

681.12 (043)  
Б39

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

**Безгачнюк Ярослав Володимирович**



УДК 006.91:681.122

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

Спеціальність 05.01.02 - стандартизація, сертифікація та  
метрологічне забезпечення

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Петришин Ігор Степанович**,  
Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», головний науковий співробітник, м.Івано-Франківськ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Пістун Євген Павлович**,  
Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри автоматизації теплових і хімічних процесів, м. Львів;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
**Народницький Геннадій Юрійович**,  
Національний науковий центр «Інститут метрології», директор наукового центру механічних вимірювань, м. Харків.

Захист відбудеться « 25 » жовтня 2013 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15).

Автореферат розісланий « 20 » вересня 2013 р.

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 20.052.03  
кандидат технічних наук, професор*



М.М. Дранчук

## АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

an2397

**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.Вошинського (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.

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 шаблоном 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 расхода газа „, автор є координатором цієї роботи.

**Мета роботи** полягає у вирішенні науково-прикладного завдання забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу шляхом удосконалення методів, пристроїв та розроблення нормативної бази забезпечення простежуваності розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу робочих засобів вимірювання, що використовуються для обліку природного газу 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'єму та об'ємної витрати газу до робочих засобів вимірювальної техніки.

**Предметом дослідження** є наукова, нормативна та технічна бази забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та 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 здійснювалися з використанням методів теорії вимірювань, регресійного аналізу, математичної статистики і теорії ймовірності, 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 градуального 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 перевірки лічильників газу.

5. 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.

#### **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. 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 саму 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 м<sup>3</sup>/год до 2500 м<sup>3</sup>/год.

4. Розроблено рекомендації щодо застосування критичних сопел як робочих еталонів та еталонів передавання і алгоритму розрахунку їх 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: методу забезпечення простежуваності вимірювань витрати газу в діапазоні нижче мінімальної відтворюваної державним первинним еталонном [1,12]; експериментальних досліджень та чисельного моделювання впливу тиску на виході критичного сопла на його характеристики [2]; методології передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу від первинного еталона до еталона на природному газі [15]; методу калібрування критичного сопла за допомогою іншого критичного сопла [17].

У роботах, опублікованих у співавторстві, використані результати, одержані здобувачем особисто, до яких належать:

вибір та застосування поліноміальної апроксимації коефіцієнта перетворення еталона передавання [3,13]; аналіз бюджету невизначеностей вторинних еталонів [4,5]; аналіз причин виникнення похибок лічильників газу [6, 8]; застосування установки з паралельним під'єднанням критичних сопел для забезпечення простежуваності [23]; апробація ідентифікації закону розподілу похибок вимірювальних каналів еталона з використанням методу топографічної класифікації

[7]; обґрунтування показників точності методів передавання розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу [9,11]; виведення залежностей для оцінювання похибки вимірювання лічильниками газу в реальних умовах експлуатації [10]; постановка завдань досліджень [14]; обґрунтування застосування ефективної площі критичного перерізу в якості характеристики критичних сопел [16]; методологія оцінювання сумарної похибки та оцінювання невизначеності [18-20]; методологія визначення характеристик критичних сопел [21]; обґрунтування діапазону вимірювань еталонів передавання [22]; обґрунтування застосування форкамери для монтування критичного сопла [24].

### **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.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** дана загальна характеристика дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження. Наведено характеристику наукової новизни і практичного значення отриманих результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

**У 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.

За результатами аналізу світового та вітчизняного досвіду використання технічних засобів для передавання розміру одиниць вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, зроблено висновок про доцільність використання в якості еталонів передавання еталонних лічильників газу роторного типу на основі безрезонансної конструкції, лічильників газу турбінних в діапазоні витрат вище 200 м<sup>3</sup>/год, лічильників газу барабаних з малов'язким і низьковипаровуваним маслом із низьким коефіцієнтом поверхневого натягу та критичні сопла. Акцентовано, що перевагу слід надавати саме критичним соплам у зв'язку з тим, що критичне сопло не вносить додаткової невизначеності у результат вимірювання, так як воно є засобом відтворення витрати.

Розглянуті відомі результати досліджень критичних сопел і встановлено, що при певних відношеннях тисків на критичному соплі наявне явище зниження коефіцієнта витoku, що потребує подальшого вивчення та виявлення причини цього явища.

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

**Другий розділ** присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням критичних сопел для використання їх як еталонів передавання.

На основі відомого рівняння масової витрати через критичне сопло шляхом внесення поправки на вплив вмісту в повітрі водяної пари на швидкість звуку та врахування залежності величини функції критичного потоку  $C^*$  від тиску та температури ізоентропійно заторможеного перед соплом газу, автором отримано уточнене рівняння для визначення коефіцієнта витoku критичного сопла для застосування його в якості еталонів передавання:

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

$q_{v,e}$  – об'ємна витрата відтворена еталоном;  $x_v$  – молярна частка водяної пари у повітрі;  $R_v$  – універсальна газова стала;  $p_0, T_0$  – тиск та температура ізоентропійно заторможеного газу;  $\rho_0$  – густина повітря за стандартних умов;  $\rho_e$  – густина повітря в еталоні за робочих умов;  $C^*(p_0, T_0)$  – функція критичного потоку, виражена як функція тиску та температури ізоентропійно заторможеного газу;  $M$  – молярна маса повітря;  $S$  – площа перерізу горловини критичного сопла.

Для усунення впливу точності вимірювання діаметра горловини на точність калібрування критичного сопла автором запропоновано об'єднати площу поперечного перерізу, із врахуванням того, що вона є сталою у визначеному діапазоні температур його застосування, з коефіцієнтом витoku і використовувати в якості характеристики критичного сопла градувальний коефіцієнт сопла  $K$ , для визначення якого з (1) автором отримане наступне співвідношення:

$$K = \frac{q_{v,e} \cdot \rho_e}{C^*(p_0, T_0) \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{R_v}{M} T_0 \cdot \rho_0}} \quad (2)$$

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 запропоновано узагальнену характеристику сопла – градувальний коефіцієнт сопла  $K^*$ , який додатково враховує функцію критичного потоку  $C^*(p_0, T_0)$ , яка є постійною при дотриманні умов застосування сопла однаковими з умовами його калібрування. Тоді рівняння (2) набуде вигляду:

$$K^* = \frac{q_{v,e} \cdot \rho_e}{(1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M} T_0 \cdot p_0}} \quad (3)$$

Поряд з описаними характеристиками можна застосовувати відому характеристику критичного сопла, а саме значення об'ємної витрати на соплі приведені до температури 20 °С та відносної вологості 0%  $q_{v,20^\circ\text{C},0\%}$ . Проте цю характеристику неможливо застосовувати при тисках на вході в критичне сопло відмінних від тиску при його калібруванні. Для цього автором запропоновано нормувати номінальне значення об'ємної витрати  $q_{v,20^\circ\text{C},0\%}$  також при тиску 100 кПа –  $q_{v,100\text{kPa},20^\circ\text{C},0\%}$  і визначати коефіцієнт, що враховує вплив тиску на об'ємну витрату  $k_p$ , який визначається як відношення приросту витрати до приросту тиску, шляхом лінійної інтерполяції результатів калібрування критичного сопла при двох значеннях тиску на вході сопла, якщо різниця цих тисків не перевищує 5 кПа. Тоді об'ємна витрата через критичне сопло за робочих умов визначатиметься з отриманого автором рівняння:

$$q_{v,p} = q_{v,100\text{kPa},20,0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_p} \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \sqrt{\frac{T_0}{293,15}} \times [1 - k_p \cdot (p_0 - 100000)] \quad (4)$$

де  $\rho_p$  – густина повітря за робочих умов.

Застосування (4) дозволить підвищити точність вимірювання об'ємної витрати приблизно на 0,01% на кожні 100 Па.

В роботі удосконалено відомий із міжнародного стандарту ISO 9300 алгоритм розрахунку геометричних розмірів критичного сопла шляхом уточнення за результатами експериментальних досліджень емпіричних моделей для визначення оціночного діаметра горловини та коефіцієнта витоку критичного сопла  $C(\text{Re})$ , як функції числа Рейнольдса  $\text{Re}$ . За результатами експериментальних досліджень отримано наступні емпіричні залежності:

– для оціночного значення діаметра горловини критичного сопла:

$$d_o^* = 1,358 \cdot q_{v,3}^{0,497}, \quad (5)$$

де  $q_{v,3}$  – задане в технічному завданні значення об'ємної витрати;

– для коефіцієнта витоку сопла, як функції числа Рейнольдса:

$$C(\text{Re}) = -14412,41016 \cdot \text{Re}^{-1,5} + 316,8535 \cdot \frac{1}{\text{Re}} - 4,94573 \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{Re}}} + 1,00036 \quad (6)$$

За результатами експериментальної перевірки емпіричної моделі (6), максимальне відхилення розрахункового значення коефіцієнта витоку від експериментального не перевищувало 0,25%.

Застосування рівнянь (5) та (6) при розрахунку геометричних розмірів критичних сопел дозволить підвищити точність їх виготовлення у відповідності з

технічними завданнями на установки для повірки лічильників газу в діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 56000.

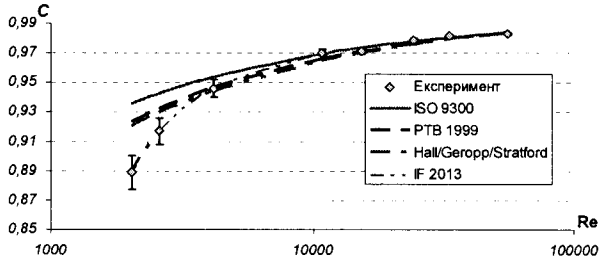


Рис. 1 Порівняння результатів експериментальних досліджень розробленої емпіричної моделі коефіцієнта витoku з відомими моделями

Одним із факторів, що впливає на метрологічні характеристики критичних сопел є відношення тиску на виході критичного сопла до тиску на його вході. В розділі наведено результати експериментальних досліджень впливу відношення тисків на критичному соплі при різних значеннях абсолютного тиску на його вході. Результати досліджень критичних сопел засвідчують наявність зони зниження коефіцієнта витoku в районі відношень тисків від 0,4 до 0,55 при чому, при зменшенні тиску на вході в сопло і для сопел меншого діаметру інтенсивність зниження коефіцієнта витoku більша.

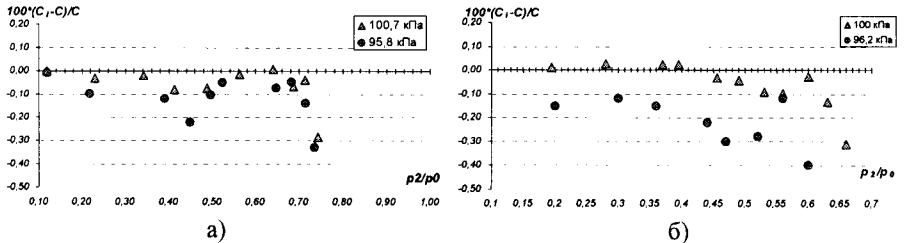


Рис. 2 Залежність відносної зміни коефіцієнта витoku критичного сопла від відношення тисків на виході та вході сопла з діаметром горловини

а) 1,2 мм б) 0,3 мм

Для визначення причини виникнення цього явища здійснено чисельне моделювання, шляхом чисельного розв'язку двохвимірних осесиметричних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для стиснуваного середовища, впливу тиску на виході критичного сопла на величину коефіцієнта витoku для критичного сопла з прямими твірними, з діаметром 0,3 мм та номінальною об'ємною витратою 0,05 м<sup>3</sup>/год. В спрощеній диференціальній формі двовимірні нестационарні рівняння Нав'є-Стокса для стиснуваного середовища в декартовій системі координат запишуться в наступному вигляді:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{1}{y} H_1 + H_2 \quad (7)$$

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.

За допомогою дискретизації рівнянь Нав'є-Стокса методом кінцевих об'ємів вони приводились до системи лінійних блочно-матричних рівнянь, які розв'язувались відомим чисельним методом Гаусса-Зейделя.

В якості граничних умов задавався повний тиск на вході в критичне сопло, та статичний 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 адиабатичною 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.

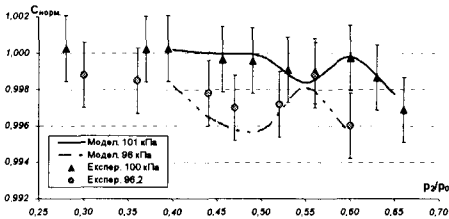


Рис. 3 Залежність нормованого коефіцієнта витіку критичного сопла від величини відношень тисків на соплі при різних абсолютних тисках на вході

За результатами моделювання побудовано графіки залежності нормованого коефіцієнта витіку сопла від величини відношення тисків, розподілу тиску по осі критичного сопла та профілі швидкостей в перерізі переходу горловини сопла до дифузора при різних відношеннях тисків при відповідних значеннях тисків на вході в сопло (рис. 3 – 6).

За результатами чисельного моделювання зроблено висновок, що ефект зниження величини коефіцієнта витіку критичного сопла в діапазоні відношень тисків на ньому від 0,4 до 0,55 зумовлений взаємодією стрибка ущільнення в дифузорі сопла із граничним пристінковим шаром в дифузорі на відстані  $1,42d^*$  –  $1,67d^*$  від горловини сопла, в результаті чого зростає товщина граничного пристінкового шару в соплі і зменшується середня швидкість потоку.

Для підвищення точності вимірювання витрати газу з використанням критичних сопел, критичні сопла з діаметрами горловини менше 2 мм слід застосовувати при значеннях відношення тисків менше 0,40 або індивідуально визначати залежність коефіцієнта витіку від відношення тисків на соплі при різних тисках на вході сопла виду  $C(p_{oi}) = f(p_2/p_0)$ .

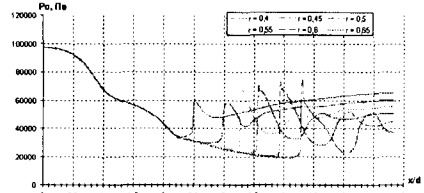


Рис. 4 Розподіли тисків по осі критичного сопла при різних значеннях відношення тиску на соплі за вхідного тиску 101 кПа

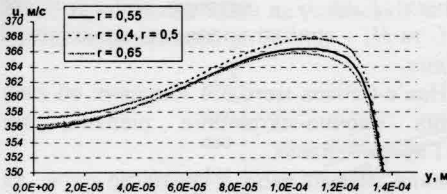


Рис. 5 Профілі швидкостей в перерізі переходу горловини сопла до дифузора при абсолютному тиску на вході сопла 101 кПа при різних значеннях відношення тисків на соплі

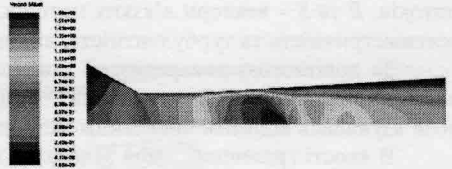


Рис. 6 – Розподіл чисел Маха по поздовжньому перерізі критичного сопла при відношенні тисків 0,55 та тиску на вході 101 кПа

**Третій розділ** присвячений розробленню методів та засобів для забезпечення простежуваності розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу.

Для вирішення проблеми забезпечення прямої простежуваності до державного первинного еталона ДЕГУ 03-01-96 вторинних та робочих еталонів в діапазоні витрат менших від 4 м<sup>3</sup>/год автором запропоновано використовувати еталони передавання на базі критичних сопел.

Оскільки основними параметрами, що визначають величину витрати через критичне сопло є коефіцієнт витіку  $C$  та площа горловини сопла  $S$ , то при паралельному включенні двох критичних сопел до виходу первинного еталона масова витрата газу з еталона  $q_{m\Sigma}$  поділиться на дві пропорційні витрати згідно з принципом балансу мас

$$q_{m\Sigma} = q_{m1} + q_{m2} \quad (8)$$

Із врахуванням того, що тиски та температури на вході двох сопел однакові, а отже однакові густини повітря перед кожним соплом, отримаємо рівняння для об'ємної витрати:

$$q_{v\Sigma} = q_{v1} + q_{v2} = C_1 S_1 C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_v}{M}} \cdot T_0 + C_2 S_2 C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_v}{M}} \cdot T_0, \quad (9)$$

де  $q_{v\Sigma}, q_{v1}, q_{v2}$  – об'ємна витрата з первинного еталона, через перше та друге критичне сопло, відповідно.

Із (9) автором отримано співвідношення для визначення номінальних значень об'ємної витрати для кожного сопла:

$$q_{v1} = \frac{q_{v\Sigma}}{1 + \frac{C_2 d_2^2}{C_1 d_1^2}}; \quad q_{v2} = \frac{q_{v\Sigma}}{1 + \frac{C_1 d_1^2}{C_2 d_2^2}} \quad (10)$$

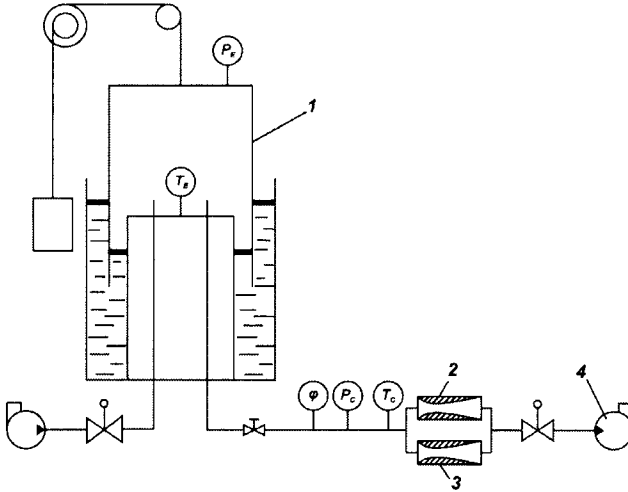


Рис. 7 Схема дослідження паралельно включених сопел критичного витoku газу на Державному первинному еталоні

- 1 – Державний первинний еталон;
- 2, 3 – досліджувані критичні сопла;
- 4 – вакуумний насос

Розроблений метод має кілька варіантів реалізації: 1) коли калібруються два ідентичні сопла з невідомими значеннями витрати; 2) коли витрата одного сопла відома, а другого ні, тоді значення об'ємної витрати для другого критичного сопла визначається як різниця сумарної приведенної витрати і номінальної витрати першого сопла:

$$q_{v2,20^{\circ}\text{C},0\%} = q_{v\Sigma,20^{\circ}\text{C},0\%} - q_{v1,20^{\circ}\text{C},0\%} \quad (11)$$

Третій варіант реалізації розробленого методу полягає у використанні в якості характеристики критичного сопла градуовального коефіцієнта  $K$ , при цьому перше критичне сопло попередньо градується на первинному еталоні і йому присвоюється значення  $K_1$  та номінальна об'ємна витрата  $q_1$ , тоді для другого невідомого сопла значення  $K_2$  визначатиметься із врахуванням (9) як:

$$K_2 = K_1 \left( \frac{q_{v\Sigma}}{q_{v1}} - 1 \right) \quad (12)$$

Звідки об'ємна витрата для невідомого сопла:

$$q_{v2} = K_1 \left( \frac{q_{v\Sigma}}{q_{v1}} - 1 \right) \cdot C^*(p_0, T_0) \cdot \sqrt{\frac{R_u}{M}} \cdot T_0 \quad (13)$$

Перевагою застосування другого методу є виключення впливу точності вимірювання діаметра горловини сопла із загального бюджету невизначеності. Розроблений метод апробовано на вторинному еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-01-08.

Проведений метрологічний аналіз розробленого методу показує, що перший та другий варіанти реалізації мають обмежене застосування, так для досягнення невизначеності вимірювань  $0,30\%$  максимально допустиме відношення номінальних витрат двох сопел не повинно перевищувати 1:2.

Результати апробації третього варіанту реалізації методу та його метрологічний аналіз засвідчують можливість його застосування без обмеження співвідношення номінальних витрат двох сопел і при цьому з бюджету невизначеності вилучені складові зумовлені неточністю вимірювання діаметрів горловин. При дослідженні критичних сопел на державному первинному еталоні досягається невизначеність вимірювань для кожного критичного сопла не більше  $0,25\%$ .

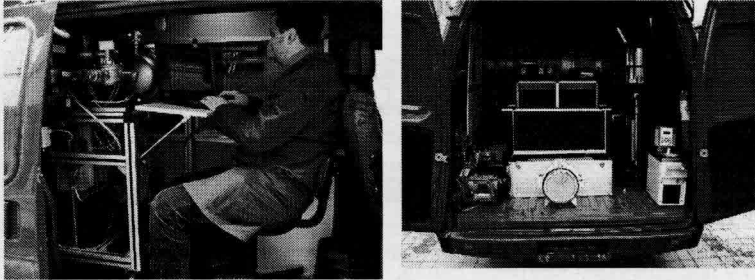


Рис. 8 Зовнішній вигляд пересувної лабораторії для забезпечення простежуваності

Розроблений метод впроваджений в метрологічну практику для забезпечення простежуваності вимірювань в діапазоні витрат нижче мінімальної відтворюваної державним первинним еталоном ДЕТУ 03-01-96 і реалізується з використанням мобільної установки на критичних соплах, яка експлуатується в складі пересувної лабораторії для забезпечення простежуваності робочих засобів вимірювань до державного первинного еталона.

Другим методом забезпечення простежуваності до державного первинного еталона за допомогою критичних сопел є метод з послідовним їх під'єднанням. При цьому методі одне критичне сопло попередньо калібрується на державному первинному еталоні і використовується в якості опорного. Метод реалізується шляхом послідовного під'єднання критичних сопел з різними діаметрами горловин (рис.9).

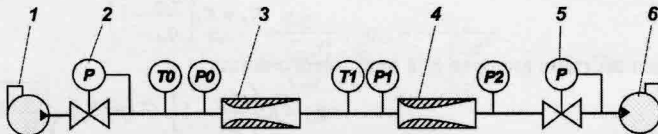


Рис. 9 Схема реалізації методу калібрування критичного сопла за допомогою опорного критичного сопла

- 1 – компресор;
- 2, 5 – регулятори тиску;
- 3 – дослідне критичне сопло;

4 – опорне критичне сопло;

6 – вакуумний насос.

Із балансу мас для представленої системи автором отримано рівняння для визначення градуювального коефіцієнта досліджуваного сопла:

$$K_2 = K_1 \left( \frac{P_0}{P_1} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad (14)$$

Для передавання розміру одиниці об'ємної витрати отриманої від державного первинного еталона до еталонів, що працюють на тиску вищому за атмосферний автором запропоновано розраховувати градуювальний коефіцієнт досліджуваного сопла за наступною формулою:

$$K_2 = K_1 \frac{C_1^*(P_{01}, T_{01})}{C_2^*(P_{02}, T_{02})} \left( \frac{P_{01}}{P_{02}} \right) \sqrt{\frac{Z_{02} T_{02}}{T_{01}}}, \quad (15)$$

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

Для простежуваності робочих засобів вимірювань до державного первинного еталона в діапазоні витрат вище верхньої межі вимірювань первинного еталона автором удосконалено метод з використанням паралельного під'єднання набору критичних сопел та еталона передавання на базі лічильника газу. При паралельній роботі сопел і лічильника витрата через еталонну секцію із умови балансу мас з врахуванням впливу тиску вимірюваного середовища на вході кожного критичного сопла автором уточнено рівняння вимірювання об'ємної витрати через дослідну секцію:

$$q_{дл} = \frac{1}{\rho_{дл}} \cdot \left( \rho_c (1 + 0.169x_v) \sqrt{\frac{T_c}{293,15}} \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1}^n (q_{v100кПа, 20^\circ C, 0\%} [1 - k_{p,i} (p_0 - 100000)]) + \rho_{дл} \cdot \frac{N}{K \cdot t} \right), \quad (16)$$

де  $\rho_{дл}$  – густина вимірюваного середовища в дослідній секції;  $\rho_c$  – густина вимірюваного середовища в критичних соплах;  $\rho_{дл}$  – густина вимірюваного середовища в еталоні передавання;  $N$  – кількість імпульсів з еталона передавання за час вимірювання  $t$ ;  $K$  – коефіцієнт перетворення еталона передавання;  $q_{v100кПа, 20^\circ C, 0\%}$  – об'ємна витрата приведена до абсолютного тиску 100 кПа, температури 20°C та відносної вологості 0% для  $i$  – того критичного сопла,  $k_{p,i}$  – коефіцієнт, що враховує вплив тиску на об'ємну витрату для  $i$  – того критичного сопла.

Для виключення впливу на точність вимірювань перехресних потоків між еталонними секціями визначено критерій їх виникнення.

В результаті метрологічного аналізу розробленого методу при умові застосування критичних сопел атестованих безпосередньо на державному первинному еталоні ДЕТУ 03-01-96 та при відношенні витрат між еталонними секціями 1:100 і одночасному застосуванні не більше шести сопел, невизначеність об'ємної витрати через дослідну секцію знаходитиметься в межах від 0,17% до 0,25%.

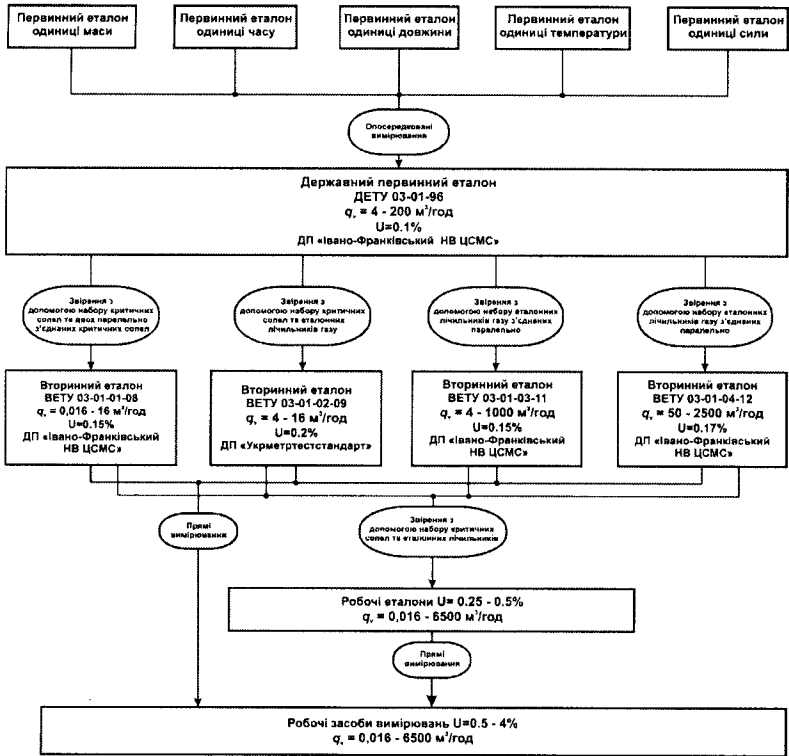


Рис. 10 Ланцюг простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу в Україні

Для забезпечення простежуваності вимірювань об'ємної витрати газу 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 (рис. 10).

**Четвертий розділ** присвячений питанням розроблення та впровадження нормативної бази для забезпечення простежуваності результатів вимірювань при передаванні розміру одиниці об'єму та об'ємної витрати газу.

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 менше  $4 \text{ м}^3/\text{год}$ .

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методику калібрування критичних сопел, яка дозволить застосовувати критичні сопла для забезпечення простежуваності вимірювань за допомогою критичних сопел.



Розроблено методику калібрування еталонів передавання на базі лічильників газу для забезпечення передавання розміру одиниці вимірювання від державного первинного еталона до робочих еталонів – повірочних установок.

Для технічної реалізації 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 витратовимірвальних установок та еталонних лічильників та витратомірів газу в діапазоні об'ємних витрат від  $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$  до  $16 \text{ м}^3/\text{год}$  розроблено та впроваджено пересувну лабораторію.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ 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 до 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 складала 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 витоку 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  $0,016 \text{ м}^3/\text{год}$  до  $4 \text{ м}^3/\text{год}$ . 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Я. Безгачнюк Спосіб забезпечення простежуваності вимірювань витрати газу в діапазоні нижче мінімальної, відтворюваної державним еталonom/Я. Безгачнюк //Метрологія та прилади. – 2011. – № 1. – с. 46–50.

2. Безгачнюк Я. Дослідження впливу тиску на виході критичних сопел на їх характеристики/Я. Безгачнюк// Нафтогазова енергетика. – 2013. – №1(19). – С. 48-59.

3. 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.

4. Петришин І. Вторинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні витрат від 4 до 1000 м<sup>3</sup>/год: створення та атестація/ Петришин І., Джочко П., Безгачнюк Я., Пелікан Ю., Бас О.// Метрологія та прилади. – 2011. - №4. – С. 18-22.

5. 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.

6. Петришин І.С. Особливості повірки лічильників газу в робочих умовах / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Український метрологічний журнал. – 2006. – №2. – С. 46–48.

7. Петришин І.С. До питання ідентифікації розподілу похибок еталону /Петришин І.С., Безгачнюк Я.В.// Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – №1(7). – с. 59-62.

8. І.С. Петришин Дослідження метрологічних характеристик лічильників газу в реальних умовах експлуатації та їх вплив на точність обліку природного газу /І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк// Нафтогазова енергетика. – 2006. – №1(1). – с. 111-114.

9. І. Петришин Система метрологічного забезпечення засобів вимірювання об'єму газу / І. Петришин, М. Кузь, Я. Безгачнюк // Метрологія та прилади. – 2007. – №2. – с. 25 – 27.

10. 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.

11. 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).

12. 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.

13. 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.

14. 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: ПФФ, НТУУ “КПІ”, 2006. – С. 292–293.

15. 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.

16. 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.

17. 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: ПФФ, НТУУ “КПІ”, 2013.

18. 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).

19. 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).

20. 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).

21. 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).

22. 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).

23. 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.

24. Пат. 61881 У 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.

## АНОТАЦІЯ

**Безгачнюк Я.В. Вдосконалення методів та пристроїв забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого звання кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладного завдання забезпечення простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу шляхом удосконалення методів, пристроїв та розроблення нормативної бази забезпечення простежуваності розміру одиниці вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу робочих засобів вимірювання, що використовуються для обліку природного газу до державного первинного еталона.

Здійснено теоретичні та експериментальні дослідження критичних сопел для використання їх як еталонів передавання. Проведено чисельне моделювання впливу

відношення тисків на критичному соплі на величину коефіцієнта витoku. Удосконалено алгоритм розрахунку геометричних розмірів критичного сопла. Розроблено метод забезпечення простежуваності в діапазоні витрат нижче мінімальної відтворюваної державним первинним еталоном об'єму та витрати газу з використанням паралельного під'єднання критичних сопл, який дозволяє забезпечувати неперервний ланцюг простежуваності до державного первинного еталона в діапазоні витрат менше 4 м<sup>3</sup>/год. 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. Розроблені і впроваджені у метрологічну практику України нормативні документи, які регламентують методики проведення калібрування для забезпечення простежуваності вимірювань.

Ключові слова: критичне сопло, простежуваність вимірювань, невизначеність вимірювань, еталон передавання, ланцюг простежуваності

### АННОТАЦІЯ

**Безгачнюк Я.В. Усовершенствование методов и устройств обеспечения прослеживаемости измерений объема и объемного расхода газа.** - Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 - стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск 2013.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи обеспечения прослеживаемости измерений объема и объемного расхода газа путем совершенствования методов, устройств и разработка нормативной базы обеспечения прослеживаемости размера единицы измерения объема и объемного расхода газа рабочих средств измерения, используемых для учета природного газа в государственном первичном эталоне.

Осуществлены теоретические и экспериментальные исследования критических сопел для использования их в качестве эталонов сравнения. Проведено численное моделирование влияния отношения давлений на критическом сопле на величину коэффициента истечения. По результатам моделирования определено область отношений давлений на критическом сопле, при которых наблюдается снижение коэффициента истечения сопла, что приводит к возникновению систематической погрешности измерения расхода газа. В результате разработаны практические рекомендации о применении критических сопел для повышения точности измерения расхода газа. Усовершенствован алгоритм расчета геометрических размеров критического сопла, который позволяет повысить точность изготовления критических сопел. Уточнено уравнение измерения расхода газа критическим соплом путем учета влияющих факторов, что позволяет уменьшить неопределенность измерений при передаче единицы объемного расхода газа от первичного эталона иерархически подчиненным средствам измерений. Разработан метод обеспечения прослеживаемости измерений в диапазоне расходов ниже минимального воспроизводимого государственным первичным эталоном единиц объема и объемного расхода газа с использованием параллельного подключения

критических сопел, который позволяет обеспечивать непрерывную цепь прослеживаемости рабочих средств измерения объема и объемного расхода газа к государственному первичному эталону в диапазоне расходов менее  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Усовершенствованы методы обеспечения прослеживаемости измерений расхода газа с использованием последовательного соединения критических сопел, а также параллельного подключения критических сопел и эталонного счетчика газа. Разработана цепь прослеживаемости измерений от государственного первичного эталона единицы объема и объемного расхода газа к рабочим средствам измерений с нормированными значениями неопределенностей по всей иерархии передачи размера единицы расхода газа. Разработаны и внедрены в метрологическую практику Украины нормативные документы, регламентирующие методики проведения калибровки для обеспечения прослеживаемости измерений.

Ключевые слова: критическое сопло, прослеживаемость измерений, неопределенность измерений, эталон сравнения, цепь прослеживаемости

### ABSTRACT

**Bezhachnyuk Y. Improved methods and apparatus to ensure traceability of measurements of volume and volumetric gas flowrate.** - Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.01.02 - standardization, certification and metrology. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2013.

The thesis is devoted to the solution of scientific and applied problems of traceability of measurement of gas volume and volumetric flowrate through improved methods, devices, and development of the normative base to ensure traceability of measurement unit to working gas flow measuring devices used for the account of natural gas from the state primary standard.

The theoretical and experimental studies of critical nozzles for use as transfer standards were carried out. The numerical simulation of influence of the pressure ratio on the critical nozzle discharge coefficient. Improved algorithm to calculate geometrical dimensions of the critical nozzle. The method of traceability in the range of flowrates below the minimum reproducible by state primary standard of unit of volume and gas flowrate using a parallel connection of critical nozzles, which can provide a unbroken chain of traceability to the state primary standard in the range of flowrates below than  $4 \text{ м}^3/\text{h}$ . A chain of traceability of measurements from the state primary standard of unit of volume and volumetric gas flowrate to the working measuring instruments with normalized values of uncertainty throughout the hierarchy transfer of size of gas flowrate unit was developed. Developed and implemented in Ukraine metrological practice regulations governing the methods of calibration to ensure traceability of measurements.

Keywords: critical nozzle, measurement traceability, uncertainty of measurement, transfer standard, traceability chain

