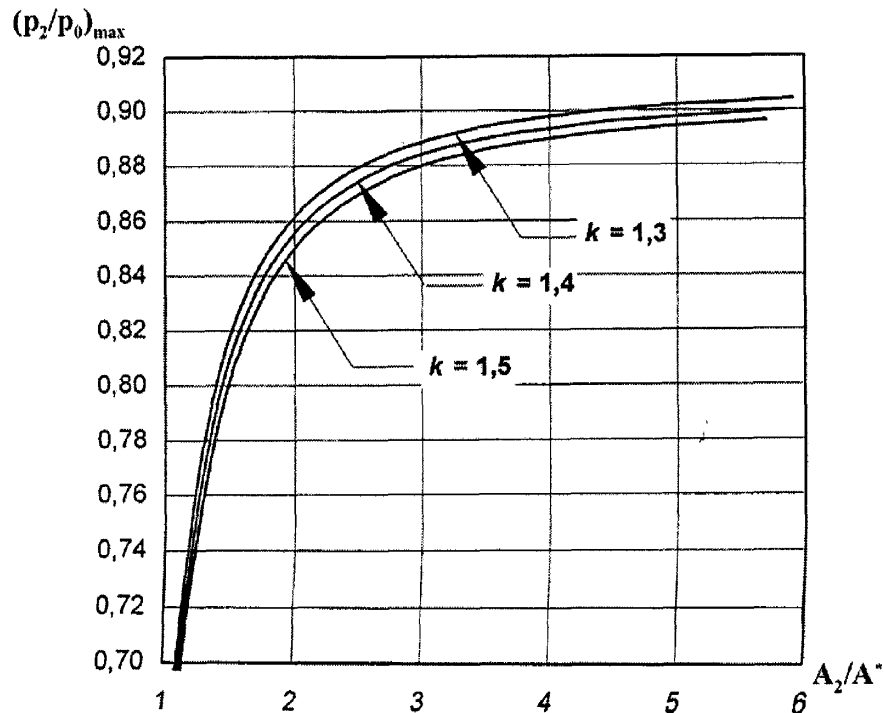


Рис. 2.7 Залежність максимально допустимого критичного відношення тисків від відношення площі вихідного отвору сопла до площі горловини сопла

Слід зауважити, що на величину степені дроселювання також впливає кут та довжина дифузора. Для прикладу для газу з $\gamma = 1.4$ при відношенні площ $A_2/A^* = 1$, $\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^* \approx 0.528$. Для досягнення степені дроселювання близькою до 0,9, відношення площ має бути рівним $A_2/A^* = 1.62$, що досягається при довжині дифузора рівній $3,94d^*$ і півкуті дифузора 2° .

Також величина степені дроселювання повинна залежати від числа Рейнольдса, так як зростання в'язкості призводить до зростання товщини граничного шару і цим самим повинне знижувати величину степені дроселювання.

В роботі [79] наводяться результати досліджень впливу величини кута вихідного дифузора на величину коефіцієнта витoku критичного сопла. Згідно наведених в роботі результатів досліджень вплив кута дифузора відчутніший для сопел з діаметром горловини менше 2 мм. Чим більший кут дифузора, тим більший буде коефіцієнт витoku. Для менших діаметрів горловин, коефіцієнт витoku буде суттєво менший із-за зміни положення звукової лінії в соплі, особливо для мініатюрних сопел.

Прийнято вважати, що за значень відношень тисків на виході та вході сопла менших за максимально допустиме значення, будь-які зміни тиску на виході критичного сопла не впливають на його характеристики. Проте, досвід повірки установок з критичними соплами з допомогою еталонів передавання, дозволив зробити припущення про хибність цього твердження, особливо для сопел з діаметрами горловини менше 2 мм.

Метою даного дослідження було виявлення залежності коефіцієнта витoku критичного сопла за різних значень тиску на його виході для розробки вимог їх експлуатації в складі повірочних установок.

Дослідження впливу вихідного тиску на характеристики критичного сопла проводились з використанням вторинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08.

Дослідження проводились за схемою представленою на рис. 2.5. Дослідження проводились шляхом визначення коефіцієнта витoku критичного сопла при різних значеннях тиску на вході та виході сопла, з метою імітації роботи сопла в реальних умовах повірочної установки, коли на вході критичних сопел може бути різний тиск залежно від кількості і типів лічильників, що повіряються, а також від конкретного значення витрати.

За результатами кожного вимірювання визначався коефіцієнт витoku сопла за формулою (2.13). Далі будувались графіки залежності відносної зміни коефіцієнта витoku сопла від відношення тисків на виході та вході сопла, за різних тисків на вході. За значення максимального ступеня дроселювання критичного сопла приймалось таке значення відношення

тисків на виході та вході сопла, за яких при подальшому його збільшенні значення коефіцієнта витoku змінювалось більше ніж на 0,1% від попереднього значення.

При дослідженні використовувались критичні сопла з тороїдальною горловиною з діаметрами горловин: 2,7мм, 1,9 мм, 1,2 мм. А також сопло з прямими твірними з діаметром горловини 0,3 мм.

Результати досліджень представлені на рис. 2.7 – 2.10.

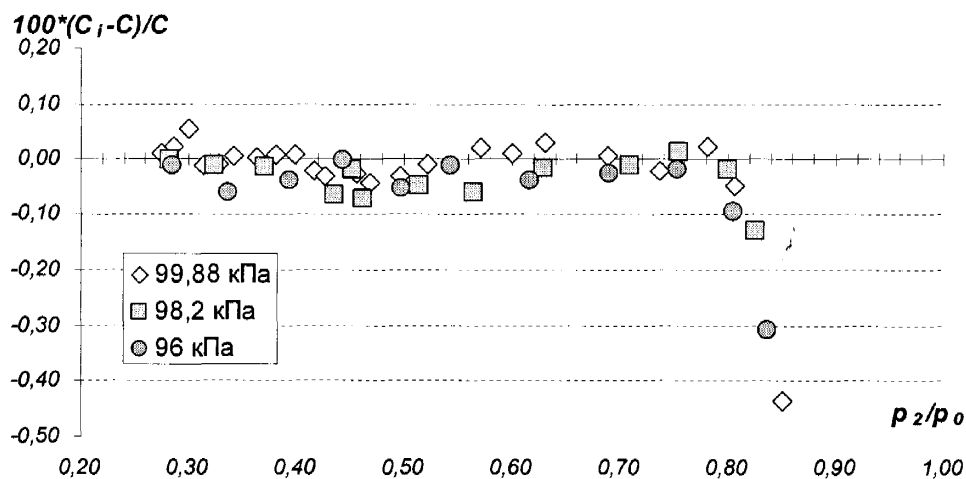


Рис. 2.8 Графіки залежності відносної зміни коефіцієнта витoku критичного сопла з тороїдальною горловиною з діаметром горловини 2,7 мм від відношення тисків на виході та вході сопла

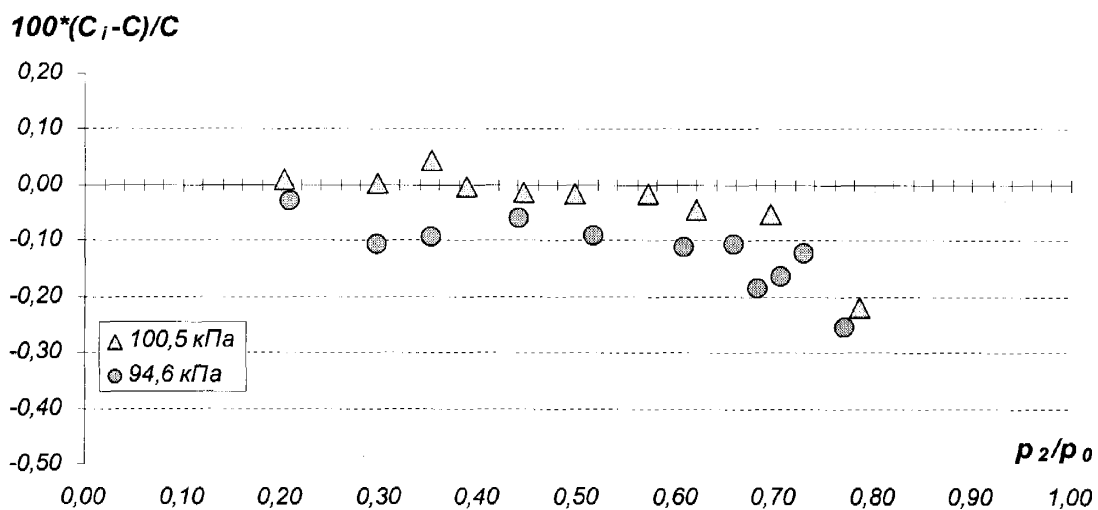


Рис. 2.9 Графіки залежності відносної зміни коефіцієнта витoku критичного сопла з тороїдальною горловиною з діаметром горловини 1,9 мм від відношення тисків на виході та вході сопла

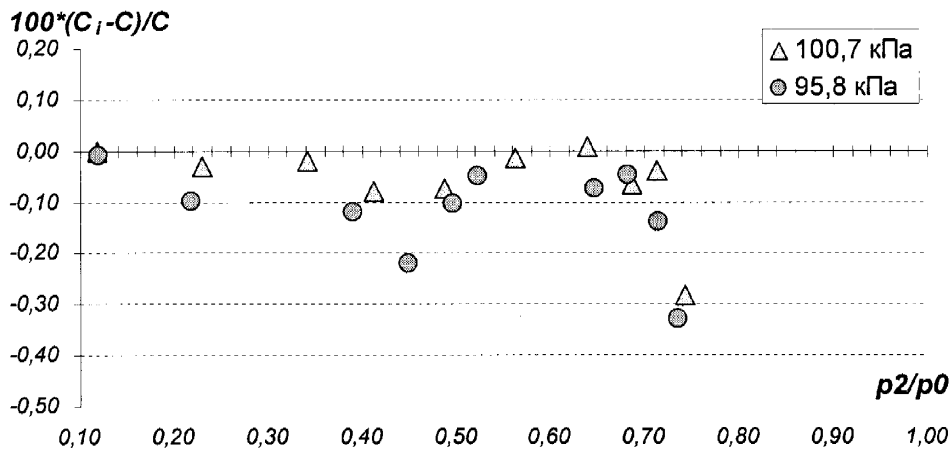


Рис. 2.10 Графіки залежності відносної зміни коефіцієнта витoku критичного сопла з тороїдальною горловиною з діаметром горловини 1,2 мм від відношення тисків на виході та вході сопла

За результатами експериментальних досліджень критичних сопел тороїдального типу представлених на рис. 2.8 – 2.10 виявлено наявність перехідної області в районі відношень тисків 0,4 до 0,5 при дослідженні критичного сопла з діаметром горловини 1,2 мм, а в соплі з діаметром горловини 1,9 мм такий ефект спостерігається при відношеннях тисків 0,63 – 0,74 [80]. При чому амплітуда перехідної області більша при меншому тиску на вході в сопло і для сопел меншого діаметру. Для критичного сопла з діаметром горловини 2,7 мм явища зникнення критичного режиму невиражене при умовах проведення експериментів.

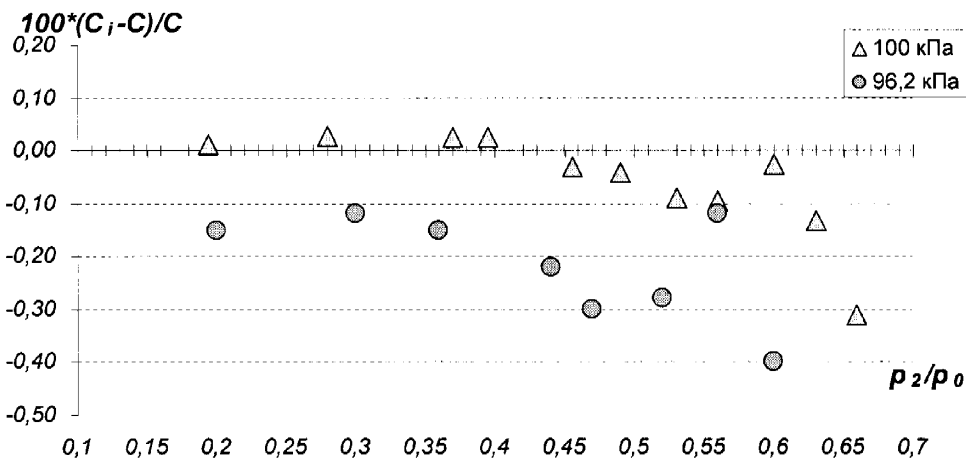


Рис. 2.11 Графіки залежності відносної зміни коефіцієнта витoku критичного сопла з прямими твірними з діаметром горловини 0,3 мм від відношення тисків на виході та вході сопла

Результати досліджень критичного сопла з прямими твірними з діаметром горловини 0,3 мм засвідчують (рис. 2.11) наявність зони зниження коефіцієнта витoku в районі відношень тисків від 0,4 до 0,55 і аналогічно до тороїдальних сопел при зменшенні тиску на вході в сопло інтенсивність зниження більша.

Спираючись на висновки наведені в [81] можна зробити припущення, що наявність області зниження коефіцієнта витoku сопла зумовлена взаємодією граничного пристінкового шару із стрибком ущільнення, який виникає при переході надзвукового потоку, що виникає в горловині сопла до дозвукового. З метою перевірки правильності припущення автором здійснювалось чисельне моделювання потоку через критичне сопло [80].

2.5 Чисельне моделювання впливу тиску на виході критичного сопла на величину коефіцієнта витoku

Моделювання впливу тиску на виході критичного сопла на величину коефіцієнта витoku здійснювалось методами обчислювальної гідродинаміки. Вихідними рівняннями для моделювання потоку газу є рівняння збереження маси, моменту та енергії. Для моделювання використовувались двовимірні, осесиметричні, усереднені по масі нестационарні рівняння Нав'є-Стокса для стиснутого середовища.

Відповідна система рівнянь у векторній диференціальній формі в декартовій системі координат записується як [80, 82]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial R}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{1}{y} H_1 + H_2, \quad (2.27)$$

де Q – вектор консервативних змінних; F та G – вектори конвективних потоків, R та S – вектори в'язких потоків, H_1 та H_2 – вихідні члени, які враховують осесиметричність та турбулентність, відповідно.

Вектор Q містить консервативні змінні питомої маси ρ , імпульсу $\rho \cdot u$ та енергії e (питомої повної енергії), яка визначається як сума внутрішньої та кінетичної енергій:

$$e = \rho \cdot \int c_v(T) \cdot dT + \frac{\rho}{2} \cdot (u^2 + v^2) \quad (2.28)$$

де u та v – декартові компоненти вектора швидкості U в x - та y -координатах; $c_v(T)$ – питома ізохорна теплоємність, як функція температури.

Також у вектор консервативних змінних входять кількість кінетичної енергії турбулентності ρk та швидкість дисипації для одиниці об'єму $\rho \varepsilon$.

В результаті вектор консервативних змінних Q можна записати у наступній формі:

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \cdot u \\ \rho \cdot v \\ e \\ \rho k \\ \rho \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Вектори конвективних потоків F та G запишемо у наступній формі:

$$F = \begin{pmatrix} \rho \cdot u \\ \rho \cdot u^2 + p \\ \rho \cdot u \cdot v \\ (e + p) \cdot u \end{pmatrix}; \quad G = \begin{pmatrix} \rho \cdot v \\ \rho \cdot u \cdot v \\ \rho \cdot v^2 + p \\ (e + p) \cdot v \end{pmatrix}, \quad (2.30)$$

Вектори дифузійних (в'язких) потоків R та S запишемо у наступній формі:

$$R = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{yx} + K \frac{\partial T}{\partial x} \\ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \\ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \end{pmatrix}; \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + K \frac{\partial T}{\partial y} \\ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \\ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

де K – коефіцієнт теплопровідності; μ_t – турбулентна в'язкість, яка визначається як:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.32)$$

де коефіцієнти $k - \varepsilon$ моделі турбулентності [83] дорівнюють відповідно: $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$;

τ_{xx}, τ_{yy} – нормальні напруження, які визначаються як:

$$\tau_{xx} = -2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.33)$$

$$\tau_{yy} = -2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.34)$$

τ_{xy}, τ_{yx} – дотичні напруження:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad (2.35)$$

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості.

Вектор вихідного члена H_1 , що враховує осесиметричність відносно осі абсцис, запишемо як:

$$H_1 = \left\{ \begin{array}{l} -\rho v \\ \tau_{xy} - \rho uv \\ u\tau_{xx} + v\tau_{yx} + K \frac{\partial T}{\partial x} - \rho v^2 \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + K \frac{\partial T}{\partial y} - (e + p)v \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}, \quad (2.36)$$

де p визначається з рівняння стану ідеального газу:

$$p = (\gamma - 1) \left[e - \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2) \right] \quad (2.37)$$

Вектор вихідного члена H_2 , що враховує турбулентність, запишемо як:

$$H_2 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_k - \rho\varepsilon + T_M \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{array} \right\}, \quad (2.38)$$

де $C_{1\varepsilon}$ та $C_{2\varepsilon}$ – модельні коефіцієнти $k - \varepsilon$ моделі турбулентності [83], які дорівнюють відповідно : $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$;

$$P_k = 2\mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2.39)$$

Для врахування впливу стисливості вимірюваного середовища введемо член, що враховує дисипацію розширення T_M [84]:

$$T_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{a^2} \quad (2.40)$$

За допомогою дискретизації системи рівнянь (2.27) в просторі та часі вони приводяться до виду системи алгебраїчних рівнянь, які розв'язуються відомими числовими методами.

Можливими методами дискретизації є метод кінцевих різниць (не консервативний), метод кінцевих об'ємів (консервативний) і метод кінцевих елементів.

При моделюванні потоку через критичне сопло доцільно здійснити дискретизацію вихідних рівнянь консервативним методом кінцевих об'ємів.

Просторова дискретизація області інтегрування здійснюється розбивкою її на множину контрольних об'ємів, які не пересікаються. Шукане рішення повинно задовольняти законам збереження маси, імпульсу та енергії для кожного контрольного об'єму і відповідно для всієї розрахункової області. При побудові розрахункової сітки враховуються форма області інтегрування, апріорні характеристики потоку і точність кінцевої моделі.

В зонах області інтегрування, де можуть бути наявні сильні градієнти обчислюваних змінних (тиску, швидкості, густини, тощо) необхідно

адаптувати розрахункову сітку дискретних точок відповідно до апріорних оцінок характеристик потоку в цих зонах.

Обчислювальна область для сопла з прямими твірними розбивалась структурованою сіткою з кількістю комірок близько 80000 (рис. 2.12). Розрахункова сітка побудована з використання програми ICEM CFD з програмного комплексу ANSYS [85]. Сітка згущувалась в пристінковій зоні та в горловині сопла для кращого вирішення потоку в цих областях та в областях переходу між конфузуром і горловиною та горловиною і дифузуром.

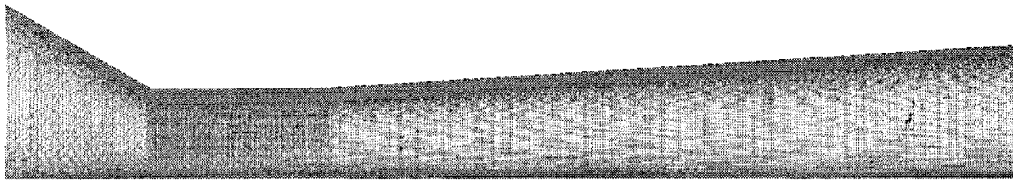


Рис. 2.12. Розрахункова сітка для критичного сопла з прямими твірними

Для кожної точки розрахункової сітки встановлено відповідні геометричні координати і прив'язані відповідні консервативні змінні.

Відповідні диференціальні рівняння Нав'є-Стокса апроксимуються різницевиими рівняннями. Застосовуючи двовимірний підхід, контрольні об'єми визначаються як площі $\Delta x \cdot \Delta y$.

Для підвищення ефективності і точності чисельного моделювання зручно скористатися переходом від декартових координат (x, y) до криволінійних координат (ξ, η) , які адаптовані під форму обчислювальної області (в нашому випадку під форму критичного сопла).

В результаті криволінійна обчислювальна область перетворюється в прямокутну область з рівномірним кроком сітки $\Delta \xi$ та $\Delta \eta$.

Тоді,

$$x = x(\xi, \eta) \Rightarrow \xi = \xi(x, y);$$

$$y = y(\xi, \eta) \Rightarrow \eta = \eta(x, y)$$

Функції для отримання нових координат згідно ланцюгового правила:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \cdot \xi_x + \frac{\partial}{\partial \eta} \cdot \eta_x \quad \text{або} \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \xi} \cdot \xi_y + \frac{\partial}{\partial \eta} \cdot \eta_y$$

Після перетворення координат вихідне рівняння набуде вигляду:

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \eta} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial \hat{R}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{S}}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\xi} \frac{H_1}{J} + \frac{H_2}{J}, \quad (2.41)$$

де

$$\hat{Q} = \frac{Q}{J}$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} \cdot (\xi_x \cdot F + \xi_y \cdot G)$$

$$\hat{G} = \frac{1}{J} \cdot (\eta_x \cdot F + \eta_y \cdot G)$$

$$\hat{R} = \frac{1}{J} \cdot (\xi_x \cdot R + \xi_y \cdot S)$$

$$\hat{S} = \frac{1}{J} \cdot (\eta_x \cdot R + \eta_y \cdot S)$$

J – якобіан перетворення координат, який визначається як:

$$J = \xi_x \cdot \eta_y - \xi_y \cdot \eta_x = \frac{1}{x_\xi \cdot y_\eta - x_\eta \cdot y_\xi} \quad (2.42)$$

Конкретне застосування описаного перетворення наведено детально в [86,87].

Дискретизація вихідних рівнянь виконана за допомогою методу контрольного об'єму для криволінійних координат приводить до:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta \hat{Q}^n}{\Delta t} + \frac{\hat{F}_{i+1/2,j} - \hat{F}_{i-1/2,j}}{\Delta \xi} + \frac{\hat{G}_{i+1/2,j} - \hat{G}_{i-1/2,j}}{\Delta \eta} = \\ & = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\hat{R}_{i+1/2,j} - \hat{R}_{i-1/2,j}}{\Delta \xi} + \frac{\hat{S}_{i+1/2,j} - \hat{S}_{i-1/2,j}}{\Delta \eta} \right) + \frac{1}{\eta} \frac{H_1^n}{J} \Delta \xi \Delta \eta + \frac{H_2^n}{J} \Delta \xi \Delta \eta \end{aligned} \quad (2.43)$$

де Δt – крок по часу; $\Delta \xi, \Delta \eta$ – кроки по простору;

$\Delta Q^n = Q^{n+1} - Q^n$ – вектор зміни параметрів потоку при переході з часового шару n до шару $(n+1)$.

Потоки $F_{i\pm 1/2}$ через стінки контрольної поверхні є функціями змінної в сусідніх точках інтерполяції, а отже усереднені по точках $i\pm 1/2$ (див. рис. 2.13).

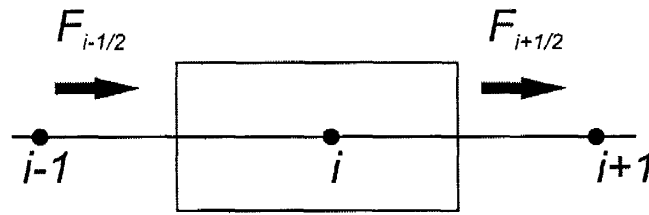


Рис. 2.13. Числові потоки через i -тий контрольний об'єм

Метою просторової дискретизації є чисельна апроксимація потоків через стінки комірки, так щоб чисельна схема була стійкою, тобто при зростанні розрядності дискретизації похибка обчислень повинна прямувати до нуля:

$$\lim_{\Delta\xi \rightarrow 0} \frac{F_{i+1/2} - F_{i-1/2}}{\Delta\xi} = F_\xi \quad (2.44)$$

Обчислення конвективних потоків виконувалось за протипотоковим алгоритмом розщеплення потоків, який сформульований в [88] та детально описаний в [89]. Алгоритм [88] є найбільш економним по затратам процесорного часу [90], тому розрахунки виконувались з використанням цього алгоритму.

Згідно [88]:

$$F_k = \frac{1}{2} [F(Q_L) + F(Q_R) - |\tilde{A}|(Q_R - Q_L)]_k, \quad (2.45)$$

де Q_L, Q_R – значення змінних зліва та справа розділюючої поверхні k .

Матриця \tilde{A} обчислюється як:

$$|\tilde{A}| = \tilde{T} |\tilde{\Lambda}| \tilde{T}^{-1}, \quad (2.46)$$

де $\tilde{\Lambda}$ – вектор власних значень матриці \tilde{A} ; \tilde{T} та \tilde{T}^{-1} – матриці лівих та правих власних векторів.

Вектор консервативних змінних в околі грані контрольного об'єму визначається за допомогою методу MUSCL [91]:

$$\begin{aligned} Q_L &= Q_i + \psi(\Delta Q_i, \Delta Q_{i+1}) \\ Q_R &= Q_{i+1} - \psi(\Delta Q_i, \Delta Q_{i+1}) \end{aligned} \quad (2.47)$$

де

$$\psi(u, v) = \frac{(u+v)}{4} \left[1 - \left(\frac{u-v}{|u|+|v|} \right)^2 \right] \quad (2.48)$$

Дифузійні (в'язкі) складові обчислювались з допомогою центрально-різницевої схеми.

Нев'язка R розраховувалась за допомогою інтегрування методом трапецій, потоків через кожную грань контрольного об'єму [89].

Наступним етапом є формування системи лінійних блочно-матричних рівнянь виду [89]:

$$C^n \cdot \Delta Q^n = R^n, \quad (2.49)$$

де $C^n = I - \left(\frac{\partial R}{\partial Q} \right)^n$ – блочна матриця неявних диференціальних

операторів розмірності $N \times N$, де N – кількість вузлів розрахункової сітки; I – одинична матриця.

На останньому етапі при розв'язку блочно-матричної системи алгебраїчних рівнянь можна використовувати ітераційні матричні методи, метод прогонки, тощо. Для вирішення блочно-матричної системи алгебраїчних рівнянь застосовано метод Гаусса-Зейделя.

Моделювання проводилось для критичного сопла з прямими твірними з діаметром 0,3 мм, розрахункова номінальна об'ємна витрата сопла 0,05 м³/год.

Розв'язок задач гідро- та газодинаміки числовими методами визначається заданими граничними та початковими умовами. В якості граничних умов задавався повний тиск на вході в критичне сопло, та татичний тиск на виході сопла. В якості середовища використовувалось повітря з врахуванням рівняння стану газу для ідеального газу. Температура повітря приймалась постійною і рівною 293 К. Стінка сопла приймалась адіабатичною із врахуванням умови прилипання потоку до стінки.

Розрахунки проводились при різних тисках на виході сопла, а також при різних тисках на вході сопла, для імітації реальних умов застосування критичних сопел.

Параметри турбулентності для граничних умов розраховувались за емпіричними формулами [92]. Вихідними параметрами вибиралась інтенсивність турбулентності, яка визначається як відношення середньоквадратичного значення флуктуації швидкості u' до середньої швидкості потоку \bar{u} , та масштаб довжини турбулентності l . Значення інтенсивності турбулентності 1% і нижче характеризує потік з низькою турбулентністю, високий рівень турбулентності характеризується інтенсивністю більше ніж 10%. Для внутрішніх потоків, інтенсивність турбулентності на вході модельованої ділянки повністю залежить від параметрів течії вище по потоку. Враховуючи, що критичне сопло монтується у форкамеру, тобто умовно нескінченну ємність, то для моделювання вхідних граничних умов може використовуватись низьке значення інтенсивності турбулентності.

Інтенсивність турбулентності може бути оцінена за емпіричною формулою [92]:

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0,16(\text{Re})^{-1/8} \quad (2.50)$$

Значення масштабу довжини турбулентності l визначалось за емпіричною формулою Прандтля-Кармана [60]:

$$l = 0.07D, \quad (2.51)$$

де D – діаметр вхідного трубопроводу перед соплом.

Оцінка параметрів, що входять в $k - \varepsilon$ модель турбулентності проводилась за емпіричними формулами [91]:

– для кінетичної енергії турбулентності k :

$$k = \frac{3}{2}(\bar{v} \cdot I)^2, \quad (2.52)$$

де \bar{v} – середня швидкість потоку;

– швидкість турбулентної дисипації ε :

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (2.53)$$

В якості критеріїв збіжності рішення використовувалась умова мінімізації залишків змінних приблизно в чотири рази від початкових значень. В якості другого критерію розраховувався баланс мас на вході і на виході розрахункової області. За допустиме відхилення масових витрат на вході та виході розрахункової області приймалось відносне відхилення не більше 0,1 %.

В результаті чисельного моделювання будувались градієнтні розподіли тиску, швидкості та густини по перерізу критичного сопла. Також чисельно розраховувались значення статичних тисків вздовж осі та вздовж стінки сопла. В областях горловини сопла та переходу до надзвукової швидкості, а також в зоні стрибків ущільнення розраховувались профілі швидкостей для оцінювання товщини граничного шару і його взаємодії зі стрибком ущільнення.

На рис. 2.14 представлено результати чисельного моделювання коефіцієнта витoku критичного сопла в залежності від відношення тисків на соплі при двох значеннях абсолютного тиску на вході в сопло у порівнянні з результатами експериментальних досліджень. Як видно з рис. 2.14 результати чисельного моделювання узгоджуються з результатами експериментів, максимальне відхилення результатів моделювання від результатів експериментів не перевищує 0,20%, при невизначеності експериментальних даних не більше 0,20 %. Крім того розбіжність зумовлена тим, що чисельна модель не враховує параметри реального газу. Значення коефіцієнтів витoku для зручності представлення нормувались значенням коефіцієнта витoku при відношенні тисків 0,35 та вхідному тиску 100 кПа.

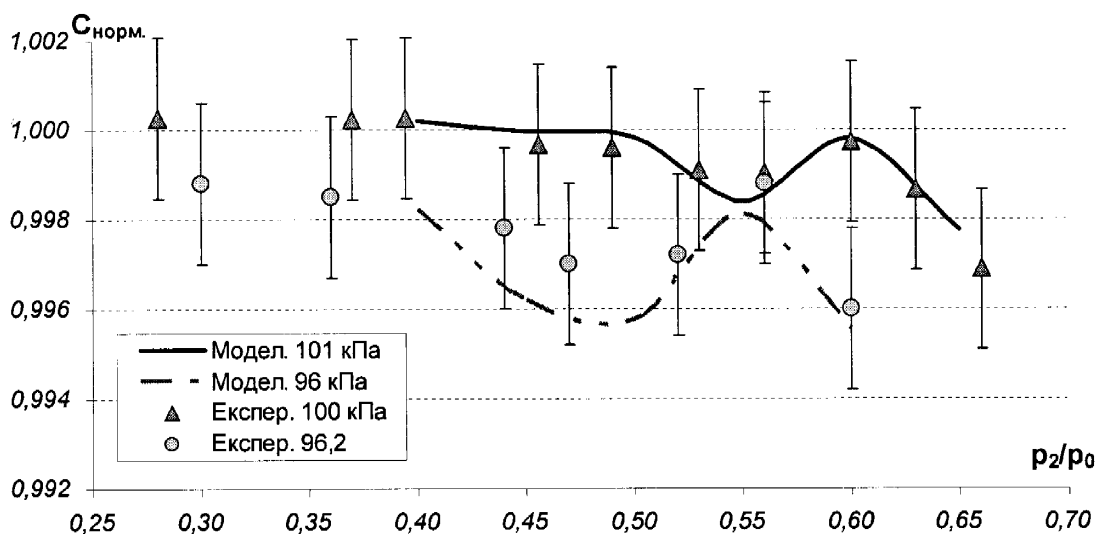


Рис. 2.14 Результати чисельного моделювання залежності нормованого коефіцієнта витoku критичного сопла від величини відношень тисків на соплі при різних абсолютних тисках на вході.

На рис. 2.15 та 2.16 представлено результати чисельного моделювання розподілів тиску по осі та біля стінки критичного сопла, відповідно. З рисунків очевидно, що в області переходу від вхідного конуса до горловини сопла біля стінки сопла наявна зона зворотного потоку, що проявляється падінням тиску, що зумовлено наявністю різкої грані між двома поверхнями. Також з графіку розподілу тиску по осі сопла очевидно, що в при критичному відношенні тисків рівному 0,55 амплітуда стрибка ущільнення більша ніж при інших значеннях відношень тисків і складає 51,3 кПа, а при значеннях відношення тисків 0,5 амплітуда стрибка тиску складає 46,8 кПа і при відношенні тисків 0,6 – 27,8 кПа, тобто при відношенні тисків 0,55 спостерігається локальний максимум стрибка тиску в дифузорі сопла.

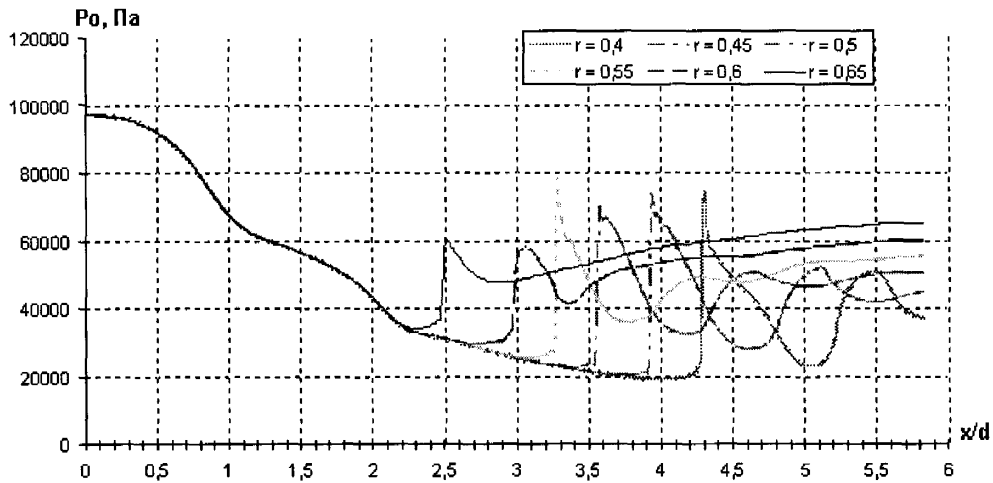


Рис. 2.15 Розподіли тисків по осі критичного сопла при різних значеннях відношення тиску на соплі

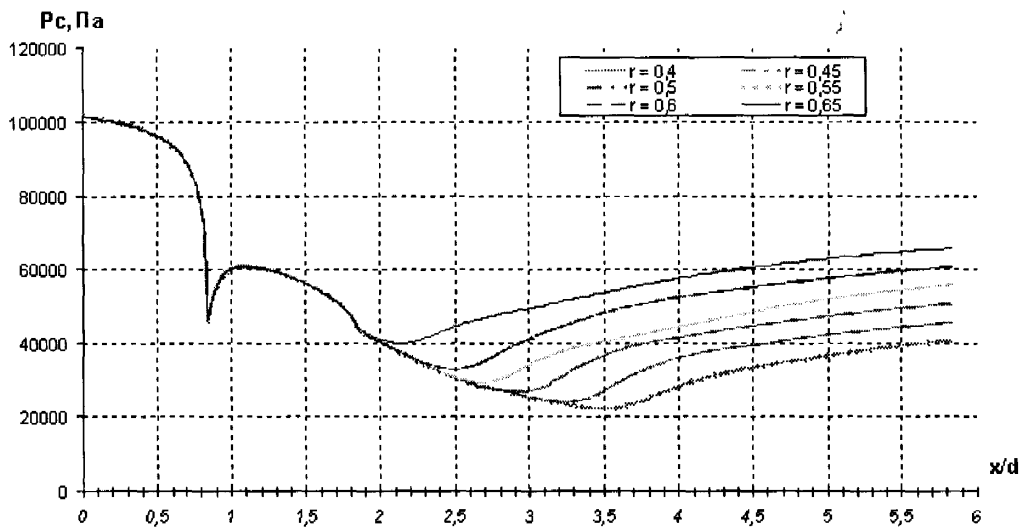


Рис. 2.16 Розподіл тисків біля стінки критичного сопла при різних значеннях відношення тиску на соплі

На рис. 2.17, 2.18 показані результати моделювання профілів швидкостей в перерізі переходу горловини сопла до дифузора при різних відношеннях тисків при відповідних значеннях тисків на вході в сопло. Як видно з рисунків при відношеннях тисків, при яких спостерігалось зниження коефіцієнта витoku величина осьової складової швидкості зменшується, як в ядрі потоку так і в пристінковій зоні та зростає товщина граничного шару, що зумовлюється переміщенням стрибка ущільнення ближче до горловини сопла, як можна бачити на рис. 2.15.

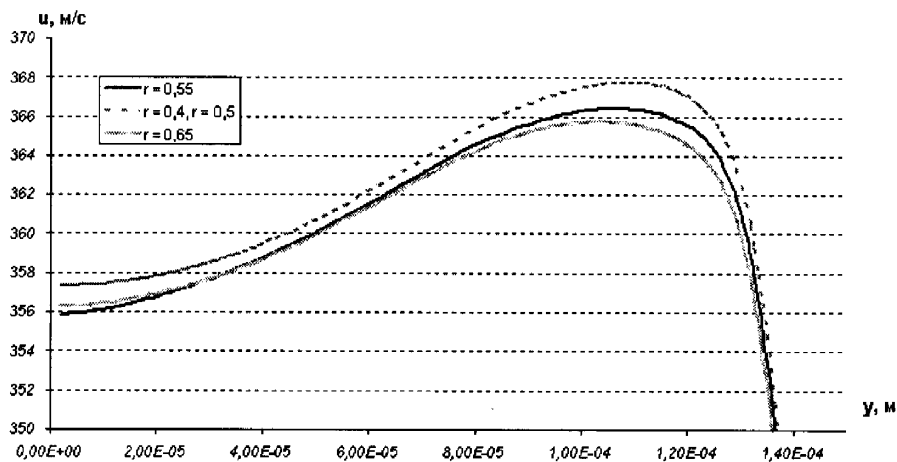


Рис. 2.17. Профілі швидкостей в перерізі переходу горловини сопла до дифузора при абсолютному тиску на вході сопла 101,325 кПа при різних значеннях відношення тисків на соплі

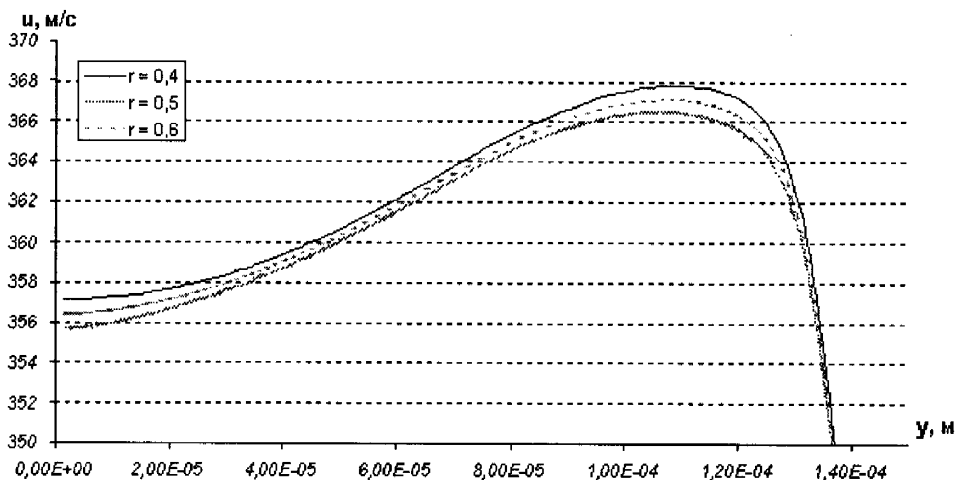


Рис. 2.18. Профілі швидкостей в перерізі переходу горловини сопла до дифузора при абсолютному тиску на вході сопла 96 кПа при різних значеннях відношення тисків на соплі

На рис. 2.19. – 2.22. зображені результати чисельного моделювання розподілів густини та чисел Маха по перерізу сопла для випадків зниження коефіцієнта витoku сопла при відповідних відношеннях тисків на критичному соплі. А на рис. 2.23, 2.24 зображені результати чисельного моделювання розподілів густини та чисел Маха по перерізу сопла при відношенні тисків 0,4 та входному тиску 101,325 кПа. На рис. 2.19 – 2.24 візуально видно структуру потоку та розподіл густини по перерізу критичного сопла. При відношенні тисків 0,4 та тиску на вході 101,325 кПа число Маха в соплі

досягає значення 1,75, а при відношенні тисків 0,55 та тиску на вході 101,325 кПа – 1,59 і при відношенні тисків 0,5 та вхідному тиску 96 кПа – 1,62.

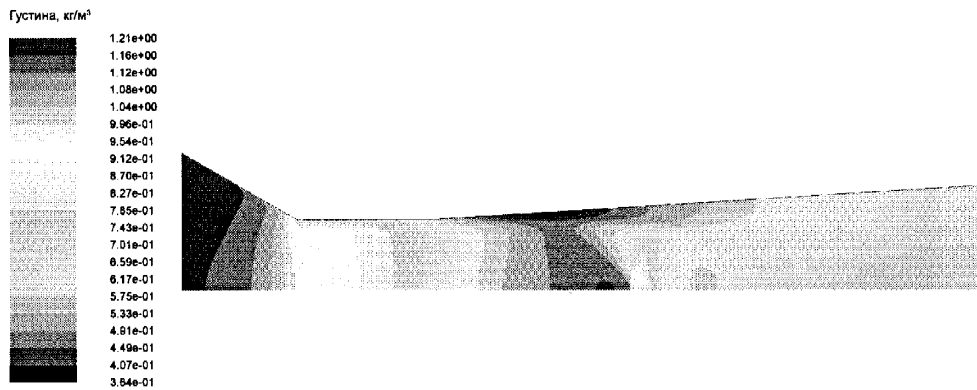


Рис. 2.19. Результат чисельного моделювання розподілу густини вимірюваного середовища по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,55 та тиску на вході 101,325 кПа

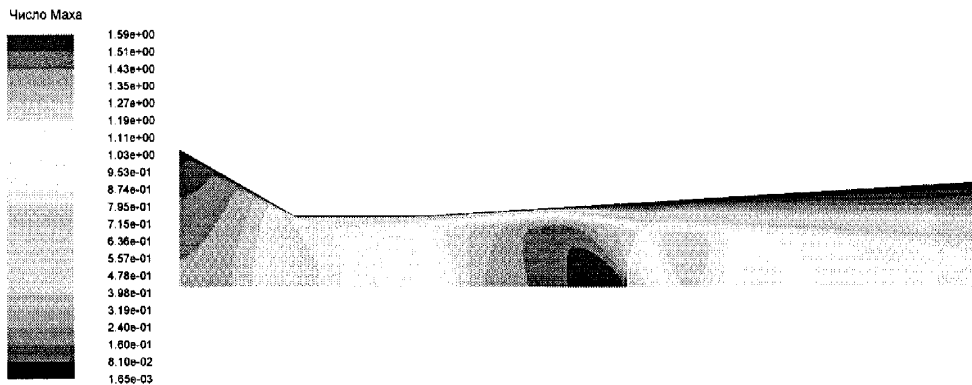


Рис. 2.20. Результат чисельного моделювання розподілу чисел Маха по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,55 та тиску на вході 101,325 кПа

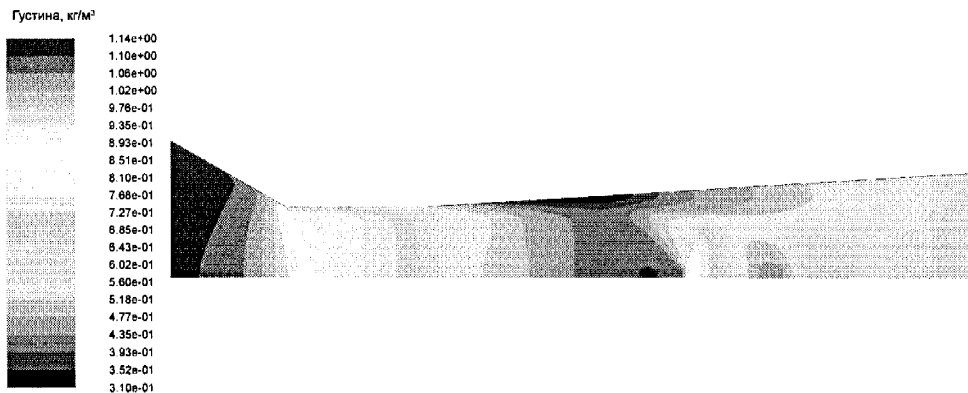


Рис. 2.21. Результат чисельного моделювання розподілу густини вимірюваного середовища по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,5 та тиску на вході 96 кПа

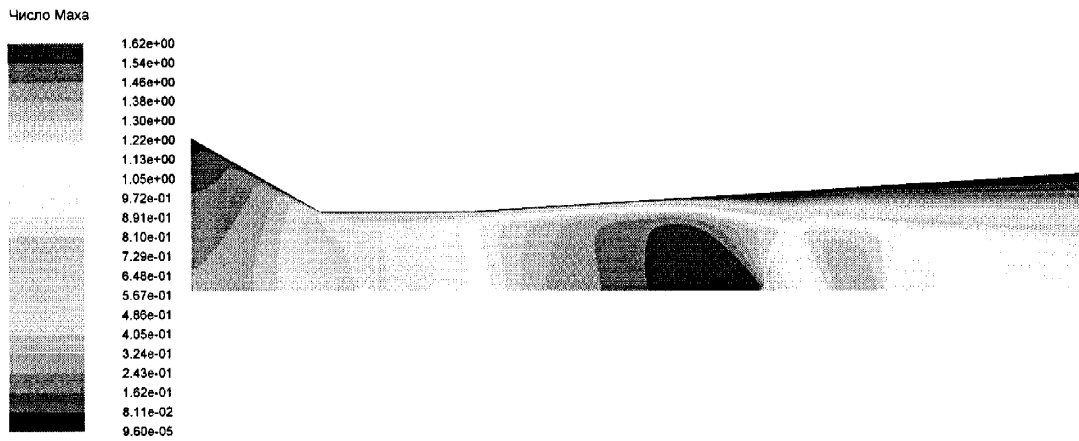


Рис. 2.22. Результат чисельного моделювання розподілу чисел Маха по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,5 та тиску на вході 96 кПа

З рис. 2.19 – 2.22 наглядно видно взаємодію стрибка ущільнення з граничним шаром в області переходу циліндричної горловини сопла у вихідний дифузор, в результаті чого товщина граничного шару в горловині сопла зростає у зв'язку з чим падає коефіцієнт витoku сопла при відповідних значеннях відношення тисків на соплі. При менших густинах вхідного потоку в соплі амплітуда стрибка ущільнення більша і відповідно більший вплив на граничний пристінковий шар.

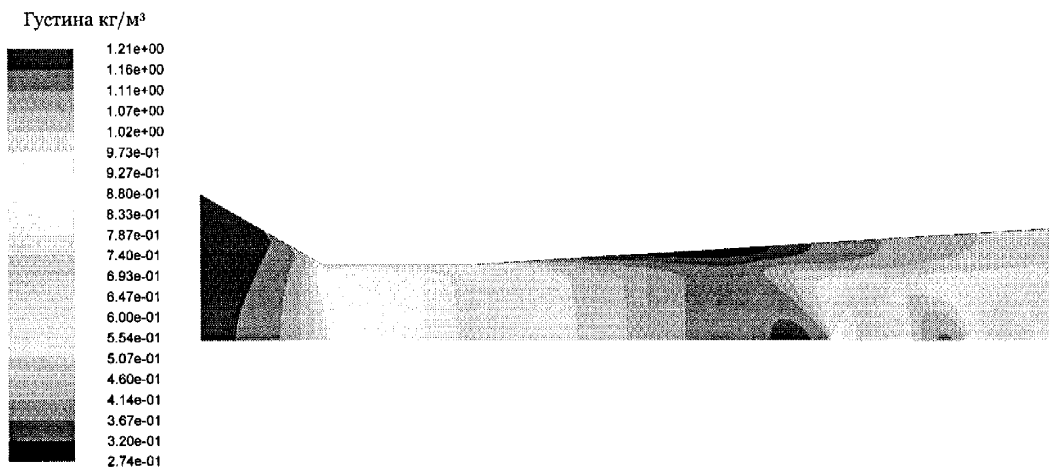


Рис. 2.23. Результат чисельного моделювання розподілу густини по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,4 та тиску на вході 101,325 кПа

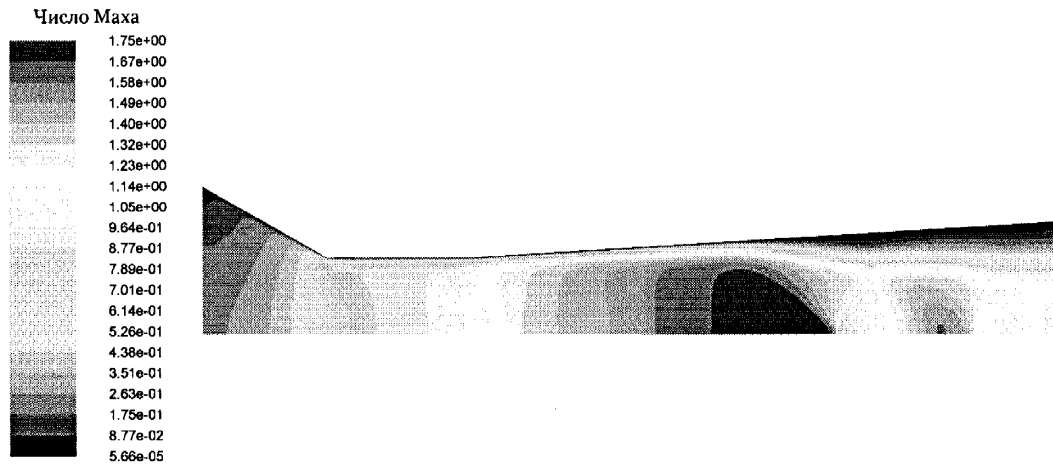


Рис. 2.24. Результат чисельного моделювання розподілу чисел Маха по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,4 та тиску на вході 101.325 кПа

Як вказується в [93] при числах Маха менше 1,3 і тонкому граничному шарі формується одиничний нормальний стрибок ущільнення. При вищих числах Маха і більшій товщині граничного шару взаємодія стрибка ущільнення з граничним шаром стає сильнішою і виникає кілька стрибків ущільнення.

Інтенсивність впливу граничного шару на форму та амплітуду стрибка ущільнення оцінюється рівнем звуження потоку, як пропонується в [94], який характеризується відношенням товщини незбуреного граничного шару δ до радіусу трубопроводу H . При зростанні рівня звуження зростає довжина ланцюга стрибків ущільнення, тобто зростає довжина зони взаємодії надзвукового потоку із граничним шаром.

За результатами чисельного моделювання можна зробити висновок, що ефект зниження величини коефіцієнта витoku критичного сопла в діапазоні відношень тисків на ньому від 0,4 до 0,55 зумовлений взаємодією стрибка ущільнення в дифузори сопла із граничним пристінковим шаром в дифузори на відстані $1,42d^* - 1,67d^*$ від горловини сопла. При цьому рівень звуження потоку дорівнює $\delta/H \approx 0,2$. При відношенні тисків менше 0,4 величина рівня звуження зменшується до 0,1, так як стрибок ущільнення зміщується в область дифузора, де радіус січення більший.

Таким чином, критичні сопла з діаметрами горловини менше 1 мм слід застосовувати при значеннях відношення тисків менше 0,4 або індивідуально визначати залежність коефіцієнта витoku від відношення тисків на соплі при різних тисках на вході сопла, тобто виводити залежності виду $C(p_{oi}) = f(p_2/p_0)$ для усунення систематичного відхилення, що може сягати 0,3% згідно результатів експериментальних досліджень (див. рис. 2.8 – 2.11, 2.14), яке виникає в результаті зниження коефіцієнта витoku, зумовленого взаємодією стрибка ущільнення з граничним шаром в дифузорі критичного сопла.

Висновки до другого розділу

1. Проаналізовано типові конструкції критичних сопел, які застосовуються у світовій та вітчизняній метрологічній практиці. Найбільш придатною конструкцією для застосування критичного сопла в якості еталона передавання є конструкція з тороїдальною горловиною.

2. Уточнено рівняння вимірювань та розроблено нові характеристики критичних сопел, для використання їх в якості еталонів передавання. Для забезпечення простежуваності еталонних установок, що працюють на повітрі при тиску близькому до атмосферного та для забезпечення найвищої точності при передаванні розміру одиниці об'ємної витрати найбільш доцільно використовувати градуовальний коефіцієнт критичного сопла K^* , а у випадку переходу на інше вимірюване середовище застосовувати градуовальний коефіцієнт сопла K . Застосування запропонованих характеристик дозволило вилучити вплив точності вимірювання діаметра горловини сопла, особливо для сопел з номінальним діаметром горловини менше 1 мм, на точність визначення витрати через сопло.

3. Удосконалено методологію розрахунку геометричних розмірів критичного сопла шляхом застосування уточненої емпіричної моделі коефіцієнта витoku критичного сопла у розширеному діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 56000. Адекватність розробленої емпіричної моделі коефіцієнта витoku перевірено експериментальним шляхом. Максимальне

відхилення розрахункових значень коефіцієнта витоку від результатів експерименту не перевищує 0,25%.

4. Проведено дослідження впливу величини відношення тисків на критичному соплі на величину його коефіцієнта витоку. За результатами досліджень виявлено ефект зниження коефіцієнта витоку в районі відношень тисків 0,40 до 0,55 для сопел різної конструкції, при чому за менших абсолютних тисків на вході в сопло і менших діаметрах горловини, величина ефекту зростає.

5. Здійснено чисельне моделювання впливу величини відношення тисків на критичному соплі на величину коефіцієнта витоку при різних значеннях відношення тисків на ньому. За результатами досліджень зроблено висновок, що ефект зниження величини коефіцієнта витоку критичного сопла в діапазоні відношень тисків на ньому від 0,40 до 0,55 зумовлений взаємодією стрибка ущільнення в дифузорі сопла із граничним пристінковим шаром в перехідній зоні між горловиною сопла та дифузором. На підставі результатів досліджень зроблено практичні рекомендації щодо застосування критичних сопел з діаметрами горловини менше 1 мм, а саме що їх слід застосовувати при значеннях відношення тисків менше 0,40 або індивідуально визначати залежність коефіцієнта витоку від відношення тисків на соплі при різних тисках на вході сопла.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ РОЗМІРУ ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ

На сьогодні простежуваність розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу реалізована не в повній мірі, так як немає методів забезпечення простежуваності державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 в діапазоні об'ємних витрат від $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ до $4 \text{ м}^3/\text{год}$. Із-за цього неможливо створити безперервний ланцюг простежуваності від державного первинного еталона до робочих засобів вимірювання. Для вирішення цієї проблеми розроблено ряд методів передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу для забезпечення простежуваності вимірювань у вказаному діапазоні витрат.

3.1 Розроблення методу передавання з використанням паралельного під'єднання критичних сопел

Для вирішення проблеми забезпечення прямої простежуваності до державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 вторинних та робочих еталонів в діапазоні витрат менших від $4 \text{ м}^3/\text{год}$ автором пропонується використовувати еталони передавання на базі двох паралельно під'єднаних критичних сопел [95]. Цей метод є можливим завдяки особливості критичного сопла створювати стабільну масову витрату газу конкретного значення для конкретного сопла при визначених параметрах ізоентропійно заторможеного газу.

Обґрунтуємо запропонований спосіб, виходячи з наступного.

Об'ємна витрата через сопло критичного витоку визначається за формулою (2.9). Як видно із (2.9), основними параметрами критичного сопла, що найбільше впливають на величину витрати сопла є коефіцієнт витоку C та площа перерізу горловини сопла S .

Коефіцієнт витoku сопла можна визначити шляхом його метрологічної атестації на еталоні об'єму та об'ємної витрати газу (див. рис. 3.1).

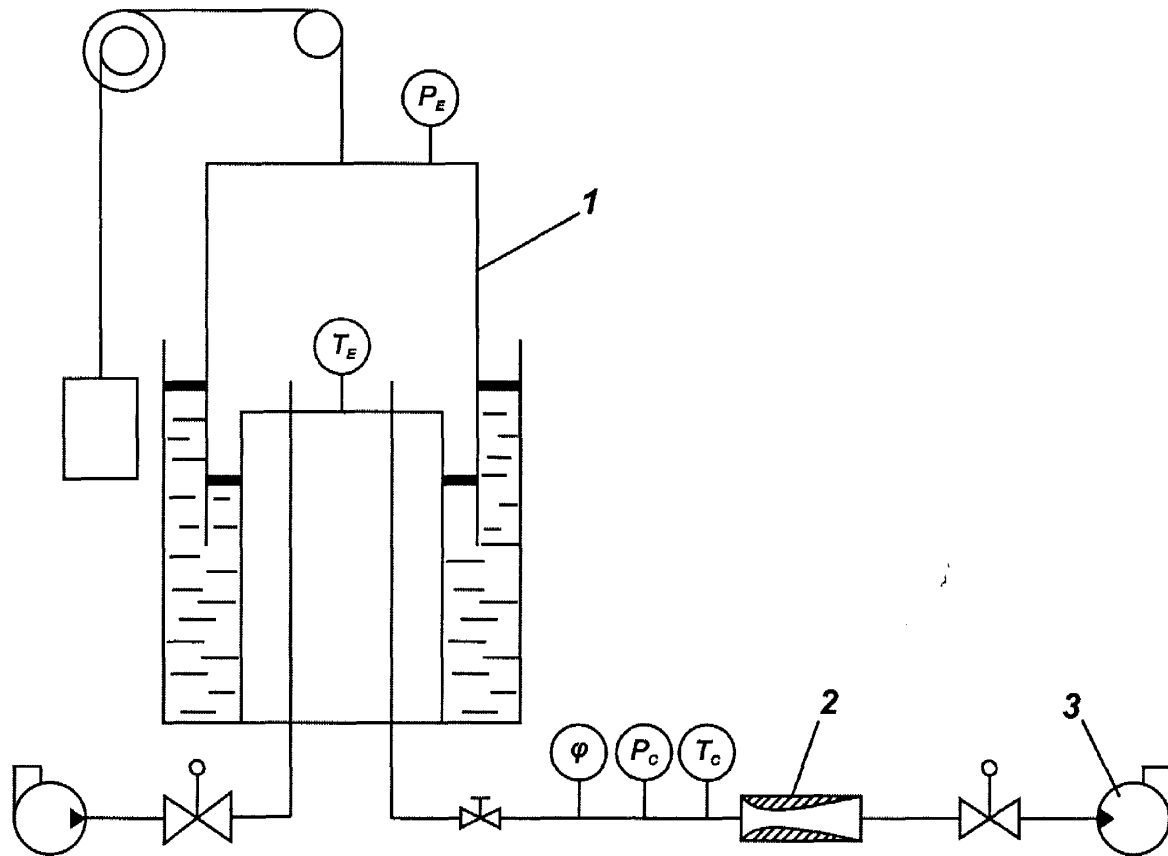


Рис. 3.1 Метрологічна атестація сопла критичного витoku газу на Державному первинному еталоні (1 – Державний первинний еталон; 2 – досліджуване критичне сопло; 3 – вакуумний насос)

Із врахуванням (2.13) коефіцієнт витoku визначається як:

$$C = \frac{q_E \cdot \rho_E}{S \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \sqrt{RT_0 \rho_0}}, \quad (3.1)$$

де q_E – об'ємна витрата через критичне сопло, відтворена державним первинним еталонем:

$$q_E = \frac{V_K}{t}, \quad (3.2)$$

де V_K – значення контрольного об'єму відтвореного первинним еталонем; t – час проходження контрольного об'єму.

Крім того коефіцієнт витoku можна визначити за розробленою емпіричною залежністю (2.25) або відомими аналітичними та емпіричними моделями [71–75,96].

Враховуючи властивість адитивності потоків, можна нарощувати значення об'ємної витрати шляхом паралельного включення сопел критичного витоку. Враховуючи те, що кожне критичне сопло створює тільки конкретне значення масової витрати при відповідних умовах на вході в сопло, можна використовувати критичні сопла для забезпечення простежуваності в сторону менших витрат.

При паралельному включенні двох критичних сопел до виходу первинного еталона параметри ізоентропійно заторможеного газу на вході в кожне сопло будуть очевидно однакові, тобто $P_{0-1} = P_{0-2}$ і $T_{0-1} = T_{0-2}$.

Слід відмітити, що ця умова виконуватиметься в повній мірі при під'єднанні двох критичних сопел в одну умовну нескінченну ємність, при цьому параметри ізоентропійно заторможеного газу будуть наближено, з високою точністю, рівні параметрам виміряним у цій ємності [37]. Отже, витрата через кожне сопло буде визначатися тільки коефіцієнтом витоку C та площею перерізу горловини сопла S , як згадувалось вище.

З умови балансу мас, масова витрата через два паралельно під'єднаних критичних сопла визначається як сума масових витрат через кожне сопло:

$$q_{m\Sigma} = q_{m1} + q_{m2} \quad (3.3)$$

Із врахуванням того, що тиски та температури на вході двох сопел однакові, а отже однакові густини повітря перед кожним соплом, то з рівнянь (2.9) та (3.3), об'ємна витрата через два паралельно під'єднані сопла визначатиметься наступним чином [95]:

$$q_{v\Sigma} = q_{v1} + q_{v2} = C_1 S_1 C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} \cdot T_0} + C_2 S_2 C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} \cdot T_0} \quad (3.4)$$

Із рівнянь (2.9) та (3.4) відношення витрати одного з сопел до сумарної витрати визначатиметься як:

$$\frac{q_{v1}}{q_{v\Sigma}} = \frac{C_1 S_1}{C_1 S_1 + C_2 S_2} \quad (3.5)$$

Із врахуванням, що $S = \frac{\pi d^2}{4}$, отримаємо:

$$\frac{q_{v1}}{q_{v\Sigma}} = \frac{C_1 d_1^2}{C_1 d_1^2 + C_2 d_2^2} = \frac{1}{1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}} \quad (3.6)$$

Номінальне значення об'ємної витрати для кожного сопла визначається за наступними формулами [97]:

$$q_{v1} = \frac{q_{v\Sigma}}{1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}}; \quad q_{v2} = \frac{q_{v\Sigma}}{1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}} \quad (3.7)$$

З рівнянь (3.7) очевидно, що для забезпечення простежуваності державного первинного еталона за значень витрати менших за мінімальну відтворювану ним, можна використовувати сопла різних номіналів з різним співвідношенням діаметрів горловин, при цьому сума витрат повинна бути рівна мінімальній витраті державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96.

Очевидно, що при під'єднанні паралельно двох сопел з однаковими діаметрами горловин, витрата через кожне сопло буде рівна половині сумарної.

Описаний метод перевірявся на вторинному еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08 з діапазоном відтворюваних витрат від 0,016 до 16 м³/год і розширеною невизначеністю вимірювань $U = \pm 0,15\%$, при $k = 2$, $P = 0,95$.

Дослідження проводилось з використанням двох критичних сопел з тороїдальною горловиною з високою точністю обробки внутрішніх поверхонь виробництва фірми „Justur s.r.o.”, Словацька Республіка, з діаметрами горловини 2,688 мм та 1,888 мм і 0,835 мм та 0,335 мм.

Спочатку критичні сопла досліджувались окремо, а потім при паралельному їх підключенні.

Результати досліджень наведено в таблицях 3.1 та 3.2.

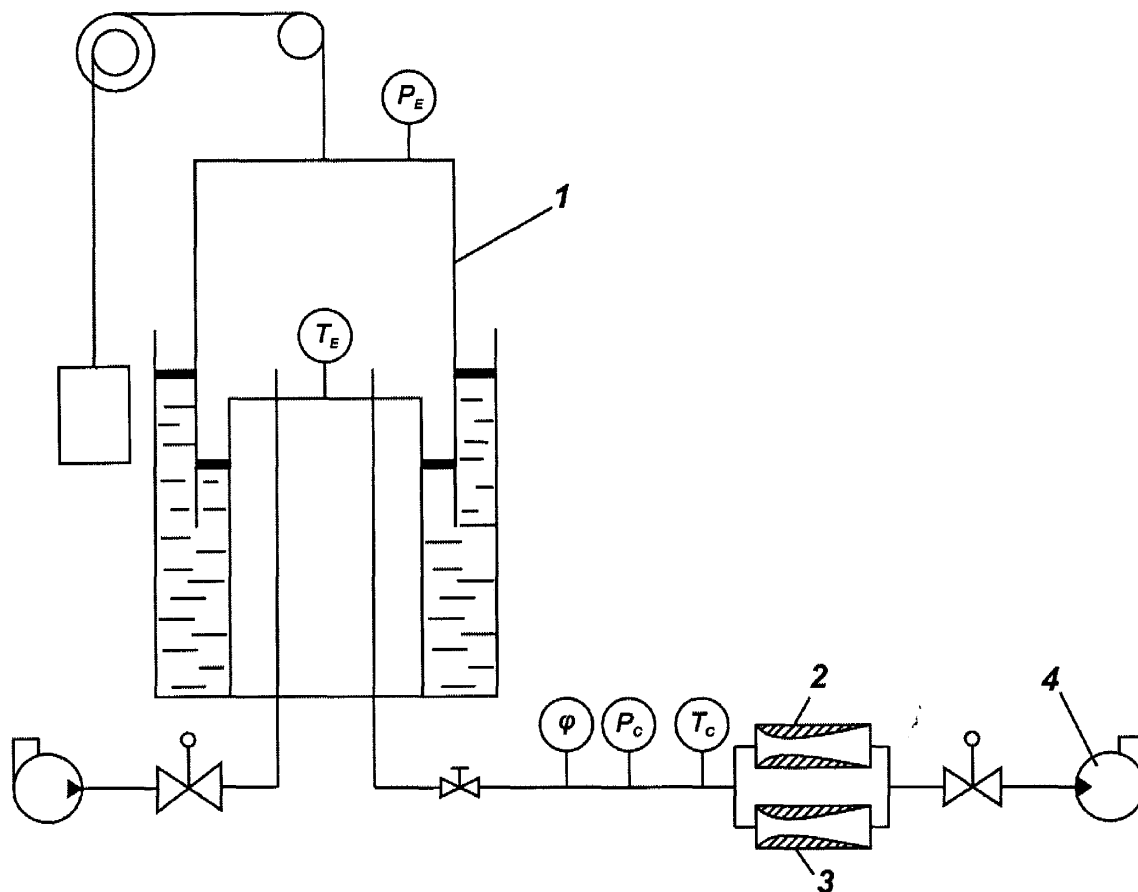


Рис. 3.2 Метрологічна атестація паралельно включених сопел критичного витoku газу на Державному первинному еталоні (1 – Державний первинний еталон; 2, 3 – досліджувані критичні сопла; 4 – вакуумний насос)

Таблиця 3.1 Результати експериментальних досліджень критичних сопел з діаметрами горловин 2,688 мм та 1,888 мм

№ сопла	d , мм	$q_{\text{урозд}}$, м ³ /ГОД	$q_{\text{впар.}}$, м ³ /ГОД	δ , %
1	2,688	3,99876	3,99790	-0,020
2	1,888	1,96814	1,96911	0,050
q_{Σ} , м ³ /ГОД		5,96690	5,96701	0,002

Таблиця 3.2 Результати експериментальних досліджень критичних сопел з діаметрами горловин 0,835 мм та 0,335 мм

№ сопла	d , мм	$q_{\text{урозд}}$, м ³ /ГОД	$q_{\text{впар.}}$, м ³ /ГОД	δ , %
1	0,835	0,383418	0,382912	-0,13
2	0,335	0,0598505	0,060068	0,36
q_{Σ} , м ³ /ГОД		0,4432685	0,44298	-0,07

Відхилення значень номінальних витрат сопел визначених при роздільному дослідженні і при паралельному підключенні визначались за формулами:

$$\delta_1 = \frac{q_{v1нар.} - q_{v1розд}}{q_{v1розд}} \cdot 100$$

$$\delta_2 = \frac{q_{v2нар.} - q_{v2розд}}{q_{v2розд}} \cdot 100$$

Розглянутий метод реалізується шляхом градуювання двох критичних сопел, для яких відомі тільки діаметри їх горловин. Іншим варіантом реалізації описаного методу забезпечення простежуваності від державного первинного еталона до об'ємних витрат нижче мінімальної ним відтворюваної є метод аналогічний до запропонованого за відмінністю того, що одне із сопел атестоване попередньо на державному первинному еталоні за номінальної витрати $4 \text{ м}^3/\text{год}$ і йому присвоєно значення об'ємної витрати за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря 0% – $q_{v1,20^\circ\text{C},0\%}$.

Далі критичні сопла під'єднують до державного первинного еталона (див. рис. 3.2) і проводиться визначення об'ємної витрати за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря 0% для пари сопел – $q_{v\Sigma,20^\circ\text{C},0\%}$, яка обчислюється за формулою (2.19).

Враховуючи властивість адитивності потоків визначаємо значення об'ємної витрати за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря 0% для другого критичного сопла [97]:

$$q_{v2,20^\circ\text{C},0\%} = q_{v\Sigma,20^\circ\text{C},0\%} - q_{v1,20^\circ\text{C},0\%} \quad (3.8)$$

Перевірку проведено за результатами досліджень на вторинному еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08, що наведені в таблиці 3.1. Звідки отримуємо:

$$q_{v1,20^\circ\text{C},0\%} = 3,99876 \text{ м}^3/\text{год}; \quad q_{v\Sigma,20^\circ\text{C},0\%} = 5,96864 \text{ м}^3/\text{год}.$$

$$q_{v2,20^\circ\text{C},0\%} = q_{v\Sigma,20^\circ\text{C},0\%} - q_{v1,20^\circ\text{C},0\%} = 5,96701 - 3,99876 = 1,96825 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Відхилення значення витрати отриманої другим варіантом методу від значення отриманого при індивідуальній атестації другого критичного сопла на вторинному еталоні становила:

$$\delta = \frac{q_{v2,20^{\circ}\text{C},0\%} - q_{v2\text{розд}}}{q_{v2\text{розд}}} \cdot 100 = 0,01 \%,$$

що співпадає із результатами наведеними в таблиці 3.1.

При використанні характеристики критичного сопла у вигляді градуувального коефіцієнта (2.16) [67], можна застосовувати третій варіант описаного методу, при якому одне сопло попередньо градуується на первинному еталоні і йому присвоюється значення градуувального коефіцієнта K та об'ємна витрата за (2.19), тоді для другого невідомого сопла значення градуувального коефіцієнта визначатиметься із врахуванням (3.5) наступним чином:

$$K_2 = K_1 \left(\frac{q_{v\Sigma}}{q_{v1}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Звідки об'ємна витрата для невідомого сопла із врахуванням (2.9) запишеться як:

$$q_{v2} = K_1 \left(\frac{q_{v\Sigma}}{q_{v1}} - 1 \right) \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} \cdot T_0} \quad (3.10)$$

Перевагою застосування цього варіанту методу є виключення впливу точності вимірювання діаметра горловини сопла із загального бюджету невизначеності, враховуючи те, що вимірювання діаметрів на сьогодні можливе з абсолютною похибкою 1 мкм.

Апробація третього варіанту розробленого методу проведено з використанням вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08. Результати апробації наведено в таблицях 3.3 та 3.4

Таблиця 3.3 Результати експериментальних досліджень критичних сопел з діаметрами горловин 0,835 мм та 0,335 мм

№ сопла	d , мм	$q_{\text{врод.}}$, м ³ /ГОД	$q_{\text{впар.}}$, м ³ /ГОД	δ , %
1	0,835	0,383418	0,383418	0,00
2	0,335	0,0598505	0,059771	-0,13
$q_{\text{вс.}}$, м ³ /ГОД		0,4432685	0,44298	-0,07

Таблиця 3.4 Результати експериментальних досліджень критичних сопел з діаметрами горловин 1,196 мм та 0,335 мм

№ сопла	d , мм	$q_{\text{врод.}}$, м ³ /ГОД	$q_{\text{впар.}}$, м ³ /ГОД	δ , %
1	1,196	0,784029	0,784029	0,00
2	0,335	0,0598505	0,059879	0,05
$q_{\text{вс.}}$, м ³ /ГОД		0,8438795	0,846720	0,003

З отриманих результатів експериментальної перевірки запропонованого методу очевидним є те, що відхилення номінальних значень об'ємних витрат визначених при їх роздільному і паралельному дослідженнях, не перевищує невизначеності експериментальних даних. Це дозволяє стверджувати про адекватність запропонованого методу градування критичних сопел, номінальні значення витрат яких менші за нижню границю відтворюваних витрат первинного еталона.

Простежуваність до державного первинного еталона в діапазоні витрат нижче 4 м³/год згідно описаного методу реалізується в наступній послідовності. При реалізації першого варіанту розробленого методу спершу вимірюються діаметри горловин двох сопел. Далі розраховують за (3.6) співвідношення витрати кожного сопла до сумарної витрати. Потім проводять градування паралельно з'єднаних сопел на первинному еталоні і визначають сумарну витрату для пари сопел згідно (2.19). На наступному етапі розраховують значення номінальних витрат для кожного сопла за (3.7). Відградувані на державному первинному еталоні сопла використовують для передавання розміру одиниці об'ємної витрати з використанням методу

звірення з використанням компаратора, тобто критичне сопло використовують в якості компаратора [57].

Другий варіант реалізується в наступній послідовності. Спершу одне сопло градується на державному первинному еталоні і йому присвоюється характеристика об'ємної витрати приведеної до 20°C та відносної вологості 0% (3.9) або ж значення ефективної площі критичного перерізу.

Далі попередньо відградуйоване сопло з'єднується паралельно із невідомим соплом і визначається сумарна витрата через два сопла за (2.19).

Далі розраховують витрату невідомого сопла або визначають градувальний коефіцієнт другого сопла за (3.9). Відградуйоване на державному первинному еталоні сопло аналогічно використовують для передавання розміру одиниці об'ємної витрати з використанням методу звірення з використанням компаратора [57].

Для забезпечення простежуваності вимірювань при застосуванні описаних вище варіантів реалізації розробленого методу передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу з використанням паралельного під'єднання критичних сопел необхідно додатково проаналізувати бюджет невизначеностей кожного із способів.

3.1.1 Метрологічний аналіз методу з використанням паралельного під'єднання критичних сопел

Метою метрологічного аналізу є розроблення алгоритму оцінювання невизначеності вимірювання згідно розробленої математичної моделі та визначення найбільш вагомих впливових величин, що чинять найбільш суттєвий вплив на величину сумарної невизначеності вимірювань.

Бюджет невизначеності методу складається на основі рівняння вимірювання.

Проаналізуємо кожен із варіантів розробленого методу.

Для першого варіанту рівняння вимірювання (3.7).

Основними параметрами, що вимірюються є діаметри горловин двох сопел та сумарна об'ємна витрата через два критичних сопла.

Складові, що визначаються шляхом вимірювання, мають невизначеність, що складається із невизначеності засобу вимірювання, за допомогою якого проводилось вимірювання та із невизначеності зумовленої повторюваністю результатів вимірювання, тобто:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{u_{зв}^2}{3} + \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.11)$$

де $u_{зв}$ – засобу вимірювання, за допомогою якого проводилось вимірювання, n – кількість повторних вимірювань.

Так невизначеність вимірювання діаметрів горловин визначається точністю засобу вимірювання лінійних розмірів, у нашому випадку використовується мікроскоп універсальний УИМ-23 з границями абсолютної похибки ± 1 мкм.

Проаналізуємо невизначеність вимірювання сумарної приведенної об'ємної витрати газу через пару критичних сопел з'єднаних паралельно.

При аналізі вважаємо, що всі вхідні величини є некорельованими. Тоді сумарна стандартна невизначеність визначається як,

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}, \quad (3.12)$$

де $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ – часткова похідна рівняння вимірювання по вхідній величині x_i ,

яку ще часто називають внеском вхідної величини у сумарну невизначеність, m – кількість вхідних величин.

При суттєво нелінійних рівняннях вимірювання доволі складно виразити часткові похідні, тому можливо скористатися іншим методом, а саме числовим методом, який дозволяє спростити розрахунки [98].

Суть цього методу полягає у розрахунку різницевих функцій:

$$\Delta_i f = f(x_1, \dots, x_i + u(x_i)/2, \dots, x_m) - f(x_1, \dots, x_i - u(x_i)/2, \dots, x_m); \quad (i = 1, \dots, m) \quad (3.13)$$

Звідки,

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta_i f)^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m (\Delta_i f)(\Delta_k f) r(x_i, x_k)} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт кореляції визначається, як:

$$r(x_i, x_k) = \frac{u(x_i, x_k)}{u(x_i)u(x_k)} = \frac{S(x_i, x_k)}{S(x_i)S(x_k)} \quad (3.15)$$

Для некорельованих величин:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta_i f)^2} \quad (3.16)$$

У випадку визначення невизначеності сумарної приведенної витрати q_{Σ} скористаємось методом часткових похідних.

Рівняння сумарної об'ємної витрати в загальному вигляді можна записати як:

$$Y = \alpha \cdot \prod_{i=1}^N X_i^{\beta_i}, \quad (3.17)$$

оцінка якого розраховується згідно рівняння:

$$y = \alpha \cdot \prod_{i=1}^N x_i^{\beta_i} \quad (3.18)$$

Звідси,

$$\begin{aligned} u^2(y) &= \sum_{i=1}^N \left(\alpha \cdot \beta_i \cdot X^{\beta_i-1} \cdot \prod_{j=1}^N X_j^{\beta_j} \Big|_{x_1, \dots, x_N} \right)^2 \cdot u^2(x_i) = \\ &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha \cdot \beta_i}{x_i} \cdot \prod_{j=1}^N x_j^{\beta_j} \right)^2 \cdot u^2(x_i) = y^2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\beta_i}{x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) = \\ &= y^2 \cdot \sum_{i=1}^N (\beta_i)^2 \cdot u_{відн.}^2(x_i) \end{aligned} \quad (3.19)$$

i

$$u_{відн.}^2(y) = \sum_{i=1}^N (\beta_i)^2 \cdot u_{відн.}^2(x_i) \quad (3.20)$$

Згідно (3.20) для сумарної приведенної об'ємної витрати сумарна стандартна невизначеність у відносній формі визначатиметься за наступним виразом:

$$u_{відн.}^2(q_{v\Sigma}) = u_{відн.}^2(\rho_e) + u_{відн.}^2(\rho_0) + \left(\frac{0.169 \cdot x_v}{1 + 0.169 \cdot x_v} \right)^2 \cdot u_{відн.}^2(x_v) + \frac{1}{4} \cdot u_{відн.}^2(T_0) + u_{відн.}^2(q_e) \quad (3.21)$$

З отриманого виразу, очевидно, що найбільш вагомими джерелами невизначеності сумарної витрати є невизначеність визначення густини газу та об'ємної витрати, що відтворюється еталоном, за допомогою якого градууються критичні сопла.

Враховуючи, що державний первинний еталон ДЕТУ 03-01-96 відтворює об'ємну витрату газу з невизначеністю 0,1% і з врахуванням невизначеностей визначення густин газу та молярної частки водяної пари за результатами вимірювання температури та тиску засобами вимірювання, що входять до складу ДЕТУ 03-01-96 можна стверджувати, що розширена невизначеність вимірювання сумарної приведеної об'ємної витрати для пари критичних сопел не перевищуватиме 0,16%.

Далі визначимо коефіцієнти впливу по кожній вхідній величині, що входить в рівняння (3.7):

- для першого критичного сопла q_{v1} :

$$\frac{\partial q_{v1}}{\partial q_{v\Sigma}} = \frac{1}{1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}}$$

$$\frac{\partial q_{v1}}{\partial C_1} = \frac{q_{v\Sigma}}{\left(1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}\right)^2} \frac{C_2 d_2^2}{C_1^2 d_1^2}$$

$$\frac{\partial q_{v1}}{\partial C_2} = -\frac{q_{v\Sigma}}{\left(1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}\right)^2} \frac{d_2^2}{C_1 d_1^2}$$

$$\frac{\partial q_{v1}}{\partial d_1} = \frac{2q_{v\Sigma}}{\left(1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}\right)^2} \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^3}$$

$$\frac{\partial q_{v1}}{\partial d_2} = \frac{-2q_{v\Sigma} C_2 d_2}{\left(1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}\right)^2 C_1 d_1^2}$$

- для другого критичного сопла q_2 :

$$\frac{\partial q_{v2}}{\partial q_{v\Sigma}} = \frac{1}{1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}}$$

$$\frac{\partial q_{v2}}{\partial C_1} = -\frac{q_{v\Sigma}}{1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}} \cdot \frac{d_1^2}{C_2 d_2^2}$$

$$\frac{\partial q_{v2}}{\partial C_2} = \frac{q_{v\Sigma}}{\left(1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}\right)^2} \cdot \frac{C_1 d_1^2}{C_2^2 d_2^2}$$

$$\frac{\partial q_{v2}}{\partial d_1} = -\frac{2 \cdot q_{v\Sigma}}{1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}} \cdot \frac{C_1 d_1}{C_2 d_2^2}$$

$$\frac{\partial q_{v2}}{\partial d_2} = \frac{2 \cdot q_{v\Sigma}}{\left(1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}\right)^2} \cdot \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^3}$$

Так як коефіцієнти витoku критичних сопел приблизно дорівнюють одиниці і розраховуються за однією і тією ж моделлю, для спрощення розрахунків приймаємо $C_1 = C_2 \approx 1$.

При градуванні двох критичних сопел з однаковими діаметрами горловин невизначеність номінального значення приведеної витрати для кожного сопла при невизначеності сумарної витрати 0,16% становитиме 0,20% при сумарній витраті рівній 4 м³/год.

При умові, що $d_2 < d_1$, очевидно, що невизначеність q_2 буде більшою, тому виведемо формулу для оцінки цієї невизначеності.

Враховуючи вагові коефіцієнти, а також те, що невизначеність вимірювання діаметрів горловин в абсолютному вираженні однакова для обох сопел, отримаємо:

$$u_{abc.}(q_{v2}) = \sqrt{\left(u_{abc.}(q_{v\Sigma}) \cdot \frac{1}{1 + \frac{d_1^2}{d_2^2}} \right)^2 + u^2(d) \cdot 4 \cdot q_{v\Sigma}^2 \cdot \frac{d_1^2 \cdot d_2^2}{(d_1^2 + d_2^2)^3} + \left(u(C) \cdot \frac{q_{v\Sigma} \cdot d_1^2}{\left(1 + \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) d_2^2} \right)^2} \quad (3.22)$$

У відносному вираженні невизначеність вимірювання витрати другого сопла визначається як:

$$u_{відн.}(q_{v2}) = \frac{u_{abc.}(q_{v2})}{q_{v2}} \cdot 100 \quad (3.23)$$

Для випадку коли сумарна витрата дорівнює мінімальній витраті відтворюваній державним первинним еталоном, тобто дорівнює 4 м³/год. Діаметр першого критичного сопла прийемо рівним 2,9 мм. Приймаючи гранично допустимою невизначеністю для витрати другого критичного сопла рівною 0,3%, отримаємо, що максимально допустиме відношення діаметрів двох сопел при використанні першого варіанту описаного методу складає 1:2.

Це обмежує застосування цього методу так як дозволяє забезпечити простежуваність із прийнятною точністю фактично тільки до витрати 2 м³/год.

Проаналізуємо точність варіанту методу, що описується формулами (3.9) та (3.10).

Враховуючи підхід до оцінювання невизначеності описаний формулами (3.12-3.20) отримаємо наступне співвідношення для оцінювання невизначеності масової витрати для другого невідомого сопла:

$$u_{відн.}^2(q_{v2}) = u_{відн.}^2(K) + u_{відн.}^2(q_{v\Sigma}) + u_{відн.}^2(q_{v1}) + u_{відн.}^2(P_0) + \frac{1}{4} \cdot u_{відн.}^2(T_0) + u_{відн.}^2(C^*) + u_{відн.}^2(\rho) \quad (3.24)$$

Підставляючи граничні оцінки невизначеностей, за умови використання державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96, у (3.24) отримаємо:

$$u_{\text{відн.}}(q_{v2}) = \sqrt{\frac{0.12^2 + 0.12^2 + 0.12^2 + 0.01^2 + (0.25 \cdot 0.034)^2}{+0.1^2 + 0.06^2}} = 0,24 \%$$

Отже застосування третього варіанту методу з використанням паралельного під'єднання критичних сопел дозволяє отримати кращі показники точності при відсутності обмеження співвідношення діаметрів горловин для досліджуваних сопел.

Описаний метод в обох варіантах на сьогодні впроваджений в метрологічну практику для забезпечення простежуваності вимірювань в діапазоні витрат нижче мінімальної відтворюваної державним первинним еталоном ДЕТУ 03-01-96, а саме нижче 4 м³/год. Технічно метод реалізується з використанням мобільної еталонної установки TZKD-16, яка входить до складу пересувної лабораторії для забезпечення простежуваності (див. рис. 3.3)[99].

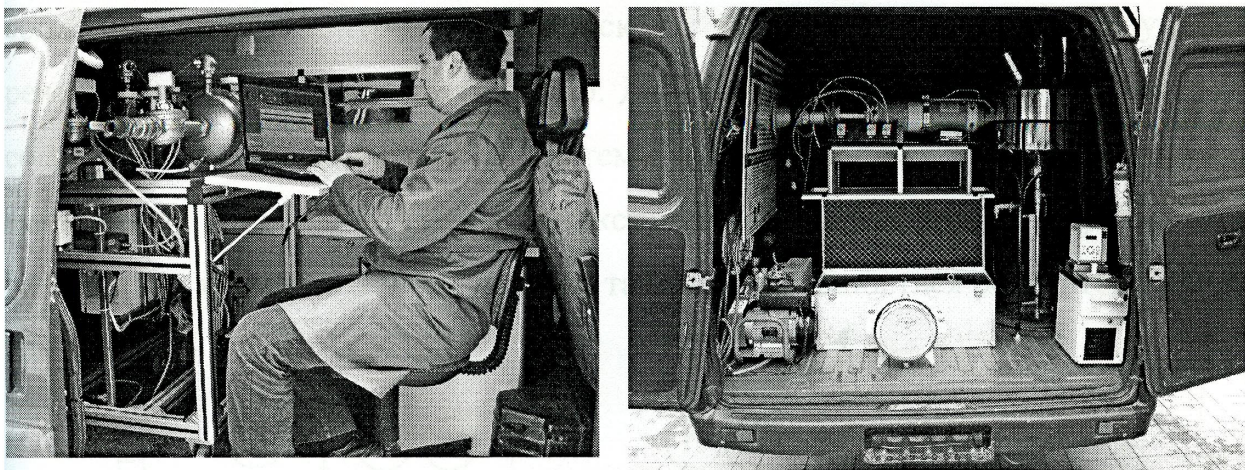


Рис. 3.3 Зовнішній вигляд пересувної лабораторії для забезпечення простежуваності

3.2 Удосконалення методу передавання з використанням послідовного під'єднання критичних сопел

Для вирішення проблеми пов'язаної із обмеженістю методу описаного в пункті 3.1 дисертаційної роботи, а отже і для підвищення точності і достовірності результатів калібрування пропонується калібрувати критичні

сопла за допомогою інших критичних сопел більшого номіналу [45, 100] попередньо каліброваних на державному первинному еталоні шляхом їх послідовного з'єднання. Проте недоліком відомого методу є вплив точності вимірювання діаметрів горловин критичних сопел на точність вимірювання об'ємної витрати.

Критичне сопло, що використовується в якості компаратора перед застосуванням для калібрування невідомого критичного сопла калібрується на державному первинному еталоні. При цьому в схему досліджень опорного сопла додатково вводиться регулятор тиску перед соплом для визначення залежності характеристики критичного сопла від тиску на його вході (рис. 2.4). Метод реалізується шляхом послідовного під'єднання критичних сопел з різними діаметрами горловин (див. рис. 3.4). Перед кожним із сопел вимірюються тиск та температура вимірюваного середовища, а після другого сопла додатково контролюється тиск на його виході для відстежування режиму витікання через друге сопло. Для визначення залежності параметрів сопла від тиску на вході в систему встановлюється регулятор тиску, аналогічно для визначення максимально допустимого критичного відношення тисків на виході системи також встановлюється регулятор тиску.

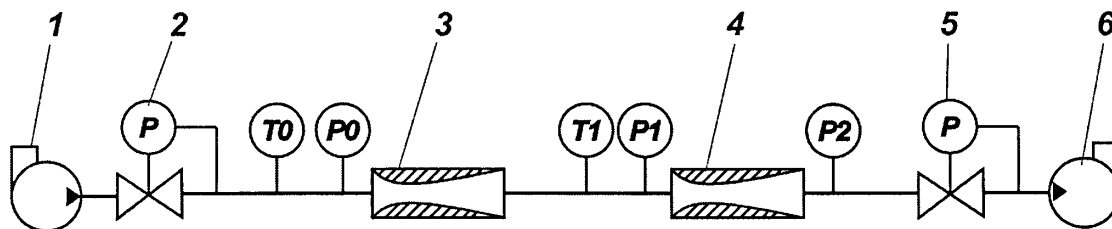


Рис. 3.4 Схема реалізації методу калібрування критичного сопла за допомогою опорного критичного сопла

Відстань між соплами вибирається з умови відсутності впливу першого сопла на друге із-за струминного потоку на виході першого сопла і повинна становити не менше $10D$, де D – діаметр трубопроводу, в який монтується перше критичне сопло.

Для виведення рівняння вимірювання запишемо баланс мас для представленої системи:

$$q_{m1} = q_{m2} = \frac{C_1 C^* S_1 P_0}{\sqrt{RT_0}} = \frac{C_2 C^* S_2 P_1}{\sqrt{RT_1}} \quad (3.27)$$

Звідси [45, 100],

$$C_2 = C_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad (3.28)$$

Для усунення впливу точності вимірювання діаметра горловини автором запропоновано застосовувати у якості вихідної метрологічної характеристики критичного сопла градувального коефіцієнта (2.16) [67], тоді рівняння (3.28) переписеться в наступному вигляді:

$$K_2 = K_1 \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad (3.29)$$

Коли перше сопло працює в критичному режимі витікання, масова витрата через всю систему постійна. Тому, масова витрата через друге сопло також буде постійною незалежно від того чи друге сопло працює при критичному режимі чи ні. Зменшуючи тиск на виході другого сопла досягається критичний режим витікання через друге сопло.

Приймаючи коефіцієнти витікання двох сопл рівними одиниці $C_1 = C_2 \approx 1$, а також при умові адіабатичного процесу $T_1 \approx T_2$ отримаємо:

$$\frac{P_1}{P_0} \approx \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2. \quad (3.30)$$

Звідси, для досягнення критичного режиму витікання через перше сопло повинна виконуватись умова:

$$\frac{d_1}{d_2} \leq \sqrt{r_{\max}^*}. \quad (3.31)$$

Перевагою удосконаленого методу є те, що для його застосування немає обмеження за допустимим відношенням номінальних витрат критичних сопл, як для методу описаному в підрозділі 3.1.

Реалізація розробленого автором методу можлива з використанням розробленого за участю автора блоку монтажу критичних сопл [101]. При

цьому в блок монтажу критичних сопел монтується досліджуване критичне сопло, а на вхід блоку монтується опорне критичне сопло.

Важливою особливістю удосконаленого методу є можливість з його допомогою визначати градувальну характеристику критичного сопла, як функції вхідного тиску та відношення тисків на соплі. Крім того, використання цього методу дозволяє здійснювати передавання розміру одиниці об'ємної витрати отриманої від державного первинного еталона до еталонів, що працюють на тиску вищому за атмосферний [66] тільки при цьому опорне сопло розміщується після досліджуваного і завжди працює в діапазоні тисків на вході, за яких проводилось дослідження на державному первинному еталоні. У якості основної характеристики критичного сопла в цьому випадку застосовується градувальний коефіцієнт критичного сопла (2.16). У цьому випадку метод реалізується в два етапи. Спершу визначаються градувальний коефіцієнт опорного критичного сопла (2.16) на державному первинному еталоні. Далі опорне сопло монтується по схемі зображеній на рис. 3.4 тільки після досліджуваного критичного сопла і потім проводять визначення градувального коефіцієнта опорного критичного сопла при високому тиску, при цьому тиск на вході в опорне критичне сопло підтримується на рівні 101 кПа. Для цих умов градувальний коефіцієнт досліджуваного сопла визначається із врахуванням (2.16) та (3.29) і впливу стисливості вимірюваного середовища для умов дослідного критичного сопла за формулою [66]:

$$K_2 = K_1 \frac{C_1^*(P_{01}, T_{01})}{C_2^*(P_{02}, T_{02})} \left(\frac{P_{01}}{P_{02}} \right) \sqrt{\frac{Z_{02} T_{02}}{T_{01}}}, \quad (3.32)$$

де $C_1^*(P_{01}, T_{01})$, $C_2^*(P_{02}, T_{02})$ – модифіковані функції критичного потоку розраховані за (2.6) для умов вимірюваного середовища опорного та дослідного критичного сопла, відповідно, Z_{02} – фактор стисливості вимірюваного середовища для умов дослідного критичного сопла.

3.2.1 Метрологічний аналіз невизначеності вимірювань за методом послідовного під'єднання критичних сопел

Аналогічно до підходу описаному в підпункті 3.1.2 складемо бюджет невизначеностей для методу з послідовним під'єднанням критичних сопел.

Вихідним рівнянням для першого варіанту реалізації методу є (3.28).

Визначимо вагові коефіцієнти по кожній вхідній величині:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_2}{\partial C_1} &= \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \cdot \frac{P_0}{P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; & \frac{\partial C_2}{\partial d_1} &= 2 \cdot C_1 \cdot \frac{d_1}{d_2^2} \cdot \frac{P_0}{P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; \\ \frac{\partial C_2}{\partial d_2} &= -2 \cdot C_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^3} \cdot \frac{P_0}{P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; & \frac{\partial C_2}{\partial P_0} &= C_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{1}{P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; \\ \frac{\partial C_2}{\partial P_1} &= -C_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{P_0}{P_1^2} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; & \frac{\partial C_2}{\partial T_1} &= \frac{1}{2} C_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{P_0}{P_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}}; \\ & & \frac{\partial C_2}{\partial T_1} &= \frac{1}{2} C_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{P_0 \cdot T_1}{P_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} T_0^2}. \end{aligned}$$

Приймаючи коефіцієнти витікання двох сопел рівними одиниці $C_1 = C_2 \approx 1$, а також при умові адіабатичного процесу $T_1 \approx T_2$, а також те, що невизначеність вимірювання діаметрів горловин, тисків та температур в абсолютному вираженні однакова для обох сопел, отримуємо наступний вираз для оцінювання невизначеності коефіцієнта витікання невідомого сопла в абсолютному вираженні:

$$u(C_2) = \sqrt{u^2(C) \cdot \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \frac{P_0^2}{P_1^2} + u^2(d) \cdot 4 \cdot \frac{P_0^2}{P_1^2} \cdot \frac{d_1^2}{d_2^6} \cdot (d_2^2 + d_1^2) + u^2(P) \cdot \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \frac{P_1^2 + P_0^2}{P_1^4} + u^2(T) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \frac{P_0^2}{P_1^2 \cdot T_0^2}} \quad (3.33)$$

Підставляючи граничні значення невизначеностей вхідних величин при умові застосування державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 невизначеність визначення коефіцієнта витікання невідомого критичного сопла буде наближено рівна невизначеності відомого сопла.

Вихідним рівнянням вимірювання для удосконаленого методу з послідовним під'єднанням критичних сопел є формула (3.29).

Вагові коефіцієнти по кожній впливовій величині, що входить у формулу (3.29) визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_2}{\partial K_1} &= \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; \quad \frac{\partial K_2}{\partial P_0} = \left(\frac{K_1}{P_1} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; \\ \frac{\partial K_2}{\partial P_1} &= - \left(\frac{K_1 \cdot P_0}{P_1^2} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}; \quad \frac{\partial K_2}{\partial T_0} = - \left(\frac{K_1 \cdot P_0 \cdot T_1}{2P_1 \cdot T_0^2} \right) \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}; \\ \frac{\partial K_2}{\partial T_1} &= \left(\frac{K_1 \cdot P_0}{2P_1 \cdot T_0} \right) \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}. \end{aligned}$$

Невизначеність оцінюється за формулою:

$$u(K_2) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_2}{\partial K_1} \cdot u(K_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial K_2}{\partial P_0} \cdot u(P_0) \right)^2 + \left(\frac{\partial K_2}{\partial P_1} \cdot u(P_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial K_2}{\partial T_0} \cdot u(T_0) \right)^2 + \left(\frac{\partial K_2}{\partial T_1} \cdot u(T_1) \right)^2} \quad (3.34)$$

Підставляючи граничні значення невизначеностей вхідних величин при умові застосування державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 невизначеність визначення градуювального коефіцієнта невідомого критичного сопла буде наближено рівна невизначеності відомого сопла, але при цьому не потрібно враховувати невизначеність вимірювання діаметрів горловин сопел, що підвищує точність, особливо в діапазоні витрат від 0,016 м³/год до 0,1 м³/год.

Невизначеність вимірювань при застосуванні формули (3.32) оцінюється аналогічно за відмінністю необхідності врахування невизначеностей визначення модифікованих функцій критичної витрати та фактора стисливості для умов дослідного критичного сопла.

3.3 Удосконалення методу передавання з використанням паралельного під'єднання критичних сопел та еталонного лічильника газу

Для повірки лічильників газу застосовуються повірочні установки на базі еталонних лічильників газу, роторного, турбінного та барабанного типів або ж на базі критичних сопел.

Застосування в якості еталона критичного сопла, дозволяє скоротити час вимірювання, так як витрата в системі встановлюється по суті майже миттєво і підтримується стабільною, а час вимірюється з високою точністю, тобто похибка зумовлена дискретністю вимірювань визначається тільки точністю та роздільною здатністю системи вимірювання інтервалів часу.

Недоліком застосування критичних сопел є значна споживана потужність вакуумних агрегатів. Чим більше значення витрати необхідно відтворити, тим більшою повинна бути електрична потужність вакуумного агрегату. Так для відтворення витрати порядку $100 \text{ м}^3/\text{год}$ необхідна потужність близько 7 кВт, а при витраті порядку $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ – більше 25 кВт.

В той же час недоліком еталонних лічильників газу є невисока точність їх калібрування в діапазоні витрат нижче $4 \text{ м}^3/\text{год}$.

Відоме технічне рішення при якому застосовується паралельне під'єднання критичних сопел та турбінного лічильника газу [39]. Проте недоліком цього рішення є значне енергоспоживання і неврахування впливу тиску вимірюваного середовища на величину об'ємної витрати через критичні сопла.

Для забезпечення малого енергоспоживання, автором пропонується застосовувати сопла критичного витоку тільки в діапазоні витрат від $0,016$ до $16 \text{ м}^3/\text{год}$, при цьому споживана потужність вакуумного агрегату не повинна перевищувати 1 кВт.

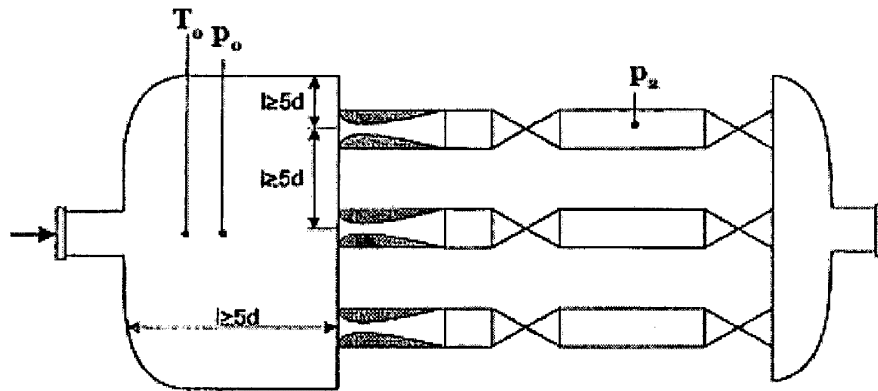


Рис. 3.5 Конструкція еталона на основі паралельного підключення критичних сопел з використанням вхідного колектора - форкамери

Для цілей передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу найбільш прийнятною конструкцією для монтування критичних сопел є конструкція з використанням вхідної форкамери. При такому конструктивному рішенні, сопла монтуються в основу вхідного колектора-форкамери, так що вони не виступають за рівень цієї основи. При цьому слід дотримуватись геометричних розмірів згідно рис. 3.5 [36]. Монтаж кожного сопла можна здійснювати, як показано на рис. 3.6.

Перевагою такої конструкції є те, що всі сопла беруть повітря з однієї ємності, об'єм якої є умовно нескінченним. І тому для вимірювання тиску та температури перед кожним соплом достатньо вимірювання тиску та температури повітря у вхідному колекторі.

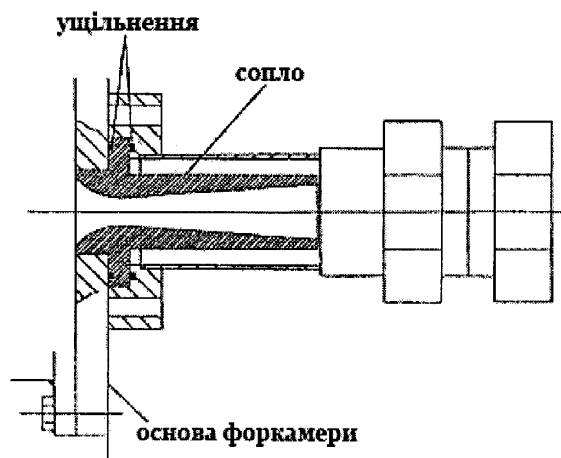


Рис. 3.6 Приклад монтажу критичного сопла у форкамеру [36]

Кожне сопло на виході блокується відсікаючими клапанами для забезпечення внутрішньої герметичності системи. Створюючи надлишковий тиск або вакуум між двома відсікаючими клапанами можна провести надійну перевірку на герметичність кожної лінії зокрема і всього еталона в цілому.

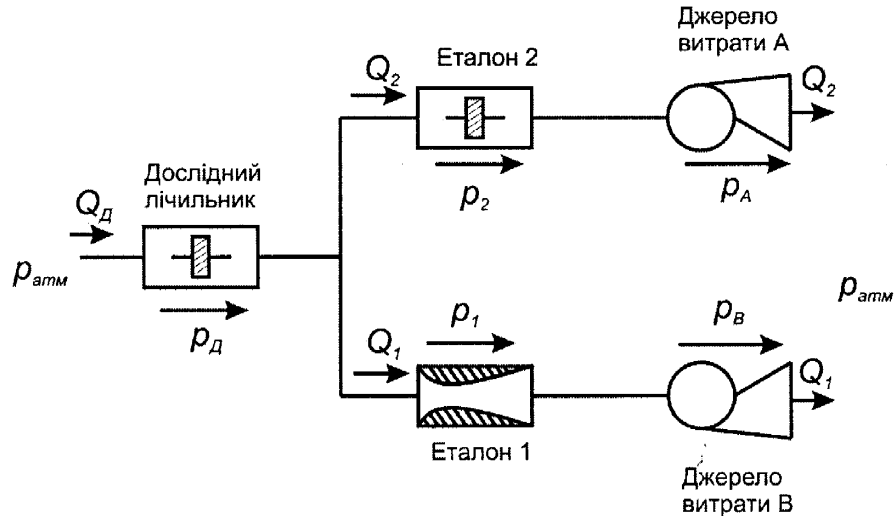


Рис. 3.7 Приклад реалізації методу з паралельним підключенням еталонів передавання на базі лічильника газу та критичних сопел

При паралельній роботі сопел і лічильника витрата через еталонну секцію визначається як сума витрат:

$$q_{v\Sigma} = \sum_{i=1}^n q_{vCi} + q_{vЛ}, \quad (3.35)$$

де q_{vCi} – витрата через i – те критичне сопло із набору сопел; $q_{vЛ}$ – витрата через лічильник.

Для врахування впливу тиску вимірюваного середовища на величину об'ємної витрати через кожне критичне сопло, автором отримано рівняння вимірювання удосконаленого методу із врахуванням (2.21) та (3.35):

$$q_{Л} = \frac{1}{\rho_{Л}} \cdot \left(\rho_{C} (1 + 0.169x_v) \sqrt{\frac{T_C}{293,15}} \times \left(\sum_{i=1}^n (q_{v100kPa, 20^{\circ}C, 0\%, i} [1 - k_{p,i} (p_0 - 100000)]) \right) + \rho_{Л} \cdot \frac{N}{K \cdot t} \right), \quad (3.36)$$

де $\rho_{Л}$ – густина вимірюваного середовища в дослідній секції; ρ_{C} – густина вимірюваного середовища в критичних соплах; $\rho_{Л}$ – густина вимірюваного середовища в еталоні передавання; N – кількість імпульсів з

еталона передавання за час вимірювання t ; K – коефіцієнт перетворення еталона передавання.

Проаналізуємо роботу повірочної установки представлені на рис. 3.7, на базі еталонного лічильника газу та на базі еталона на критичних сопел, при їх паралельній роботі.

При паралельній роботі обох еталонів повинна бути виключена можливість виникнення перехресних потоків між еталонами.

Для аналізу представимо гідравлічну схему (див. Рис. 3.7), запропонованої установки у вигляді еквівалентної електричної схеми за способом представленим в [102] (див. Рис. 3.8).

Еталони витрати газу в електричній схемі можуть бути представлені резисторами, опір яких еквівалентний втратам тиску на кожному еталоні. Аналогічно до всмоктувального джерела витрати, який створює від’ємний тиск p по відношенню до атмосферного тиску і цим самим створює потік з витратою Q , напруга U джерела живлення створює струм I .

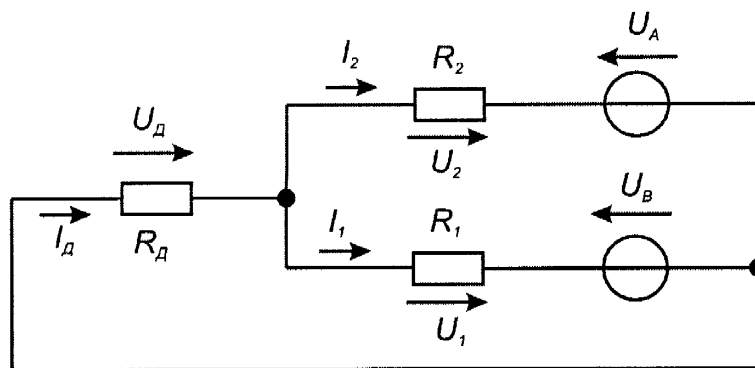


Рис. 3.8 Еквівалентна електрична схема повірочної установки

Повітря в установку засмоктується із навколишнього середовища через дослідний лічильник і повертається назад через джерело витрати. Звідси, вхід і вихід установки знаходяться під тим самим атмосферним тиском. В електричній схемі це відповідає одному опорному потенціалу джерел живлення U_A та U_B і резистора R_d .

Згідно закону Кірхгофа [103] для електричного кола (рис. 3.8) можуть бути записані наступні співвідношення:

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_2 + U_{\mathcal{D}} \\
 U_B &= U_1 + U_{\mathcal{D}} \\
 I_{\mathcal{D}} &= I_1 + I_2
 \end{aligned}
 \tag{3.37}$$

Перехресні потоки між еталонами установки відображаються на еквівалентній електричній схемі зміною напрямку одного із двох струмів I_1 або I_2 .

Тому необхідно визначити критерій для струму, який би не призводив до зміни його напрямку.

Спираючись на рівняння (3.36) після відповідних перетворень отримуємо вираз для струму I_1 :

$$I_1 = \frac{U_B \cdot R_2 - R_{\mathcal{D}} \cdot (U_A - U_B)}{R_2 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_{\mathcal{D}}}
 \tag{3.38}$$

Знаменник рівняння (3.36) завжди додатній. Струм I_1 не змінюватиме свого напрямку, якщо чисельник рівняння (3.36) буде більше нуля, тобто якщо виконуватиметься наступна умова:

$$U_B \cdot R_2 > R_{\mathcal{D}} \cdot (U_A - U_B)
 \tag{3.39}$$

Уведемо коефіцієнт a , який дорівнює:

$$a = \frac{R_{\mathcal{D}}}{R_2}
 \tag{3.40}$$

Тоді нерівність (3.37) можна записати як:

$$\frac{U_A}{U_B} < \left(1 + \frac{1}{a}\right)
 \tag{3.41}$$

Здійснивши зворотну трансформацію електричної схеми в гідравлічну нерівність (3.41) можна записати так [102]:

$$\frac{p_A}{p_B} < \left(1 + \frac{1}{a}\right)
 \tag{3.42}$$

Для гідравлічної схеми коефіцієнт a визначається як відношення гідравлічних опорів дослідного лічильника і еталона 2, які представлені відповідними падіннями тиску $p_{\mathcal{D}}$ та p_1 .

Отже, при проектуванні запропонованої установки, тиски p_A та p_B , а також відношення гідроопорів, повинні вибиратись із врахуванням

нерівності (3.42), так щоб були відсутні перехресні потоки між еталонами установки.

Враховуючи те, що максимальне розрідження для еталонних лічильників майже ніколи не перевищує -5 кПа, а мінімальне розрідження для критичних сопел становить не більше – -30 кПа, то можна зробити висновок, що в запропонованій установці на базі двох еталонів не будуть виникати перехресні потоки при одночасній їх роботі.

На сьогодні ДП „Івано-Франківськстандартметрологія” створено прототип запропонованої установки на базі мобільної повірочної установки TZKD-16, виробництва фірми “Justur s.r.o.”, Словацька Республіка та еталона передавання на базі лічильника газу Delta S-Flow G25, виробництва фірми “Itron”. Ця установка дозволяє здійснювати передавання розміру одиниці об’єму та об’ємної витрати газу в діапазоні від 0,016 до 40 м³/год при невизначеності вимірювань порядку 0,2 – 0,25 %. Протягом двох років експлуатації розробленої установки проводились перевірки метрологічних характеристик еталонів, що входять до її складу, які засвідчили високу стабільність метрологічних характеристик, як еталона на базі критичних сопел, так і еталона на базі еталонного лічильника. Відмінності характеристик еталонів визначених при перевірках від характеристик, отриманих на початку експлуатації знаходились в межах $\pm 0,05$ %.

Удосконалений метод реалізовано і впроваджено у складі пересувної лабораторії забезпечення простежуваності до державного первинного еталона [99].

Паралельне застосування еталонів на базі еталонного лічильника газу та критичних сопел дозволить підвищити довгострокову стабільність та точність відтворення одиниць об’єму та об’ємної витрати газу при помірному енергоспоживанні. І ще однією з переваг запропонованого конструктивного рішення є суттєве скорочення часу вимірювань.

3.3.1 Метрологічний аналіз методу з паралельним застосуванням набору критичних сопел та еталонного лічильника газу

При використанні окремо кожної складової системи, або набору критичних сопел, або лічильника, невизначеність вимірювання системи визначається невизначеністю однієї із складових.

Доцільно розглянути випадок паралельного застосування сопел та лічильника.

Рівняння вимірювань описується формулою (3.36).

Для оцінки внеску у сумарну невизначеність витрати через дослідну секцію згідно рівняння (3.36) виведемо вирази для обчислення вагових коефіцієнтів по кожній вхідній величині.

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial \rho_{\text{л}}} = -\frac{1}{\rho_{\text{л}}^2} \left(\rho_{\text{с}} (1 + 0,169 x_{\text{в}}) \sqrt{\frac{T_{\text{с}}}{293,15}} \cdot \sum_{i=1}^n q_{\text{в},\text{р},i} + \rho_{\text{л}} \cdot \frac{N}{K \cdot t} \right);$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial \rho_{\text{с}}} = \frac{5,840568 \cdot 10^{-2}}{\rho_{\text{л}}} (1 + 0,169 \cdot x_{\text{в}}) \sqrt{\frac{T_{\text{с}}}{293,15}} \sum_{i=1}^n q_{\text{в},\text{р},i};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial x_{\text{в}}} = \frac{9,870559 \cdot 10^{-3}}{\rho_{\text{л}}} \rho_{\text{с}} \cdot \sqrt{T_{\text{с}}} \sum_{i=1}^n q_{\text{в},\text{р},i};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial T_{\text{с}}} = \frac{2,92028 \cdot 10^{-2}}{\rho_{\text{л}}} \cdot \frac{\rho_{\text{с}} (1 + 0,169 \cdot x_{\text{в}})}{\sqrt{T_{\text{с}}}} \sum_{i=1}^n q_{\text{в},\text{р},i};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial q_{\text{в},\text{р},i}} = n \cdot \frac{5,840568 \cdot 10^{-2}}{\rho_{\text{л}}} \rho_{\text{с}} (1 + 0,169 \cdot x_{\text{в}}) \sqrt{T_{\text{с}}};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial \rho_{\text{л}}} = \frac{N}{\rho_{\text{л}} \cdot K \cdot t};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial N} = \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}} \cdot K \cdot t};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial K} = -\frac{\rho_{\text{л}} \cdot N}{\rho_{\text{л}} \cdot K^2 \cdot t};$$

$$\frac{\partial q_{\text{л}}}{\partial t} = -\frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}}} \cdot \frac{N}{K \cdot t^2}$$

Найбільш вагомими внесками у сумарну невизначеність судячи із значень вагових коефіцієнтів є густини вимірюваного середовища на

дослідній секції та еталонному лічильнику і невизначеності об'ємних витрат через критичні сопла та еталонний лічильник.

Всі вхідні величини приймаємо некорельованими.

Приймаючи невизначеності номінального значення об'ємної витрати для кожного сопла рівними, сумарна невизначеність об'ємної витрати на дослідній секції запишеться як:

$$u(q_D) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho_D}\right)^2 u^2(\rho_D) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho_C}\right)^2 u^2(\rho_C) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial x_v}\right)^2 u^2(x_v) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_C}\right)^2 u^2(T_C) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial q_{v,p,i}}\right)^2 u^2(q_{v,p,i}) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho_{pl}}\right)^2 u^2(\rho_{pl}) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial N}\right)^2 u^2(N) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial K}\right)^2 u^2(K) + \left(\frac{\partial q_D}{\partial t}\right)^2 u^2(t)} \quad (3.43)$$

Підставляючи граничні значення невизначеностей вхідних величин при умові застосування критичних сопел атестованих безпосередньо на державному первинному еталоні ДЕТУ 03-01-96 при відношенні витрат між еталонними секціями 1:100 та при одночасному застосуванні не більше шести сопел, невизначеність визначення об'ємної витрати через дослідну секцію складатиме від 0,17% до 0,25%.

Отже, розроблений метод можна застосовувати в для передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу від державного первинного еталона до робочих еталонів.

3.4 Розроблення ланцюга простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу

Як згадувалось в першому розділі дисертаційної роботи, основою ланцюга простежуваності є державний первинний еталон ДЕТУ 03-01-96, який володіє найвищою точністю, проходить міжнародні звірення з національними еталонами інших країн, при цьому встановлений рівень еквівалентності його стосовно інших еталонів [69].

Враховуючи обмежений діапазон відтворюваних витрат державного первинного еталона і для зменшення фізичного зношування його в ланцюг простежуваності на наступному щаблі входять вторинні еталони. Вторинні отримують розмір одиниці вимірювання від державного первинного еталона методами з використанням компаратора. В діапазоні витрат, що відповідає діапазону витрат первинного еталона передавання розміру одиниці вимірювання здійснюється відомими методами звірення з використанням компаратора [57]. В діапазоні витрат менше $4 \text{ м}^3/\text{год}$ передавання здійснюється одним із розроблених методів, детально описаних в підрозділах 3.1 та 3.2 дисертаційної роботи та в [97, 100].

В діапазоні витрат вище $200 \text{ м}^3/\text{год}$ передавання розміру одиниці об'ємної витрати здійснюється шляхом паралельного під'єднання еталонів передавання [11], які попередньо калібровані на державному первинному еталоні, або ж із застосуванням методу з використанням паралельного під'єднання набору критичних сопел та лічильника газу [102].

Для підвищення достовірності вимірювань вторинні еталони проходять взаємозвірення. Для взаємозвірень вторинних еталонів використовуються критичні сопла або еталони передавання на базі лічильників газу.

Робочі еталони отримують розмір одиниці об'ємної витрати газу або від державного первинного еталона, або від вторинних еталонів усіма вище описаними методами. Робочі еталони, аналогічно, як і вторинні, проходять процедуру звірень із державним і вторинними еталонами та між собою [57,58,60].

Робочі засоби вимірювань калібруються згідно існуючих методик повірки чи калібрування [50] і отримують розмір одиниці вимірювання від робочих еталонів. У випадку, коли вимагається вища точність, робочі засоби калібруються з використанням вторинних еталонів.

Застосування робочих засобів для вимірювання вимагає відповідних методик виконання вимірювань. За участю автора розроблена типова методика виконання вимірювань [104].

В результаті, ланцюг простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в Україні матиме наступний вигляд (див. рис. 3.9).

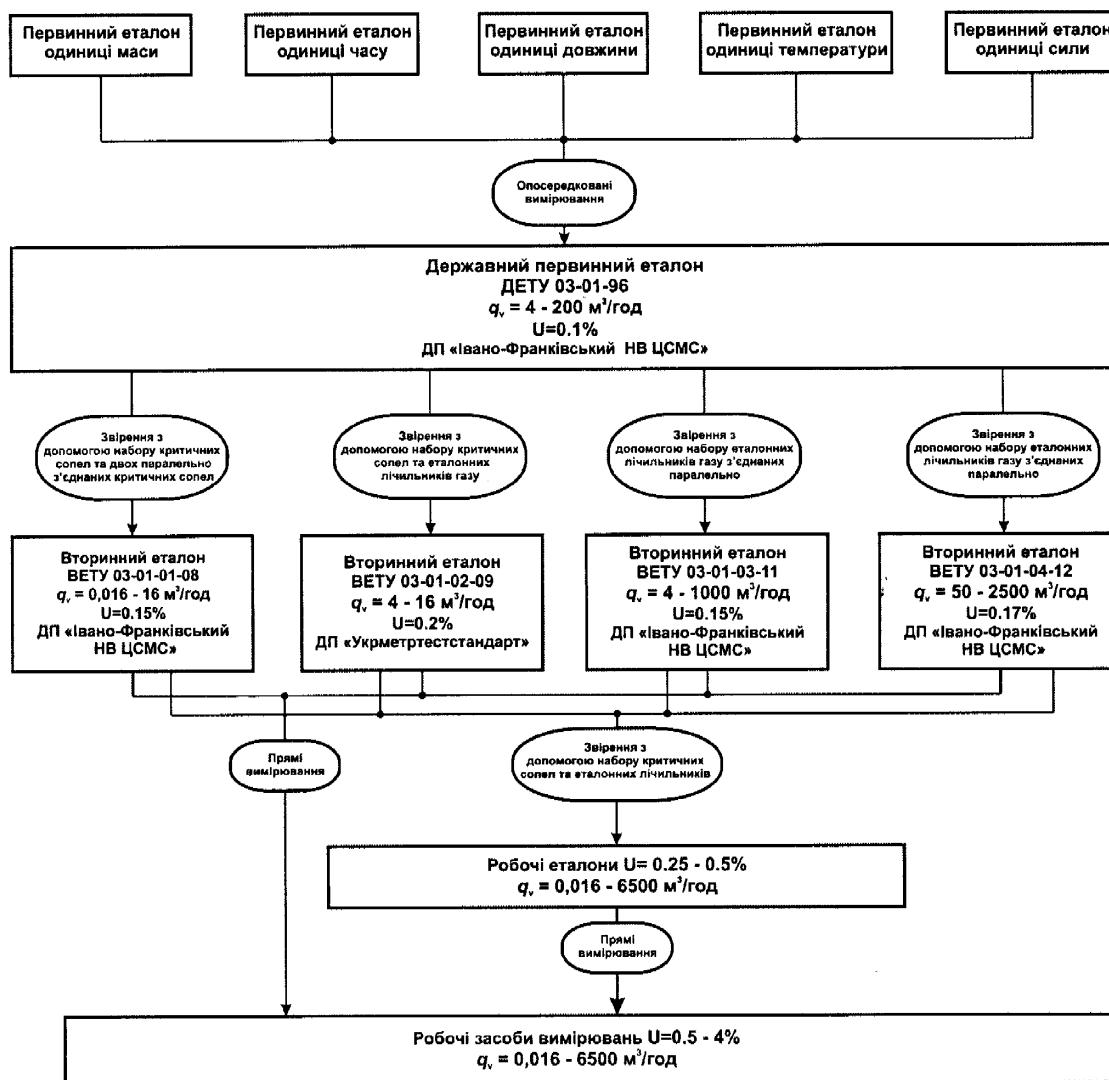


Рис. 3.9 Ланцюг простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в Україні

Висновки до третього розділу

1. Розроблено та апробовано метод забезпечення простежуваності до державного первинного еталона в діапазоні витрат нижче мінімальної відтворюваної ним витрати, а саме нижче 4 м³/год. Застосування методу дозволяє забезпечити пряму простежуваність до державного первинного еталона у вказаному діапазоні витрат.

2. Розроблено метод передавання розміру одиниці об'ємної витрати газу з використанням послідовного під'єднання критичних сопел. Перевагою

розробленого методу є можливість калібрування дослідного критичного сопла при різних вхідних тисках, а також можливість його застосування для забезпечення простежуваності до державного первинного еталона калібрувальних установок, що працюють на реальному робочому середовищі.

3. Розроблено та впроваджено метод передавання з використанням паралельного під'єднання критичних сопел та еталонного лічильника газу. Розроблений метод дозволить підвищити точність та ефективність передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу.

4. Проведено метрологічні аналізи розроблених методів передавання. Результати метрологічного аналізу засвідчують можливість застосування розроблених методів для забезпеченні простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу.

5. Розроблено ланцюг простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в Україні.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ПЕРЕДАВАННІ РОЗМІРУ ОДИНИЦІ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ

Однією із основ забезпечення простежуваності вимірювань є нормативна основа. До нормативної основи входять державні стандарти, методичні документи та інструкції, які визначають порядок виконання метрологічних робіт і дотримання яких гарантує правильність, точність та достовірність вимірювань.

В галузі вимірювання витрати на сьогодні ще не до кінця сформована нормативна основа. Особливу слід звернути на нормативну основу забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань. Перш за все повинен бути документально затверджений ланцюг простежуваності, а по-друге, повинні бути розроблені методичні документи на калібрувальні роботи в рамках цього ланцюга простежуваності.

Згідно завдань дисертаційної роботи потрібно удосконалити державну повірочну схему, яка по суті встановлює ланцюг простежуваності та розробити методичні документи на калібрування засобів, за допомогою яких здійснюється передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу в даній повірочній схемі та додатково здійснюються моніторинг та взаємозвірення еталонів на різних ступенях схеми.

4.1 Удосконалення повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу

Основним документом, який визначає порядок передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу та простежуваність вимірювань, які

здійснюються при передаванні є державна повірочна схема для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу [8].

В першому розділі дисертаційної роботи здійснено її аналіз. На підставі аналізу виявлено, що найбільш проблемним місцем повірочної схеми є простежуваність в діапазоні витрат нижче $4 \text{ м}^3/\text{год}$. В цьому діапазоні витрат розмір одиниці вимірювань об'єму та об'ємної витрати отримується шляхом опосередкованих вимірювань величин з інших повірочних схем для засобів вимірювань маси, довжини, густини, тощо, що порушує принцип єдності вимірювань.

Для вирішення цієї проблеми розроблено два методи забезпечення прямої простежуваності з використанням компаратора до державного первинного еталона [105], але це вирішує тільки технічну сторону питання. Для вирішення нормативної сторони цієї проблеми слід внести зміни до відповідного державного стандарту.

Другим проблемним питанням є відсутність простежуваності до еталонних установок, що працюють на тиску вищому за атмосферний.

В першу чергу зміна стосується поля державного первинного еталона. В склад державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 слід внести набір еталонних витратомірів на базі критичних сопел для реалізації відтворення одиниці об'ємної витрати газу в діапазоні витрат нижче $4 \text{ м}^3/\text{год}$, одним із розроблених і описаних в третьому розділі дисертаційної роботи методів. Таким чином, діапазон відтворюваних витрат державного первинного еталона можливо розширити до $0,8 \text{ м}^3/\text{год}$.

Наступна зміна стосується поля еталонів передавання. Враховуючи розроблені нові методи передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу [95, 99] діапазон об'ємних витрат еталонів передавання слід розширити від $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ до $1000 \text{ м}^3/\text{год}$.

До поля вторинних еталонів слід внести новостворювані та перспективні еталонні установки, що працюють на високому тиску. Розмір одиниці вимірювання ці установки отримуватимуть від державного

первинного еталона ДЕТУ 03-01-96 з використанням методу описаного в третьому розділі дисертаційної роботи.

Існуючу повірочну схему слід доповнити в частині методів передавання від вторинних еталонів до робочих еталонів. До методів передавання слід додати метод з використанням компаратора. В якості компаратора можуть використовуватись критичні сопла та еталона передавання на базі лічильників газу.

Поле робочих еталонів слід доповнити еталонними установками, що працюють на високому тиску, що в найближчій перспективі будуть розроблені та впроваджені у метрологічну практику. Розмір одиниці вимірювання отримуватимуть від вторинних еталонів. Що працюють на високому тиску за допомогою метода з використанням компаратора.

На даний час проходить процедура погодження проекту нової редакції повірочної схеми.

4.2 Розроблення нормативного документа для калібрування критичних сопел

Одним із елементів простежуваності є наявність відповідних методик калібрування. Методика калібрування описує послідовність та реалізацію вимірювальних процедур, що виконуються при калібруванні.

До останнього часу не було розроблено методики калібрування критичних сопел. Тому розроблення методики калібрування критичних сопел є актуальним завданням.

Із врахуванням результатів теоретичних та експериментальних досліджень наведених в другому розділі дисертаційної роботи розроблено методику калібрування критичних сопел.

Методика калібрування поширюється на критичні сопла, що використовуються в якості еталонів передавання, що використовуються для передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу і робочих

еталонів, які застосовуються у складі повірочних установок для повірки та калібрування лічильників та витратомірів газу.

Метрологічними характеристиками критичних сопел є коефіцієнт витоку сопла C , коефіцієнт витоку, як функція числа Рейнольдса $C = f(Re)$, номінальне значення об'ємної витрати приведене до температури 20 °С та відносної вологості 0% чи 60% $q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}$ або номінальне значення об'ємної витрати приведене до абсолютного тиску 100 кПа, температури 20 °С та відносної вологості 0% $q_{v100\text{кПа},20^{\circ}\text{C},0\%}$ і відповідно коефіцієнт, що враховує поправку витрати по тиску k_p , а також розширена невизначеність вимірювань.

Перед проведенням калібрування необхідно здійснити розгляд технічної документації на критичне сопло, це в першу чергу технічне завдання на його розробку. В технічному завданні вказуються геометричні параметри критичного сопла, нормується чистота обробки внутрішніх поверхонь. Також повинні вказуватися умови застосування сопла та умови монтажу. В технічному завданні крім того вказується бажана точність калібрування критичного сопла та вказується яка з характеристик сопла використовується.

При розгляді технічної документації перевіряється відповідність геометричних параметрів критичного сопла вимогам нормативних документів, які поширюються на них [37,38], а також перевіряється правильність застосування критичного та правильність вибору характеристики сопла. Для прикладу, якщо критичне сопло буде застосовуватися в умовах, при яких тисках на вході буде приблизно величиною постійною, то в якості характеристики сопла можна використовувати коефіцієнт витоку і номінальне значення об'ємної витрати приведене до температури 20 °С та відносної вологості 0% $q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}$. У випадку застосування критичного сопла при різних тисках на його вході

використання цих характеристик призведе до появи систематичного відхилення.

При калібруванні критичного сопла необхідно виконати операції наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Перелік операцій при калібруванні критичного сопла

Найменування операції	ЗВТ, які використовуються при калібруванні
1 Зовнішній огляд	Візуально
2 Визначення діаметра горловини	Мікроскоп універсальний вимірювальний УИМ-23, границі допустимої основної похибки $(1,0+L/100)$ мкм
3 Визначення номінальної об'ємної витрати	Державний первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-96; діапазон відтворюваних витрат: 4 – 200 м ³ /год; НСП = 5×10^{-4} ; СКВ = 9×10^{-4} ; Вторинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08; діапазон відтворюваних витрат: 0,016 – 16 м ³ /год; $S_{\Sigma} = 1,3 \times 10^{-3}$. Еталони передавання Діапазон об'ємних витрат: 0,016 – 400 м ³ /год.
4 Визначення максимально допустимого критичного відношення тисків	
5* Визначення коефіцієнта витоку	
6 Оцінювання невизначеності номінальної об'ємної витрати	–
7* Оцінювання невизначеності коефіцієнта витоку	–
Примітка*: пункти 5 та 7 проводяться, якщо такі характеристики обумовлені в технічному завданні	

Калібрування критичних, як правило, проводиться при наступних умовах навколишнього середовища:

- температура навколишнього середовища (20 ± 2) °С;
- відносна вологість, не більше 80%;
- атмосферний тиск від 84 до 106,7 кПа;
- зміна температури повітря в приміщенні, не більше 2 °С за 8 годин;

– зміна температури повітря на дослідній ділянці протягом одного вимірювання, не більше 0,5 °С;

– відсутність вібрації, трясіння, магнітних полів (крім земного), які впливають на роботу еталона, з використанням якого здійснюється калібрування.

Одним із суттєвих моментів під час калібрування, який значною мірою впливає на якість процесу калібрування є підготовка до калібрування.

В ході підготовки до калібрування перевіряють актуальність свідоцтв про повірку чи метрологічну атестацію або сертифікатів про калібрування усіх засобів вимірювань, що використовуються при калібруванні критичних сопел. Особливо важливо, що засоби калібрування та критичні сопла, що калібруються повинні бути витримані за умов, при яких проводиться калібрування не менше як 6 годин для досягнення температурної стабілізації.

Першою процедурою при калібруванні критичних сопел є зовнішній огляд. Як правило, огляд критичних сопел доцільно проводити з використанням мікроскопа для детального огляду саме внутрішніх поверхонь сопла, а конкретно вхідного конуса та горловини сопла. При огляді перевіряють чистоту поверхні, наявність механічних пошкоджень, подряпин інших видимих дефектів. При наявності забруднень їх слід усунути, так як вони зменшують фактичний діаметр сопла, а також змінюють характер потоку в соплі [68], що особливо важливо для сопел малих діаметрів, а саме менше 2 мм.

При задовільних результатах зовнішнього огляду переходять до визначення діаметра горловини сопла. У випадку використання як характеристики сопла градуовального коефіцієнта (2.16) або ж градуовального коефіцієнта (2.18), то діаметр горловини не потрібно виміряти.

Вимірювання діаметра горловини проводять з використанням вимірювального мікроскопа із необхідною роздільною здатністю, для прикладу УИМ-23 [106] з роздільною здатністю 1 мкм.

Вимірювання діаметра горловини критичного сопла проводять, як мінімум по трьох діаметральних хордах через кожні 60°. На кожній хорді вимірювання повторюють не менше 3 разів. За результатами усіх вимірювань оцінюють середнє значення діаметра горловини критичного сопла:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad (4.1)$$

де d_i – i – тий результат вимірювання діаметра горловини, n – загальна кількість вимірювань.

Наступним кроком є оцінювання стандартної невизначеності вимірювання діаметра горловини, яку оцінюють за типом А у відносному вираженні:

$$u_A(\bar{d}) = \frac{100}{\bar{d}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.2)$$

та сумарної стандартної невизначеності вимірювання діаметра горловини:

$$u(\bar{d}) = \sqrt{u_A(\bar{d})^2 + \frac{u_M^2}{3}}, \quad (4.3)$$

де u_M – невизначеність вимірювання мікроскопа.

4.2.1 Процедура визначення номінального значення об'ємної витрати сопла

В повірочних установках на базі критичних сопел, що використовуються для повірки лічильників газу, як правило, в якості характеристики сопла застосовується характеристика – номінальне значення об'ємної витрати приведеної до температури 20°C та відносної вологості 0% або 60% $q_{v,20^\circ\text{C},0\%}$ або $q_{v,20^\circ\text{C},60\%}$. Використання цієї характеристики можливе при незначній зміні тиску на вході сопел, а саме менше 1 кПа. При наявності в повірочних установках значної зміни тиску на вході в сопло, а саме більше 1 кПа, доцільно використовувати в якості основної характеристики сопла

номінальне значення об'ємної витрати приведеної до абсолютного тиску 100 кПа, температури 20°C та відносної вологості 0% або 60% $q_{v,100\text{кПа},20^\circ\text{C},0\%}$ та коефіцієнт, що враховує поправку до витрати по тиску k_p .

Визначення номінального значення об'ємної витрати сопла $q_{v,20^\circ\text{C},0\%}$ або $q_{v,20^\circ\text{C},60\%}$ проводиться з використанням державного первинного еталона ДЕТУ 03-01-96, вторинного еталона ВЕТУ 03-01-01-08 або еталонів передавання.

Для проведення вимірювань критичне сопло встановлюється у вимірювальний трубопровід дослідної секції відповідного еталона. Внутрішній діаметр трубопроводу повинна бути не менше $4\bar{d}$. Критичне сопло встановлюють вхідним конфузуром до вихідного патрубку відповідного еталона, а вихідним дифузуром до системи створення вакууму, що забезпечує створення і підтримання критичного режиму течії через сопло. Допускається встановлювати сопло у форкамеру [37], при цьому відстань від стінки форкамери до критичного сопла повинна бути не менше $5\bar{d}$. Перед соплом повинні бути відсутні джерела вихорів та закручення потоку.

Перед соплом здійснюють відбір тиску та вимірюють температуру газу. Відстані точок вимірювання від вхідного січення сопла визначаються згідно [36–38].

Перед проведенням безпосередньо вимірювань здійснюють продувку сопла, шляхом створення за допомогою системи створення вакууму величини перепаду тиску на соплі не більше 0,5. Продувку здійснюють протягом кількох хвилин для досягнення термостабілізації. Згідно результатів досліджень наведених в [107] прийнятна термостабілізація досягається після, як мінімум, 10 хвилинної продувки сопла.

Після цього проводять вимірювання шляхом пропускання контрольного об'єму повітря через сопло при умові підтримання критичного режиму течії через нього. За час вимірювання фіксують час проходження контрольного об'єму та усереднені значення тиску та температури перед соплом та в еталоні, а також відносної вологості повітря перед соплом.

Номинальне значення визначають при критичному відношенні тисків не більше 0,4, спираючись на результати досліджень наведених в другому розділі дисертаційної роботи.

За даного відношення тисків проводять не менше 3-ох вимірювань.

За результатами вимірювань обчислюють номінальне значення об'ємної витрати приведеної до температури 20°C та відносної вологості 0% (2.19).

У випадку використання еталона передавання, характеристика якого задана середнім значенням його коефіцієнта перетворення \bar{K} і відхиленнями від нього δ_E :

$$q_E = \frac{N_E}{t \cdot \bar{K}} \cdot \frac{1}{(1 + \delta_E/100)} \cdot 3600, \quad ; \quad (4.4)$$

де N_E – кількість імпульсів імпульсного перетворювача еталона передавання за час вимірювання t .

У випадку використання еталона передавання, характеристика якого задана функцією коефіцієнта перетворення від витрати $K(q_i)$:

$$q_E = \frac{N_E}{t \cdot K(q_i)} \cdot 3600 \quad (4.5)$$

$\rho_E, \rho_{СК}$ – густини повітря в еталоні і перед соплом, відповідно, які розраховують за формулою [108]:

$$\rho_i = 0,00348374 \frac{P_i}{Z_i T_i} (1 - 0,3780 x_v), \quad (4.6)$$

де x_v – молярная частка водяної пари у повітрі перед соплом:

$$x_v = \varphi \cdot f(P_{СК}, T_{СК}) \cdot \frac{P_{НВ}(T_{СК})}{P_{СК}} \cdot 10^{-2}, \quad (4.7)$$

де φ – відносна вологість повітря, %; $P_{СК}$ – абсолютний тиск перед соплом, Па; $T_{СК}$ – температура перед соплом; $f(P_{СК}, T_{СК})$ – поправковий множник:

$$f(P_{СК}, T_{СК}) = \alpha + \beta P_{СК} + \gamma T_{СК}^2, \quad (4.8)$$

где $\alpha = 1,00062$, $\beta = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$, $\gamma = 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-2}$;

Z – фактор стисливості повітря:

$$Z_i = 1 - \frac{P_i}{T_i} \left[a_0 + a_1(T_i - 273,15) + a_2(T_i - 273,15)^2 + \right. \\ \left. + (b_0 + b_1(T_i - 273,15))x_v + (c_0 + c_1(T_i - 273,15))x_v^2 \right] + \\ + \frac{P_i^2}{T_i^2} [d + ex_v^2] \quad (4.9)$$

де значення коефіцієнтів: $a_0 = 1,58123 \cdot 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{Па}^{-1}$; $a_1 = -2,9331 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$;
 $a_2 = 1,1043 \cdot 10^{-10} \text{ К}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$; $b_0 = 5,707 \cdot 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{Па}^{-1}$; $b_1 = -2,051 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$;
 $c_0 = 1,9898 \cdot 10^{-4} \text{ К} \cdot \text{Па}^{-1}$; $c_1 = -2,376 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$; $d = 1,83 \cdot 10^{-11} \text{ К}^2 \cdot \text{Па}^{-2}$;
 $e = -0,765 \cdot 10^{-8} \text{ К}^2 \cdot \text{Па}^{-2}$;

$p_{iA}(T_{NE})$ – тиск насиченого водяного пару [108]:

$$p_{HB}(T_{CK}) = e^{(AT_{CK}^2 + BT_{CK} + C + DT_{CK}^{-1})} \quad (4.10)$$

де $A = 1,2378847 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-2}$; $B = -1,9121316 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$; $C = 33,93711047$; $D = -6,3431645 \cdot 10^3 \text{ К}$.

У випадку приведення до відносної вологості 60% формула (2.19) набуде вигляду [109]:

$$q_{v,20^\circ\text{C},60\%} = \frac{\rho_E}{\rho_{CK}} \frac{1 + 0.169x_v(\varphi_{60})}{1 + 0.169x_v} \sqrt{\frac{293.15}{T_{CK}}} q_E, \quad (4.11)$$

де $x_v(\varphi_{60})$ – молярна частка водяної пари у повітрі при відносній вологості 60%.

За результатами вимірювань розраховують статистичні показники:

– математичне очікування номінального значення об'ємної витрати $q_{v,20^\circ\text{C},0\%}$ або $q_{v,20^\circ\text{C},60\%}$, яке обчислюють як середнє арифметичне:

$$\overline{q_{v,20^\circ\text{C},0\%}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{v,20^\circ\text{C},0\%_i}}{n} \quad (4.12)$$

– стандартну невизначеність середнього арифметичного номінального значення об'ємної витрати за типом А, яка оцінюється як середньоквадратичне відхилення:

$$u_A(q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}) = \frac{100}{q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%_i} - \overline{q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}})^2}{n(n-1)}} \quad (4.13)$$

Визначення номінального значення об'ємної витрати сопла $q_{v100\text{кПа},20^{\circ}\text{C},0\%}$ та коефіцієнт, що враховує поправку до витрати по тиску k_p проводиться аналогічно як і $q_{v,20^{\circ}\text{C},0\%}$ з додатковим визначенням впливу тиску на вході критичного сопла на величину номінального значення витрати.

Для визначення номінального значення об'ємної витрати сопла $q_{v100\text{кПа},20^{\circ}\text{C},0\%}$ потрібно виконати наступні вимірювання:

- три вимірювання при тиску на вході близькому або дещо вищому від атмосферного тиску;
- два вимірювання при тиску на вході зменшеному не менше як на 5 кПа від значення тиску при попередніх вимірюваннях;
- одне повторне вимірювання при умовах перших трьох вимірюваннях.

При кожному вимірюванні визначається номінальне значення об'ємної витрати приведеної до температури 20°C та відносної вологості 0% або 60% за формулами (2.19) або (4.11).

Якщо початкові і кінцеве вимірювання при тиску на вході в критичне сопло близькому або вищому за атмосферний тиск відрізняються більше ніж на $0,05\%$, що може бути викликане зміною умов вимірювань протягом вимірювання, то результати вимірювань відкидають і вимірювання проводять ще раз після стабілізації умов.

Залежність величини номінальної витрати від тиску на вході при відносно незначній його зміні приймаємо наближено лінійною. Для визначення величини впливу вхідного тиску на величину номінальної витрати необхідно перш за все визначити відношення зміни витрати від зміни тиску на вході (2.20).

Номінальне значення об'ємної витрати сопла $q_{v100кПа,20^{\circ}C,0\%}$ розраховують за (2.21). Коефіцієнт, що враховує поправку до витрати по тиску k_p розраховують за (2.22).

4.2.2 Процедура визначення максимально допустимого критичного відношення тисків на соплі

Для досягнення критичного режиму течії через критичне сопло необхідною умовою є дотримання відношення абсолютного тиску після сопла до абсолютного тиску на вході в сопло менше за максимально допустиме критичне відношення тисків [80].

Визначення максимально допустимого критичного відношення тисків проводять шляхом визначення номінального значення об'ємної витрати $q_{v,20^{\circ}C,0\%}$ за (2.19) при різних значеннях відношення тисків на соплі послідовно в сторону зростання останнього від його початкового значення 0,4.

При критичному режимі течії величина номінального значення об'ємної витрати буде постійною, при досягненні або перевищенні максимально допустимого критичного відношення тисків витрата почне зменшуватися.

За значення максимально допустимого критичного відношення приймається таке значення відношення тисків на критичному соплі, за якого номінальне значення об'ємної витрати відрізнятиметься від номінального значення об'ємної витрати визначеного при відношенні тисків 0,4 більше ніж на 0,1 %.

4.2.3 Процедура визначення коефіцієнта витоку критичного сопла

Визначення коефіцієнта витоку сопла проводять аналогічно як і номінального значення об'ємної витрати шляхом пропускання контрольного

об'єму повітря через сопло при умові підтримання критичного режиму течії через нього і фіксуванням часу проходження контрольного об'єму та усереднених значень тиску та температури перед соплом та в еталоні, а також відносної вологості повітря перед соплом. Вимірювання проводять за різних тисків на вході в критичне сопло.

За результатами вимірювань здійснюють обчислення в наступній послідовності:

1. Обчислюють площу поперечного перерізу горловини сопла:

$$S_{CK} = \frac{\pi \bar{d}^2}{4} \quad (4.14)$$

2. Обчислюють параметри ізоентропійно заторможеного газу [62]:

$$- \text{тиск } P_0 = P_{CK} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} ;$$

$$- \text{температуру } T_0 = T_{CK} \left(1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) \cdot Ma^2 \right),$$

де γ – відношення питомих теплоємностей для сухого повітря, як функція тиску та температури перед соплом. Відношення питомих теплоємностей для сухого повітря допускається визначати за формулою (2.5);

Ma – число Маха для вхідного трубопроводу перед соплом [67]:

$$Ma = \frac{4q_E}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho_{CK} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{CK}}}, \quad (4.15)$$

де D – діаметр вхідного трубопроводу перед критичним соплом, R – газова стала, для повітря $R \approx 287,04$ Дж/(моль·К).

3. Обчислюють функцію критичного потоку C^* . Враховуючи, що для повітря при низьких тисках показник адиабати k наближено рівний відношенню питомих теплоємностей γ , то допускається обчислювати C^* за (2.4). При вищих тисках на вході в сопло доцільно скористатися емпіричною залежністю (2.6).

4. Обчислюють коефіцієнт витoku критичного сопла за (2.13) та число Рейнольдса для горловини сопла (2.17).

5. Наступним кроком оцінюють статистичні показники:

– середнє арифметичне значення коефіцієнта витoku за j – того значення вхідного тиску:

$$\bar{C}_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij}}{n} \quad (4.17)$$

– стандартну невизначеність коефіцієнта витoku за типом А:

$$u_A(C_j) = \frac{100}{\bar{C}_j} \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ij} - \bar{C}_j)^2}{n(n-1)} \quad (4.18)$$

4.2.4 Оцінювання невизначеності

В розділі оцінка невизначеності проводиться оцінка невизначеності номінального значення об'ємної витрати та (або) невизначеності коефіцієнта витoku сопла.

Оцінка невизначеності проводиться згідно підходу описаному в третьому розділі дисертаційної роботи.

Розширена невизначеність номінального значення об'ємної витрати із врахуванням формул (2.19) оцінюється за наступним співвідношенням:

$$U(q_{v,20^\circ C,0\%}) = 2 \cdot \sqrt{u^2(\rho_E) + u^2(\rho_{CK}) + \left(\frac{0,169 \cdot x_v}{1 + 0,169 \cdot x_v}\right) \cdot u^2(x_v) + \frac{1}{4} \cdot u^2(T_{CK}) + u^2(q_E) + u_A(q_{v,20^\circ C,0\%})^2} \quad (4.19)$$

За формулою (4.19) проводиться оцінка для номінальних значень об'ємної витрати розрахованими за формулами (2.19).

Стандартну невизначеність визначення молярної частки водяного пару у повітрі визначають методом перебору крайніх значень вхідних параметрів, що входять у формулу розрахунку. Аналогічним чином оцінюється невизначеність коефіцієнта стисливості повітря.

Невизначеність обчислення густини повітря за формулою (4.6) оцінюється за наступною формулою:

$$u(\rho) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial Z}\right)^2 u^2(Z) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_v}\right)^2 u^2(x_v) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial M_{c.n.}}\right)^2 u^2(M_{c.n.}) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial M_a}\right)^2 u^2(M_a)} \quad (4.20)$$

Стандартні невизначеності молярної маси повітря та водяного пару згідно [108] складає 0,002%.

Розширена невизначеність коефіцієнта витoku критичного сопла оцінюється за формулою:

$$U(C) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial q_E} \cdot u(q_E)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho_E} \cdot u(\rho_E)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho_0} \cdot u(\rho_0)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial C^*(p_0, T_0)} \cdot u(C^*(p_0, T_0))\right)^2 + \left(\frac{0,169 \cdot x_v}{1 + 0,169 \cdot x_v}\right)^2 \cdot u^2(x_v) + \left(\frac{\partial C}{\partial T_0} \cdot u(T_0)\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial S_{CK}} \cdot u(\bar{d})\right)^2 + u_A(C)^2} \quad (4.21)$$

Приклад застосування методики калібрування критичних сопел наведено в Додатку Б.

4.3 Розроблення методики калібрування еталонів передавання на базі лічильників газу

Поряд з критичними соплами в якості еталонів передавання застосовуються лічильники газу: роторного, барабанного та турбінного типів [22]. Проте на сьогодні не розроблено методики їх калібрування, що не дозволяє простежувати результати вимірювань з їх використанням.

За участю автора розроблено методику калібрування еталонів передавання на базі лічильників газу [110].

Розроблена методика калібрування еталонів передавання поширюється на еталони передавання на базі лічильників газу (далі – еталони передавання), які оснащені перетворювачами об'єму газу, що протік через них, в частотні імпульсні сигнали, і встановлює послідовність їх калібрування.

Таблиця 4.2 Перелік операцій, що виконуються при калібруванні еталонів передавання

Назва операції	Засоби виміральної техніки та обладнання, що застосовуються при калібруванні
1 Зовнішній огляд	Візуально
2 Перевірка герметичності еталона передавання	ЗВТ, що входять до складу еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу та допоміжне обладнання
3 Перевірка функціонування еталона передавання	Державний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, $S_v = 9 \cdot 10^{-4}$, $\Theta_v = 5 \cdot 10^{-4}$, $S_q = 1 \cdot 10^{-3}$,
4 Визначення коефіцієнтів перетворення	$\Theta_q = 6 \cdot 10^{-4}$, $U = 0.1 \%$, діапазон об'ємних витрат від $4 \text{ м}^3/\text{год}$ до $200 \text{ м}^3/\text{год}$.
5 Визначення відтворюваності	Вторинні еталони одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, границі відносної похибки $t_{\Sigma} S_{\Sigma} \leq 0,2 \%$, $U \leq 0,2\%$, діапазони об'ємних витрат від $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$ до $4000 \text{ м}^3/\text{год}$.
6 Оцінювання невизначеності	—

Робочим середовищем, що використовується при калібруванні еталонів передавання є повітря.

Калібрування еталона передавання 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 еталона, що використовується при калібруванні еталона передавання;
- зміна температури навколишнього та робочого середовища не повинна перевищувати 0,2 °С за час одного вимірювання;

- діаметр умовного проходу під'єднувальних труб не повинен відрізнятися від діаметра умовного проходу еталона передавання у відносному вираженні більше ніж на $\pm 2\%$;

- наявність перед еталоном передавання турбінного типу прямих ділянок труб, довжина яких повинна бути не менше 10 DN до, та не менше 5 DN після нього;

- еталони передавання роторного типу калібруються та надалі використовуються з одним постійним комплектом прямих ділянок.

- еталон передавання та прямі ділянки труб повинні бути розміщені на одній осі.

Еталон передавання до початку калібрування повинен бути витриманий в приміщенні, де проводитиметься його калібрування, за вище перерахованих умов не менше 24 годин для досягнення термостабілізації із навколишнім середовищем.

Перед проведенням робіт з калібрування еталони передавання роторного та турбінного типів, як правило, проходять напрацювання протягом не менше 200 год. за номінальної витрати для обкатки опорних підшипників і таким чином для стабілізації характеристик еталонів передавання.

Першою операцією, що здійснюється при калібруванні є зовнішній огляд.

При зовнішньому огляді еталона передавання перевіряють:

- комплектність, маркування і пломбування;

- відсутність видимих дефектів та пошкоджень корпусу імпульсного перетворювача еталона передавання, які перешкоджають його правильній роботі.

При позитивних результатах зовнішнього огляду переходять до перевірки герметичності еталона передавання.

Еталони передавання працюють переважно при надлишкових тисках від 5 кПа до -5 кПа, тому перевірку герметичності здійснюють при таких значеннях надлишкового тиску.

Перевірку герметичності еталона передавання проводять на еталоні об'єму та об'ємної витрати газу, що використовується при його калібруванні, шляхом під'єднання його до еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати, подальшої герметизації виходу (входу) еталона передавання і створення максимально можливого надлишкового тиску (розрідження) в системі «еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу – еталон передавання». Витримують в такому стані систему протягом 5 хвилин, при цьому слідкують за зміною показів еталона передавання та системи вимірювання еталона, що використовується при калібруванні. Допускається додаткова перевірка еталона передавання шляхом промилювання його мильним розчином.

Систему і еталон передавання вважають герметичними, якщо за час дослідження витoku повітря з системи не спостерігалось за умови зміни температури в системі не більше ніж на $\pm 0,1$ °C.

Наступною операцією при калібруванні еталона передавання є перевірка його функціонування. Яку проводять для перевірки його працездатності. Для цього через еталон передавання пропускають контрольний об'єм повітря за його максимальної об'ємної витрати $q_{v \max}$ не менше п'яти разів.

Якщо еталон передавання працює без сторонніх шумів і перетворювач об'єму в імпульси формує вихідні імпульсні сигнали з характеристиками, що наведені в технічній документації на нього, то результати перевірки функціонування еталона передавання вважають позитивними.

4.3.1 Процедура визначення коефіцієнтів перетворення еталонного лічильника та апроксимаційного полінома

Перед проведенням досліджень не менше 5 раз пропускають контрольний об'єм повітря, за максимального значення об'ємної витрати, через еталон передавання для досягнення врівноваження температур перед ним та в еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що застосовується.

Визначення коефіцієнта перетворення еталона передавання проводять шляхом пропускання через нього контрольного об'єму повітря, що відтворюється еталоном одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, за витрат, які визначаються з формули [111]:

$$q_i = \left(\frac{q_{\min}}{q_{\max}} \right)^{\frac{i-1}{N-1}} q_{\max}, \quad (4.22)$$

де q_{\min} , q_{\max} – мінімальна та максимальна об'ємна витрата еталона передавання, відповідно; N_{\min} – мінімальна кількість вимірювальних точок, яка визначається як:

$$N_{\min} = 1 + M \cdot \lg \left(\frac{q_{\max}}{q_{\min}} \right), \quad (4.23)$$

де M – кількість точок на декаду. Для еталона передавання кількість точок на декаду, як правило становить 10. Значення N_{\min} округлюється до найближчого цілого числа.

З умови (4.23) із врахування того, що відношення $\frac{q_{\max}}{q_{\min}}$ для еталонів передавання, як правило, становить 10, мінімальна кількість вимірювальних точок становитиме:

$$N_{\min} = 1 + 10 \cdot \lg(10) = 11$$

Враховуючи те, що градувальна характеристика еталона передавання повинна описуватися поліномом, то число степенів свободи ν повинне бути рівним 6 [111]. Число степенів свободи дорівнює різниці числа вимірювальних точок і числа параметрів або коефіцієнтів n_e необхідних для

побудови градууювальної кривої. Звідси необхідна кількість вимірювальних точок визначатиметься як:

$$N = \nu + n_a \quad (4.24)$$

З двох значень кількості вимірювальних точок розрахованих за (4.23) та (4.24) вибирають максимальне значення.

Для апроксимації градууювальної кривої еталона передавання бажаним є застосування поліному виду [22]:

$$K(q) = a_{-2}q^{-2} + a_{-1}q^{-1} + a_0 + a_1q^1 + a_2q^2, \quad (4.25)$$

де $a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, a_2$ – коефіцієнти полінома.

Тобто число коефіцієнтів апроксимації становить $n_a = 5$, а отже необхідна кількість вимірювальних точок становитиме: ;

$$N = 6 + 5 = 11$$

За кожного значення об'ємної витрати q_i (4.22), дослідження повторюють не менше 7 разів.

Значення об'ємної витрати задається із відхиленням не більше $\pm 2\%$ від значень розрахованих за (4.22).

Дослідження за об'ємної витрати q_i обов'язково слід проводити рівномірно змінюючи її значення при кожному наступному експерименті від $(q_i - 2\%)$ до $(q_i + 2\%)$, спочатку в сторону збільшення, а потім в сторону зменшення.

Місця вимірювання тиску та температури на еталоні передавання повинні бути чітко визначені.

При кожному вимірюванні за встановленого значення об'ємної витрати проводять зняття показів та запис у протокол, наступних параметрів:

- контрольного об'єму, що відтворюється еталonom (V_{Kj}), м³;
- часу проходження контрольного об'єму (t_{jv}), с;
- кількості імпульсів з еталона передавання (N_{jv});
- надлишкового тиску у еталоні (P_{Ei}) та перед (або у) еталоні передаванні, (P_{jv}), Па;

- температури у еталоні (T_{Eji}), та на виході (вході) в еталон передавання (T_{ji}), °C

- атмосферного тиску (P_{aj}), Па.

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

– значення об'єму, що пройшов через еталон передавання:

$$V_{ji} = V_{Kj} \times \frac{P_{aj} + P_{Eji}}{P_{aj} + P_{ji}} \times \frac{T_{ji} + 273,15}{T_{Eji} + 273,15} \quad (4.26)$$

– коефіцієнта перетворення еталона передавання:

$$K_{ji} = N_{ji} / V_{ji} \quad (4.27)$$

– фактичного значення об'ємної витрати:

$$q_{vj} = \frac{3600 \cdot V_{ji}}{t_{ji}} \quad (4.28)$$

За результатами вимірювань за кожної об'ємної витрати:

а) визначають середнє значення коефіцієнта перетворення еталона передавання за j -того значення об'ємної витрати:

$$\overline{K_j} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ji}}{n}, \quad (4.29)$$

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

б) визначають середнє значення об'ємної витрати:

$$\overline{q_{vj}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{vji}}{n}, \quad (4.30)$$

Далі проводять апроксимацію градувальної характеристики еталона передавання виду $K(q)$ поліномом (4.25) та визначають відхилення апроксимованої характеристики від експериментальних значень.

За результатами досліджень еталона передавання, розраховують, використовуючи метод найменших квадратів, коефіцієнти апроксимаційного полінома (4.25).

Далі розраховують відхилення коефіцієнтів перетворення еталона передавання розрахованих за апроксимаційним поліном від коефіцієнтів отриманих експериментальним шляхом:

$$e_j = \frac{K(q_j) - \bar{K}_j}{\bar{K}_j} \cdot 100 \quad (4.31)$$

Відхилення апроксимованої характеристики від експериментальної не повинно перевищувати 0,05%.

Важливою характеристикою еталона передавання є відтворюваність [22]. Визначення відтворюваності проводять після 24 годин технологічного прогону еталона передавання, який проводять після першого циклу його досліджень.

Відтворюваність визначають шляхом порівняння коефіцієнтів перетворення еталона передавання визначених при першому циклі досліджень із коефіцієнтами перетворення визначеними при повторному циклі досліджень.

Повторний цикл досліджень проводять аналогічно описаній вище послідовності для всіх значень витрат визначених при першому циклі досліджень. За кожного значення витрати проводять не менше 3 досліджень.

Обчислюють коефіцієнти перетворення еталона передавання за формулами (4.27).

Обчислюють оцінку відтворюваності для j - того значення об'ємної витрати за формулою:

$$\delta_{Bj} = \frac{(\bar{K}_{Bj} - \bar{K}_j)}{\bar{K}_j} \cdot 100, \quad (4.32)$$

де \bar{K}_{Bj} - середнє значення коефіцієнта перетворення еталона передавання за j - того значення об'ємної витрати, що визначений при повторному циклі досліджень.

З множини значень оцінки відтворюваності за кінцеве приймають максимальне значення.

Оцінка відтворюваності не повинна перевищувати 0,05%.

4.3.2 Оцінювання невизначеності еталона передавання

Основними джерелами невизначеності при калібруванні еталона передавання є:

- невизначеність відтворення еталоном одиниці об'єму газу;
- випадковий ефект, що характеризує повторюваність результатів вимірювань;
- складова, що зумовлена дискретністю лічильника імпульсів.

Рівняння вимірювання, що застосовується при визначенні коефіцієнтів перетворення еталона передавання описується формулами (4.26) та (4.27).

Оцінюють стандартну невизначеність по типу А середнього значення коефіцієнта перетворення за j – того значення об'ємної витрати у відносному вираженні:

$$u_A(\bar{K}_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{ji} - \bar{K}_j)^2}{n(n-1)}} / \bar{K}_j \quad (4.33)$$

Оцінюють стандартну невизначеність по типу В кількості імпульсів. Ця складова зумовлена тим, що на початку і в кінці вимірювання можливо не врахувати по 1 імпульсу еталона передавання.

Оцінку стандартної невизначеності по типу В кількості імпульсів у відносному вираженні розраховують за формулою:

$$u_{Bj}(\bar{N}) = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{2}{\bar{N}_j} \quad (4.34)$$

де \bar{N}_j – середнє значення кількості імпульсів, отримане на j -тій витраті.

$$\bar{N}_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ij}}{n} \quad (4.35)$$

У випадку реалізації методу імпульсної інтерполяції [112] складовою невизначеності (4.34) нехтують.

Оцінюють стандартну невизначеність по типу В контрольного об'єму газу. Ця складова визначається за даними атестації еталона одиниць об'єму

та об'ємної витрати газу, що застосовується при калібруванні еталона передавання:

$$u_B(V) = \frac{U(V)}{k} \quad (4.36)$$

де $k = 2$ – коефіцієнт охоплення, при довірчій ймовірності $P = 0,95$.

Оцінюють сумарну стандартну невизначеність коефіцієнта перетворення за j – того значення об'ємної витрати:

$$u_{c_j}(\bar{K}_j) = \sqrt{u_A^2(\bar{K}_j) + u_B^2(\bar{N}) + u_B^2(V)} \quad (4.37)$$

Розширену невизначеність розраховують, приймаючи довірчу ймовірність рівною 0,95, коефіцієнт охоплення $k = 2$:

$$U_{0,95_j}(K) = k u_{c_j}(\bar{K}_j) \quad (4.38)$$

З множини значень розширеної невизначеності в якості метрологічної характеристики еталона передавання приймають її максимальне значення.

Приклад застосування методики калібрування еталона передавання наведено в Додатку В.

Отримані метрологічні характеристики еталона передавання використовуються при передаванні розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу від державного первинного еталона до вторинних еталонів та робочих еталонів і від вторинних еталонів до робочих еталонів за допомогою методу з використанням компаратора. Тобто еталон передавання використовується в якості компаратора.

4.4 Впровадження результатів досліджень

Результати дисертаційної роботи впроваджені у практичній діяльності ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» у таких напрямках:

- розроблені і впроваджені у метрологічну практику нормативні документи, які регламентують методики проведення калібрування для забезпечення простежуваності вимірювань:

- сопел критичних (Метрологія. Сопла критичні. Методика калібрування. Затверджена наказом головної організації Міністерства економічного розвитку і торгівлі України з вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу лічильниками та витратомірами-лічильниками ДП „Івано-Франківськстандартметрологія” №93 від 05.03.2012р.);

- еталонів передавання на базі лічильників газу (Метрологія. Еталони передавання на базі лічильників газу. Методика калібрування. Затверджена наказом головної організації Міністерства економічного розвитку і торгівлі України з вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу лічильниками та витратомірами-лічильниками ДП „Івано-Франківськстандартметрологія” №93 від 05.03.2012р.).

- розроблено та впроваджено пересувну лабораторію для забезпечення простежуваності робочих засобів вимірювання до Державного первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу (ДЕТУ 03–01–96) та проведення калібрування, метрологічної атестації та повірки еталонних витратовимірювальних установок та еталонних лічильників та витратомірів газу в діапазоні об'ємних витрат від 0,016 м³/год до 2500 м³/год. Акт впровадження в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» (Додаток Г.1).

Результати аналізу та вдосконалення методології розрахунку геометричних розмірів критичних сопел застосовуються підприємством-виробником критичних сопел та повірочних установок на їх базі ТОВ ВКФ «Курс». Акт впровадження ТОВ ВКФ «Курс», м. Дніпропетровськ (Додаток Г.2).

Висновки до четвертого розділу

1. Доопрацьовано державну повірочну схему для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в частині забезпечення передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу від державного первинного еталона до вторинних еталонів в діапазоні витрат від 0,016 м³/год до 4 м³/год.

2. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методику калібрування критичних сопел, яка дозволила застосовувати критичні сопла для забезпечення простежуваності вимірювань за допомогою критичних сопел.

3. Розроблено методику калібрування еталонів передавання на базі лічильників газу для забезпечення простежуваності розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу від державного первинного еталона до робочих еталонів – повірочних установок.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень методів та пристроїв забезпечення простежуваності вимірювань об'ємної витрати газу здійснено удосконалення наукових, методологічних підходів щодо забезпечення простежуваності, а також розроблено нормативні документи для проведення калібрування, які є невід'ємною частиною ланцюга простежуваності. При цьому отримані такі наукові та практичні результати:

1. Здійснено моделювання та експериментальні дослідження впливу відношення тисків на критичному соплі на величину його коефіцієнта витоку, за результатами яких встановлено, що ефект зниження величини коефіцієнта витоку критичного сопла в діапазоні відношень тисків на ньому від 0,40 до 0,55 зумовлений взаємодією стрибка ущільнення в дифузорі сопла із граничним пристінковим шаром в перехідній зоні між горловиною сопла та дифузором. Зроблено висновок щодо застосування критичних сопел з діаметрами горловини менше 2 мм при значеннях відношення тисків менше 0,40 або індивідуального визначення залежності коефіцієнта витоку від відношення тисків на соплі при різних тисках на вході сопла, що дозволить підвищити точність вимірювань на 0,2 – 0,3% при забезпеченні простежуваності до державного первинного еталона.

2. Удосконалено методологію розрахунку геометричних розмірів критичного сопла шляхом застосування уточненої емпіричної моделі коефіцієнта витоку критичного сопла у розширеному діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 56000 для підвищення точності відтворення значення об'ємної витрати. Як наслідок усунуто джерело появи систематичних відхилень розрахункової номінальної об'ємної витрати, що складали від 1 до 5 % від фактичного значення об'ємної витрати визначеного шляхом експериментальних досліджень. Адекватність розробленої емпіричної моделі коефіцієнта витоку перевірено експериментальним шляхом. Максимальне

відхилення розрахункових значень коефіцієнта витoku від результатів експерименту не перевищує 0,25%.

3. Розроблено метод передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газу до робочих засобів вимірювань в діапазоні нижче мінімальної витрати відтворюваної державним первинним еталоном шляхом використання паралельного під'єднання критичних сопел, який дозволяє забезпечувати неперервний ланцюг простежуваності до державного первинного еталона в діапазоні витрат від 0,016 м³/год до 4 м³/год. З отриманих результатів експериментальної перевірки розробленого методу очевидним є те, що відхилення номінальних значень об'ємних витрат визначених при їх роздільному і паралельному дослідженнях, не перевищує довірчих границь експериментальних даних.

4. Удосконалено методи передавання розміру одиниці об'ємної витрати газу з використанням послідовного під'єднання критичних сопел та паралельного під'єднання критичних сопел з лічильником газу, що дало можливість калібрувати критичні сопла при різних вхідних тисках, забезпечувати простежуваність до державного первинного еталона калібрувальних установок, що працюють на реальному робочому середовищі та підвищити точність відтворення об'ємної витрати газу при передаванні розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати до робочих засобів вимірювання.

5. Розроблено ланцюг простежуваності для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу, який є основою для забезпечення простежуваності вимірювань та визнання результатів вимірювань проведених на всіх рівнях.

6. Розроблено та впроваджено в метрологічну практику нові нормативні документи для реалізації калібрування критичних сопел та еталонів передавання на базі лічильників газу, які є нормативною базою для підтвердження ланцюга простежуваності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) 3rd edition. JCGM 200:2012.
2. Directive 2004/22/EC of European Parliament and of the council of 31 March 2004 on measuring instruments. Official Journal of the European Union. L135. 2004.
3. ГОСТ 8.061-80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение»
4. Теория систем воспроизведения единиц и передачи их размеров: Науч. издание — Учеб. пособие / Под ред. В. А. Слава. — СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. — 160 с.
5. Петришин І.С. До питання ідентифікації розподілу похибок еталону//І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк/Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – №1(7). – с. 59-62.
6. Бродин І.С. Держаний спеціальний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу./ Бродин І.С., Петришин І.С., Бестелесний А.Г., Дикий П.І.// Український метрологічний журнал. – 1997. – №3. – С. 31-35
7. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. 4-е изд. – М.: Наука, 1968. – 939 с.
8. 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).
9. Офіційний сайт Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM) [електронний ресурс].– доступ <http://kcdb.bipm.org>.
10. Петришин І.С. Впровадження еталонів передавання в повірочну практику засобів вимірювальної техніки об'єму та об'ємної витрати газу /

І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк, Д.О. Середюк // Український метрологічний журнал. – 2006. – №4. – С. 55–59.

11. Петришин І. Вторинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні витрат від 4 до 1000 м³/год: створення та атестація/ І. Петришин, П. Джочко, Я. Безгачнюк, Ю. Пелікан, О. Бас// Метрологія та прилади. – 2011. - №4. – С. 18-22.

12. Средства испытаний расходомеров/ Б.В. Бирюков, М.А. Данилов, С.С. Кивилис. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112с.

13. Петришин І.С. Математична та метрологічна моделі вторинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Український метрологічний журнал. – 2007. – №2. – С.40 – 42.

14. R. Kramer, B. Mickan Traceability of gas meters used for legal metrology applications (custody transfer) in Germany. Argentina 2006.

15. Середюк О.Є. Метрологічне забезпечення відтворення і передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати природного газу: дис. ... доктора техн. наук: 05.01.02 / Середюк Орест Євгенович. – Івано-Франківськ, 2009. – 384с.

16. Aschenbrenner A. The main features of the new bell prover of the Physikalisch-technische Bundesanstalt. In.: Proceedings of the IMEKO Conference on Flow Measurement FLOMEKO'83, Budapest 1983, pp. 237-240

17. Aschenbrenner A. Ein Prüfstand für Großgaszähler mit überkritischen Düsen als Normalgeräte. PTB-Bericht Me-24, PTB Braunschweig und Berlin, Oktober 1979, 36 seiten

18. Van der Grinten, J.G.M. The primary standard for gas flow measurement in the Netherlands. International conference on flow measurement FLOMEKO'93, October 26-28, 1993, Seoul Korea

19. M.P. van der Beek Developments in the realization of traceability for high-pressure gas-flow measurements./ M.P. van der Beek, I.J. Landheer, H. H. Dijkstra/DiJstelbergen//NMI VSL-Flow, IGCR 2001 Amsterdam, The Netherlands 2001

20. Van der Beek M.P. Gas-Oil Piston Prover, a new concept to realize reference values for High-Pressure Gas-Volume in the Netherlands/ Van der Beek M.P., Van den Brink R., Landheer I.J.// FLOMEKO 2003. Groningen. The Netherlands

21. Volmer W. EUROLOOP: Unique Oil and Gas Calibration Facilities/Volmer W.//FLOMEKO 2007, Johannesburg, South Africa

22. Петришин І.С. Впровадження еталонів передавання в повірочну практику засобів вимірювальної техніки об'єму та об'ємної витрати газу / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк, Д.О. Середюк // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2006): V міжнар. наук.–техн. конф., 10–12 жовтня 2006р, Харків: наукові праці конф.: у 2 т. – Т2. – Харків: ННЦ „Інститут метрології”. – 2006. – С.223–226.

23. Петришин І.С. Особливості повірки лічильників газу в робочих умовах / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Український метрологічний журнал. – 2006. – №2. – С. 46–48.

24. Dijstelbergen, H. H. A New Reference Meter for Gasmeter Calibration,/ Dijstelbergen, H. H. and van der Beek, M. P.// Proc. FLOMEKO, 1998, 37 – 42.

25. Середюк Д.О. Експериментальні дослідження впливу конструкції приєднувальних трубопроводів на метрологічні характеристики еталонних роторних лічильників / Д.О. Середюк // Вимірювання витрати та кількості газу: 7-а всеукр. наук.-техн. конф., 25-27 жовтня 2011 р., м. Івано-Франківськ: матеріали конф.– Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – С.64.

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

27. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. - Л.: Машиностроение, 1989. -701с.

28. Барабанные счетчики газа TG. Руководство по эксплуатации. V 2.1 Rev 02/2008. Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH & Co KG. Bochum. – 2008. – 11p.

29. Thompson R. Turbine flowmeter performance model/Thompson R., Grey J.// Trans. ASME, Journal of Basic Engineering №92(4). – 1970 – pp. 712-723.

30. Петришин І.С. Дослідження метрологічних характеристик лічильників газу в реальних умовах експлуатації та її вплив на точність обліку природного газу/І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк//Нафтогазова енергетика. – 2006. – №1(1). – с. 111-114.

31. Петришин Н.І. Управління результатами вимірювань кількості газу під час передавання його від постачальників до споживачів/Н.І. Петришин, Я.В. Безгачнюк// Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2008. – №2. – с. 115-119.

32. ISBN 978-90-386-2192-0 Dynamics of turbine flow meters/ by Petra Wilhelma Stoltenkaml.–Eindhoven: Technische Universitet Eindhoven, 2007. – Profschritt. – 143 p.

33. V. Herrmann. The use of an 8 path ultrasonic meter as a reference meter standard./ V. Herrmann, M. Wehmeier, T. Dietz, A. Ehrlich, M. Dietzen//5th International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, 2006

34. Hofmann F. Fundamentals of Ultrasonic-flow measurement for industrial applications. Krohne Messtechnik GmbH & Co. KG. Duisburg. 2000.

35. Dietz T. A new low pressure calibration facility using 8-path ultrasonic meters as working standards/ T. Dietz // PTB-Workshop “Uncertainty of natural gas and oil flow measurement”. November 4-6. 2008

36. ISSN 0341-7964. PTB Test Instructions. Volume 25 “Gas meters. Test rigs with critical nozzles” Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1998.

37. МИ 1538-86. ГСИ. Критические расходомеры. Методика выполнения измерений массового расхода газа. Методические указания. - Казань, 1986.

38. ISO 9300:2005 “Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles”. Geneve. 2005.
39. Dietrich H. High-accuracy test rig for gas flows from 0.01 m³/h up to 25000 m³/h / Dietrich H., Nath B., von Lavante E.// 15th world congress of international measurement confederation IMEKO-XV, Osaka, Japan june 13-18, 1999.
40. 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.
41. Wright J. Laboratory primary standards in flow measurement: Practical guides for measurement and control, 2nd edition, D.W. Spitzer editor, Instrumentation, Systems and Automation Society. – Research Triangle Park. – North Carolina. – 2001. – pp. 731-760.
42. Johnson A. The effect of vibrational relaxation of the discharge coefficient of critical flow venturis / Johnson A., Wright J., Nakao S., Merkle C, Moldover M.// Flow measurement and Instrumentation. 2000.
43. Vulovic F. Report on the Intercomparison carried out on eight European benches using sonic nozzles as transfer standard (EUROMET Project No. 307), Gas de France. – February, 1997.
44. Nakao S. Effects of diffuser shapes of critical nozzles on critical back pressure ratio in the low Reynolds number range/Nakao S., Takamoto M.// ASME FEDSM2000-11109. – Boston, Massachusetts. – 2000.
45. Hayakawa M. Development of the transfer standard with sonic venturi nozzles for small mass flow rate of gases/ Hayakawa M., Ina Y., Yokoi Y., Takamoto M., Nakao S.// Flomeko 1998, p. 303-307.
46. Kim J. Study for gas flow through a critical nozzle /Kim J., Kim H., Matsuo S., Setoguchi T.// Journal of Thermal Sciences No. 12(3). – pp. 250-259.
47. Беляев Б. Метод калибровки критических сопел /Беляев Б., Вагин В., Патрикеев В.// Измерительная техника. – №4. – 2002. с.37-39.

48. Caron, R. Investigation into the Premature Unchoking Phenomena of Critical Flow Venturis,/ Caron R., Britton C., Kegel T.// Proc. ASME FEDSM2000-11108, Boston, Massachusetts, USA. – 2000.

49. Nakao S. Choking phenomena of sonic nozzles at low Reynolds numbers/Nakao S., Takamoto M.//Flow measurement and Instrumentation. - 2000. - №11. – p. 285-291.

50. Метрологія. Лічильники газу побутові. Методи та засоби повірки: Р50-071-98. – [Чинний від 1999-01-01]. – К. Держстандарт України, 1998. – II, – 20 с. – (Нормативний документ Держстандарту України: Рекомендації)].

51. Присяжнюк Т.І. Вдосконалення методичних засад та технічних засобів відтворення витрати газу в діапазоні від 0,001 до 0,016 м3/год [Текст]: дис. канд. техн. наук: 21.02.13 / Присяжнюк Тарас Ігорович. - Івано-Франківськ, 2013. – 120с.

52. J.D.Wright. What is the best transfer standard? FLOMEKO'2003 Groningen, Netherlands. – 2003.

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 27at 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. Метрологія. Державний спеціальний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-96. Методика атестації./ І. Петришин, М. Дмитрусь, М. Кузь, Я. Безгачнюк. – [Чинна від 2004-04-16]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», 2004. – II, 18 с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Методика).

57. Метрологія. Еталони об'єму та об'ємної витрати газу дзвонового типу. Методика звірень: РМУ-024-2008. / І.Петришин, О.Середюк, Я.Безгачнюк, Д.Середюк. – [Чинна від 2008-09-01]. – Івано-Франківськ: ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", 2008. – II, 11 с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Інструкція).

58. Метрологія. Установки повірочні з еталонними лічильниками газу. Методика повірки: МПУ-168-03-2008. / І.Петришин, Я.Безгачнюк, Д.Середюк. – [Чинна від 2008-09-01]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», 2008. – II, 10с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Методика).

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

60. Метрологія. Установки повірочні лічильників газу з еталонними критичними соплами. Методика повірки./ І.Петришин, П.Джочко, Я.Безгачнюк, Д.Середюк. – [Чинна від 2007-05-31. Наказ ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» №201 від 31.05.2007р.]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», 2007. – II, 9с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Методика).

61. Smith R.E. A theoretical method of determining discharge coefficients foe Venturis operation at critical flow conditions/ Smith R.E., Matz R.J.// Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, vol. 84. 1962, pp. 434-446.

62. Самолойлович Г.С. Гидрогазодинамика: Учебник для студентов вузов, – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

63. E.W. Lemmon NIST Standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties – REFPROP, Version 7.0 /E.W. Lemmon,

M.O. McLinden, M.L. Huber// National Institute of Standards and Technology, Standard reference data program. Gaithersburg. MD. – 2002.

64. Термодинамические свойства воздуха /Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д. и др. – ГСССД. Серия монографии. М.: Издательство стандартов, 1978. – 276 с.

65. Aschenbrenner A. The influence of humidity on the flowrate of air through critical flow nozzles / Aschenbrenner A.// Proceedings of 3rd International conference on Flow measurement FLOMEKO'83, Budapest, Hungary, 20-22 Sept. 1983.

66. Безгачнюк Я. Методологія передавання розміру одиниці об'єму газу від первинного еталона до еталона на природному газі /Я.В. Безгачнюк // Вимірювання витрати та кількості газу: 6-а всеукр. наук.-техн. конф., 20-21 жовтня 2009 р., Івано-Франківськ: матеріали конф. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2009. – С.27.

67. Петришин І.С. Методологія передавання розміру одиниці об'ємної витрати газу робочим еталонам на базі критичних сопел / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк, Д.О. Середюк// Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2010): VII міжнар. наук.–техн. конф., 12–14 жовтня 2010р, Харків: наукові праці конф.: у 2 т. – Т2. – Харків: ННЦ „Інститут метрології”. – 2010. – С.188–191.

68. ISBN-3-89701-843-8 G. Wendt Einsetzbarkeit kritisch durchstömter düsen mit Reynolds-zahlen $1 \cdot 10^5$ für die durchflussmessung von gasen /G. Wendt// MA-69 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig. – 2000. – 173 s.

69. Cox M.G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset / M.G. Cox // Metrologia. – 2007. – №44. – P.187 – 200.

70. Youden W. J. Graphical diagrams of interlaboratory test results /Youden W.J.// Journal of Industrial quality control. Vol.15. No.11.–May 1959. – pp.133-137.

71. Johnson A. Evaluation of theoretical CFV flow models in the laminar, turbulent and transition flow regimes/A. Johnson, J. Wright// Proceeding of 6th ISFFM Conference, May 16-18, 2006, Queretaro, Mexico.

72. Geropp D. Laminare grenzsichten in ebenen und rotationssymmetrischen lavalduesen / Geropp D.// Deutsche Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht. – 1971. – pp. 71-90.

73. Stratford B.S. The calculation of the discharge coefficient of profiled choked nozzles and the optimum profile for absolute air flow measurement/Stratford B.S.// Journal of Royal Aeron. Soc. – Vol. 68. 1964. – pp. 237-245.

74. Hall I. Transonic flow in two-dimensional and axially-symmetric nozzles/ Hall I.// Quart. Journal of Mechanics and applied Math. – Vol. XV. Pt. 4. – 1962. – pp. 487-508.

75. Kliegel J.R. Transonic flow in small throat radius of curvature nozzles /Kliegel J.R., Levine J.N.// AIAA Journal. – 1969. – vol. 7. – pp. 1375-1378.

76. B.T. Arnberg Review of critical flowmeters for gas flow measurements/ B.T. Arnberg// Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, vol. 84. – 1962. – pp. 447-460

77. Герасимов А. Характеристики газовых потоков при разных условиях потока через сопла Лавалья / Герасимов А., Иванов В., Красавин В., Лахов В., Раинчик С., Семенова О. // Измерительная техника. – 2005. – №4. – С. 40-44.

78. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

79. J.-H. Kim. Effect of diffuser angle on discharge coefficient of miniature critical nozzles/ J.-H. Kim, H.-D. Kim//Journal of Mechanical Science and Technology. – 2010. – № 24(9). – pp. 1793-1798.

80. Безгачнюк Я. Дослідження впливу тиску на виході критичних сопел на їх характеристики/Я. Безгачнюк// Нафтогазова енергетика. – 2013. – №1(19). – с. 48-59.

81. Теория пограничного слоя. перев. с немецкого / Шлихтинг Г. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1974. – 712 с.

82. Gnesin V.I. Numerical modelling of the 3d viscous flow through a vibrating turbomachine blade row / V.I. Gnesin, L.V. Kolodyazhnaya, R. Rzadkowski // In book K.D. Papailiou, F. Martelli, M. Mann: Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Proceedings of the 7th International Conference held in Athens-Greece. – 5-9 March 2007. – P. 1273-1284.

83. Jones W.P. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence./ Jones W.P., Launder B.E.//Int. J. Heat Mass Transfer,15:301-314. – 1972.

84. D.C. Wilcox Turbulence modeling for CFD. 3rd edition, DCW Industries, Inc., La Canada. – 2006.

85. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. пособие/ О.В. Батулин, Н.В. Батулин, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151с.

86. von Lavante E. A three dimensional multigrid multiblock multistage time stepping scheme for the Navier-Stokes equations / von Lavante E., El-Miligui A., Duane N.//. Notes on Numerical Fluid Mechanics, vol. 35, Vieweg 1991.

87. Zachial A. Numerische Simulation einer zeitabhängigen kritischen Dusenstromung unter Variation der Reynolds-Zahl. Diplomarbeit, Universität GH Essen, Dezember 1998.

88. Roe P.L. Characteristic based schemes for the Euler equations./ Roe P.L.// A Numerical Review of Fluid Mechanics, 1986, pp. 337-365.

89. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. – К.: Наук. думка, 2003. – 380 с.

90. А.А. Приходько. Численное моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра./ А.А. Приходько, Е.Б. Рогоза// Вісник Харківського національного університету. – 2012. – №1015. – с. 283 - 291

91. El-Miligui A., Cannizzaro F., Melson N., von Lavante E. A three dimensional multigrid multiblock multistage time stepping scheme for the Navier-Stokes equations. In: Proceedings of the 9th GAMM Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics, Lausanne. 1991

92. Никитин Н.В. Численное исследование ламинарно-турбулентного перехода в круглой трубе под действием периодических входных возмущений /Никитин Н.В.// Изв. РАН. МЖГ. – 2001.– №2. – С. 42-55.

93. Weiss A. Behaviour of shock trains in diverging duct /Weiss A., Grzona A., Olivier H. //Springer-Verlag. Exp. Fluids No.46. – 2010. – pp. 355 – 365.

94. Caroll B.F. Computations and experiments for a multiple normal shock/boundary-layer interaction/Caroll B.F., Lopez-Fernandez P.A., Dutton J.C.// Journal of propuls power No. 9(3). – 1993. – pp. 405-411.

95. Я. Безгачнюк Спосіб забезпечення простежуваності вимірювань витрати газу в діапазоні нижче мінімальної, відтворюваної державним еталоном/Я. Безгачнюк //Метрологія та прилади № 1. – 2011. – с. 46–50.

96. Ishibashi M. Very accurate analytical calculation of the discharge coefficients of critical venturi nozzles with laminar boundary layer / Ishibashi M., Takamoto M.// Proceedings of the FLUCOME, Hayama, Japan, Sept. 14, 1997.

97. Безгачнюк Я.В. Спосіб забезпечення простежуваності вимірювань витрати газу в діапазоні нижче мінімальної відтворюваної державним первинним еталоном/Я.В. Безгачнюк // Вимірювання витрати та кількості газу: 7-а всеукр. наук.-техн. конф., 25-27 жовтня 2011 р., Івано-Франківськ: збірник тез доповідей– Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2011. – С.66-67.

98. ISO: Guide to the expression of uncertainty in measurement. – Geneva, Switzerland: ISO International Organization for Standardization, 1993.

99. Пат. 75178 У Україна, МПК (2012.01) G 01 F 25/00. Пересувна лабораторія для забезпечення простежуваності робочих засобів вимірювання до державного первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу/ /Петришин І.С., Джочко П.Я., Середюк Д.О., Безгачнюк Я.В., Бас О.А., Гулик В.Я., Лемішка В.І., Пелікан Ю.Т.; заявник і патентовласник Петришин І.С.,

Джочко П.Я., Середюк Д.О., Безгачнюк Я.В., Бас О.А., Гулик В.Я., Лемішка В.І., Пелікан Ю.Т. – № u2012 05149; заявл. 25.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22.

100. Безгачнюк Я. Калібрування критичного сопла за допомогою іншого критичного сопла/Я. Безгачнюк//XII наук.-техн. конф. „Приладобудування: стан і перспективи”, 23-24 квітня 2013 р., м. Київ: зб. наук. праць. – Київ: ПБФ, НТУУ “КПІ”, 2013. – С. 254-255.

101. Пат. 61881 U Україна, МПК (2011.01) G 01 F 25/00. Пристрій для калібрування, метрологічної атестації та повірки сопел критичного витоку / Петришин І.С., Джочко П.Я., Середюк Д.О., Безгачнюк Я.В.; заявник і патентовласник Петришин І.С., Джочко П.Я., Середюк Д.О., Безгачнюк Я.В.– № u2011 04886; заявл. 19.04.11; опубл. 25.07.11, Бюл. №14.

102. І. Петришин. Підвищення точності та стабільності повірочних установок для повірки лічильників газу/ І. Петришин, П. Джочко, Я. Безгачнюк//Український метрологічний журнал. – 2013. – №2. – с. 47 – 50.

103. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Издательство «Высшая школа». – 1996.

104. Метрологія. Об’єм природного газу за стандартних умов. Типова методика виконання вимірювань з використанням лічильника газу та коректора об’єму газу: МВУ 034/03-2008 / І.С. Петришин, В.Ю. Готовкін, В.І. Карташев, В.С. Бондаренко, Я.М. Власюк, П.Я. Джочко, Я.В. Безгачнюк. – [Чинна від 2008-01-02]. – К.: ДП «Укрметртестстандарт, 2008. – 83 с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Інструкція).

105. І. Петришин Система метрологічного забезпечення засобів вимірювання об’єму газу/І. Петришин, М. Кузь, Я. Безгачнюк//Метрологія та прилади. – 2007. – №2. – с. 25 – 27.

106. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении, Издательство стандартов, М. 1981.

107. N. Bignell Using small nozzles as secondary flow standards. /N. Bignell// Flow measurement and Instrumentation No. 11. – 2000. – pp. 329 – 337.

108. A. Picard Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007) / A. Picard, R. Davis, M. Glaser, K. Fujii//Metrologia № 45 (2008). – p. 149–155.

109. Метрологія. Сопла критичні. Методика калібрування: МК 02/03-2012 / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк. – [Чинна від 2012-03-05]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», 2012. – II, 10 с. – (Нормативний документ департаменту технічного регулювання Мінекономрозвитку України: Методика).

110. Метрологія. Еталони передавання на базі лічильників газу. Методика калібрування: МК 01/03-12 / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк, Д.О. Середюк, В.Я. Гулик, П.Я. Джочко. – [Чинна від 2012-03-05]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», 2012. – II, 9 с. – (Нормативний документ департаменту технічного регулювання Мінекономрозвитку України: Методика).

111. OIML R 137-1: 2006 Gas meters. Part 1: Requirements. Paris. France. – 2006.

112. Manual of Petroleum measurement standards. Chapter 4 – Proving systems. Section 6 – Pulse interpolation. API American Petroleum Institute. – Washington D.C. – May, 1999. – p. 14.

Додаток А

Алгоритм розрахунку геометричних розмірів критичного сопла

Вихідні дані для розрахунку:

- номінальне значення об'ємної витрати газу q_{v3} ;
- абсолютний тиск перед соплом P , Па;
- температура газу перед соплом T , К;
- відносна вологість φ , %
- газова стала для повітря;
- кут дифузора γ .

Розрахунок здійснюється в наступній послідовності.

1. Розрахунок густини повітря:

$$\rho = 0,00348374 \frac{P}{ZT} (1 - 0,3780x_v),$$

де x_v – молярна частка водяної пари у повітрі перед соплом:

$$x_v = \varphi \cdot f(P, T) \cdot \frac{p_{\text{НВ}}(T)}{P} \cdot 10^{-2},$$

де $f(P, T)$ – поправковий множник:

$$f(P, T) = \alpha + \beta P + \gamma T^2,$$

где $\alpha = 1,00062$, $\beta = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$, $\gamma = 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-2}$;

Z – фактор стисливості повітря:

$$Z = 1 - \frac{P}{T} \left[a_0 + a_1(T - 273,15) + a_2(T - 273,15)^2 + (b_0 + b_1(T - 273,15))x_v + (c_0 + c_1(T - 273,15))x_v^2 \right] + \frac{P^2}{T^2} [d + ex_v^2],$$

де $a_0 = 1,58123 \cdot 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{Па}^{-1}$; $a_1 = -2,9331 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$; $a_2 = 1,1043 \cdot 10^{-10} \text{ К}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$; $b_0 = 5,707 \cdot 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{Па}^{-1}$; $b_1 = -2,051 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$; $c_0 = 1,9898 \cdot 10^{-4} \text{ К} \cdot \text{Па}^{-1}$; $c_1 = -2,376 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$; $d = 1,83 \cdot 10^{-11} \text{ К}^2 \cdot \text{Па}^{-2}$; $e = -0,765 \cdot 10^{-8} \text{ К}^2 \cdot \text{Па}^{-2}$;

$p_{\text{НВ}}(T)$ – тиск насиченого водяного пару:

Продовження додатку А

$$p_{HB}(T_a) = e^{(AT^2 + BT + C + DT^{-1})}$$

де $A = 1,2378847 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-2}$; $B = -1,9121316 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$; $C = 33,93711047$; $D = -6,3431645 \cdot 10^3 \text{ К}$.

2. Розрахунок динамічної в'язкості повітря:

$$\mu_T = 1.5121 \cdot \frac{T^{3/2}}{T + 120} \cdot 10^{-6}$$

3. Розрахунок відношення питомих теплоємностей для повітря:

$$\begin{aligned} \gamma_0 = & 1,3993 + 6,152 \cdot 10^{-5} \cdot p_0 + 3,348 \cdot 10^{-9} \cdot p_0^2 + \\ & + 3,575 \cdot 10^{-5} \cdot T_0 - 1,071 \cdot 10^{-7} \cdot T_0^2 - 1,502 \cdot 10^{-7} \cdot p_0 \cdot T_0 \end{aligned}$$

4. Розрахунок модифікованої функції критичного потоку:

$$C^*(p_0, T_0) = \sqrt{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_0 + 1}{2} \right)^{\frac{(\gamma_0 + 1)}{2(1 - \gamma_0)}}$$

5. Розрахунок оціночного значення діаметра горловини:

$$d_o^* = 1,358 \cdot q_{v,3}^{0,497}$$

6. Розраховується число Рейнольда:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot q_{v,3} \cdot \rho}{d^* \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \cdot \pi \cdot \mu_T}$$

7. Розрахунок коефіцієнта витoku:

$$\begin{aligned} C(\text{Re}) = & -14412,41016 \cdot \text{Re}^{-1,5} + 316,8535 \cdot \frac{1}{\text{Re}} - \\ & - 4,94573 \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{Re}}} + 1,00036 \end{aligned}$$

8. Розрахунок діаметра горловини:

$$d^* = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{v,3}}{\pi \cdot C(\text{Re}) \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot 3600 \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \cdot 10^3$$

9. Перевірка умови:

$$1 - \frac{d_o^*}{d^*} \leq 1 \cdot 10^{-6}$$

Продовження додатку А

У випадку невиконання умови перехід до кроку 6.

При виконанні умови продовжують розрахунок решти геометричних розмірів критичного сопла.

10. Вхідний діаметр сопла:

$$d_1 = 2,5 \cdot d^*$$

11. Радіус вхідного скруглення:

$$r_c = 2 \cdot d^*$$

12. Довжина вихідного дифузора:

$$L_{\text{диф}} = 1..12 \cdot d^*$$

13. Діаметр вихідного отвору:

$$d_2 = 2 \cdot L_{\text{диф}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{180^\circ} \cdot \pi\right) + d^*$$

14. Загальна довжина сопла:

$$L = \sqrt{r_c^2 - \left(r_c - \frac{d_1 - d^*}{2}\right)^2} + r_c \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{180^\circ} \cdot \pi\right) + L_{\text{диф}}$$

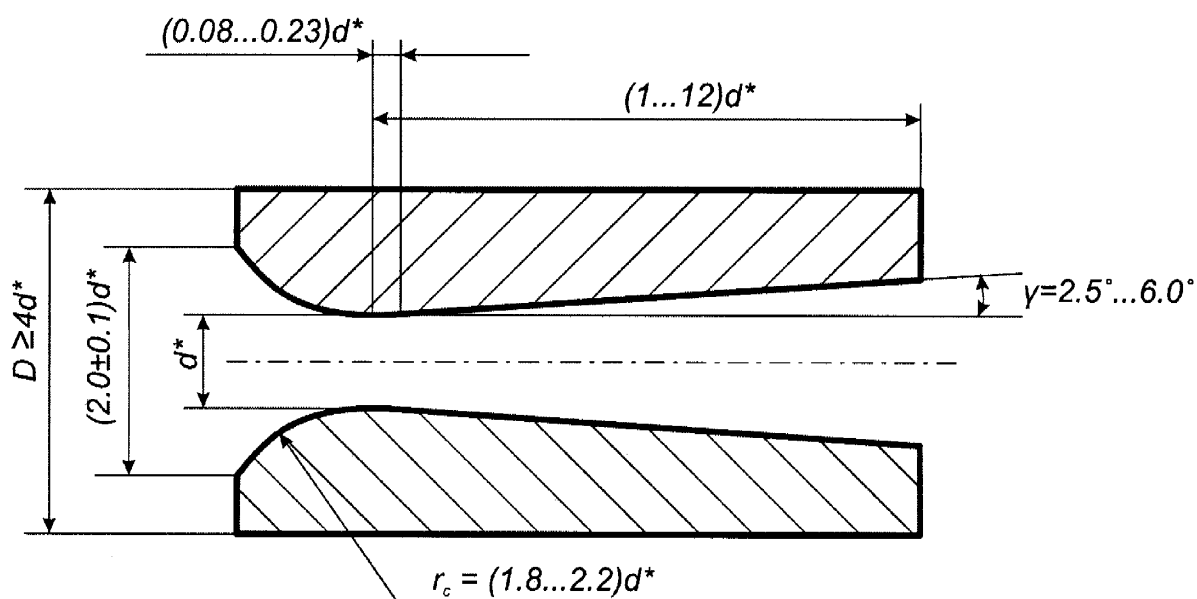
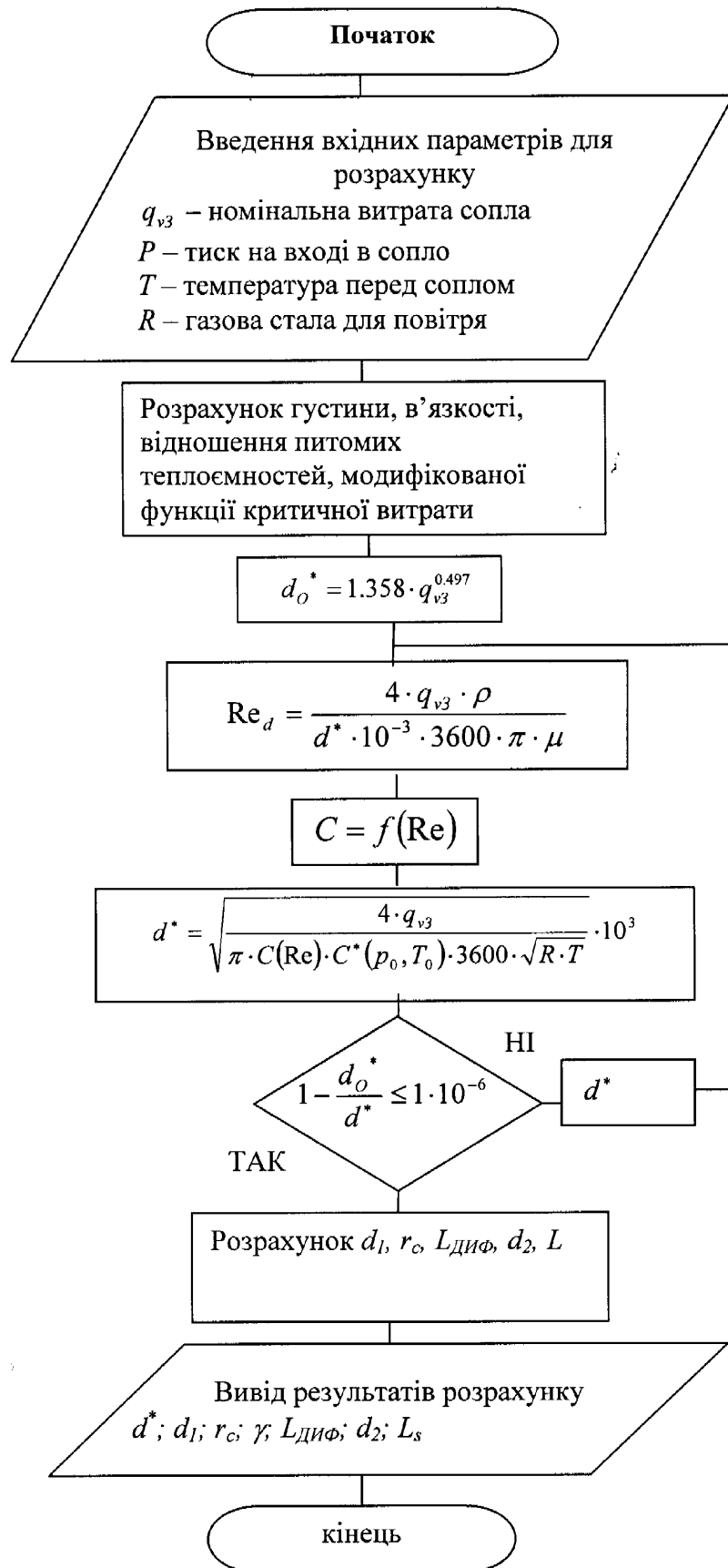


Рисунок А.1. Геометричні розміри критичного сопла з торіодальною горловиною

Продовження додатку А

Блок-схема алгоритму розрахунку геометричних параметрів критичного сопла з тороїдальною горловиною



Додаток Б

Приклад застосування методики калібрування критичних сопел МК 02/03-2012

Відділ НЗВ (калібрувальна лабораторія) ДП «Івано - Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory SE "Ivano -Frankivs 'kstandartmetrologia "			Свідоцтво про уповноваження ПК 009 -2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate PK009 -2009 from 06.07.2009.
Сторінка 1	Сторінок 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер № Приклад
Page 1	Pages 5	Protocol of calibration	Referencenumber № Приклад

ПРОТОКОЛ № Приклад Калібрування критичного сопла

Тип СК(торо їдальн е)

Зав.№ СК -4-8Р Рж випуск у 2008

Виробник : ПА Т «Івано -Франк ів ький завод «Пром прилад »

Замовник : ДП « Івано -Франк ів ькстандартметролог ія»

Дата проведення : 06.12.2012

Метод кал іб рування : безпосереднє звірення з вє талоном згідно методики МК02/03 - 2012

Кал іб рування : проведен оз використанням : державного первинного еталона ДЕТУ03 - 01-96(UA 1)

Не визначеність відтворення об' ємної витрати газу : 0,1 0% (СМС)

Умовні позначення

P_a	Атмосферний тиск
T_a	Температура навколишнього середовища
φ	Відносна вологість повітря
t	Час вимірювання
P_E	Абсолютний тиск в еталоні
$P_{СК}$	Абсолютний тиск передсоплом
T_E	температура в еталоні
$T_{СК}$	температура передсоплом
V_E	контрольний об' єм повітря, що відтворюється еталоном
Z_E	фактор стисливості повітря в еталоні
$Z_{СК}$	фактор стисливості повітря передсоплом
p_{H_2O}	тиск нас и єного водяного пар у
f	Корекційний коефіцієнт, що враховує відмінність вологого повітря відносно ідеального газу
x_v	молярна доля водяного пар у в повітрі
ρ_E	Густина повітря в еталоні
$\rho_{СК}$	Густина повітря передсоплом
$Q_{v,20^{\circ}C,0\%}$	Номинальна витрата сопла при веден до 20°C та відносної вологості 0%
$Q_{v,20^{\circ}C,0\%,100}$	Номинальна витрата сопла при веден до 20°C , відносної вологості 0% та тиску 100 кПа
k_p	Корекційний коефіцієнт, що враховує вплив тиску на коефіцієнт витoku сопла
$P_{СКmax}$	максимальний тиск передсоплом при визначенні номінально ї витрати при ведено ї до тиску 100 кПа
$P_{СКmin}$	Мінімальний тиск передсоплом при визначенні номінально ї витрати при ведено ї до тиску 100 кПа
$Q_{v,20^{\circ}C,0\%,P_{max}}$	Номинальна витрата сопла при $P_{СКmax}$
$Q_{v,20^{\circ}C,0\%,P_{min}}$	Номинальна витрата сопла при $P_{СКmin}$

Продовження додатку Б

Відділ НЗВ (калібрувальна лабораторія) ДП «Івано - Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory SE "Ivano -Frankivs kstandartmetrologia "			Свідоцтво про уповноваження ПК 009 -2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК009 -2009 from 06.07.2009.
Сторінка 2	Сторінок 5	Протоколкалібрування	Реєстраційнийномер№ Приклад
Page 2	Pages 5	Protocol of calibration	Referencenumber№ Приклад

Результати калібрування

№ пп	$P_a, \text{Па}$	$T_a, \text{°C}$	$\varphi\%$	$t, \text{с}$	$P_{E, \text{Па}}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$T_E, \text{°C}$	$T_{CK}, \text{°C}$	$V_E, \text{м}^3$
1	97487	21,28	42,3	90,34	99880	99840	21,2	21,28	0,100663
	Z_E	Z_{CK}	$P_{IV}, \text{Па}$	f	x_v	$\rho_E, \text{кг/м}^3$	$\rho_{CK}, \text{кг/м}^3$	$q_{v, 20^\circ\text{C}}, \text{м}^3/\text{год}$	
	0,99962	0,99962	2530,5	1,003935	0,0110233	1,177567	1,17678	3,99788	
2	$P_a, \text{Па}$	$T_a, \text{°C}$	$\varphi\%$	$t, \text{с}$	$P_{E, \text{Па}}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$T_E, \text{°C}$	$T_{CK}, \text{°C}$	$V_E, \text{м}^3$
	97482	21,30	41,8	90,33	99875	99836	21,19	21,3	0,100658
	Z_E	Z_{CK}	$P_{IV}, \text{Па}$	f	x_v	$\rho_E, \text{кг/м}^3$	$\rho_{CK}, \text{кг/м}^3$	$q_{v, 20^\circ\text{C}}, \text{м}^3/\text{год}$	
	0,99962	0,99962	2533,6	1,003935	0,0109069	1,177600	1,17670	3,99843	
3	$P_a, \text{Па}$	$T_a, \text{°C}$	$\varphi\%$	$t, \text{с}$	$P_{E, \text{Па}}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$T_E, \text{°C}$	$T_{CK}, \text{°C}$	$V_E, \text{м}^3$
	97475	21,40	41,2	90,32	99867	99829	21,21	21,4	0,100667
	Z_E	Z_{CK}	$P_{IV}, \text{Па}$	f	x_v	$\rho_E, \text{кг/м}^3$	$\rho_{CK}, \text{кг/м}^3$	$q_{v, 20^\circ\text{C}}, \text{м}^3/\text{год}$	
	0,99962	0,99962	2549,2	1,003937	0,0108172	1,177466	1,17626	3,99966	
4	$P_a, \text{Па}$	$T_a, \text{°C}$	$\varphi\%$	$t, \text{с}$	$P_{E, \text{Па}}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$T_E, \text{°C}$	$T_{CK}, \text{°C}$	$V_E, \text{м}^3$
	98165	21,20	40,7	94,58	100558	96030	21,21	21,18	0,100672
	Z_E	Z_{CK}	$P_{IV}, \text{Па}$	f	x_v	$\rho_E, \text{кг/м}^3$	$\rho_{CK}, \text{кг/м}^3$	$q_{v, 20^\circ\text{C}}, \text{м}^3/\text{год}$	
	0,99962	0,99963	2518,1	1,003954	0,0104817	1,185764	1,13248	3,99706	
5	$P_a, \text{Па}$	$T_a, \text{°C}$	$\varphi\%$	$t, \text{с}$	$P_{E, \text{Па}}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$T_E, \text{°C}$	$T_{CK}, \text{°C}$	$V_E, \text{м}^3$
	98175	21,13	41	94,59	100568	96045	21,22	21,13	0,100672
	Z_E	Z_{CK}	$P_{IV}, \text{Па}$	f	x_v	$\rho_E, \text{кг/м}^3$	$\rho_{CK}, \text{кг/м}^3$	$q_{v, 20^\circ\text{C}}, \text{м}^3/\text{год}$	
	0,99962	0,99963	2507,3	1,003953	0,0105126	1,185828	1,13283	3,99591	
6	$P_a, \text{Па}$	$T_a, \text{°C}$	$\varphi\%$	$t, \text{с}$	$P_{E, \text{Па}}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$T_E, \text{°C}$	$T_{CK}, \text{°C}$	$V_E, \text{м}^3$
	97490	21,35	42	90,34	99882	99845	21,3	21,35	0,100681
	Z_E	Z_{CK}	$P_{IV}, \text{Па}$	f	x_v	$\rho_E, \text{кг/м}^3$	$\rho_{CK}, \text{кг/м}^3$	$q_{v, 20^\circ\text{C}}, \text{м}^3/\text{год}$	
	0,99962	0,99962	2533,6	1,003935	0,0110882	1,177209	1,17671	3,99781	

$P_{CK, \text{Па}}$	$q_{v, 20^\circ\text{C}, 0\%, P_{\text{max}}}, \text{м}^3/\text{ч}$	$P_{CK, \text{Па}}$	$q_{v, 20^\circ\text{C}, 0\%, P_{\text{min}}}, \text{м}^3/\text{ч}$	$q_{v, 20^\circ\text{C}, 0\%, 100}, \text{м}^3/\text{ч}$	$k_p, \text{Па}^{-1}$
99840	3,99788	96030	3,99706	3,99791	$5,38 \cdot 10^{-8}$

Продовження додатку Б

Відділ НЗВ (калібрувальна лабораторія) ДП «Івано - Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory SE "Ivano -Frankivs 'kstandartmetrologia "			Свідоцтво про уповноваження ПК 009 -2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК009 -2009 from 06.07.2009.
Сторінка 3	Сторінок 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер № Приклад
Page 3	Pages 5	Protocol of calibration	Referencenumber № Приклад

Визначення максимального допустимого критичного відношення тисків

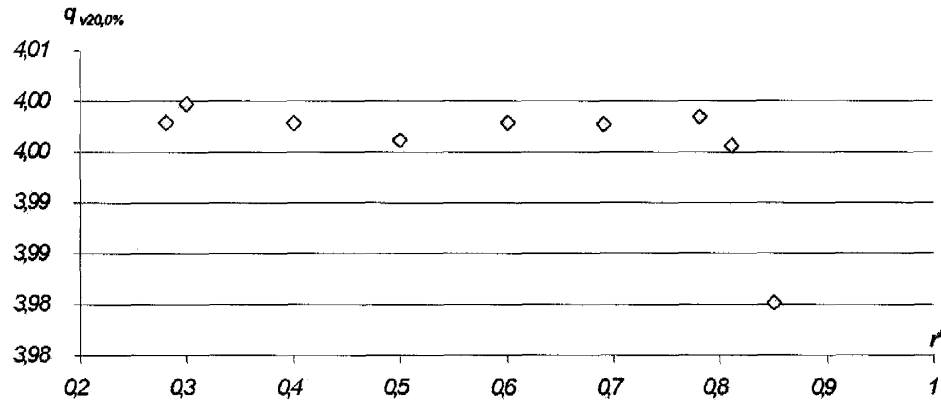
№п/п	$P_a, Па$	$T_a, ^\circ C$	$\varphi\%$	t, c	$P_B, Па$	$P_{CK}, Па$	$T_B, ^\circ C$	$T_{CK}, ^\circ C$	V_{BM}^3
1	97487	21,28	42,3	90,34	99880	99840	21,2	21,28	0,100663
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2530,5	1,003935	0,0110233	1,177567	1,17678	3,99788	0,28
2	97475	21,40	41,2	90,32	99867	99829	21,21	21,4	0,100667
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2549,2	1,003937	0,0108172	1,177466	1,17626	3,99966	0,30
3	97497	21,34	42,1	90,33	99889	99844	21,31	21,34	0,100672
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2539,9	1,003936	0,0110104	1,177239	1,17659	3,99780	0,40
4	97500	21,28	41,9	90,35	99892	99853	21,32	21,28	0,100672
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2530,5	1,003935	0,0109176	1,177276	1,17698	3,99620	0,50
5	97519	21,37	40,1	90,33	99911	99871	21,33	21,37	0,100672
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2544,5	1,003938	0,0105044	1,177645	1,17701	3,99788	0,60
6	97528	21,35	39,8	90,32	99920	99882	21,34	21,35	0,100663
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2541,4	1,003938	0,0104120	1,177752	1,17726	3,99767	0,69
7	97528	21,43	39,3	90,34	99920	99884	21,37	21,43	0,1007
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2553,9	1,003940	0,0103318	1,177668	1,17700	3,99837	0,78
8	97520	21,30	40	90,38	99912	99878	21,36	21,3	0,100696
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2533,6	1,003936	0,0104332	1,177568	1,17741	3,99554	0,81
9	97520	21,38	39,8	90,73	99912	99874	21,36	21,38	0,100677
	Z_B	Z_{CK}	$P_{НВ}, Па$	f	x_v	$\rho_B, кг/м^3$	$\rho_{CK}, кг/м^3$	$q_{v2PCK} \%$	r
	0,99962	0,99962	2546,1	1,003938	0,0104321	1,177569	1,17704	3,98008	0,85

Продовження додатку Б

Відділ НЗВ (калібрувальна лабораторія) ДП «Івано - Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory SE "Ivano -Frankivs 'kstandartmetrologia "			Свідоцтво про уповноваження ПК 009 -2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК009 -2009 from 06.07.2009.
Сторінка 4	Сторінок 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер № Приклад
Page 4	Pages 5	Protocol of calibration	Referencenumber № Приклад

Визначення максимально допустимого критичного відношення тисків

№п/п	$q_{v,20^{\circ}C,0\%}$ м ³ /год	r	$\delta\%$
1	3,99788	0,28	0,00
2	3,99966	0,30	0,04
3	3,99780	0,40	0,00
4	3,99620	0,50	-0,04
5	3,99788	0,60	0,00
6	3,99767	0,69	-0,01
7	3,99837	0,78	0,01
8	3,99554	0,81	-0,06
9	3,98008	0,85	-0,45



Максимально допустиме критичне відношення тисків становить 0,81.

Бюджет невизначеностей

№п/п	$q_{v,20^{\circ}C,0\%}$ м ³ /год
1	3,99788
2	3,99843
3	3,99966
$q_{v,20^{\circ}C,0\%}$	3,99866
$u_A(q)$, м ³ /год	0,00053

Продовження додатку Б

Відділ НЗВ (калібрувальна лабораторія) ДП «Івано - Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory SE "Ivano -Frankivs 'kstandartmetrologia "			Свідоцтво про уповноваження ПК 009 -2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК009 -2009 from 06.07.2009.
Сторінка 5	Сторінок 5	Протоколкалібрування	Регістраційнийномер№ Приклад
Page 5	Pages 5	Protocol of calibration	Referencenumber№ Приклад

Виміряна величина	Оцінка виміряної величини x_i	Стандартна невизначеність вимірювання $u(x_i)$	Відносне значення стандартної невизначеності $u(x_i)/ x_i $	Ваговий коефіцієнт t_i	Внески невизначеності $u^2(y)$
ρ_z	12	0,000 72	6,Е-04	1	3,6 Е-07
ρ_{ox}	12	0,000 72	6Е -04	1	3,6 Е-07
x_v	0,00 64	1,28Е -05	2Е -01	0,00108	4,66Е -08
T_{ox}	198	0,1	3,4Е -04	0,25	7,23 Е-09
q_E	10	0,005	5Е -04	1	2,5Е-07
					1,02 Е-06

Стандартна невизначеність (тип А), %	0,01 34
Стандартна невизначеність (тип В), %	0,10 1
Сумарна невизначеність , %	0,11
Розширена невизначеність $U(k=2)$, %	0,22

Результат калібрування :

$q_{v,100kPa,20^\circ C,0\%}$ М ³ /ГОД	k_p Па ⁻¹	r^2	$U(k=2)$ %
3,99791	$5,38 \cdot 10^{-8}$	0,81	0,22

Дослідження виконав _____

(підпис, прізвище, ініціали)

Додаток В

Приклад застосування методики калібрування еталонів передавання МК 01/03-2012

Калібрувальна лабораторія ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory			Атестат акредитації ПК 009-2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК 009-2009 from 06.07.2009
Сторінка 1	Сторінка 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер
Page 1	Pages 5	Calibration protocol	Referencenumber

Протокол калібрування еталона передавання

Тип лічильника: роторний
 Умовне позначення: Delta S-Flow G25
 Заводський номер: 3400113531 Рік виготовлення: 2009
 Виробник: Фірма "Actaris Gaszahlbau GmbH", м. Карлсруе, Німеччина
 Власник: ДП "Івано-Франківськстандартметрологія"
 Дата проведення: 14.07.2012

Номінальне значення коеф. перетворення: 20590,60 $\text{мл}\cdot\text{м}^{-3}$

Метод ДМА: безпосереднє зрівняння із вторинним еталоном одиниці об'єму та об'ємної витрати газу BETU 03-01-01-08

Умови проведення:

1. Цикл калібрування
1. Температура н.с. 21,0 $^{\circ}\text{C}$
2. Атм. тиск 969,0 Па
3. Відносна вологість Φ %

ДМА проведено з використанням: вторинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу BETU 03-01-01-08

Невизначеність відтворення об'єму та витрати: $U(V), k=2$ 0,13 %

Еталонний лічильник прослідковується до вторинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу BETU 03-01-01-08

Результати калібрування

- | | |
|---|---|
| 1. Зовнішній огляд | Еталонний лічильник відповідає вимогам експлуатаційної документації |
| 2. Перевірка герметичності | Еталонний лічильник герметичний |
| 3. Перевірка функціонування | Еталонний лічильник функціонує нормально |
| 4. Визначення метрологічних характеристик еталонного лічильника | |

Використовувані позначення і скорочення

P_a	атмосферний тиск	t	час проходження контрольного об'єму
P_E	тиск піддавомом	q_v	об'ємна об'ємна витрата
P_L	тиск на еталонному лічильнику	q_n	приведена об'ємна витрата
T_E	температура піддавомом	V_k	контрольний об'єм
T_L	температура на еталонному лічильнику	V	приведений контрольний об'єм
N	кількість імпульсів відтворених еталонним лічильником	K	коефіцієнт перетворення

Задане значення витрати				Q_5 $\text{м}^3/\text{год}$										
P_a	P_E	P_L	T_E	T_L	N	t	q_v	q_n	V_k	P_E/P_a	T_L/T_E	V	K	$\delta\%$
99900	2392	461	20,33	20,10	4241	20,910	34,76	36,41	0,2019	1,019454	0,99922	0,2057	20620,77	0,16
99900	2392	461	20,33	20,10	4241	20,910	34,76	36,41	0,2019	1,019454	0,99922	0,2057	20620,77	0,16
99900	2367	461	20,46	20,08	4242	20,900	34,76	36,41	0,2019	1,019506	0,99971	0,2056	20636,12	0,22
Сер. зн. коеф. K , $\text{мл}\cdot\text{м}^{-3}$			20625,53											
Сер. зн. відх., $\delta\%$			0,17											
u_p (K), %			0,02											
u_E (P_E), %			0,03											
u_n (q_n), %			0,09											
u_r (P_L), %			0,09											
U (K), $k=2$, %			0,18											

Продовження додатку В

Калібрувальна лабораторія ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory			Атестат акредитації ПК 009-2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК 009-2009 from 06.07.2009
Сторінка 2	Сторінка 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер
Page 2	Pages 5	Calibration protocol	Reference number

Задане значення витрати			30 м³/год			1 цикл калібрування								
P_s	P_E	P_I	T_E	T_I	N	t	q_v	q_n	V_s	$P_E P_I$	$T_I T_E$	V	K	$\delta\%$
99900	2382	879	20,56	20,10	4222	23,720	30,64	31,06	0,2019	1,016078	0,99843	0,2046	20633,03	0,21
99900	2384	877	20,58	20,10	4221	23,710	30,66	31,07	0,2019	1,015119	0,99837	0,2046	20628,73	0,19
99900	2384	877	20,58	20,10	4221	23,710	30,66	31,07	0,2019	1,015119	0,99837	0,2046	20628,73	0,19
Сер. зн. коеф. K , імп./л		20630,16												
Сер. зн. відх., %		0,19												
u_A (K), %		0,01												
u_B (P), %		0,03												
u_B (N), %		0,09												
u_C (K), %		0,09												
U (K), $k=2$, %		0,18												

Задане значення витрати			35 м³/год			1 цикл калібрування								
P_s	P_E	P_I	T_E	T_I	N	t	q_v	q_n	V_s	$P_E P_I$	$T_I T_E$	V	K	$\delta\%$
99900	2384	1376	20,65	20,20	4197	29,180	24,91	25,12	0,2019	1,010062	0,99847	0,2036	20612,00	0,10
99900	2384	1376	20,71	20,20	4197	29,17	24,82	25,12	0,2019	1,010072	0,99826	0,2036	20616,01	0,12
99900	2384	1376	20,71	20,20	4195	29,17	24,92	25,12	0,2019	1,010072	0,99826	0,2036	20606,18	0,08
Сер. зн. коеф. K , імп./л		20611,40												
Сер. зн. відх., %		0,10												
u_A (K), %		0,01												
u_B (P), %		0,03												
u_B (N), %		0,09												
u_C (K), %		0,09												
U (K), $k=2$, %		0,18												

Задане значення витрати			25 м³/год			2 цикл калібрування								
P_s	P_E	P_I	T_E	T_I	N	t	q_v	q_n	V_s	$P_E P_I$	$T_I T_E$	V	K	$\delta\%$
99900	2389	1498	20,65	20,17	4191	23,220	24,87	25,05	0,2019	1,006704	0,99837	0,2033	20612,36	0,11
99900	2368	1503	20,70	20,22	4190	23,34	24,77	24,96	0,2019	1,008624	0,99837	0,2033	20608,07	0,09
99900	2368	1505	20,75	20,26	4190	23,33	24,78	24,85	0,2019	1,008604	0,99833	0,2033	20610,18	0,10
Сер. зн. коеф. K , імп./л		20610,54												
Сер. зн. відх., %		0,10												
u_A (K), %		0,00												
u_B (P), %		0,03												
u_B (N), %		0,09												
u_C (K), %		0,09												
U (K), $k=2$, %		0,18												

Задане значення витрати			20 м³/год			1 цикл калібрування								
P_s	P_E	P_I	T_E	T_I	N	t	q_v	q_n	V_s	$P_E P_I$	$T_I T_E$	V	K	$\delta\%$
99900	2386	1783	20,80	20,10	4176	35,780	20,31	20,38	0,2019	1,005796	0,99762	0,2026	20613,40	0,11
99900	2386	1783	20,82	20,10	4171	35,740	20,34	20,40	0,2019	1,005796	0,99755	0,2026	20590,12	0,00
99900	2387	1784	20,87	20,10	4172	35,740	20,34	20,40	0,2019	1,005796	0,99738	0,2025	20598,56	0,04
Сер. зн. коеф. K , імп./л		20600,69												
Сер. зн. відх., %		0,05												
u_A (K), %		0,03												
u_B (P), %		0,03												
u_B (N), %		0,09												
u_C (K), %		0,10												
U (K), $k=2$, %		0,20												

Продовження додатку В

Калібрувальна лабораторія ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» Calibration laboratory			Атестат акредитації ПК 009-2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК 009-2009 from 06.07.2009
Сторінка 3	Сторінка 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер
Page 3	Page 5	Calibration protocol	Reference number

Задане значення витрати			18 м ³ /год			1 цикл калібрування								
P ₂	P ₃	P ₁	T ₂	T ₁	N	t	q _v	q _s	V ₁	P ₂ P ₁	T ₁ T ₂	V	K	δ%
98800	2367	2006	20,94	20,21	4163	45,590	15,94	15,96	0,2019	1,003681	0,99752	0,2021	20596,67	0,03
98800	2367	2007	20,95	20,20	4160	45,510	15,97	15,99	0,2019	1,003671	0,99745	0,2021	20583,43	-0,03
98800	2365	2006	20,89	20,18	4162	45,560	15,96	15,98	0,2019	1,003661	0,99759	0,2021	20590,73	0,00
Сер. зн. коэф. К, мл/л			20590,28			q _{м³/год}						15,97		
Сер. зн. відх., δ%			0,00											
u _A (K), %			0,03											
u _B (P ₁), %			0,03											
u _B (V ₁), %			0,09											
u _c (K), %			0,09											
U(K), k=2, %			0,18											

Задане значення витрати			12 м ³ /год			1 цикл калібрування								
P ₂	P ₃	P ₁	T ₂	T ₁	N	t	q _v	q _s	V ₁	P ₂ P ₁	T ₁ T ₂	V	K	δ%
98800	2367	2163	21,25	20,95	4156	60,31	12,05	12,05	0,2019	1,002021	0,99864	0,2020	20570,89	-0,10
98800	2366	2163	21,00	20,85	4156	60,39	12,04	12,05	0,2019	1,002011	0,99949	0,2022	20583,62	-0,18
98800	2367	2163	21,22	20,85	4156	60,37	12,04	12,05	0,2019	1,002021	0,99874	0,2021	20568,79	-0,11
Сер. зн. коэф. К, мл/л			20564,44			q _{м³/год}						12,05		
Сер. зн. відх., δ%			-0,13											
u _A (K), %			0,02											
u _B (P ₁), %			0,03											
u _B (V ₁), %			0,09											
u _c (K), %			0,09											
U(K), k=2, %			0,18											

Задане значення витрати			10 м ³ /год			1 цикл калібрування								
P ₂	P ₃	P ₁	T ₂	T ₁	N	t	q _v	q _s	V ₁	P ₂ P ₁	T ₁ T ₂	V	K	δ%
98800	2368	2229	21,45	21,20	4155	72,570	10,02	10,02	0,2019	1,001376	0,99915	0,2020	20668,87	-0,11
98800	2368	2228	21,45	21,20	4153	72,580	10,01	10,02	0,2019	1,001378	0,99915	0,2020	20558,77	-0,15
98800	2367	2227	21,35	21,30	4155	72,670	10,00	10,01	0,2019	1,001386	0,99983	0,2021	20654,51	-0,18
Сер. зн. коэф. К, мл/л			20560,65			q _{м³/год}						10,02		
Сер. зн. відх., δ%			-0,13											
u _A (K), %			0,02											
u _B (P ₁), %			0,03											
u _B (V ₁), %			0,09											
u _c (K), %			0,09											
U(K), k=2, %			0,18											

Задане значення витрати			10 м ³ /год			1 цикл калібрування								
P ₂	P ₃	P ₁	T ₂	T ₁	N	t	q _v	q _s	V ₁	P ₂ P ₁	T ₁ T ₂	V	K	δ%
98800	2413	2213	19,48	18,80	4148	69,840	10,41	10,40	0,2019	1,001960	0,99768	0,2018	20651,98	-0,19
98800	2408	2213	19,53	18,80	4147	70,130	10,36	10,36	0,2018	1,001830	0,99751	0,2018	20651,56	-0,19
98800	2402	2222	19,62	19,00	4147	72,180	10,07	10,07	0,2019	1,001762	0,99788	0,2018	20648,85	-0,21
Сер. зн. коэф. К, мл/л			20550,13			q _{м³/год}						10,28		
Сер. зн. відх., δ%			-0,20											
u _A (K), %			0,01											
u _B (P ₁), %			0,03											
u _B (V ₁), %			0,09											
u _c (K), %			0,09											
U(K), k=2, %			0,18											

Продовження додатку В

Калібрувальна лабораторія ДП «Івано-Франківське стандартметрологія» Calibration laboratory			Атестат акредитації ПК 009-2009 від 08.07.2009 р. Accreditation certificate ПК 009-2009 from 08.07.2009
Сторінка 4	Сторінка 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер
Page 4	Page 5	Calibration protocol	Reference number

Задане значення витрати 8 м³/год

P_a	P_b	P_c	T_a	T_b	N	t	q_v	q_n	V_s	P_c/P_a	T_b/T_a	V	K	$\delta\%$
99800	2368	2277	19,70	19,25	4139	91,080	7,98	7,98	0,2019	1,001167	0,99846	0,2018	20607,25	-0,40
99800	2391	2277	19,79	19,30	4136	91,060	7,98	7,98	0,2019	1,001128	0,99835	0,2018	20611,46	-0,38
99800	2397	2277	19,83	19,30	4142	91,060	7,98	7,97	0,2019	1,001088	0,99819	0,2018	20529,94	-0,29
Сер. зн. коеф. K , мл/л							$q_m \cdot \Delta t$							
20316,22							7,98							
Сер. зн. відх., %														
-0,36														
$u_A(K)$, %														
0,03														
$u_B(P_A)$, %														
0,03														
$u_B(V_s)$, %														
0,09														
$u_c(K)$, %														
0,10														
$U(K), k=2$, %														
0,20														

Задане значення витрати 6 м³/год

P_a	P_b	P_c	T_a	T_b	N	t	q_v	q_n	V_s	P_c/P_a	T_b/T_a	V	K	$\delta\%$
99800	2363	2317	19,98	19,80	4136	119,270	6,09	6,09	0,2019	1,000653	0,99839	0,2019	20494,81	-0,51
99800	2361	2316	20,12	20,00	4136	117,420	6,19	6,19	0,2019	1,000643	0,99863	0,2019	20480,61	-0,53
99800	2382	2315	20,23	20,00	4136	116,510	6,29	6,29	0,2019	1,000863	0,99922	0,2019	20487,69	-0,50
Сер. зн. коеф. K , мл/л							$q_m \cdot \Delta t$							
20484,37							6,19							
Сер. зн. відх., %														
-0,52														
$u_A(K)$, %														
0,01														
$u_B(P_A)$, %														
0,03														
$u_B(V_s)$, %														
0,09														
$u_c(K)$, %														
0,09														
$U(K), k=2$, %														
0,18														

Задане значення витрати 4 м³/год

P_a	P_b	P_c	T_a	T_b	N	t	q_v	q_n	V_s	P_c/P_a	T_b/T_a	V	K	$\delta\%$
99800	2360	2351	20,29	20,28	4136	179,050	4,06	4,06	0,2019	1,000287	1,00000	0,2020	20478,52	-0,64
99800	2391	2352	20,35	20,33	4136	179,100	4,06	4,06	0,2019	1,000287	0,99993	0,2019	20480,91	-0,63
99800	2380	2352	20,36	20,41	4136	179,370	4,05	4,05	0,2019	1,000277	1,00017	0,2020	20476,23	-0,66
Сер. зн. коеф. K , мл/л							$q_m \cdot \Delta t$							
20478,69							4,06							
Сер. зн. відх., %														
-0,54														
$u_A(K)$, %														
0,01														
$u_B(P_A)$, %														
0,03														
$u_B(V_s)$, %														
0,09														
$u_c(K)$, %														
0,09														
$U(K), k=2$, %														
0,18														

Задане значення витрати 2 м³/год

P_a	P_b	P_c	T_a	T_b	N	t	q_v	q_n	V_s	P_c/P_a	T_b/T_a	V	K	$\delta\%$
99800	2377	2372	20,26	20,00	4120	342,040	2,13	2,12	0,2019	1,000049	0,99911	0,2017	20423,23	-0,81
99800	2379	2375	20,20	19,90	4120	342,040	2,13	2,12	0,2019	1,000040	0,99898	0,2017	20426,22	-0,80
99800	2377	2372	20,19	19,87	4120	339,590	2,15	2,14	0,2019	1,000049	0,99891	0,2017	20427,42	-0,79
Сер. зн. коеф. K , мл/л							$q_m \cdot \Delta t$							
20425,62							2,13							
Сер. зн. відх., %														
-0,80														
$u_A(K)$, %														
0,01														
$u_B(P_A)$, %														
0,03														
$u_B(V_s)$, %														
0,09														
$u_c(K)$, %														
0,09														
$U(K), k=2$, %														
0,18														

Задане значення витрати 1 м³/год

P_a	P_b	P_c	T_a	T_b	N	t	q_v	q_n	V_s	P_c/P_a	T_b/T_a	V	K	$\delta\%$
99800	2376	2375	20,33	20,18	2049	350,120	1,04	1,04	0,100775	1,000010	0,99949	0,1007	20342,62	-1,20
99800	2376	2376	20,36	20,25	2049	359,530	1,01	1,01	0,100775	1,000000	0,99863	0,1007	20340,05	-1,22
99800	2376	2376	20,38	20,38	2049	359,890	1,01	1,01	0,100775	1,000000	1,00000	0,1008	20352,42	-1,25
Сер. зн. коеф. K , мл/л							$q_m \cdot \Delta t$							
20338,36							1,02							
Сер. зн. відх., %														
-1,23														
$u_A(K)$, %														
0,01														
$u_B(P_A)$, %														
0,06														
$u_B(V_s)$, %														
0,09														
$u_c(K)$, %														
0,10														
$U(K), k=2$, %														
0,20														

Продовження додатку В

Калібрувальна лабораторія ДП «Івано-Франківська стандартметрологія» Calibration laboratory			Атестат акредитації ПК 009-2009 від 06.07.2009 р. Accreditation certificate ПК 009-2009 from 06.07.2009
Сторінка 5	Сторінок 5	Протокол калібрування	Реєстраційний номер
Page 5	Pages 5	Calibration protocol	Reference number

Задане значення витрати			05 м³/год												
P_e	P_s	P_t	T_s	T_t	N	t	q_v	q_m	V_s	P_s/P_t	T_s/T_t	V	K	$\delta\%$	
99800	2375	2375	20,20	19,50	2032	589,360	0,61	0,60	0,100775	1,000000	0,99761	0,1005	20211,96	-1,84	
99800	2375	2375	20,31	19,60	2033	586,170	0,62	0,62	0,100775	1,000000	0,99758	0,1005	20222,58	-1,79	
99800	2375	2375	20,39	19,60	2033	590,400	0,61	0,61	0,100775	1,000000	0,99731	0,1005	20228,09	-1,76	
Сер. зн. коеф. K , мл/л		20220,88													
Сер. зн. відх., %		-1,80													
$u_A(K)$, %		0,02													
$u_B(N)$, %		0,06													
$u_B(N_s)$, %		0,09													
$u_c(K)$, %		0,11													
$U(K)$, $k=2$, %		0,22													

Задане значення витрати			04 м³/год												
P_e	P_s	P_t	T_s	T_t	N	t	q_v	q_m	V_s	P_s/P_t	T_s/T_t	V	K	$\delta\%$	
99800	2374	2382	20,58	20,56	2010	905,260	0,40	0,40	0,100775	0,999921	0,99993	0,1008	19948,36	-3,12	
99800	2374	2382	20,58	20,56	2010	905,260	0,40	0,40	0,100775	0,999921	0,99993	0,1008	19948,36	-3,12	
99800	2374	2382	20,58	20,56	2010	905,260	0,40	0,40	0,100775	0,999921	0,99993	0,1008	19948,36	-3,12	
Сер. зн. коеф. K , мл/л		19948,36													
Сер. зн. відх., %		-3,12													
$u_A(K)$, %		0,00													
$u_B(N)$, %		0,06													
$u_B(N_s)$, %		0,09													
$u_c(K)$, %		0,10													
$U(K)$, $k=2$, %		0,20													

Дослідження виконав _____



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора
«Івано-Франківськстандартметрологія»

В.В. Соколовський

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Безгачнюка Я.В.:
«Вдосконалення методів та пристроїв забезпечення простежуваності
вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу», поданої на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі: старшого наукового співробітника науково-дослідної лабораторії ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» Середюка Д.О., наукового співробітника Гулика В.Я. та наукового співробітника Пелікана Ю.Т. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Безгачнюка Я.В. на тему: «Вдосконалення методів та пристроїв забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу» впроваджені у метрологічну діяльність ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» при розробленні, метрологічних дослідженнях пересувної лабораторії для забезпечення простежуваності вимірювань.

Впровадження пересувної лабораторії дало можливість реалізувати передавання одиниці об'ємної витрати газу від державного первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу до робочих еталонів в діапазоні від 0,016 до 2500 м³/год. Розробленою пересувною лабораторією забезпечується пряма простежуваність вимірювань об'ємної витрати газу до державного первинного еталона у відповідності до чинної державної повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу за ДСТУ 3383:2007.


Старший науковий співробітник
вчений зберігач
державного еталона ДЕТУ 03-01-96, к.т.н.

 Д.О. Середюк

Науковий співробітник, вчений зберігач
вторинного еталона ВЕТУ 03-01-04-12

 В.Я. Гулик

Науковий співробітник, вчений зберігач
вторинного еталона ВЕТУ 03-01-03-11

 Ю.Т. Пелікан

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ ВКФ „Курс”

В.М. Кравцов



«26» березня 2013 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Безгачнюка Я.В.:
«Вдосконалення методів та пристроїв забезпечення простежуваності
вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу», поданої на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі: головного метролога ТОВ ВКФ „Курс”, м. Дніпропетровськ Бородіна В.І., головного конструктора Кузнецова О.М. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Безгачнюка Я.В. на тему: «Вдосконалення методів та пристроїв забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу» впроваджені у виробничу діяльність ТОВ ВКФ „Курс” при виготовленні критичних сопел для експлуатації їх у складі повірочних установок.

Впровадження алгоритму розрахунку геометричних розмірів критичних сопел дало можливість підвищити точність виготовлення критичних сопел для досягнення вимог нормативних документів на повірку лічильників газу в частині точності виставлення значення об'ємної витрати.

Головний метролог

В.І. Бородин

Головний конструктор

О.М. Кузнецов

