

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

На правах рукопису

КЛОЧКО НАТАЛІЯ БОГДАНІВНА

УДК 006.86:681.121.4

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ТУРБІННИХ
ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ**

Спеціальність 05.01.02 – Стандартизація, сертифікація та метрологічне
забезпечення

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

*Цей примірник дисертації ідентифікований
за змістом з машинним примірником
дисертації поданим до вченої вченої
ради ДДН.052.03
Вчений секретар *М. Драмчук*
Науковий керівник *08.09.2014р*
Чеховський Степан Андрійович,
кандидат технічних наук, професор*

Івано-Франківськ – 2014



d524

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПРАЦЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ	11
1.1. Аналіз сучасного стану моделювання роботи турбінних лічильників газу.....	11
1.2. Турбінні лічильники як об'єкт метрологічних досліджень.....	15
1.3. Аналіз алгоритмів опрацювання результатів вимірювань при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу.....	19
1.4. Аналіз методів статистичного опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу.....	21
1.4.1. Основні положення математичної статистики під час опрацювання вимірювальної інформації.....	21
1.4.2. Аналіз методів математичної статистики при ідентифікації законів розподілу результатів вимірювання.....	25
1.5. Еталонні установки для метрологічного контролю турбінних лічильників газу.....	29
1.6. Постановка задач досліджень.....	42
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ.....	43
2.1. Моделювання процесу вимірювання об'єму газу турбінними лічильниками.....	43
2.1.1. Розроблення графічної моделі функціонування турбінних лічильників газу...	43
2.1.2. Удосконалення математичної моделі турбінних лічильників газу	47
2.2. Дослідження впливу параметрів вимірювального середовища на стабільність коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу.....	54
2.2.1. Моделювання впливу параметрів природного газу на коефіцієнт перетворення лічильника.....	54

2.2.2 Дослідження стабільності робочих умов еталонної установки при дослідженні метрологічних характеристик турбінних лічильників.....	59
2.3 Висновки до другого розділу.....	61
РОЗДІЛ 3. ЕКСПРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ.....	63
3.1 Експериментальні дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу.....	63
3.2 Застосування методів математичної статистики для ідентифікації закону розподілу результатів вимірювання турбінними лічильниками.....	69
3.3 Застосування інформаційного підходу під час опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу.....	76
3.4 Дослідження закономірностей зміни ентропійного коефіцієнту при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників.....	85
3.5 Дослідження моделей вимірювання об'єму газу турбінним лічильником.....	91
3.6 Висновки до третього розділу.....	94
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ПРИ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ.....	96
4.1 Методика визначення коефіцієнта перетворення для корекції систематичної похибки турбінних лічильників газу.....	96
4.2 Методика визначення ентропійного коефіцієнта для оцінювання випадкової похибки турбінних лічильників газу.....	98
4.3 Удосконалення алгоритму опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу при їх метрологічних дослідженнях.....	99
4.4 Апробація методики опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу із врахуванням основних етапів математичної статистики.....	105
4.5 Розроблення нормативного документа з методики калібрування турбінних лічильників на реальному середовищі.....	110
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	111

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115
Додаток А.....	127
Додаток Б.....	130
Додаток В.....	139
Додаток Г.....	142
Додаток Д.....	152
Додаток Е.....	158

ВСТУП

Один із шляхів досягнення енергетичної безпеки України є раціональне та ефективне використання природного газу. Її реалізація неможлива без застосування сучасних високоточних засобів вимірювання об'єму та витрати природного газу та належного їх метрологічного забезпечення. Поряд з цим потребує поглибленого вивчення питання забезпечення високих метрологічних характеристик пристроїв та систем вимірювання витрати потоків газу для контролю та керування технологічними процесами в таких енергоємних галузях, як нафтогазовидобувна та нафто- і газопереробна. На сьогоднішній час оцінювання точності промислових лічильників газу, в тому числі і турбінних, здійснюється за допомогою еталонних установок вимірювання об'єму і витрати газу. Оскільки ці дослідження проводяться, в основному, на повітрі в силу практичної відсутності еталонних установок з функціонуванням на природному газі за великих витрат, все більшої актуальності набуває необхідність вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу. При цьому необхідною є оптимізація методів опрацювання вимірювальної інформації на базі імовірнісних методів оцінювання метрологічних характеристик засобів обліку природного газу.

Відомі дослідження у сфері витратометрії природного газу, які виконані вітчизняними та іноземними вченими, зокрема, І.С. Бродиним [1], Є.П. Пістуном [2], І.С. Петришиним [3-6], О.Є. Середюком [4,7,8], В.С. Вошинським [9,10], Л.В. Лесовим [2] (Україна), П.П. Кремльовським [11], А.А. Тупіченковим [12], А.П. Герасимовим [13] (Російська Федерація), З. Кабзою (Польща) [14], Д. Допхайде [15] (Німеччина), Е.Томсоном [16], Дж. Греєм [16], В.Ф.З.Лі [17], Дж. Евансом [17] (США) та ін. стосуються, перш за все, розроблення еталонних засобів витратометрії та вдосконалення методологічних аспектів проектування і експлуатації робочих засобів вимірювання об'єму та витрати природного газу та створення науково-методичної та приладної бази у вказаній галузі. Однак питання вивчення імовірнісних характеристик лічильників газу, в тому числі і турбінних, при їх метрологічних дослідженнях, потребує ґрунтовного доопрацювання.

Відомі роботи в галузі вимірювального експерименту вітчизняних авторів, зокрема В.М. Чинкова [18,19], Є.Т. Володарського [20], Л.О. Кошевої [20,21] та іноземних Н.Джонсона [22], Ф.Лиона [22], М.Кендалла [23], А.Стьюарта [23] присвячені дослідженню імовірнісних характеристик теоретичних аспектів та засобів вимірювання параметрів технологічних процесів і практично не стосуються сфери витратометрії природного газу. Саме тому **актуальним науково-прикладним завданням** є удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу при їх застосуванні як еталонних засобів вимірювання.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких відображені у дисертаційній роботі, виконувалися впродовж 2009-2014 років згідно з держбюджетною науково-дослідною тематикою кафедри «Інформаційно-вимірювальна техніка» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу "Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрат та контролю обладнання і технологічних параметрів в нафтогазовій галузі" (ДРН 0109U008878).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у вирішенні науково-прикладного завдання у галузі метрології – підвищення точності турбінних лічильників газу шляхом удосконалення методів та розроблення нормативної бази для покращення оцінювання метрологічних характеристик турбінних лічильників при обліку природного газу.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

- провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку методів оцінювання точності турбінних лічильників газу в науково-прикладних, нормативних та технічних аспектах;
- удосконалити модель процесу функціонування турбінного лічильника газу з метою врахування конструктивних параметрів турбіни, умов її експлуатації та параметрів природного газу на метрологічні характеристики турбінних лічильників газу;
- здійснити експериментальні дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу на реальному середовищі для оцінювання виду законів

розподілу результатів вимірювання та їх зв'язку з випадковою складовою похибки турбінних лічильників;

– удосконалити концепцію застосування методів математичної статистики при опрацюванні результатів вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками;

– удосконалити методи оцінювання точності турбінних лічильників газу та розробити алгоритми їх практичної реалізації;

– розробити нормативний документ з практичного застосування удосконаленого методу оцінювання точності турбінних лічильників при їх калібруванні.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками.

Предметом дослідження є наукова, прикладна (в аспекті інформаційного забезпечення) та нормативна бази оцінювання метрологічних характеристик еталонних турбінних лічильників газу.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз, проведений в дисертаційній роботі, ґрунтувався на використанні методів математичного моделювання фізичних процесів у турбінних лічильниках газу на базі основних положень теоретичної механіки, газодинаміки та критеріїв гідродинамічної подібності потоків, методів теорії імовірності, математичної статистики, теорії похибок та теорії невизначеності при оцінюванні метрологічних характеристик турбінних лічильників газу.

Експериментальні дослідження здійснювались з використанням методів теорії вимірювань і планування експерименту, математичної статистики та теорії імовірності, методів числового опрацювання результатів експериментів із використанням ПЕОМ. Для експериментального визначення метрологічних характеристик турбінних лічильників на природному газі застосовувалась сдина створена в Україні калібрувальна установка на базі еталонних лічильників, яка функціонує на природному газі в ПАТ «Івано-Франківсьгаз».

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи.

1. Удосконалено математичну модель процесу функціонування турбінного лічильника газу, яка враховує конструктивні параметри турбіни, критерії подібності

гідродинамічних потоків турбіни, умови її експлуатації та параметри природного газу, що дозволяє кількісно оцінити систематичну складову похибки, чим досягається підвищення точності результатів вимірювання турбінними лічильниками газу при їх калібруванні як еталонних засобів.

2. Вперше експериментальним шляхом встановлено види законів розподілу результатів вимірювання об'єму газу за різних заданих фіксованих значень об'ємної витрати для турбінних лічильників типорозмірів G400 та G160, що дає можливість підвищити оцінку точності результатів вимірювання шляхом уточнення діапазону зміни випадкової складової похибки результатів вимірювання об'єму за різних витратних режимів турбінних лічильників газу.

3. Удосконалено концепцію застосування методів математичної статистики шляхом ідентифікації виду закону розподілу на базі інформаційного підходу при опрацюванні результатів вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками, яка дозволяє підвищити оцінку точності та достовірності результатів вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками.

4. Удосконалено методи оцінювання точності турбінних лічильників газу шляхом одночасного коригування систематичної складової похибки результатів вимірювання об'єму та оцінювання випадкової складової, які лягли в основу розроблення нормативного документу з оцінювання точності турбінних лічильників газу при їх калібруванні, що відкриває нові практичні аспекти створення еталонних засобів вимірювання об'єму газу .

Практична цінність одержаних результатів полягає у:

- експериментальному підтвердженні за допомогою калібрувальної установки ПАТ «Івано-Франківськгаз», яка функціонує на природному газі, адекватності розробленої удосконаленої моделі функціонування турбінних лічильників газу та встановленні законів розподілу результатів вимірювання ними об'єму газу;

- розробленні та впровадженні у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» нормативного документу з методики калібрування турбінних лічильників газу на реальному середовищі при їх застосуванні як еталонних засобів вимірювання об'єму природного газу;

– використанні результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при підготовці фахівців за освітньо-професійними програмами спеціаліста і магістра спеціальності «Метрологія та вимірювальна техніка» на кафедрі «Інформаційно-вимірювальна техніка» з дисциплін «Вимірювальний експеримент та обробка результатів», «Теоретичні основи метрологічного забезпечення витратовимірювання».

Особистий внесок здобувача. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, висновки та рекомендації, що представлені до захисту, одержані автором особисто і стосуються удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників та алгоритму опрацювання результатів вимірювання об'єму природного газу [24].

У роботах, опублікованих у співавторстві, використані результати одержані здобувачем особисто, до яких належать: аналіз джерел невизначеностей під час вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками [25,26]; встановлення виду закону розподілу результатів вимірювання [27,28]; обґрунтування доцільності застосування турбінних лічильників у складі витратовимірювального комплексу, який використовується для виявлення витоків природного газу в газорозподільних мережах [25,29]; порівняльний аналіз теоретичних методів статистичної обробки експериментальних даних, які застосовуються при ідентифікації законів розподілу [30]; розроблено діаграму Ісікави для функціонування турбінних лічильників газу [31]; розроблена концепція інноваційних технологій при вивченні метрологічних характеристик турбінних лічильників газу [32]; розроблені та апробовані методи оцінювання точності турбінних лічильників газу [33]; розроблено алгоритми коригування систематичної складової похибки результатів вимірювання об'єму та оцінювання випадкової складової похибки турбінних лічильників газу [97].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 7-ій міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування 2008: стан і перспективи” (м.Київ), 6-ій Всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості

газу» (м.Івано-Франківськ, 2009), 9-ій міжнародній науково–технічній конференції «Приладобудування 2010: стан і перспективи» (м.Київ), 7-ій всеукраїнській науково–технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (м.Івано-Франківськ, 2011), 11-ій міжнародній науково–технічній конференції «Приладобудування 2012» (м.Київ), 1-ій всеукраїнській науково-методичній конференції «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей» (м.Івано-Франківськ, 2012).

Крім того матеріали роботи доповідались на наукових семінарах кафедри «Інформаційно-вимірювальна техніка» впродовж 2009-2014рр..

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових працях, із них 7 статей (із них 1 одноосібна та 1 у науково-метричному журналі) у фахових наукових виданнях, що входять до переліку ДАК України, та в 6 публікаціях за матеріалами праць науково-технічних конференцій, крім того розроблено 1 нормативний документ.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПРАЦЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

У розділі проводиться аналіз шляхів оцінювання точності турбінних лічильників газу. Розглядаються методи ідентифікації закону розподілу результатів вимірювання об'єму газу. Висвітлюються основні етапи опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу та їх основні показники якості. Здійснюється короткий огляд еталонних установок, що використовуються для метрологічних досліджень турбінних газових лічильників. Формулюється постановка задач досліджень.

1.1 Аналіз сучасного стану моделювання роботи турбінних лічильників газу

Турбінні лічильники газу широко використовуються в інженерній практиці. Простота монтажу та експлуатації в поєднанні з високою надійністю та точністю є достатніми для їх застосування при вирішенні інженерних питань. Для прикладу, при вимірюванні в розподільних мережах турбінні лічильники обліковують 60–70% всього споживаного газу.

Турбінні лічильники відносяться до класу тахометричних, загальною ознакою яких є обертання чутливого елемента (перетворювача) під дією рушійного моменту, який створюється потоком [11,34,35]. Таким елементом у турбінних лічильників є тангенціальна або аксіальна турбіна.

На рис. 1.1 представлено схему турбінного лічильника з аксіальною турбіною.

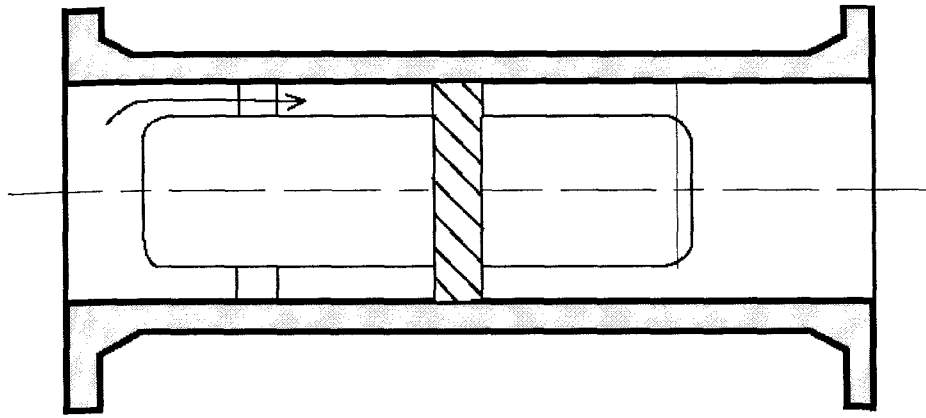


Рис. 1.1. Схема турбінного лічильника з аксіальною турбіною.

Слід зазначити, що практично донедавна турбінні лічильники рідко використовувалися для вимірювання об'ємної витрати природного газу. Це пояснювалося тим, що рушійний момент на газі незначний. Але, зважаючи на можливість вдосконалення конструкції, застосування нових матеріалів та методів опрацювання результатів вимірювання ними суттєво змінило ситуацію.

Типовий турбінний лічильник складається з трьох основних вузлів: аеродинамічно збалансованої турбіни, корпусу та відлікового пристрою [11].

Розміри отворів для подачі газу до турбіни розраховані так, щоб забезпечити необхідні швидкості потоків газу в трубопроводі за максимальної витрати лічильника. Таким чином втрати тиску на лічильнику мінімальні. Проте, оскільки енергія обертання лопатей турбіни – це кінетична енергія потоку, то конструктивно отвори виконуються як направляючі для збільшення швидкості газу і її дії на лопатки турбіни. Турбіна виконується з великим радіусом лопаток, щоб створити максимальну рушійну силу. Для конкретних умов експлуатації окремо виготовляють та проектують турбінний лічильник, чим забезпечується необхідна висока точність і діапазон вимірювання для конкретних завдань.

Ідеальний турбінний лічильник не має сил опору, характеризується нескінченно тонкими лопатками турбіни, сумарна рушійна сила сконцентрована в середній точці радіуса, а також має рівномірний розподіл швидкості на лопаті в осьовому напрямку [16].

Мінімальна витрата турбінного лічильника зазвичай визначається серією випробувань при низькому тиску, щоб встановити витрату, при якій лічильник досягає прийнятних показів (мінімальних, коли він уже є працездатним). Мінімальна витрата для будь-якого іншого тиску може бути знайдена шляхом прирівнювання рушійних моментів при нових умовах до визначених при випробуваннях з врахуванням густини газу[6]:

$$[\rho_B \cdot q_{vB}^2(\min)] = (\rho \cdot q_{v\min}^2). \quad (1.1)$$

Оскільки [6]:

$$\rho = \rho_B \frac{P K_B}{P_B K}, \quad (1.2)$$

де P_B , P , K_B , K – значення абсолютного тиску газу та коефіцієнта стисливості для умов випробування та експлуатації (нові умови) відповідно; $q_{vB}(\min)$, $q_{v\min}$ – робоча об'ємна витрата через турбінний лічильник для умов випробування та експлуатації (нові умови) відповідно.

Спільний розв'язок (1.1) і (1.2) дає[6]:

$$Q_{\min} = Q_B(\min) \sqrt{\frac{P_B}{P}} \cdot \sqrt{\frac{K}{K_B}}. \quad (1.3)$$

Таким чином бачимо, що мінімальна робоча об'ємна витрата через турбінний лічильник змінюється як корінь квадратний з відношення тисків.

Максимальна вимірювана робоча об'ємна витрата через турбінний лічильник визначається механічними і міцнісними властивостями турбіни, а також максимально можливим ударним навантаженням на її опори [16].

Зазвичай, конструкція повинна забезпечувати необхідну градуовальну характеристику лічильника, що визначає його умови застосування та діапазон вимірювання.

Питанням підвищення точності турбінних лічильників газу задавалися не лише іноземні, а й вітчизняні науковці в галузі вимірювання витрати. Скажімо, на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень роботи турбінних лічильників газу у [9,10] запропонована математична модель швидкостей потоку в

кільцевому січенні турбінного лічильника для турбулентного та ламінарного потоків, що дало можливість використання запропонованих моделей для створення високоточних турбінних лічильників газу [10].

У [37] розроблена методика визначення сил тертя для турбіни лічильника або витратоміра в статичних і перехідних режимах, а також методика визначення сил тертя для турбіни лічильника або витратоміра в статичних і перехідних режимах.

Розроблений комплексний алгоритм оптимізації конструктивних параметрів запропонований у [37] дозволив створити дослідний патентнозахищений зразок турбінних перетворювачів витрати з аксіальним гідродинамічно врівноваженим чутливим елементом з більш досконалішими метрологічними характеристиками порівняно з існуючими аналогами. У працях [38-39] досліджено методику визначення моменту в'язкого тертя, що діє на чутливий елемент турбінного первинного перетворювача витрат, визначення сил та осевого зусилля, що врівноважують ротор. Праці відомих науковців у галузі вимірювання об'ємної витрати [11,34,40] лягли в основу всіх вище перелічених розроблень та досягнень в оцінюванні точності турбінних лічильників газу. Коли мова йде про турбінні лічильники газу, варто зауважити, що, інтенсивність збільшення або зменшення похибки залежить від амплітуди відхилення витрати від усталеного значення і ця похибка корелює з періодами збільшення і зменшення [37]. Ці відхилення при відомих характеристиках лічильників можна враховувати і компенсувати за допомогою коректорів, шляхом внесення поправки на систематичну складову похибки. Розроблення, отримані в результаті наукових досліджень турбінних лічильників газу, дали можливість врахування багатьох параметрів, що визначають систематичну складову похибки турбінних лічильників газу. Проте на сьогоднішній день не існує методики, яка б враховувала не лише систематичну похибку турбінного лічильника, яка визначається геометричними параметрами турбіни, а й випадкову шляхом опрацювання результатів вимірювання лічильниками.

Іноземні науковці провели ряд наукових досліджень в галузі вимірювання об'ємної витрати газу турбінними лічильниками. Вивчення природи утворення сил

опору вимірювального середовища [41], дослідження впливу зміни режиму потоку газу на похибку турбінного лічильника [42-44], вивчення оптимальних умов калібрування турбінних лічильників газу [45-49], все це лягло в основу запропонованих методів підвищення точності турбінних лічильників газу, шляхом врахування параметрів потоку та самого турбінного лічильника. У працях іноземних науковців не досліджено, як зміняться випадкові характеристики похибки для певного типорозміру лічильника в залежності від діапазону вимірювання. Оцінювання випадкової складової похибки результатів вимірювання об'ємної витрати газу доцільно провести із застосуванням методів математичної статистики, оскільки саме такий підхід дає змогу визначити статистичні параметри вибірки, що дозволить підвищити точність турбінних лічильників газу.

Постає питання підвищення точності турбінних лічильників газу на основі уже отриманих результатів наукових досліджень вітчизняних та іноземних науковців та вивченні зміни похибки лічильника в залежності від діапазону вимірювання.

1.2 Турбінні лічильники як об'єкт метрологічних досліджень

Опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу здійснюють із врахуванням основних показників якості вимірювання. При цьому контролюють і основні метрологічні характеристики лічильників. Основні показники якості вимірювання та основні метрологічні характеристики турбінних лічильників регламентуються відповідно до [53].

Під час виконання метрологічних досліджень турбінних газових лічильників, зокрема метрологічної атестації, важливим є можливість відтворення одного і того ж контрольного значення об'єму за різних умов (різними засобами і методами, в різний час та в різних місцях). Така характеристика вимірювання називається відтворюваністю. Визначення відтворюваності результатів вимірювання об'єму газу турбінними лічильниками проводять після 24 годин технологічного прогону еталонного лічильника, який проводять після першого циклу його досліджень. При

цьому визначають та записують у протокол наступні параметри: контрольний об'єму, що відтворюється еталоном (V_{Kj}), м³; час проходження контрольного об'єму (t_{ji}), с; кількість імпульсів з еталонного лічильника (N_{ji}); надлишковий тиск у еталоні (P_{Ei}) та перед (або у) еталонним лічильником, (P_{ji}), Па; температури у еталоні (T_{Eji}), та на виході (вході) в еталонний лічильник (T_{ji}), °С; 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 еталонний лічильник [4]:

$$V_{ji} = V_{Kj} \times \frac{P_{aj} + P_{Eji}}{P_{aj} + P_{ji}} \times \frac{T_{ji} + c}{T_{Eji} + T_c}, \quad (1.4)$$

де T_c – значення температури за стандартних умов, °С.

– коефіцієнта перетворення еталонного лічильника [4]:

$$K_{ji} = \frac{N_{ji}}{V_{ji}}, \quad (1.5)$$

– середнє значення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника за j -того значення об'ємної витрати для n результатів вимірювань:

$$\overline{K}_j = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ji}}{n}. \quad (1.6)$$

Відтворюваність визначають шляхом порівняння коефіцієнтів перетворення еталонного лічильника із коефіцієнтами перетворення визначеними при повторному циклі досліджень. Повторний цикл досліджень проводять для всіх значень об'ємних витрат визначених при першому циклі досліджень. За кожного значення об'ємної витрати проводять не менше 3 досліджень.

При цьому оцінку відтворюваності для j -того значення об'ємної витрати визначається за формулою [4]:

$$\delta_{Vj} = \frac{(\overline{K}_{Vj} - \overline{K}_j)}{\overline{K}_j} \times 100\%, \quad (1.7)$$

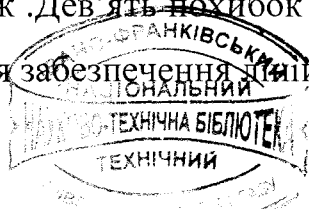
де \bar{K}_j – середнє значення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника за j -того значення об'ємної витрати, що визначений при повторному циклі досліджень.

З множини значень оцінки відтворюваності за кінцеве приймають максимальне значення. Еталонний лічильник вважається таким, що пройшов ДМА і допускається до застосування, якщо довірчі границі відносної похибки еталонного лічильника не перевищують значення наведені у [54], максимальне значення відхилення експериментальних коефіцієнтів перетворення від значень, розрахованих за апроксимаційним поліномом не перевищують 0,2 %, оцінка відтворюваності не перевищує половини довірчих границь відносної похибки еталонного лічильника за j -того значення витрати. У випадку не відповідності однієї із метрологічних характеристик еталонного лічильника вимогам еталонний лічильник вважається непридатним і не допускається до застосування.

Під час планування вимірювального експерименту загалом одним із основних завдань є зведення до мінімуму випадкової похибки. В цьому випадку говорять про збіжність результатів вимірювання, а саме про близькість повторюваних контрольованих результатів вимірювання об'єму газу в однакових умовах. Для метрологічних досліджень цей показник якості вимірювань має вагоме значення і оцінюється як і відтворюваність результатів за допомогою середньоквадратичного відхилення.

У [53] регламентовано також і вимоги до стабільності та лінійності метрологічних характеристик лічильника. У діапазоні витрат від $0,25 \cdot q_{max}$ до q_{max} зміни похибки лічильника за кожної витрати не повинні виходити за межі 0,2%.

Похибку лічильника треба визначати за різних витрат газу в такому порядку: $0,25 q_{max}$; $0,70 q_{max}$; $0,40 q_{max}$, q_{max} , причому зміну від $0,4 q_{max}$ до q_{max} роблять через значення $1,10 q_{max}$ для того, щоб наблизитися до значення q_{max} від більшого значення витрати газу. При кожній витраті потрібно тричі оцінити похибку без зміни витрати газу. Цикл треба повторити тричі. Випробування виконують з газом за атмосферних умов (± 100 мбар) або за найнижчого тиску, для якого розроблено лічильник. Дев'ять похибок лічильника за кожної витрати не повинні перевищувати 0,2%. Для забезпечення лінійності під час випробування за витрати газу від $0,25 q_{max}$



0/524

до q_{max} за кожного випробувального тиску, різниця між найбільшою і найменшою похибкою лічильника не повинна перевищувати значень, наведених в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Допустимі різниці найбільшої і найменшої похибки лічильника за кожного випробувального тиску

Розмір	Тиск	
	≤ 4 бар	> 4 бар
$\leq DN 100$	1,0%	0,5%
$\geq DN 100$	1,0%	0,3%

При цьому динамічний діапазон знаходиться у співвідношенні 1:50, а середнє зважене значення похибки (СЗП) повинне бути якомога ближче до нуля, наскільки це дозволяє калібрування та максимальна допустима похибка. СЗП не повинна виходити за межі $\pm 0,4$ %. СЗП обчислюють за формулою [53]:

$$СЗП = \frac{\sum(q_i/q_{max}) \times E_i}{\sum(q_i/q_{max})}, \quad (1.8)$$

де q_i/q_{max} — ваговий коефіцієнт; E_i — похибка лічильника за витрати q_i , %. Якщо $q_i = q_{max}$, то замість 1 треба застосовувати ваговий коефіцієнт 0,4.

У [55] пропонується застосовувати комплексний показник якості (КПЯ) турбінних лічильників газу, який враховує їх надійність, час експлуатації, енергоспоживання та інші одиничні показники якості, оскільки одночасне досягнення оптимальних значень за кожним із цих показників є неможливим. Для визначення КПЯ лічильників пропонується застосування наступної формули [55]:

$$КПЯ = 1 + \sum_{i=1}^N [(a_i - 1) \cdot \gamma_i], \quad (1.9)$$

де a_i — відношення кожного аналізованого параметра i -го лічильника до такого ж порівнюваного базового показника; γ_i — вагові коефіцієнти, N — число лічильників-аналогів. Проте КПЯ не враховує статистичних характеристик власне результатів вимірювання об'єму турбінними лічильниками, тому не має реального застосування при вирішенні мети роботи.

Наведені показники якості при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу повинні знаходитися у встановлених межах [53].

При метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу основною його характеристикою є коефіцієнт перетворення K , який прямо пропорційний об'єму газу, пропущеному через лічильник, і обернено пропорційний кількості імпульсів отриманих із давача. Опрацювання результатів здійснюють на базі коефіцієнта перетворення.

Вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу повинно відбуватися із врахуванням перелічених показників якості вимірювання та метрологічних характеристик турбінних лічильників газу.

1.3 Аналіз алгоритмів опрацювання результатів вимірювань при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу

Опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу виконується безпосередньо після їх закінчення відповідно до чинних методик та нормативних документів [50-52,79] і базується на опрацюванні результатів визначення коефіцієнта перетворення лічильника. Аналіз нормативних документів показав, що алгоритм визначення похибки лічильника можна подати наступним чином:

1) визначення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника проводять шляхом пропускання через нього контрольного об'єму повітря, що відтворюється еталоном одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, за витрат визначених в ТЗ на еталонний лічильник. За кожного значення об'ємної витрати, дослідження повторюють не менше 7 разів.

2) за результатами кожного дослідження отримують вибірку миттєвих значень витрати і за ними визначаються усереднені значення об'ємної витрати q_v ;

3) за усередненими значеннями об'ємної витрати, параметрами газу та діаметром умовного проходу еталонного лічильника обчислюють число Рейнольдса Re , як основну характеристику виду потоку;

4) визначається об'єм за робочих умов за результатами вимірювань еталонного лічильника турбінного типу за кількістю імпульсів отриманих з робочого еталона та коефіцієнтом перетворення лічильника;

5) розраховуються коефіцієнти стискуваності робочого середовища для умов досліджуваного та еталонного лічильника згідно з [52];

6) розраховується об'єм газу за стандартних умов за результатами вимірювань еталонного та досліджуваного лічильників.

9) визначається абсолютна похибка результатів вимірювання лічильником газу за відповідних значень об'ємної витрати;

10) визначається відносна похибка лічильника газу за відповідних значень об'ємної витрати за робочих умов і критерію Рейнольдса, розрахованого для умов лічильника.

11) за результатами визначеннями похибки лічильника на кожній витраті визначають середнє значення похибки, оцінку середньоквадратичного відхилення (СКВ), довірчі границі похибки.

У наведеному алгоритмі, за яким здійснюють опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу, не здійснюється ідентифікація закону розподілу значень об'єму, що носить випадковий характер, і не оцінюється вплив параметрів оточуючого середовища, що вносить систематичний дрейф у отримані значення результатів вимірювання об'єму. Разом з тим, додатково на основі статистичних методів повинна здійснюватися перевірка на наявність промахів у результатах спостережень і перевірка відтворюваності дослідів. Також відомо, що коефіцієнт перетворення лічильника K , який береться із градуовальної характеристики, залежить від критерію Рейнольдса, але фізична модель експерименту [16,17,41] доводить, що він залежить і від низки інших факторів, якими нехтують під час опрацювання результатів метрологічних досліджень.

При цьому існує два способи дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу: «старт з ходу» і «старт з місця». Через інерційність турбінних лічильників метод «старт з місця» не використовується. Надається перевага методу «старт з ходу», де завдяки синхронізації по імпульсах не

відбувається втрата вимірювальної інформації. Для того, щоб оптимально підібрати установку для перевірки турбінних лічильників газу необхідно проаналізувати показники якості вимірювання та основні метрологічні характеристики турбінних лічильників газу, а також установки, що використовуються для метрологічного контролю лічильників.

1.4 Аналіз методів статистичного опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу

1.4.1 Основні положення математичної статистики під час опрацювання вимірювальної інформації.

Аналізуючи практику опрацювання експериментальних даних [20-22], можна стверджувати, що більшість результатів вимірювання представляють собою вибірку з деякої генеральної сукупності, яка може містити аномальні спостереження. Аномальні спостереження у вибірці появляються через грубі промахи під час реєстрації вимірювань, в результаті випадкових імпульсних завад, збоїв устаткування. Якщо дані різко виділяються на фоні більшості результатів спостережень, вони можуть бути виключені з вибірки на попередньому етапі аналізу результатів проведеного вимірювання з урахуванням фізичної суті вимірюваної величини. Результати, які входять до так званої сумнівної зони, розпізнаються складніше і вимагають застосування спеціальних статистичних процедур для виявлення аномальних спостережень [56-60]. Проте навіть після виявлення таких аномальних результатів не можна вважати аналіз точності виконання результатів вимірювання завершеним і правильним без ґрунтовних пояснень одержаних результатів.

Для забезпечення правильності опрацювання результатів спостережень, перевірки відхилень розподілів ймовірностей від нормального, коректного визначення основних методів розрахунку, оцінки точності методів і результатів вимірювання, розроблено низку нормативних документів [61-69] і рекомендацій щодо їх застосування. Для прикладу стандарти [61,62,64,67] описують принципи

планування експериментів та основний алгоритм кількісної оцінки прецизійності методів вимірювання на практиці, водночас ці стандарти є основою для прийняття рішень під час проведення лабораторних експериментів.

Застосування методів статистичного аналізу під час експериментальних досліджень передбачає виконання операцій, в результаті яких на підставі значень статистик критеріїв приймається рішення про відхилення або прийняття гіпотез, що перевіряються [18-20,22]. Нормальність розподілу спостережуваних величин є необхідною передумовою для коректного застосування більшості класичних методів математичної статистики, яка використовується в метрологічних задачах [70-76]. Доцільним є дослідження критеріїв, за допомогою яких і перевіряється нормальність закону розподілу випадкових величин.

Автоматичне видалення аномальних спостережень без встановлення причин їх виникнення виправдане і можливе лише тоді, коли створена модель спостереження добре вивчена і випробувана, тобто заздалегідь відома її поведінка. Проте загалом такий метод використовується рідко. В основному використовують статистичні критерії, за допомогою яких встановлюється закон розподілу спостережень і за відповідним алгоритмом опрацювання результатів експерименту, проводять видалення аномальних результатів, оскільки дуже часто відсутня інформація про якість вимірювання або ж ця інформація не є надійною. Підсумовуючи вище сказане, робимо висновок, що у випадку статистичного опрацювання набору даних, одержаних під час вимірювального експерименту, обов'язковим є виконання трьох послідовних етапів:

1. Перевірка на наявність промахів, оскільки результати спостереження, які різко відрізняються від інших, спотворюють кінцевий результат вимірювання.

2. Ідентифікація закону розподілу (перевірка нормальності), оскільки в основі процедур математичної статистики, які застосовуються в обробці результатів метрологічних досліджень, лежить нормальний закон розподілу, в іншому випадку виникає необхідність розроблення унікального методу опрацювання експериментальних даних.

3. Перевірка відтворюваності дослідів для підтвердження відсутності часової залежності та відносної стабільності зовнішніх умов під час проведення вимірального експерименту.

На рис. 1.2 наведено деякі критерії математичної статистики, що використовуються для опрацювання результатів експериментальних досліджень загалом (у додатку А наведено особливості їх застосування, переваги та недоліки кожного із критеріїв). У випадку, коли мова йде про лабораторні вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу турбінними лічильниками, застосування критеріїв математичної статистики наведених на рис. 1.2 та проаналізованих у [27,28,30,58] для перевірки на наявність промахів у результатах спостережень та на відтворюваність дослідів не завжди дають бажаний результат. Критерії перевірки нормальності закону розподілу не завжди дають змогу ідентифікувати вид кривої розподілу результатів, а отже, постає задача вибору таких методів математичної статистики, які могли б ідентифікувати вид закону розподілу з достатньою вірогідністю.

Результати прямих вимірювань залежно від того, чи було проведено однократні чи багатократні спостереження опрацьовуються згідно з чинними нормативними документами [51,61-63,67,68]. Відповідно до центральної граничної теореми вважається, що результати вимірювань розподілені нормально і підлягають подальшому статистичному опрацюванню, суть якого полягає у визначенні результату вимірювання із заданою імовірністю. Актуальною і до кінця не вирішеною залишається проблема відхилення закону розподілу від нормального та подальшого опрацювання результатів, що не підпорядковуються закону Гауса. У витратометрії питання точності вимірювання та правильності представлення результатів безпосередньо пов'язане з адекватністю математичної моделі опрацювання результатів прямого вимірювання температури і тиску. При статистичному опрацюванні даних першим етапом мала б бути перевірка закону розподілу, а не апіорне твердження його нормальності, незважаючи на низку різнорідних впливових чинників.

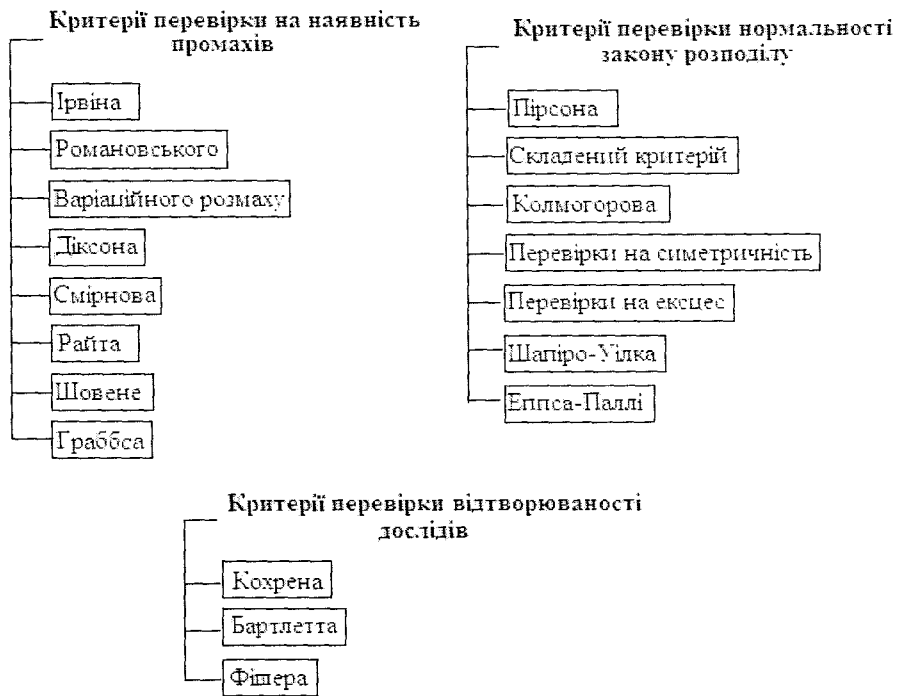


Рис.1.2. Деякі критерії математичної статистики, що використовуються для опрацювання результатів експериментальних досліджень

У процесі вимірювання об'ємної витрати газу, зважаючи на кореляційні зв'язки між параметрами процесу вимірювання, впливовими чинниками та результатом, необхідно вивчити їх взаємоповедінку та дослідити закон розподілу результату вимірювання турбінними лічильниками. Для цього доцільним є застосування підходів статистичної ідентифікації.

Аналізуючи нормативну базу в області прикладної математичної статистики [61-69] та загальні стандарти, на основі яких проводять вимірювання витрати газу загалом [52,77], варто зауважити, що, в основному, опрацювання результатів зводиться до визначення наступних величин:

- витрати газу (для цього застосовують розрахункові формули залежно від методу визначення витрати і типу застосовуваних лічильників);
- коефіцієнт стисливості газу розраховують згідно з [52];
- визначення основних параметрів газового середовища (абсолютного тиску, температури, густини, компонентного складу газу, поправочного множника

на розширення вимірювального середовища, кінематичної та динамічної в'язкості, критерію Рейнольдса);

– визначення похибок вимірювання витрати та невизначеності результату.

Описані вище статистичні підходи застосовуються і для розв'язання прикладних технічних задач. Проте на сьогодні не існує універсального алгоритму математичного опрацювання результатів наукових досліджень у сфері вимірювання витрати природного газу, зокрема турбінними лічильниками, і навіть з урахуванням класичної теорії похибок та теорії невизначеності до кінця не відомо, як враховувати вплив додаткових чинників, не передбачених стандартом і методикою виконання вимірювань. Тому постає задача розроблення алгоритму опрацювання результатів вимірювального експерименту із врахуванням методів математичної статистики та фізики вимірного процесу.

1.4.2. Аналіз методів математичної статистики при ідентифікації законів розподілу результатів вимірювання.

Метрологічна атестація засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу передбачає процедуру проведення досліджень з метою визначення їх метрологічних характеристик та встановлення придатності цих засобів до застосування. У свою чергу опрацювання результатів вимірювальної інформації перш за все передбачає ідентифікацію законів розподілу вибірки з результатами вимірювання об'єму природного газу, що пройшов через турбінний лічильник, для того, щоб підібрати правильний алгоритм визначення похибки результату. Для опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу в лабораторних умовах пропонується проаналізувати використання кількох статистичних підходів.

Для перевірки закону розподілу випадкових похибок, які виникають в результаті проведення вимірювання, найчастіше застосовують критерій Пірсона χ^2 , ідея якого базується на контролі відхилення гістограми

експериментальних даних від гістограми з таким самим числом інтервалів, яка побудована на основі нормального закону розподілу [23].

При використанні критерію χ^2 для перевірки гіпотези рівності реального і теоретичного розподілів також здійснюють групування результатів спостережень n по r інтервалах. Для кожного інтервалу підраховують число результатів вимірювання, що попали у цей інтервал, а потім визначають ймовірність попадання в цей інтервал при нормальному законі розподілу, використовуючи формулу Лапласа. Вважають, що вибірка із своїми результатами спостережень відповідає теоретичному розподілу, якщо $\chi^2 < \chi^2_{\alpha}$, де χ^2_{α} – квантиль χ^2 – розподіл з f степенями вільності, який також визначається згідно з табличними даними. При цьому значення довірчої ймовірності можуть приймати значення від 0.01 до 0.99. Одним із недоліків даного критерію є можливість його застосування переважно до великих вибірок.

Поряд із критерієм Пірсона виділяють графік Пірсона, який вважається досить універсальним, оскільки дає змогу робити висновок не лише про нормальність закону розподілу, але й ідентифікувати розподіли відмінні від нормального. Шляхом визначення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу та перенесення цих значень на площину графіка Пірсона можна встановити закон розподілу вибірки, що підлягає опрацюванню. Ідентифікація законів розподілу за графіком Пірсона застосовується і для вибірок, де $n \geq 8$.

Критерій перевірки на симетричність закону розподілу призначений для перевірки гіпотез про симетричність спостережуваного закону розподілу при об'ємах вибірки $8 \leq n \leq 5000$ [66]. Статистика критерію розраховується за формулою (А.9) (табл. А.1.).

Перевіряється нульова гіпотеза $H_0: \sqrt{B_1} = 0$ і конкуруюча гіпотеза $H_1: \sqrt{B_1} > 0$ (додатна асиметрія) або $H_1: \sqrt{B_1} < 0$ (від'ємна асиметрія). У стандарті і першоджерелах [66,67] приводяться лише таблиці процентних точок, проте нічого не говориться про види розподілів. Розподіл статистики (А.9) (табл. А.1.) у випадку нормального закону є симетричним і залежить від кількості спостережень. У [70]

говориться про те, що розподіл статистик (А.9) дуже швидко наближається до нормального з нульовим математичним очікуванням і асимптотичною дисперсією.

Критерій, який розраховується згідно зі статистикою (А.9), є критерієм лише для перевірки на симетричність законів розподілу. Його використання результативне і оправдане лише у тих випадках, коли необхідно перевірити відхилення закону від нормального, проте не відхилення гіпотези про симетричність на основі припущень про нормальність закону не може говорити про нормальність закону розподілу (ця умова є необхідною, проте недостатньою).

В свою чергу, у стандарті [66] передбачено використання критерію перевірки на ексцес при об'ємах вибірок $8 \leq n \leq 5000$. Статистика критерію перевірки на ексцес має вигляд (А.10) (табл. А.1.). Перевіряється гіпотеза $H_0: \beta_2=3$ проти альтернативи $H_1: \beta_1>3$ (великий ексцес) або $\beta_2<3$ (малий ексцес). У стандарті та першоджерелах [66,67], як і в попередньому випадку, наводяться лише таблиці процентних точок. Варто зауважити, що згідно з [66] розподіл статистик (А.10) навіть при великих об'ємах вибірок є далеким від нормального.

Разом з критерієм симетричності даний критерій дозволяє робити висновки про степінь відхилення даної вибірки від нормального закону. Недоліком критерію є залежність розподілу статистики (А.10) від об'єму вибірки. Проте, варто зауважити, що сумісне використання критеріїв перевірки на симетричність та ексцес лягло в основу експрес методу, суть якого полягає у побудові гістограми результатів вимірювання, що враховує і протяжність закону розподілу і його ексцес.

Варто зауважити, що поряд із критерієм перевірки на ексцес існує інформаційний підхід до визначення закону розподілу. У такому випадку алгоритм перевірки закону розподілу зводиться до визначення ентропійного коефіцієнту, який характеризує в значній мірі формування вершини кривої розподілу. У відповідності до отриманого значення ентропійного коефіцієнта вибірці присвоюють закон розподілу. Завдяки такій універсальності ентропійного коефіцієнта і можливості його застосування для вибірок різного об'єму, зокрема і для малих вибірок, варто дослідити в подальшому його поведінку для вибірок, отриманих в результаті проведення експерименту.

Складений критерій [56,66] включає два незалежні критерії і використовується при перевірці гіпотези про нормальність розподілу вибірки результатів спостережень при їх кількості $10 \leq n \leq 50$. При перевірці задаються рівнем значимості $q_I(\alpha_I)$ (для критерію I) і $q_{II}(\alpha_{II})$ (для критерію II). Рівень значущості складеного критерію повинен задовольняти умові (A.4) із табл. A.1. Гіпотеза про узгодженість дослідного розподілу з теоретичним нормальним перевіряється наступним чином: перевіряємо виконання критерію I. Для цього визначається значення \bar{d} за формулою (A.2) з табл. A.1.

Нульова гіпотеза про належність емпіричного розподілу нормальному справедлива, якщо виконується умова (A.1) з табл. A.1.

Виконуємо перевірку за критерієм II. Гіпотеза про нормальність розподілу підтверджується, якщо не більше m різниць $|x_i - \bar{X}_{y.p.}|$ перевершили значення $\frac{Z_{p/2}}{S}$.

Результуючий рівень значущості складного критерію піддається умові (A.5) (табл. A.1.).

Якщо виявиться, що хоча б один з критеріїв не виконується, то вважають, що розподіл досліджуваної сукупності результатів вимірювання не відповідає нормальному закону.

Критерій Шапіро-Уїлка [30,56,66], базується на аналізі лінійної комбінації відмінностей порядкових статистик. Застосування критерію передбачено при об'ємі вибірки $8 \leq n \leq 50$. При об'ємах вибірок $51 \leq n \leq 99$ коефіцієнти і таблиці процентних точок можна знайти у [66]. У стандарті критерій рекомендується застосовувати при відсутності апріорної інформації про тип можливого відхилення від нормальності у тих випадках, коли в якості альтернативи можна вибрати гіпотезу наступного вигляду: зразково симетричний розподіл з $|\sqrt{\beta_2}| < 1/2$ і $\beta_2 < 3$ або ж асиметричний розподіл (для прикладу $|\sqrt{\beta_2}| > 1/2$). В іншому випадку рекомендують критерій Елпса-Паллі, проте така рекомендація не є очевидною і потребує підтвердження.

Для розрахунку статистики для варіаційного ряду $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$, отриманого з вибірки, розраховують величину S за формулою (А.12) (табл. А.1.). Статистика даного критерію має вигляд (А.11). Гіпотеза про нормальність не приймається при малих значеннях статистики.

Критерій Шапіро-Уїлка при об'ємах вибірок менше 50 є непоганим критерієм перевірки на нормальність, володіє досить високою потужністю порівняно з непараметричними критеріями оцінки відносно таких близьких альтернатив як логістичний закон.

Проте за допомогою критерію Шапіро-Уїлка важко відрізнити від нормального розподілу експоненціального сімейства з більш плоскими порівняно з нормальним густинами розподілів. А це трохи суперечить рекомендаціям стандарту по його застосуванню.

1.5 Еталонні установки для метрологічного контролю турбінних лічильників газу

З метою забезпечення єдності вимірювань при відтворенні, передачі та зберіганні одиниці фізичної величини створюються еталони або робочі еталони. Так як об'єм та об'ємна витрата газу є досить важливими фізичними величинами із-за їх комерційної значимості, практично у всіх розвинутих країнах створені еталони даних одиниць фізичних величин. Враховуючи те, що об'єм газу та його об'ємна витрата взаємозв'язані між собою досить простою залежністю, розвиток еталонної бази йшов по шляху створення еталонів об'єму або об'ємної витрати (в залежності від методу вимірювання та його конструктивного виконання). Так, наприклад, еталон на базі дзвонового мірника відтворює об'єм, а об'ємна витрата виступає похідною величиною. І, навпаки, еталон на базі критичних сопел відтворює витрату, а об'єм визначається інтегралом цієї витрати за певний проміжок часу.

У [4,81] вказується, що в загальному еталонні установки складаються з джерела витрати (повітродувки, компресора, тощо), випробувальної ділянки, на якій розміщують засіб вимірювальної техніки об'єму та об'ємної витрати, якому

передається одиниця фізичної величини, з'єднувального трубопроводу, засобів контролю та регулювання об'єму та об'ємної витрати.

Аналізуючи еталонну базу розвинутих країн, можна сказати, що відтворення одиниці об'єму та об'ємної витрати, як правило, проводиться такими способами[6]:

– дискретно-динамічним способом – вимірюванням переміщення поршня, що витісняє контрольну порцію об'єму газу (дзвонові, поршневі установки);

– гравіметричним статичним способом – вимірюванням за допомогою ваги зміни маси газу в мірній ємності до і після спорожнення або наповнення її газом (гравіметричні установки);

– об'ємним статичним способом – вимірюванням зміни маси газу в мірній ємності до і після спорожнення або наповнення її газом опосередковано, вимірюючи тиск та температуру на початку та в кінці вимірювального циклу (установки типу $PVTt$);

– зважуванням еквівалентної кількості витісненої речовини (мастила) – (установки рідинного витіснювання);

– вимірюванням часу протікання газу через критичне сопло (установки на критичних соплах).

Серед найбільш поширених еталонних установок перше місце за поширенням займають дзвонові установки [4,6,7,81]. Невизначеність дзвонових установок знаходиться в межах від 0,06 – 0,3 %. Другим найбільш поширеним типом еталонних установок є поршневі. Діапазон значень невизначеності для цього типу установок становить від 0,05 до 0,5 %. Гравіметричні установки, що на сьогодні використовуються в світі, мають невизначеності від 0,15 до 0,4 %. Найточніші на сьогодні установки типу $PVTt$, невизначеність яких становить від 0,02 до 0,2%. Установки рідинного витіснювання мають невизначеність від 0,13 до 0,4%.

Розглянемо детальніше конструктивні особливості та метрологічні характеристики еталонних установок, що використовуються для калібрування (метрологічної атестації) турбінних лічильників газу на практиці.

Принцип дії дзвонових еталонних установок ґрунтується на вимірюванні інтервалу часу протягом якого накопичується або витісняється відомий з високою

точністю об'єм газу з одночасним вимірюванням температури та тиску газу. Установки складаються з циліндричної ємності, витіснювача в центрі її. Затрубний простір між циліндричною ємністю і витіснювачем заповнений замковою рідиною, як правило, мастилом або водою. В затрубний простір занурений дзвін. Вага дзвона за допомогою вантажів підібрана таким чином, щоб досягти необхідного значення надлишкового тиску. Для компенсації виштовхувальної сили застосовують спеціальні засоби, що дозволяє забезпечити постійність тиску під дзвоном. Недосконалість компенсуючого механізму приводить до флуктуації тиску під дзвоном протягом вимірювального циклу. Валики і направляючі стержні забезпечують бокову стабільність положення дзвону при його русі.

Основним недоліком дзвонів еталонних установок є те, що з їхнього вимірювального циклу не виключений неусталений режим роботи як засобу вимірювальної техніки, так і самої установки. З метою зменшення впливу даного фактору на точність таких установок приходиться збільшувати час вимірювального циклу. Це, в свою чергу, вимагає створення громіздких і дорогих за вартістю установок із значним об'ємом мірника, аж до 60 м³. Тому в останній час установки знаходять застосування тільки для перевірки витратомірів і лічильників газу на порівняно невеликих витратах, в тому числі при градуванні та повірці побутових лічильників газу.

Основним джерелом похибок відтворення об'єму є температурні похибки, викликані непостійністю температури в приміщенні, де вони встановлені, а також зміни лінійних розмірів деталей дзвонів мірника (дзвону, лінійки). Ще одним джерелом похибки є похибка від випаровування в піддзвонівий простір замкової рідини, яка залежить від тривалості вимірювального циклу, площі змоченої поверхні дзвону і дзеркала рідини, а також вологості повітря, що подається під дзвін.

На похибку дзвонів установки впливають також нестабільність тиску за вимірювальним циклом – ця зміна тиску викликана тим, що в процесі опускання дзвона вага останнього змінюється на величину архімедової сили. Для зменшення похибок сучасні дзвоніві мірники виготовляються з нержавіючої сталі, витіснювачі заповнюються мастилом, установки обладнуються оригінальними пристроями для

забезпечення стабільності тиску під дзвоном, коректорами температурної похибки та похибки від зміни об'єму при занурюванні мірника в рідину, оптичною та електронною швидкодіючою апаратурою високої точності, а також ПЕОМ.

Тим не менше, дзвоніві еталонні установки є одними із найточніших, зокрема, державний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в Україні реалізовано на базі дзвоніві еталонної установки. Точність установки досягається використанням досконаліших засобів вимірювальної техніки. Можливим є використання дзвонівих установок для дослідження лічильників газу з використанням в якості робочого середовища природного газу, але це вимагає значного ускладнення установки і підвищує вимоги до техніки безпеки [46]. Крім того, дзвоніві установки працюють тільки при тисках близьких до атмосферного (надлишковий тиск не перевищує 5 кПа), тому за допомогою таких установок не можливо досліджувати лічильники при високих тисках. В силу особливостей застосування дзвонівих установок, їхнє використання для метрологічних досліджень турбінних лічильників газу є проблематичним.

Принцип дії поршневих еталонних установок полягає у виділенні із потоку газу (повітря) з допомогою поршневого розділювача і детекторів, розміщених на каліброваному вимірювальному трубопроводі, контрольного об'єму газу. Як розділювач може використовуватись рідина, що витісняє газ із каліброваного по висоті резервуара. При передачі одиниці об'ємної витрати газу здійснюється збір інформації з засобу вимірювань за період проходження розділювача від одного детектора до другого [6]. При цьому вимірюваний контрольний об'єм газу буде рівний каліброваному об'єму вимірювального трубопроводу, що знаходиться між двома детекторами. Багаторазове виділення контрольного об'єму здійснюється при зміні напрямку переміщення розділювача. Витратовимірювальна установка такого типу розроблена у ВНДІВ (м.Казань, Росія) і була затверджена Держстандартом СРСР як Державний первинний еталон одиниці об'ємної витрати газу.

- Аналогічно, як і для дзвонівих установок основними джерелами похибки є:
- точність засобів, якими проводиться вимірювання геометричних розмірів;
 - точність каналів вимірювання тиску та температури;

- негерметичність ущільнення;
- нестабільність температури навколишнього та робочого середовища;
- коливання поршня і його перекиє в процесі руху, тощо.

Поршневі установки використовуються в якості первинних еталонів об'ємної витрати в 15 країнах. Найточніші поршневі установки мають невизначеність 0,05%.

Основним недоліком поршневих еталонних установок є наявність незгладжуваних пульсацій тиску та його великі втрати на поршні, що приводить до нерівномірності його ходу і відповідно, впливає на стабільність відтворення витрати.

На відміну від дзвонових установок поршневі установки можна використовувати для досліджень лічильників при роботі на природному газі при високих тисках. Установка такого типу створена фахівцями Івано-Франківського національного університету нафти і газу в Дніпропетровську, а також на базі Ruhrgas AG, Німеччина – PIGSARTM, яка є первинним еталоном об'єму та об'ємної витрати газу при високому тиску в Німеччині. Проте, зважаючи на наявність незгладжуваних пульсацій тиску та на територіальну приналежність, використання таких установок для метрологічних досліджень турбінних лічильників газу є не раціональним рішенням.

Принцип дії еталонних установок на критичних соплах ґрунтується на створенні за допомогою джерела витрати на критичному соплі критичного режиму витікання. При цьому режимі потоку витрата через дослідну ділянку стабільна. Режим потоку визначається відношенням тисків на вході і виході критичного сопла, яке повинен складати не менше 2,0. Швидкість потоку в найвужчому місці сопла встановлюється рівній швидкості звуку, що забезпечує надзвичайно високу стабільність витрати. Характерною особливістю цих установок є відтворення об'ємної витрати протягом довгого періоду часу.

Джерелами похибок цих установок є точність виготовлення профілю критичного сопла, точність його встановлення в трубопровід (співвісність, наявність прямих ділянок, тощо). Вимоги до критичних сопл викладені в міжнародному стандарті [78].

Перевагою соплових установок висока стабільність їх характеристик з часом, саме тому критичні сопла використовують в якості трансферних еталонів в багатьох країнах, а також при міжнародних звіряннях [6,7].

Недоліком цих установок є те, що на точність установки впливає наявність частинок домішок в газі, які впливають на геометричні розміри сопла, а також недоліком є фіксованість витрат, тобто можливо відтворювати тільки визначені витрати.

Щодо еталонних установок з робочими еталонами, то варто зазначити, що вони використовуються для градування та повірки витратомірів та лічильників газу, для точного відтворення і вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. Діапазон вимірювання витрати таких установок від 0,02 до 2500 м³/год, при цьому значення контрольних об'ємів становлять від 0.02 до 14 м. Межі основної похибки по витраті становлять від 0,15 до 0,5 %, а по об'єму: від 0,25 до 0,5 %.

Застосовуються два типи повірочних установок з використанням еталонних газових лічильників: в яких еталонний лічильник встановлюється після лічильника, що підлягає метрологічним дослідженням; в яких еталонний лічильник встановлюється перед лічильником, що підлягає метрологічним дослідженням [6].

Як еталонні лічильники використовують турбінні та барабанні лічильники газу, що випускаються як робочі засоби вимірювань, але атестовані для використання як зразкові. Для покращання умов та впровадження автоматизації процесу метрологічних досліджень вони забезпечуються спеціальними відліковими пристроями і (або) перетворювачами об'ємів, що протікають через них, в електричні імпульсні сигнали. Похибка вимірювань еталонних лічильників в основному не перевищують $\pm 0,5\%$ [4].

Похибка турбінних лічильників газу зумовлена перетоками в зазорах між роторами та між роторами і корпусом враховується під час калібрування лічильників, проте може виникати і додаткова похибка за рахунок зміни параметрів газу. Додаткову похибку вносить і тертя в шестернях та підшипниках. Зі збільшенням витрат крива залежності похибки роторних лічильників від витрати зростає до витрат $(0,2-0,5)V_{max}$ і стабілізується в діапазоні витрат від $0,5V_{max}$ до V_{max} .

Зміна кривої похибок пояснюється тим, що, з одного боку, перетоки повітря в щілинах непостійні і зростають внаслідок збільшення різниці тиску в них при зростанні витрат, а з другого, потік в щілинах при збільшенні швидкості обертання роторів все більше залежить від відносної швидкості обертання їх відносно корпусу. За рахунок цього частина вимірюваного середовища повертається на вхід лічильника і вимірюється повторно. Недоліком таких установок є невисока точність відтворення об'єму та об'ємних витрат. Особливостями установок є: широкий діапазон відтворюваних об'ємів та об'ємних витрат газу та можливість оптимізації градууювально-повірочного циклу. Установа такого типу діє в умовах ПАТ «Івано-Франківськагаз» та дозволяє реалізувати метрологічні дослідження турбінних лічильників газу. Проте при опрацюванні результатів вимірювання виконаних із застосуванням робочих еталонів статистичні характеристики визначаються за умов нормального закону розподілу даних, без ідентифікації закону розподілу, що, в свою чергу, може слугувати одним зі шляхів підвищення точності турбінних лічильників газу.

У ПАТ «Івано-Франківськгаз» експлуатується єдина в Україні лабораторія для випробування та перевірки засобів вимірювань об'єму й об'ємної витрати газу на природному газі [36]. Еталонна установа відноситься до установок типу «набір еталонних витратомірів». У виборі типів і типорозмірів лічильників газу як робочих еталонів виходили з технічних характеристик лічильників з метою забезпечення максимального діапазону роботи лабораторії; максимального застосування турбінних лічильників газу; забезпечення взаємного перекриття діапазонів по об'ємних витратах лічильників сусідніх типорозмірів; забезпечення передачі розміру одиниці об'єму газу від Державного еталону одиниць об'єму та об'ємної витрати газу до робочих еталонів. Установа відноситься до типу установок, в яких робочі еталони знаходяться перед засобом вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу, що перевіряється, тобто спочатку газ протікає через робочий еталон (еталони), а потім через лічильник.

Установку для випробування та перевірки засобів вимірювань об'єму й витрати газу на природному газі (надалі – установа) розроблено та реалізовано на

базі газорозподільної підстанції (ГРП). Установа знаходиться в приміщенні спеціальної лабораторії, спорудженої на території ГРП і відповідає усім вимогам і нормам техніки безпеки щодо об'єктів даного типу. Технологічну схему установки, розміщеної в лабораторії, зображено на рис. 1.3.

Установку приєднано до газопроводів високого ГВТ (до 0,8 МПа), середнього ГСТ (до 0,3 МПа) та низького ГНТ (до 5 кПа) тисків, шляхом безпосередньої урізки в існуючі газопроводи ГРП. Установка складається з трьох порожнистих колон: вхідної, середньої і вихідної; засувок вхідних; регулюючих та комутуючих; фільтрів, робочих еталонів, лічильників, що перевіряються, арматури та з'єднувальних газопроводів.

Газ на вхід установки надходить по газопроводу середнього тиску. Завдяки різниці тисків на вході та на виході (на вході тиск більший ніж на виході) відбувається перетік газу, тобто переміщення газу через лічильники.

До виходу вихідної колони приєднанні газопроводи середнього ГСТ та низького ГНТ тисків. Таким чином, установка повністю замкнена на існуючі газопроводи ГРП, тобто є проміжною ланкою. Робота установки базується на створенні різниці тисків на її вході та на виході.

Для очищення газу на установці застосовуються фільтри. Пропускна здатність фільтра та його номінальний діаметр відповідає (або більший) пропускну здатності та номінальному діаметру типорозміру лічильника, що застосовується, і з яким буде застосовано даний фільтр. Фільтр встановлюється перед прямою ділянкою трубопроводу, що розміщується перед робочим еталоном, і має місця приєднання засобів вимірювань перепаду тиску. Верхня межа засобу вимірювань тиску газу вибрана з розрахунку, що $P_{\max} = (1,05 \dots 1,15) \cdot P_{\text{роб}}$.

Тиск на вході установки вимірюється перетворювачем тиску, встановленим перед діафрагмою. Також здійснюється вимірювання перепаду тиску і температури газу перед діафрагмою. Газ через редуктори надходить у вхідну колону.

Залежно від діапазону вимірювання витрати газу, можуть бути задіяні одна, дві, три або чотири паралельні ланки газопроводу з робочими еталонами і

відповідними максимальними значеннями витрати газу. Це реалізується шляхом закривання (відкривання) відповідних засувок запірної арматури.

Перед кожним робочим еталоном об'єму газу встановлені перетворювачі тиску і температури (за винятком робочого еталону турбінного типу, де перетворювач температури встановлено після нього).

Вимірювання об'єму газу, що проходить через лічильник (як робочий еталон так і лічильник, що перевіряється) за стандартних умов V_c м³, виконуються шляхом вимірювання об'єму газу за робочих умов, вимірювання температури і тиску газу в трубопроводі відповідними засобами вимірювань і розрахунку об'єму газу до стандартних умов.

Об'єм газу за робочих умов V_p , м³, який пройшов через лічильник газу за інтервал часу проведення перевірки, визначається за формулою [79]:

$$V_p = V_{pk} - V_{pn}, \quad (1.9)$$

де V_{pk} – показники відлікового пристрою лічильника газу на момент закінчення інтервалу часу проведення перевірки, м³; V_{pn} – показники відлікового пристрою лічильника газу в момент початку інтервалу часу проведення перевірки, м³.

Значення V_c обчислюється за формулою [79]:

$$V_c = V_p \times \left(\frac{T_{cm}}{T_{cp}} \times \frac{P_{cp}}{P_{cm}} \times \frac{1}{K} \right), \quad (1.10)$$

де P_{cp} – середнє значення за інтервал часу проведення перевірки абсолютного тиску газу, МПа; T_{cp} – середнє значення за інтервал часу перевірки температури газу, °С; K – коефіцієнт стисливості газу за тиску P_{cp} та температури T_{cp} , що визначається згідно з [52]. Коефіцієнт стисливості розраховується на ПЕОМ. Необхідні для розрахунку значення густини газу за стандартних умов, молярна частка азоту та діоксиду вуглецю вводиться перед вимірюваннями за результатами сертифікатів на газ або за результатами аналізу природного газу.

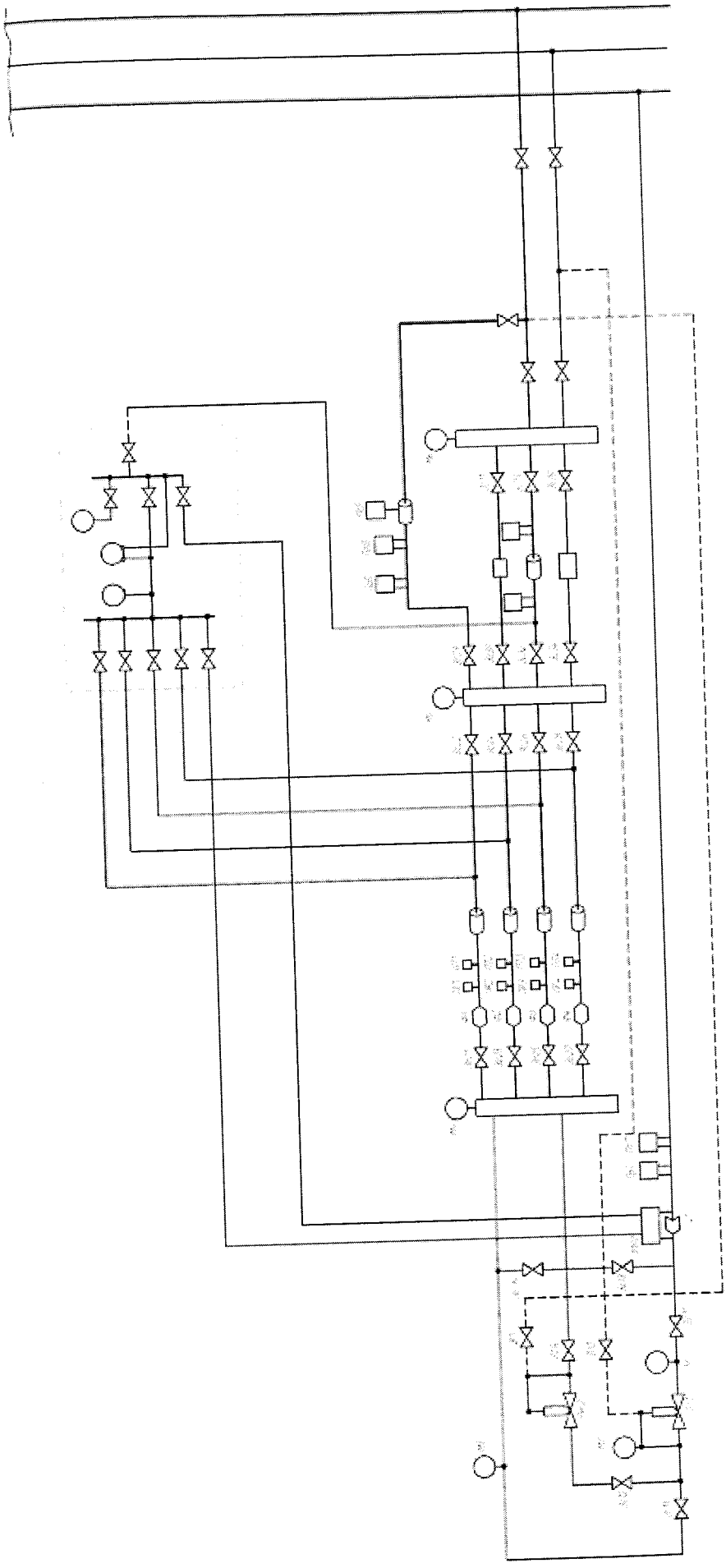


Рис. 1.3. Технологічна схема установки створеної у ПАТ «Івано-Франківськгаз»

Для вимірювання температури застосовуються термоперетворювачі опору з діапазоном вимірювань (-50..50) °С. Засоби вимірювань температури розміщені після лічильника при застосуванні турбінного лічильника газу та перед лічильником при застосуванні лічильника роторного типу. Відстань від лічильника до місця розміщення засобів вимірювань температури становить 2 DN за умови їх встановлення після турбінного лічильника. Термоперетворювачі опору розміщуються у трубопроводі без гільз.

У виборі типів і типорозмірів лічильників газу як робочих еталонів виходили з технічних характеристик лічильників та:

- забезпечення максимального діапазону роботи установки;
- максимального застосування лічильників газу;
- забезпечення взаємного перекриття діапазонів по об'ємних витратах лічильників сусідніх типорозмірів;
- забезпечення передачі розміру одиниці об'єму газу від Державного еталону одиниць об'єму та об'ємної витрати газу до робочих еталонів.

Вимірювальні перетворювачі температури перетворюють значення температури в електричні та кодові сигнали. Перетворювачі температури оснащені додатковим перетворювачами вимірювального сигналу в уніфікований сигнал струму 4...20 мА та код, що дає можливість передавати вимірювальний сигнал на пульт керування та ПЕОМ.

Технологічні параметри, такі як тиск на вході, в регуляторі, температура приміщення, сигнали пожежної, охоронної сигналізації та сигналізації загазованості опрацьовуються контролером технологічних параметрів і теж надходять в ПЕОМ.

У процесі метрологічних досліджень лічильника газу, що працює на низькому тиску і його робоче положення горизонтальне, необхідно провести наступні роботи:

- якщо перевіряється лічильник газу і його робота вимагає застосування трубопроводу діаметром 100 мм (DN100), то його необхідно встановити на трубопроводі між засівками Зс 30 та Зс 31 замість вставки Вс1;

- якщо перевіряється лічильник газу і його робота вимагає застосування трубопроводу діаметром 150 мм (DN150), то його необхідно встановити на трубопровід між засувками Зс 32 та Зс 33 на місце лічильника Л2;

- якщо перевіряється лічильник газу і його робота вимагає застосування трубопроводу діаметром 200 мм (DN200), то його необхідно встановити на трубопровід між засувками Зс 34 та Зс 35 замість вставки Вс2;

- якщо перевіряється лічильник газу, робоче положення якого горизонтальне і його робота вимагає застосування трубопроводу діаметром 50 або 80 мм (DN50 або DN80), то його можна монтувати на трубопровід діаметром 100 мм через конусні перевідники після засувки Зс 30 та перед засувкою Зс 31.

Під час роботи на середньому тиску потрібно відкрити послідовно засувки Зс 5 та Зс 11 і проконтролювати наявність і величину тисків перед регулятором Рег1 за показами манометра М1 та після регулятора Рег1 за показами манометрів М2 та М3, а також в колоні К1 за показами манометра М4. Надалі проводити роботи у вище згаданій послідовності. Під час роботи з робочими еталонами необхідно пуск газу через них здійснювати повільно, щоб тиски перед лічильниками та оберти турбінки наростали поступово для запобігання можливості пневмоударів.

Блок-схему визначення відносної похибки для перевірки лічильника газу зображено на рис.1.3, де V – об'єм газу, виміряний лічильником та зведений до стандартних умов, м^3 ; V_p – об'єм газу виміряний лічильником в робочих умовах, м^3 ; ΔV – приріст об'єму газу, зведений до стандартних умов, м^3 ; ΔV_p – приріст об'єму газу в робочих умовах, м^3 ; P_i – абсолютний тиск газу (його вимірне значення), Па; T_i – абсолютна температура газу; T – термодинамічна температура газу, К; K_i – коефіцієнт стисливості газу; K_N – коефіцієнт перетворення лічильника газу або робочого еталону, $\text{м}^3/\text{імп}$; Z_i – коефіцієнт корекції (фактор стисливості), P_n – надлишковий тиск в лічильнику (його вимірне значення), Па; P_b – атмосферний тиск, Па; P_{ni} – надлишковий тиск газу в лічильнику або його вимірюване значення, Па; P_{bi} – атмосферний тиск або його вимірюване значення, Па; ΔN – кількість імпульсів, що надходять від лічильника газу або робочого еталону.

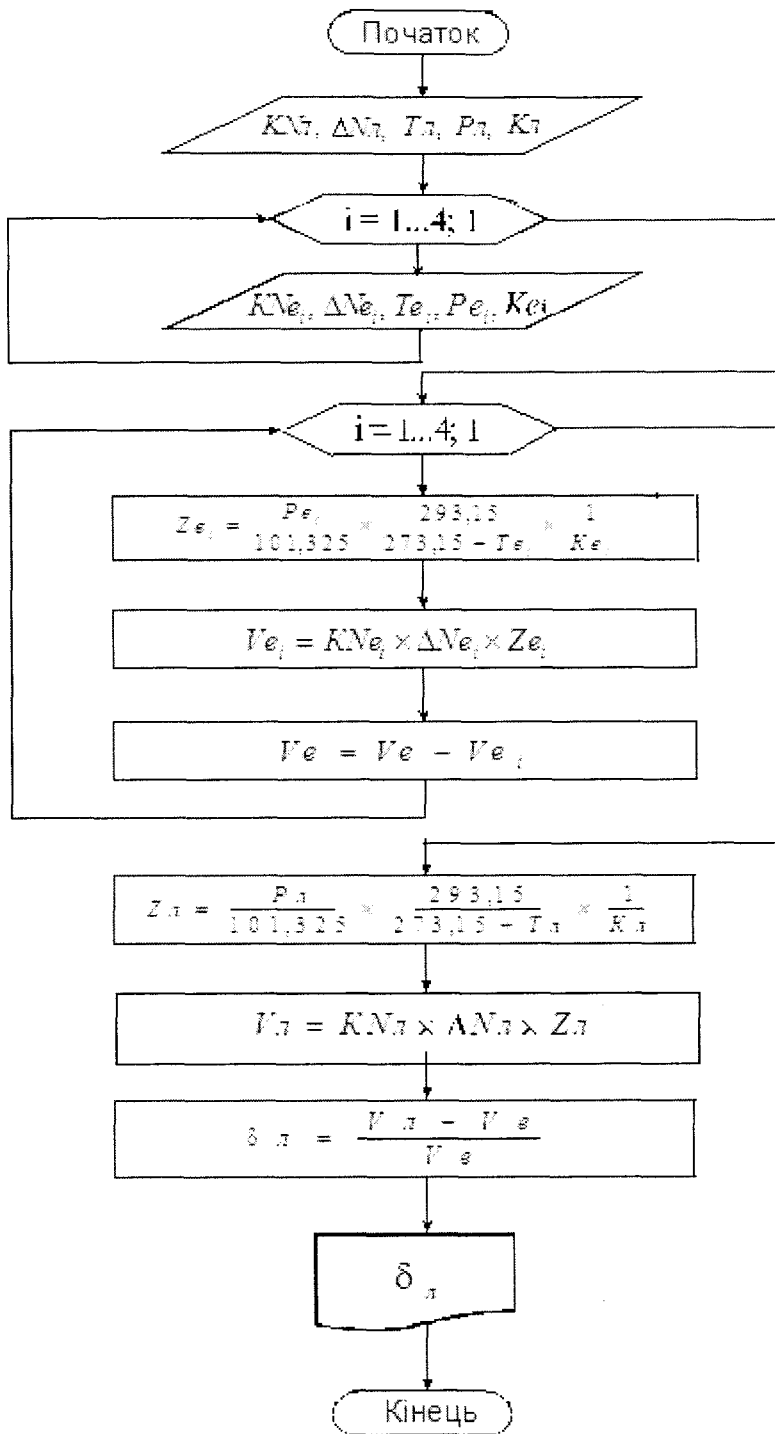


Рис. 1.3. Блок-схема алгоритму визначення відносної похибки для перевірки лічильника газу.

1.6 Постановка задач досліджень

У результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що потребують удосконалення методи оцінювання точності турбінних лічильників газу. Оскільки не до кінця досліджено вплив зміни виду закону розподілу на точність турбінного лічильника та не враховується під час експериментальних досліджень теоретична модель процесу функціонування турбінного лічильника газу, то відповідно постають наступні задачі:

1. Удосконалити модель процесу функціонування турбінного лічильника газу з метою врахування конструктивних параметрів турбіни, умов її експлуатації та параметрів природного газу на метрологічні характеристики турбінних лічильників газу.
2. Здійснити експериментальні дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу на реальному середовищі для оцінювання виду законів розподілу результатів вимірювання та їх зв'язку з випадковою складовою похибки турбінних лічильників.
3. Удосконалити концепцію застосування методів математичної статистики при опрацюванні результатів вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками.
4. Удосконалити методи оцінювання точності турбінних лічильників газу та розробити алгоритми їх практичної реалізації.
5. Розробити нормативний документ з практичного застосування удосконаленого методу оцінювання точності турбінних лічильників при їх калібруванні.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

У розділі здійснюються теоретичні дослідження з удосконалення моделі процесу функціонування турбінного лічильника газу із врахуванням конструктивних параметрів турбіни, умов її експлуатації та параметрів природного газу на їх метрологічні характеристики. Проводиться моделювання та оцінювання впливів природного газу та пульсацій вимірною середовища на стабільність коефіцієнта перетворення лічильника.

2.1 Моделювання процесу вимірювання об'єму газу турбінними лічильниками

2.1.1. Розроблення графічної моделі функціонування турбінних лічильників газу.

Зважаючи на широке використання турбінних лічильників газу та їх переваги [11,12,34,35,80], в процесі дисертаційних досліджень разом із статистичними методами опрацювання вимірювальної інформації досліджено роботу турбінного вітчизняного промислового лічильника газу. Перш за все варто зупинитися на перевагах турбінних лічильників [4,11,12,34,82-85], до числа яких можна віднести можливість роботи на високих температурах і тисках; встановлення на вертикальних і горизонтальних трубопроводах; висока точність (похибка 0,5-1,5%); швидкодія (стала часу 100-500 мс); широкий діапазон вимірювання; лінійність характеристики в широкому діапазоні витрат; можливість вимірювання швидкозмінних потоків; надійність; простота експлуатації; відносно низька вартість.

Із застосуванням графічного методу структурного аналізу визначення причинно-наслідкового зв'язку, тобто діаграми Ісікави, проаналізовано чинники, які приводять до виникнення похибки результату визначення об'єму турбінними лічильниками. Застосування такого методу передбачає:

- ідентифікацію чинників та причин впливу на результат дослідження;
- групування визначених чинників за змістовими та причинно-наслідковими блоками;

- визначення пріоритетності чинників в умовах кожного окремого блока;
- відкидання тих чинників, на які ми не можемо вплинути;
- ігнорування малозначних чинників;
- аналіз остаточної картини діаграми.

Основною перевагою застосування діаграми Ісікави є її наочність, оскільки зв'язок виявлених чинників і причин з досліджуваним наслідком відображається у простій формі і може слугувати в подальшому з метою моделювання роботи засобу вимірювання.

При моделюванні роботи турбінного лічильника ключовою є кутова швидкість обертання лопатей турбіни [4], оскільки об'єм газу, пропущений через лічильник, змушує турбіну крутитися зі швидкістю пропорційною витраті газу, який подається на вхід лічильника. Відповідно, в основу «риб'ячої кістки» покладено саме кутову швидкість обертання лопатей турбіни. Виділимо основні причини відхилення реальної кутової швидкості від ідеальної. Перш за все, варто зауважити, що конструкція турбінного лічильника, а саме такі параметри як довжина лопаті, радіус тіла турбіни, кут між лопатями, хорда лопаті головним чином формують кутову швидкість обертання і їх необхідно враховувати при моделюванні роботи турбінного лічильника в першу чергу. Сповільнюють швидкість обертання турбіни сили механічного опору, які виникають через тертя в місцях підвісу турбіни, тертя в самих підшипниках та в радіальному зазорі між турбіною і корпусом лічильника, що спричиняє не лінійність між частотою обертання та миттєвою швидкістю потоку. Не можна нехтувати і гідродинамічними властивостями потоку, оскільки на вході в турбіну виникають «збурення» потоку через тертя газового середовища із торцевою частиною турбіни і поверхнями лопатей. Відповідно при моделюванні треба враховувати режим потоку. При цьому ключовими є густина, компонентний склад, в'язкість, тиск та температура газу. Звідси випливає, що рівняння роботи газового турбінного лічильника в реальних умовах, перш за все, повинно враховувати конструктивні особливості турбінного лічильника і параметри потоку. Структурно вплив перелічених вище чинників відображає діаграма Ісікави представлена на рис.2.1

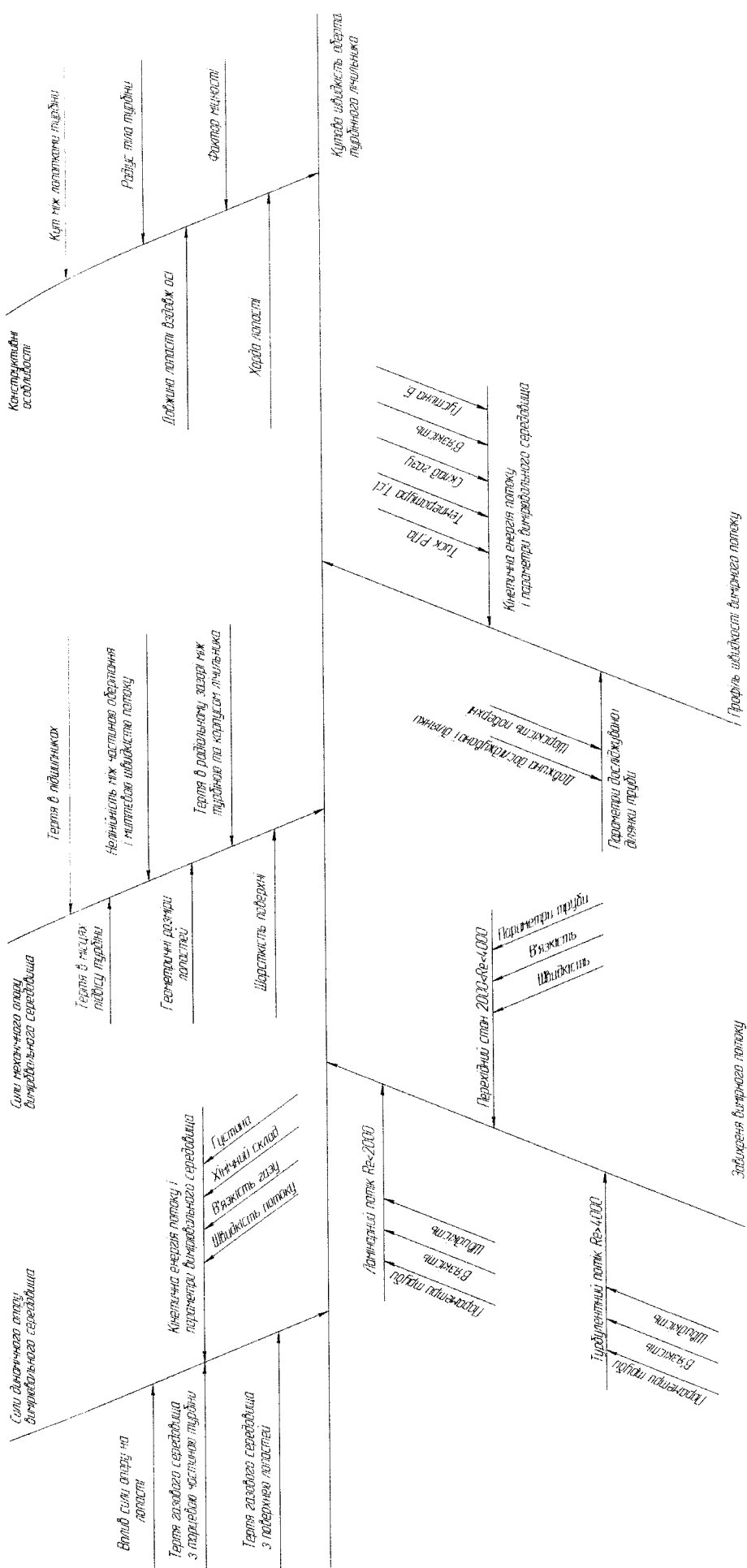


Рис.2.1. Діаграма Ісікави для визначення причин відхилення реальної швидкості обертання турбінного лічильника газу від ідеальної

На основі причинно-наслідкової діаграми для турбінного лічильника газу можна виділити основні причини виникнення відхилення реальної кутової швидкості від ідеальної:

- сили механічного опору;
- геометричні параметри випробувальної ділянки (труби).
- сили аеродинамічного вимірною середовища;
- ефект завихрення вимірювального потоку;
- профіль швидкості вимірювального потоку.

Водночас, всі перелічені вище чинники можна класифікувати як такі, що формуються вимірювальним середовищем і ті, котрі спричинені конструктивними особливостями, самого лічильника, адже з діаграми на рис.2.1 [31] видно, що багато гілок мають спільні «кістки». Кожен із наведених чинників формує результат вимірювання, а результат, у свою чергу, супроводжується сумарною похибкою вимірювання.

Окрім технологічних параметрів процесу, що впливають на результат дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу, мають місце і наступні чинники, що вносять додаткову похибку:

- зміна зовнішніх умов;
- хімічний склад і густина газу, на якому проводиться повірка;
- температура, тиск газу в еталоні та в робочому лічильнику відповідно;
- зміна виду гідродинамічного потоку газу.

Для покращення існуючого алгоритму опрацювання вимірювань разом із особливостями установки розглядалися і особливості роботи лічильника, а саме: конструктивні особливості тіла лічильника, профіль швидкості вимірювального потоку, сили механічного та динамічного опорів, завихрення у вимірювальному потоці і фізико-хімічні властивості природного газу. На рис. 2.1 діаграма Ісікави детально описує зміну поведінки сил, що діють на турбінку у процесі вимірювання об'єму.

Перш ніж перейти до експериментальних досліджень, необхідно змоделювати процес вимірювання об'єму за допомогою турбінного лічильника газу та дослідити

вплив на результат вимірювання об'ємної витрати параметрів процесу вимірювання, впливових чинників з метою встановлення причинно-наслідкових зв'язків. В основу математичної моделі рівняння вимірювання об'єму газу покладено теоретичні дослідження фізичної роботи турбінного лічильника та розроблена діаграма впливів (рис.2.1).

2.1.2. Удосконалення математичної моделі турбінних лічильників газу.

«Ідеальна» калібрована швидкість обертання турбінки визначається силами, які діють на турбінку, проте в реальних умовах вимірювального експерименту на реальному (газовому) середовищі існують сили дії на турбінку, які викликають відхилення кутової швидкості обертання від її ідеальної характеристики [4,34,41]. Дане відхилення можна охарактеризувати функцією безрозмірного відношення сил інерції до сил в'язкості. Це відношення є нічим іншим, як числом Рейнольдса. В основному, ці сили уповільнюють швидкість обертання турбінки, відповідно, збільшуючи похибку вимірювання витрати.

Турбінні газові лічильники призначені і відкалібровані в умовах рівномірного осьового потоку. А це означає, що якщо у потоці газу виникають завихрення на вході турбінки, то залежно від напрямку цих завихрень, турбінка може збільшити або зменшити швидкість обертання, що призведе до завищених або занижених показів лічильника, а отже споживач або постачальник можуть зазнати втрат.

Окрім сил опору вимірювального середовища, що сповільнюють рух турбінки, додатково має місце тертя у підшипниках ротора та механічні навантаження на привід індикаторів потоку. У [4,16,17] детально розглянуто природу утворення сил, що сповільнюють рух турбінки.

Теоретично можна описати ситуацію, коли не існувало б сил, що сповільнюють швидкість обертання турбінки, тоді вона обертатиметься зі швидкістю, що точно відтворює вектор швидкості потоку (на поверхню лопаті турбінки). На рис.2.2 зображено векторну діаграму для турбінки. Припускаючи, що

лопаті турбінки плоскі і швидкість потоку однорідна і паралельна відносно осі, тоді з рис. 2.2 випливає:

$$r\omega_i = \tan \beta \cdot v, \quad (2.1)$$

де r – вектор радіусу турбінки, м; v – вектор швидкості потоку, м/с; ω_i – ідеальна швидкість обертання, с^{-1} ; β – кут нахилу лопатей турбіни відносно осі.

Якщо ввести в рівняння значення об'ємної витрати q_v , то:

$$\frac{\omega_i}{q_v} = \frac{\tan \beta}{rS}, \quad (2.2)$$

S – площа поперечного перерізу потоку, м^2 ; \bar{r} – ефективний радіус турбіни (середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусу лопаті (R, r)),

м.

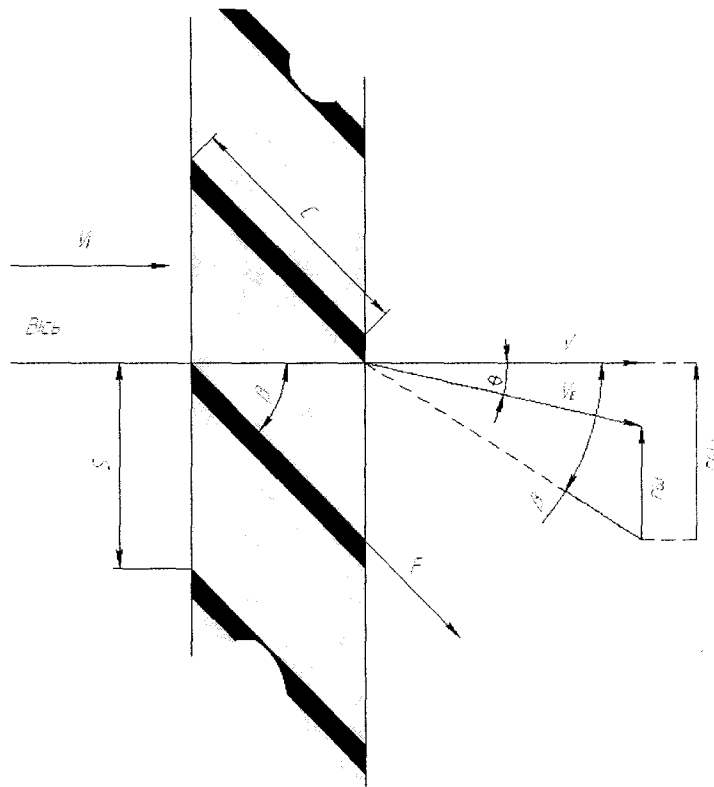


Рис. 2.2. Векторна діаграма для аксіальної турбінки

v – вектор швидкості потоку; v_E – реальний вектор швидкості на виході потоку; \square – т завихрення на виході потоку із врахуванням моменту сповільнюючи сил; β – кут хилу лопатей турбіни; ω – вектор кутової швидкості турбінки; r – вектор радіусу рбінки; F – сили опору вимірного середовища, що діють на поверхні кожної

лопаті; c – хорда лопаті; s – довжина лопаті вздовж осі; c/s – фактор міцності турбінки.

Як згадано у [16] дане відношення є наближеним виразом для коефіцієнту перетворення лічильника K , який за умов проведення експерименту визначається як функція від критерію Рейнольдса $K = f(Re)$. Відношення $\frac{\omega_i}{q_v}$ будемо вважати теоретичним значенням коефіцієнту перетворення лічильника (надалі це відношення позначатимемо як K).

В ідеальних умовах проведення вимірювального експерименту відповідь лічильника на зміну швидкості потоку ідеально лінійна і визначається виключно геометричними параметрами лопаті. У реальних умовах існує низка впливових чинників, що сповільнюють рух лопаті турбінки. За умов стабільної витрати швидкість турбінки можна описати наступним чином:

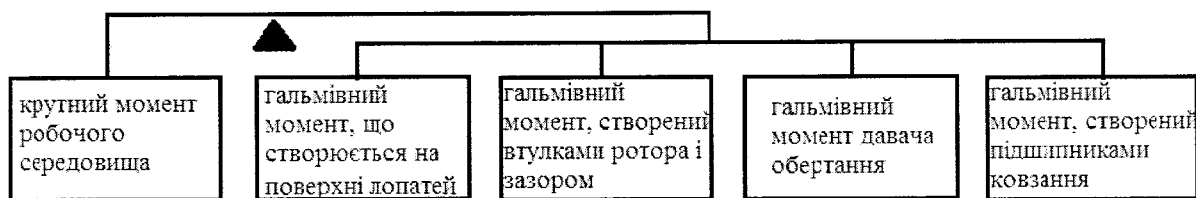


Рис. 2.3. Протидіючі моменти, що виникають в турбінці

Повертаючись знову до рис.2.2, різниця між фактичною швидкістю обертання турбінки $r\omega$ та ідеальною $r\omega_i$, є швидкість ковзання турбінки за рахунок сукупного впливу моментів сил, що діють на неї, сповільнюючи швидкість (див. рис.2.3), в результаті чого вектор швидкості руху робочого середовища відхиляється. Введемо в рівняння змінну радіуса r і прирівнюючи повну швидкість зміни моменту імпульсу робочого середовища, що проходить через турбінку, сповільнюючий момент дорівнюватиме [41]:

$$\int_a^R \frac{\rho q_v 2\pi r^2 (r\omega_i - r\omega)}{\pi(R^2 - a^2)} dr = N_T, \quad (2.3)$$

що у свою чергу дорівнює[41]:

$$\overline{r^2} \rho q_v^2 (\omega_i - \omega) = N_T, \quad (2.4)$$

де N_T сумарний сповільнюючий момент сил. Зіставляючи рівняння (2.2) та (2.4) одержимо [41]:

$$K = \frac{\tan \beta}{rS} - \frac{N_T}{r^2 \rho q_v^2}. \quad (2.5)$$

У більшості конструкцій лічильників останні три з чотирьох гальмівних моментів з рис. 2.3 малі за нормальних умов експлуатації порівняно з крутним моментом, що виникає за рахунок вимушеного опору руху середовища по всій поверхні лопаті. Як зображено на рис.2.2 сила F , що виникає через цей ефект, діє в напрямку вздовж поверхні лопаті і визначається як [41]:

$$F = \frac{\rho V^2}{2} C_D S, \quad (2.6)$$

де C_D коефіцієнт лобового опору і S – площа поверхні лопаті з кожного боку, м². Використовуючи визначення коефіцієнта лобового опору в умовах турбулентного потоку цю силу можна визначити як [41]:

$$F = 0,074 \text{Re}^{-0.2} \rho q_v^2 S. \quad (2.7)$$

У [41] сповільнюючий момент, що створюється впливом опору вздовж поверхні лопаті турбінки (з n лопатями) подано наступним чином:

$$N_T = n(R + a) \rho q_v^2 0.037 \text{Re}^{-0.2} S \sin \beta. \quad (2.8)$$

Беручи до уваги рівняння (2.5) та (2.8), впливає:

$$K = \frac{\tan \beta}{rS} - \frac{0.036n(R + a)SA^{-2} \text{Re}^{-0.2} \sin \beta}{r^2}. \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) показує, що нелінійність зміни кутової швидкості за рахунок зміни витрати за нормальних умов експлуатації є функцією деяких основних геометричних параметрів та критерію Рейнольдса. Крім того, застосоване відхилення від наближених ρq_v^2 залежить від гальмівного моменту робочого середовища за умов турбулентного потоку та інших процесів, що супроводжують зміну виду потоку від перехідного і до ламінарного, що свідчить про те, що нехтувати критерієм Рейнольдса не можна [41]. Це основна причина, чому осьові турбінні лічильники рекомендують для турбулентних потоків.

Завихрення потоку викликає пульсації, що у свою чергу вносить додаткову похибку в результат вимірювання. Критерій Рейнольдса загалом визначається відношенням сил інерції до сил в'язкості потоку [4]:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot q_v \cdot \rho_c}{\pi \cdot \mu \cdot D}, \quad (2.10)$$

де ρ_c – густина природного газу за робочих умов, кг/м^3 ; D – діаметр вимірювального трубопроводу, м; μ – динамічна в'язкість газу, $\text{Па}\cdot\text{с}$, q_v – об'ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{с}$.

Очевидно, що для того, щоб оцінити вид потоку робочого середовища, необхідно знати параметри середовища і геометричні розміри ділянки труби.

Коли мова йде про природний газ, то коефіцієнт динамічної в'язкості з урахуванням компонентного складу природного газу за тисків до 0,5 МПа обчислюють за формулою [4]:

$$\mu = 3.24 \frac{T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \rho_c^{0.125}}{\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2})}, \quad (2.11)$$

де μ виражено в $\text{мкПа}\cdot\text{с}$; T – температура природного газу, К; x_{N_2}, x_{CO_2} – вміст азоту та двооксиду вуглецю, відповідно.

Формула для визначення числа Re (2.1) набуває вигляду:

$$\text{Re} = \frac{1.23 q_v \rho_c (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2}))}{\pi D (T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \rho_c^{0.125}) \cdot 10^{-6}}. \quad (2.12)$$

Отже, якщо брати до уваги і конструктивні особливості турбінки, і аеродинамічні властивості потоку робочого середовища, то коефіцієнт перетворення лічильника, який в даному випадку розглядався як відношення кутової швидкості обертання від об'ємної витрати можна подати наступним виразом:

$$K = \frac{\tan \beta}{rS} - \frac{0.036n(R+a)SA^{-2} \sin \beta}{r^{-2}} \times \left(\frac{1.23 \rho \cdot q_v (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2}))}{\pi D (T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \rho_c^{0.125}) \cdot 10^{-6}} \right)^{-0.2}. \quad (2.13)$$

У розв'язанні прикладних задач часто використовують критерії подібності, для того, щоб повністю описати процес руху газового середовища. Вище уже згадувалося про критерій подібності, який характеризує перехід потоку від ламінарного до турбулентного – критерій Рейнольдса; також мова йшла і про сили

аеродинамічного опору вимірного середовища, де опосередковано згадувалося про сили інерції. Оскільки, дослідженню підлягають турбінні лічильники газу, то число Рейнольдса доцільно рахувати по відношенню до геометричних параметрів лічильника, а не дослідної ділянки труби. Для цього скористаємося закордонними підходами для визначення числа Рейнольдса для турбінних лічильників газу.

Детальніше сили інерції розкриває критерій Струхаля [4]:

$$St = \frac{f \times L}{v}, \quad (2.14)$$

де f – частота пульсацій потоку, Гц; L – довжина хорди лопаті, м; v – швидкість потоку, м/с.

Коли мова йде про властивість інерційності середовища та сили, що виникають під час нестационарного руху, то найкращим критерієм подібності тут є число Струхаля (2.14). Дослідженню критеріїв подібності Струхаля і Рейнольдса присвячено ряд наукових праць [16,17,41,42]. Практичну цінність має виведене число Струхаля з урахуванням конструктивних особливостей для турбінних лічильників [17]:

$$St = \frac{fD^3 \pi P_f}{4q_v}, \quad (2.15)$$

а також і число Рейнольдса [17]:

$$Re = \frac{fDd}{v}, \quad (2.16)$$

де d – діаметр лопаті турбіни, м; P_f – коефіцієнт заповнення лічильника.

Коли мова йде про природний газ, як робоче середовище турбінного лічильника, то приймаємо, що $P_f=1$. Прирівнявши частоту пульсацій потоку за формулами (2.15) та (2.16) отримаємо:

$$Re = \frac{St \times 4q_v \times d}{v \times D^2 \times \pi}. \quad (2.17)$$

Одержаний вираз підставимо у залежність (2.13) і з урахуванням динамічної в'язкості (2.12) розпишемо коефіцієнт перетворення лічильника, виділивши не

лише конструктивні особливості турбінки, а й параметри природного газу та властивості вимірного потоку:

$$K = \frac{\tan \beta}{rS} - \frac{0.285n(R+a)SA^{-2} \sin \beta}{r^{-2}} \times \left(\frac{St \cdot 4q_v \rho d (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2}))}{D^2 \pi (T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \rho_c^{0.125}) \cdot 10^{-6}} \right)^{-0.2} \quad (2.18)$$

Отже, отримана залежність (2.18) характеризує коефіцієнт перетворення турбінного лічильника із врахуванням конструкції лічильника та параметрів природного газу і дозволяє оцінити нелінійність коефіцієнта перетворення відносно об'ємної витрати. Разом з тим, залежність (2.18) дозволяє коректувати систематичну складову похибки, оскільки враховує і геометричні параметри турбінки, і параметри вимірного середовища. Відповідно, якщо ввести в коректор правки на розрахунок коефіцієнта перетворення лічильника за формулою (2.18) при умові, що параметри моделі будуть уточнені експериментально при градуванні турбінного лічильника, то таким чином можна коригувати систематичну складову сумарної похибки.

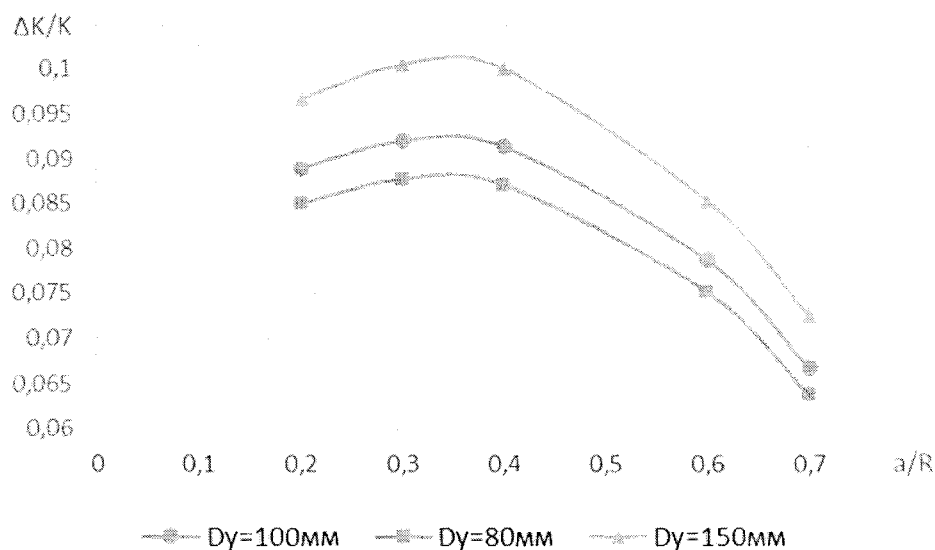


Рис.2.4. Вплив геометричних розмірів турбіни на зміну коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу для труби з умовними діаметрами 80,100, 150 мм.

Результати моделювання впливу геометричних розмірів турбіни на співвідношення протидіючих і рушійних сил, які приводять до зміни коефіцієнту перетворення, наведені на рис.2.4. Вони можуть бути підставою для вибору на етапі

проектування лічильника оптимальних геометричних параметри турбінні за критерієм мінімальної зміни відношення кутової швидкості обертання до об'ємної витрати.

Постає задача оцінювання випадкової складової похибки для внесення правок у алгоритм визначення похибки турбінного лічильника газу. З цією метою необхідно дослідити залежність формування виду закону розподілу на всьому діапазоні вимірювання досліджуваного турбінного лічильника. Із розглянутих в першому розділі методів ідентифікації закону розподілу перевага надається інформаційному методу на основі ентропійного коефіцієнта, оскільки він дає можливість оцінити не лише параметри нормального закону, але й основні види законів розподілу.

2.2 Дослідження впливу параметрів вимірювального середовища на стабільність коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу

2.2.1 Моделювання впливу параметрів природного газу на коефіцієнт перетворення лічильника.

Параметри вимірного середовища у запропонованій моделі для визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника появилися в результаті розписування коефіцієнта динамічної в'язкості природного газу. Зі зміною в'язкості змінюватимуться інертні властивості потоку газу і відповідно сили тертя між шарами газу. Динамічна в'язкість при сталих температурі та тиску залежить від внутрішніх (хімічних) властивостей самої рідини. У [4,52] цю залежність при тисках до 0,5 МПа подано у вигляді (2.11). При чому формула (2.11) застосовна в діапазоні температур 240-360 К. Похибка визначення в'язкості в цьому діапазоні не перевищує 3% для природного газу, якщо похибки вимірюваних параметрів прийняті рівними нулю [52]. В'язкість природного газу збільшується при збільшенні температури, оскільки збільшення температури веде до збільшення швидкості

теплого руху молекул, що робить газ більш в'язким. Залежність в'язкості від тиску виражена слабо [52].

Необхідно дослідити, як впливають параметри газу, які представлені у моделі (2.18) через коефіцієнт динамічної в'язкості, на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника.

Метрологічні дослідження турбінних лічильників газу типорозмірів G400 та G160 проводились на всьому діапазоні вимірювання лічильників на реальному середовищі. При цьому значення параметрів густини газу, концентрації азоту та двоокису вуглецю подавалися у паспорті газу. У табл.2.1 наведено їх значення.

Таблиця 2.1

Значення параметрів природного газу при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу.

Густина, кг/м ³	Молярна концентрація азоту, відн.од	Молярна концентрація двоокису вуглецю, відн.од.	Абсолютна температура Т, К
0,6807	0,005060	0,004580	281,2700
0,6955	0,005620	0,002850	281,7200
0,7006	0,007310	0,002560	283,2700
0,7080	0,009050	0,001420	286,2700
0,7402	0,007170	0,001270	289,5700

З метою оцінки вагомості впливу кожного вхідного параметра для розрахунку коефіцієнта перетворення лічильника на його величину обчислювалися коефіцієнти вагомості за формулою [77]:

$$\frac{\partial K}{\partial q_i} \cong \left[\frac{K_{qi}^{\max} - K_{qi}^{\min}}{(q_{\max} - q_{\min}) / q_i \cdot 100\%} \right], \quad (2.19)$$

де $\frac{\partial K}{\partial q_i}$ – коефіцієнт вагомості впливу i -го вхідного параметра на обчислення

коефіцієнта перетворення лічильника, $\frac{лмн}{м^3} / 1\%$; q_{\max} , q_{\min} – максимальне та

мінімальне значення вхідного параметра відповідно; K_{qi}^{\max} , K_{qi}^{\min} – значення

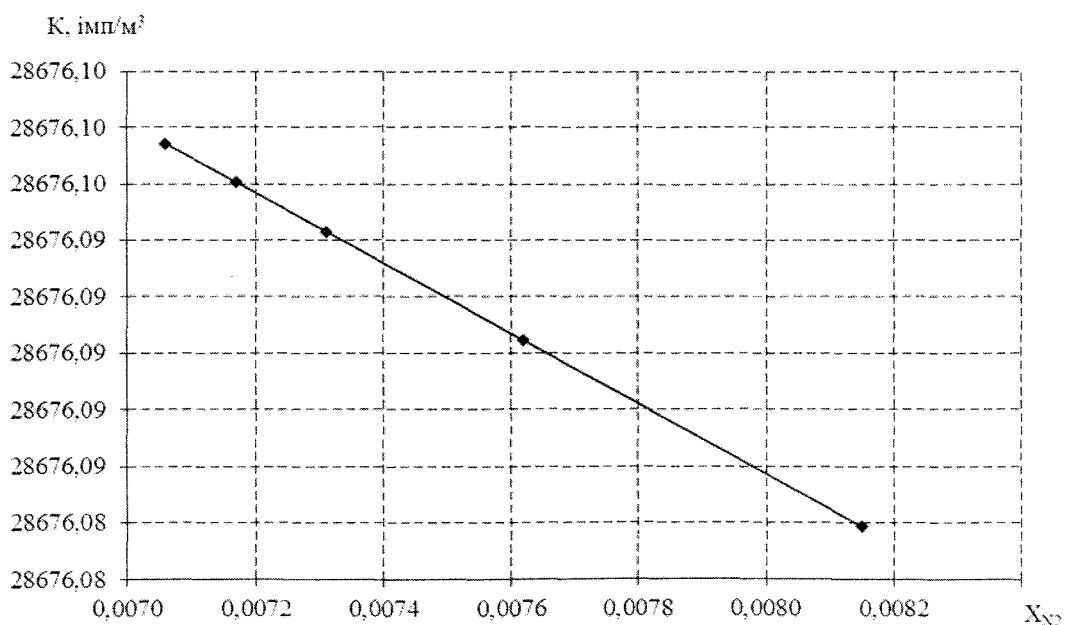
коефіцієнта перетворення лічильника при максимальному та мінімальному значенні вхідного параметра відповідно, имп/м^3 ; \bar{q}_i – середнє значення i -того вхідного параметра.

Результати обчислень подані в табл.2.2. Для зручності запропоновано використовувати безрозмірний коефіцієнт вагомості, що дає змогу оцінити ступінь впливу зміни кожного із впливових факторів за умови його зміни на 1 %. Таким чином, формула (2.19) набуде вигляду:

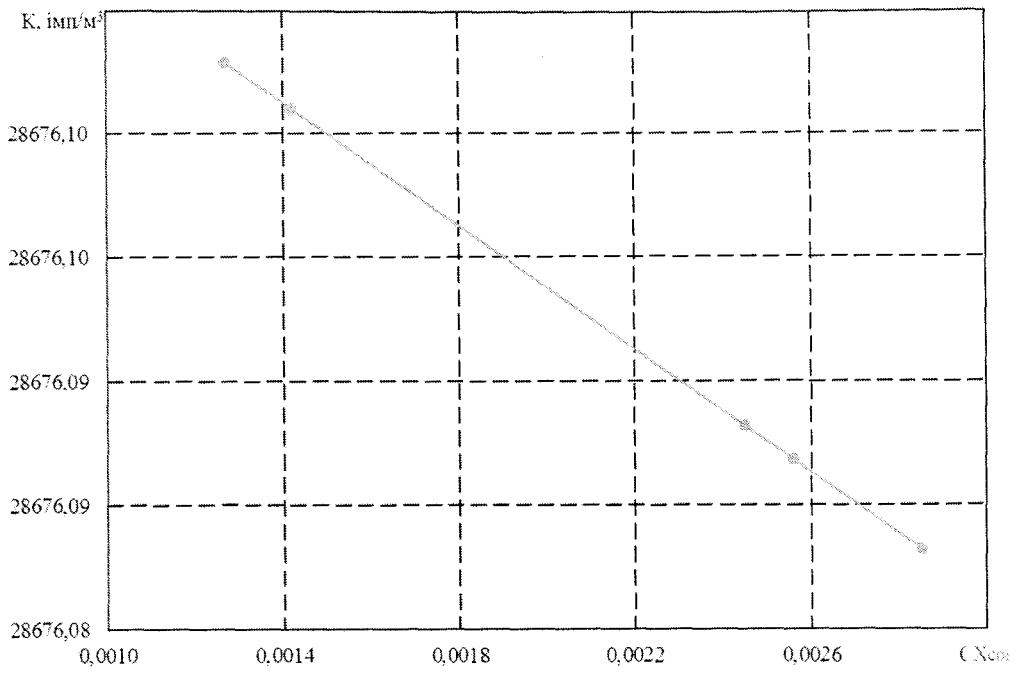
$$\frac{\partial K'}{\partial p'_i} \cong \frac{(K_{qi}^{\max} - K_{qi}^{\min}) \times \bar{p}'_i}{(p'_{\max} - p'_{\min}) \times \bar{K}_i}, \quad (2.20)$$

де $\frac{\partial K'}{\partial p'_i}$ – безрозмірний коефіцієнт вагомості впливу i -го вхідного параметра на обчислення коефіцієнта перетворення лічильника; \bar{K}_i – середнє значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника за умови зміни i -того вхідного параметра, имп/м^3 .

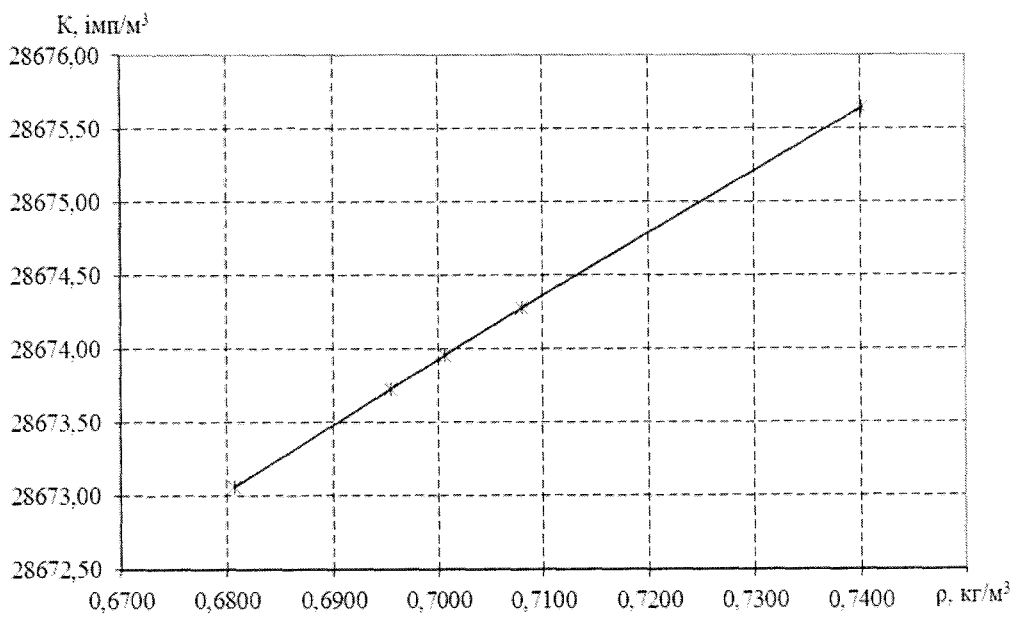
Графічні залежності, отримані в результаті дослідження впливу вищенаведених параметрів на коефіцієнт перетворення лічильника (який пропонується визначати за (2.18)), представлено на рис.2.4.



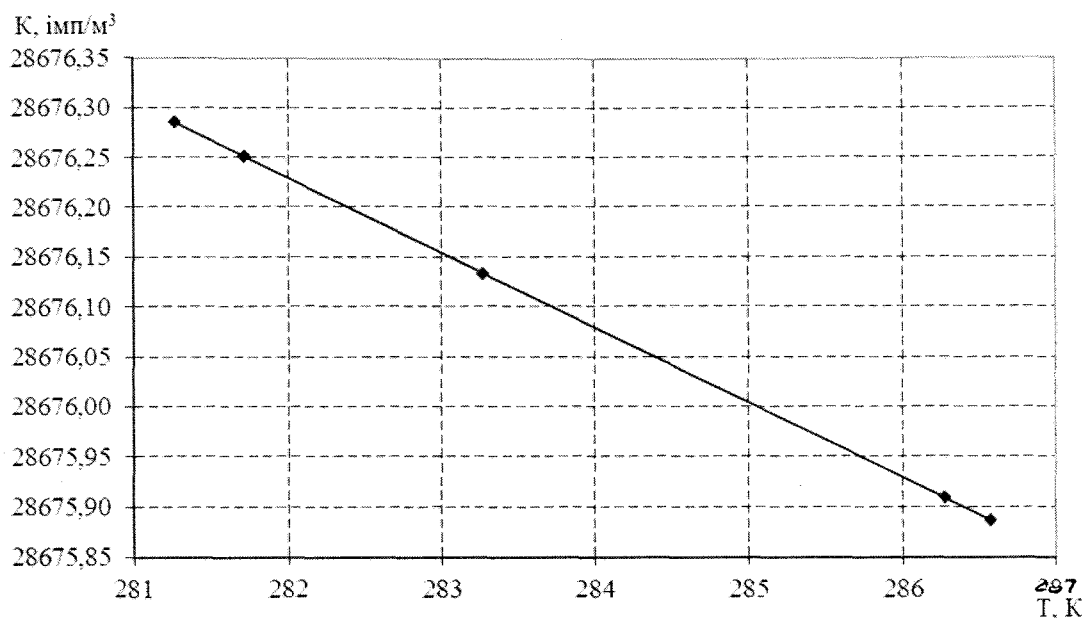
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.5. Зміна коефіцієнта перетворення лічильника від параметрів природного газу: а – при зміні молярної концентрації азоту; б - при зміні молярної двоокису вуглецю; в – при зміні густини; г – при зміні абсолютної температури.

Таблиця 2.2

Значення коефіцієнтів вагомості вхідних параметрів розрахунку коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу

Вхідний параметр	$\frac{\partial K}{\partial q_i}, \frac{\text{imp}}{\text{m}^3} / 1\%$	$\frac{\partial K'}{\partial q_i}$
Молярна концентрація азоту, відн.од.	-0,0009	$-3,23 \times 10^{-6}$
Молярна концентрація двоокису вуглецю, відн.од.	-0,0003	$-9,15 \times 10^{-7}$
Абсолютна температура T, К	-0,2133	$-0,7 \times 10^{-3}$
Густина ρ_c , кг/м ³	0,3058	1×10^{-3}

Отримані результати дослідження впливу параметрів вимірного середовища на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника газу (рис. 2.5 та табл. 2.2) доводять, що, найбільш впливовими факторами на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника K є абсолютна температура та густина природного газу. На це вказують значення обчисленого ступеню впливу зміни кожного із впливових факторів за

умови його зміни на 1 %. Вплив концентрації азоту і диоксиду вуглецю є меншим. Звідси випливає, що при обчисленні коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу разом із геометричними параметрами турбінки ключовими є параметри природного газу, при чому зміна густини та абсолютної температури на 10% призводять до зміни коефіцієнта перетворення лічильника на 0,01% та 0,007%.

2.2.2. Дослідження стабільності робочих умов еталонної установки при дослідженні метрологічних характеристик турбінних лічильників.

При метрологічних дослідженнях лічильників газу, зокрема турбінних, витрата робочого середовища повинна бути постійною або повільно змінною в часі. Відповідно до [78] допускаються пульсації потоку, якщо виконується умова не перевищення середнього квадратичного відхилення миттєвих значень перепаду тиску [78]:

$$S_{qv} = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta p_i - \overline{\Delta p})^2 \right)^{1/2}}{\overline{\Delta p}} \leq 0,1 \quad (2.21)$$

де n – число вимірювань перепаду тиску за інтервал часу, прийнятий для оцінки пульсацій потоку; i – номер вимірювання; Δp_i – значення перепаду тиску при i -му вимірюванні, Па; $\overline{\Delta p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_i$ – середнє значення перепаду тиску, Па.

Коефіцієнт перетворення лічильника є одним з головних показників якості турбінних лічильників газу і у запропонованій моделі (2.18) опосередковано залежить від числа Re , яке тут визначається геометричними розмірами та коефіцієнтом динамічної в'язкості μ попередньому підрозділі доведено, що вплив на величину коефіцієнта динамічної в'язкості мають густина та температура. Оскільки під час вимірювання об'єму густина природного газу залишається сталою, а температура коливається в межах 8°C (як видно із протоколів досліджень), то при дослідженні пульсацій потоку пропонується враховувати не лише коливання тиску, а й температури. За такої умови, формула (2.21) набуде вигляду:

$$S_{q_v} = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{T_i} - \frac{\bar{p}}{\bar{T}} \right)^2 \right)^{1/2}}{\frac{\bar{p}}{\bar{T}}} \leq 0,1, \quad (2.22)$$

де p_i – значення тиску при i -му вимірюванні, Па; $\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$ – середнє значення тиску, Па; T_i – значення температури при i -му вимірюванні, К; $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ – середнє значення температури, К.

Під час опрацювання результатів дослідження турбінних газових лічильників типорозмірами G400 та G160 в умовах випробувальної лабораторії ПАТ «Івано-Франківськгаз» розрахунок відношення $\frac{p_i}{T_i}$ проводився як в межах однієї вибірки (тобто для результатів вимірювання миттєвих значень витрати), так і для кількох вибірок з результатами досліджень у одній і тій же контрольній точці (тобто для усереднених значень об'ємної витрати).

Нижче подані результати дослідження стабільності потоку для усереднених значень об'ємної витрати в контрольній точці $q_v=100 \text{ м}^3/\text{год}$ на середньому тиску турбінного лічильника типорозміру G160.

Таблиця 2.3

Результати досліджень стабільності потоку вимірного середовища для усереднених значень об'ємної витрати в контрольній точці $q_v=100 \text{ м}^3/\text{год}$

p_i , кПа	T_i , К	p_i/T_i , кПа/К	S_{q_v}
331,21	286,34	1,1567	0,010452
331,21	286,33	1,1567	
331,23	286,30	1,1569	
331,21	286,28	1,1570	
331,19	286,25	1,1570	

Результати досліджень стабільності потоку вимірного середовища для миттєвих значень об'ємної витрати в контрольній точці $q_v=100 \text{ м}^3/\text{год}$

p_i , кПа	T_i , К	p_i/T_i , кПа/К	S_{qv}
331,01	286,45	1,15556	0,0050617
330,97	286,46	1,15539	
331,00	286,45	1,15553	
330,98	286,45	1,15546	
330,98	286,44	1,15549	
330,97	286,45	1,15543	
330,98	286,44	1,15548	
330,97	286,43	1,15550	
330,96	286,43	1,15546	
330,97	286,43	1,15551	
330,96	286,42	1,15552	
330,97	286,41	1,15560	
330,96	286,4	1,15560	

Як видно з результатів наведених в табл.2.3-2.4 показник стабільності вимірного середовища при дослідженні турбінних лічильників на порядок менший максимально допустимої норми регламентованої нормативним документом [78]. Тому можна зробити висновок, що пульсації вимірного середовища не впливають на точність вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу в умовах випробувальної установки ПАТ «Івано-Франківськгаз».

2.3 Висновки до другого розділу

Розроблена графічна модель функціонування турбінних лічильників газу на реальному середовищі у вигляді діаграми Ісікави, яка конкретизує фактори впливу на метрологічні характеристики турбінних лічильників.

Розроблена вдосконалена математична модель функціонування турбінних лічильників газу, яка враховує основні геометричні параметри турбіни, умови експлуатації і критерії гідродинамічної подібності потоку. Розроблена модель дозволяє коригувати систематичну складову похибки лічильників на етапі проектування і метрологічної атестації турбінного лічильника газу.

Досліджено вплив параметрів природного газу на коефіцієнт перетворення лічильника. Встановлено, що найбільш суттєвими є вплив густини та абсолютної температури, зміна яких на 10% призводять до зміни коефіцієнта перетворення лічильника на 0,01% та 0,007% відповідно.

З метою перевірки на коректність експериментальних досліджень, при яких відтворювана витрата на еталонній установці приймалася стабільною, здійснено оцінку пульсацій потоку. Встановлено, що зміна тиску без врахування непостійності температури не приводить до пульсацій, які би перевищували 0,1%, чим обґрунтовано відсутність впливу пульсацій вимірною середовища на імовірнісні характеристики (функцію розподілу та щільність) результату вимірювання об'єму турбінними лічильниками.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

У розділі проведено експериментальне дослідження коефіцієнта перетворення турбінних лічильників газу. Отримано нові залежності виду закону розподілу від робочої об'ємної витрати через турбінний лічильник. Отримало подальший розвиток визначення коефіцієнта перетворення лічильника за його конструктивними параметрами, параметрами потоку та із врахуванням виду закону розподілу.

3.1 Експериментальні дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу

Якщо розглядати загалом, то результат вимірювання – це комплексна характеристика процесу вимірювання, що відображає в собі низку ключових моментів. На процес метрологічних досліджень турбінних лічильників газу на витратомірних установках типу «набір еталонних лічильників» вплив мають параметри вимірної процесу та умови проведення досліджень. З технологічної точки зору вплив на результат мають типорозмір лічильника, що підлягає повірці; витрата, на якій перевіряється лічильник; кількість лічильників, що підлягають одночасній перевірці; геометричні розміри досліджуваної ділянки; засоби вимірювання тиску і температури.

Для експериментальних досліджень метрологічних характеристик турбінних лічильників газу відповідно до плану експериментальних досліджень метрологічних характеристик турбінних лічильників газу здійснено вибір засобів вимірювання. При цьому основні характеристики лічильників складали:

– перший еталонний *роторний* лічильник G65, його метрологічні характеристики: номінальна витрата: $Q_{\text{ном}}=65 \text{ м}^3/\text{год}$; максимальна витрата: $Q_{\text{max}}=100\text{м}^3/\text{год}$; межа основної відносної похибки: $Q_{\text{min}} \leq Q < Q_t: \pm 2\%$, $Q_t \leq Q \leq Q_{\text{max}}: \pm 1\%$; номінальний діаметр $DN=80$;

- другий еталонний *роторний* лічильник G250, його метрологічні характеристики: номінальна витрата: $Q_{\text{ном}}=250 \text{ м}^3/\text{год}$; максимальна витрата: $Q_{\text{max}}=400 \text{ м}^3/\text{год}$; межа основної відносної похибки: $Q_{\text{min}} \leq Q < Q_t: \pm 2\%$, $Q_t \leq Q \leq Q_{\text{max}}: \pm 1\%$; номінальний діаметр DN=100;

- перший досліджуваний *турбінний* лічильник G400, його метрологічні характеристики: максимальна витрата $Q_{\text{max}}=650 \text{ м}^3/\text{год}$; мінімальна витрата: $Q_{\text{min}} = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; межа основної відносної похибки: $Q_{\text{min}} \leq Q < Q_t: \pm 2\%$, $Q_t \leq Q \leq Q_{\text{max}}: \pm 1\%$; номінальний діаметр DN=100;

- другий досліджуваний *турбінний* лічильник G160, його метрологічні характеристики: максимальна витрата $Q_{\text{max}}=250 \text{ м}^3/\text{год}$; номінальна витрата: $Q_{\text{ном}}=65 \text{ м}^3/\text{год}$; межа основної відносної похибки: $Q_{\text{min}} \leq Q < Q_t: \pm 2\%$, $Q_t \leq Q \leq Q_{\text{max}}: \pm 1\%$; номінальний діаметр DN=80.

В установці використовується вимірювальний перетворювач температури типу ПТ-М з 4-х провідним з'єднанням, що працює в діапазоні температур від -30 до 60°C з номінальною статичною характеристикою M100. Для вимірювання і передачі значень тиску на відстань та для подальшого опрацювання, застосовуються вимірювальні перетворювачі тиску з метою передачі вимірювального сигналу на обчислювач (коректор) або на пульт керування ПЕОМ. Моделі та характеристики вимірювального перетворювача тиску, що застосовується в установці, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Моделі та характеристики вимірювального перетворювача тиску, що застосовується в установці

Назва моделі	Технічні характеристики				
	Застосування	Діапазон вимірювання	Межі основної похибки, %	Вихідний сигнал	Маса, кг
Метран-45	ДИ, ДВ, ДИВ, ДД	ДИ: 0,1 кПа-60МПа ДВ: 0,1-100 кПа ДИВ: 0,08кПа-530 кПа ДД: 0,1 кПа – 25 МПа	$\pm 0,25\%$; $\pm 0,5\%$; $\pm 1,0\%$	I=0..5; 4..20; 0..20 мА	1÷6,5

В усіх перетворювачах тиску, перепаду тиску і температури для передачі даних використовують HART-протокол – тобто протокол двонаправленого зв'язку, який передбачає передачу цифрової інформації поверх стандартного аналогового сигналу 4-20 мА. HART-модем передає дані через розширювач портів RS232. Імпульсні сигнали вимірювання витрати з перетворювачів обертів робочих еталонів і лічильників обробляються контролером метрологічних параметрів і через розширювач портів надходять у ПЕОМ.

Експериментальні дослідження турбінних лічильників газу типорозмірами G400 та G160 проводилися на випробувальній установці, що працює на реальному середовищі в умовах ПАТ «Івано-Франківськгаз». Точність установки становить 0,5%, діапазон значень об'ємної витрати від 0,6 м³/год до 2500 м³/год. Протоколи досліджень зі зазначеними параметри процесу вимірювання та вимірного середовища подано у додатку А. При цьому для турбінного лічильника ЛГК G160, який досліджувався на природному газі, коефіцієнти перетворення лічильника наведені у табл.3.2. Залежність коефіцієнта перетворення від об'ємної витрати наведено на рис.3.1. Аналогічні характеристики одержано і для турбінного лічильника ЛГК G400 (див.табл.3.3 і рис.3.2).

Таблиця 3.2

Коефіцієнт перетворення турбінного лічильника газу типорозміру G160 під час роботи га природному газі.

$q_v, \text{ м}^3/\text{год}$	$K, \text{ імп./м}^3$
25,54	28301,9523
50,603	27868,165
100,699	27671,3426
125,985	27663,7299
162,403	27681,6639
202,21	27741,2513
246,4	27809,8805

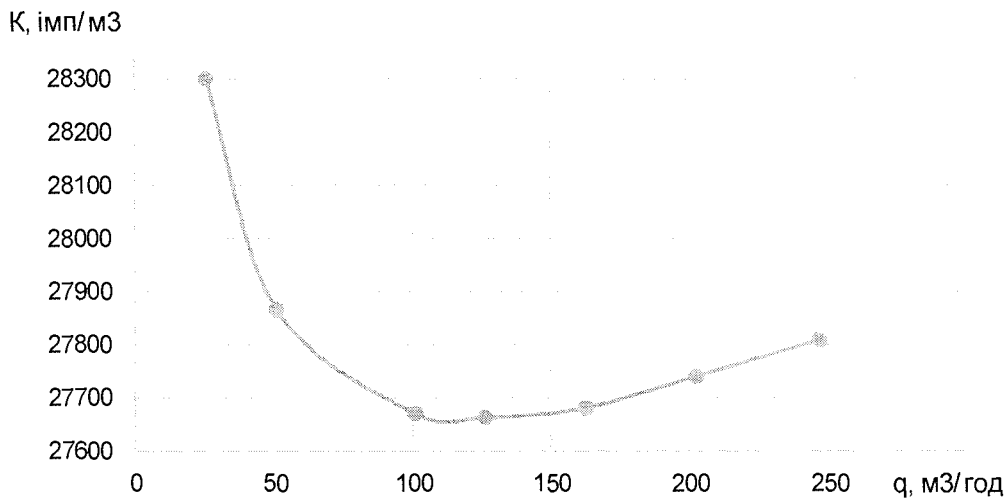


Рис.3.1. Залежність коефіцієнта перетворення турбінного лічильника G160 від об'ємної витрати

Отримані результати доводять, що залежність коефіцієнта перетворення від об'ємної витрати є дзеркальним відображенням класичної характеристики (залежності похибки лічильника від об'ємної витрати) турбінних лічильників газу [4]. Це пояснюється тим, що у випадку турбінних лічильників газу, похибка обчислюється як:

$$\delta = \frac{K_i - K_{ном}}{K_{ном}} \times 100\%, \quad (3.1)$$

де K_i – i -те значення коефіцієнта перетворення, імпл/м³; $K_{ном}$ – номінальне значення коефіцієнта перетворення, імпл/м³. Тобто похибка лічильника обернено пропорційна значенню коефіцієнта перетворення лічильника. Проте, варто зауважити, що теоретично залежність на рис.3.1. мала б виглядати дещо інакше, як це подано на рис.3.2, хоча в ідеалі, коефіцієнт перетворення лічильника мав би бути сталим на всьому діапазоні вимірювання. Вважається [11], що об'ємна витрата газу дорівнює добутку швидкості руху газу через турбінку на «ефективну» площу поперечного перерізу. Звідси випливає, що відхилення від ідеальної пропорції між коефіцієнтом перетворення і об'ємною витратою спричинене тим, що площа поперечного потоку турбінки не є сталою. У турбінних лічильниках газу це відбувається, в основному, через зміну пограничного шару, тобто рухомої частини потоку газу (що може бути

зумовлене високою в'язкістю газу або низькою витратою). Рухома частина потоку газу відносно стабільна на високих числах Рейнольда ($Re > 10000$) [11], в той час як на малих числах Рейнольдса при ламінарному та перехідному потоці через зміну профіля швидкості потоку пограничний шар змінюється, що в результаті призводить до коливань коефіцієнта перетворення лічильника як це показано на рис.3.2.

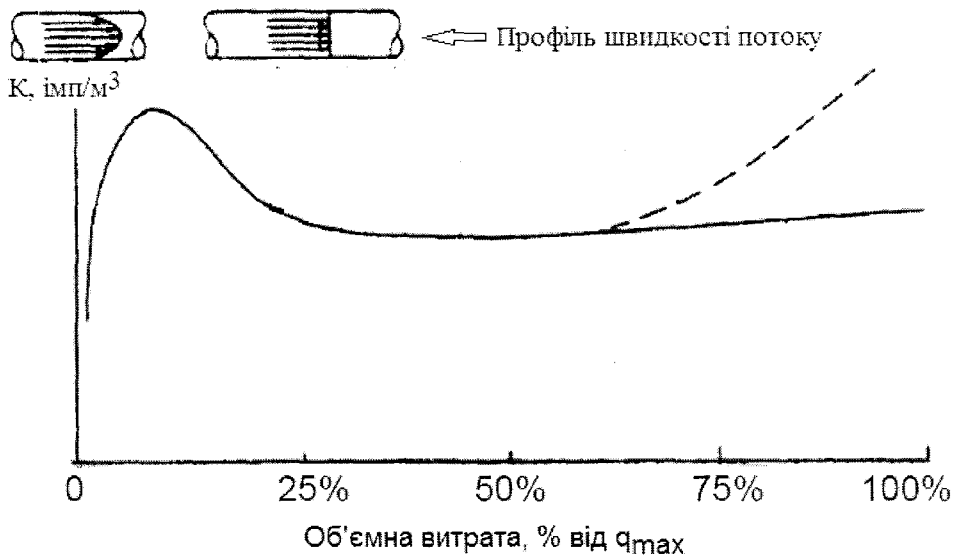


Рис.3.2. Теоретична залежність коефіцієнта перетворення турбінного лічильника від об'ємної витрати

Окрім згаданих вище факторів нестабільності коефіцієнту перетворення лічильника мають місце і механічні процеси, такі як тертя в опорах підшипників, відхилення геометричних параметрів турбінки від каліброваних. Пунктирна лінія на рис.3.2 говорить про те, що на кінці діапазону вимірювання через зміну гідродинамічних властивостей потоку може відбуватися «задирання» кривої характеристики турбінки. Це, в свою чергу, є доказом присутності ексцентричних мас, що відчувається на великих витратах через неправильно збалансовану турбіну. Експериментально отримані значення (рис.3.1) підтверджують цей факт.

Отримані результати (рис.3.1, рис.3.3) доводять, що залежність коефіцієнта перетворення від об'ємної витрати не є сталою. Простежується закономірність: на малих витратах коефіцієнт перетворення набуває своїх максимальних значень, стабілізується в діапазоні приблизно від $0,15q_{max}$ до $0,9q_{max}$.

Коефіцієнт перетворення турбінного лічильника газу типорозміру G400 під час роботи на природному газі.

$q_v, \text{м}^3/\text{год}$	$K, \text{імп./м}^3$
25,465	27243,0503
49,823	27033,7324
101,697	26759,7240
126,076	26753,1451
160,75	26749,6467
200,293	26771,6263
249,733	26763,2826
279,76	26766,4357
310,66	26771,1607
360,08	26767,6340
375,20	26775,6433
421,33	26765,9730
470,64	26768,8873
510,64	26782,2743
565,33	26777,8687
590,57	26857,8433
649,66	26955,3723

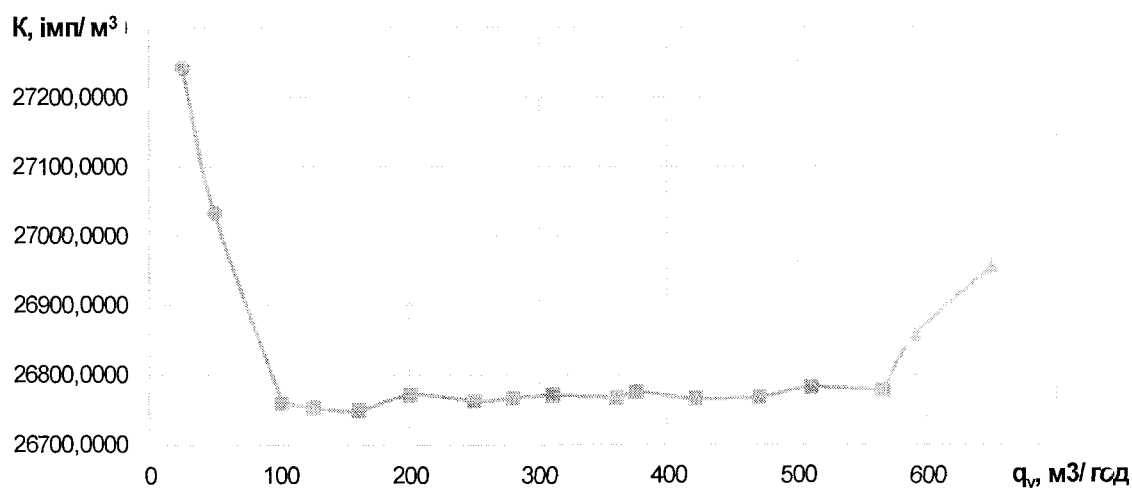


Рис.3.3. Залежність коефіцієнта перетворення турбінного лічильника G400 від об'ємної витрати

В свою чергу аналіз ряду праць в області вимірювання об'ємної витрати газу турбінними лічильниками [41,42,82,84,85] показав, що коефіцієнт перетворення, в основному, є функцією від геометрії турбіни, як це видно із формули (2.18). Відхилення можуть вносити параметри газу, проте ці відхилення не мали б на стільки суттєво виділятися із ряду результатів. Тому постає задача: проаналізувати та дослідити, чим викликані дані відхилення від стабільності та внести поправки у алгоритм обчислення коефіцієнта перетворення лічильника газу, що дозволило б підвищити оцінку точності вимірювання турбінними лічильниками.

3.2 Застосування методів математичної статистики для ідентифікації закону розподілу результатів вимірювання турбінними лічильниками

На сьогоднішній день в математичній статистиці існує багато різноманітних критеріїв, що дають відповідь на питання ідентифікації закону розподілу отриманих даних, проте зупинимося на графічному, аналітичному та інформаційному підході, в основу яких закладена параметрична оцінка вибірки. У [86-89] згадується про деякі підходи, що застосовуються для підбору емпіричного розподілу ймовірностей при малих об'ємах вибірок. Відомо [88], що за допомогою графіка Пірсона, розрахувавши показники форми розподілу, а саме: коефіцієнти асиметрії β_1 та ексцесу β_2 , можна визначити тип закону розподілу даних. Перевага надається методу Пірсона в порівнянні з методами Шарльє і Крамера, завдяки тому, що цей метод охоплює практично всі відомі види статистичних розподілів. Коефіцієнти β_1 та β_2 виражаються через третій та четвертий центральний момент відповідно [88]:

$$\beta_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (3.2)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} - 3, \quad (3.3)$$

де μ_3 – третій центральний момент; μ_4 – четвертий центральний момент; σ – середньоквадратичне відхилення (СКВ); x_i – i -й результат спостереження; \bar{x} – середнє арифметичне вибірки; n – об'єм вибірки (кількість елементів).

Як уже згадувалося вище, основною перевагою графічного методу Пірсона є його універсальність при визначенні сімейства групи розподілів. Дуже часто на практиці закон розподілу отриманих дослідним шляхом даних відрізняється від нормального, не зважаючи на твердження центральної граничної теореми, тому і постає питання ідентифікації закону розподілу відмінного від нормального. Свого часу Пірсон запропонував графічний підхід ідентифікації сімейства розподілів, в якому чітко окреслив зони, які видно з рис.3.4 Як відомо [89], значущим носієм інформації випадкових величин є її моменти, а при визначенні форми кривої закону розподілу важливу роль відіграють третій та четвертий центральні моменти. При розрахунках третій центральний момент може набувати позитивних значень, що говорить про переважаючу більшість додатних відхилень відносно математичного сподівання досліджуваного значення фізичної величини, і в цьому випадку роблять висновок про позитивну асиметрію кривої розподілу. У випадку коли третій центральний момент набуває негативних значень, відповідно, можна говорити про переважаючу більшість від'ємних (негативних) відхилень і робити попередній висновок про лівосторонню асиметрію кривої закону розподілу. Хоча для остаточного висновку про форму кривої розподілу третього центрального моменту не є достатньо, оскільки він залежить від одиниць вимірювальної величини. Для того, щоб отримати значення, котре могло б слугувати мірою асиметрії і не залежало б від одиниць вимірювання величини, ввели поняття коефіцієнта асиметрії β_1 математично отримавши вираз (3.2). В літературі [90] β_1 називають першим коефіцієнтом форми, коефіцієнтом асиметрії або ж третім стандартним моментом, а коефіцієнт β_2 математично відображений у формулі (3.3) називають другим

коефіцієнтом форми, коефіцієнтом ексцесу або ж четвертим стандартним моментом. Власне, розрахункові значення цих двох коефіцієнтів дозволяють відтворити попередню картину кривої закону розподілу, а саме: β_1 говорить про правосторонню ($\beta_1 > 0$) або лівосторонню ($\beta_1 < 0$) асиметрію, в свою чергу β_2 у випадку, якщо $\beta_2 > 0$, говорить про гостровершинність кривої закону розподілу, а якщо $\beta_2 < 0$, то це говорить про її плосковершинність.

Власне, спираючись на ці два початкові положення при визначенні закону розподілу, Пірсон розробив графічний метод, який полягає у розрахунках коефіцієнтів асиметрії та ексцесу і перенесення цих значень на графік.

На основі отриманих статистичних даних випробування лічильників для кожного з 36 окремих файлів, які в собі містять результати випробування (у кожному з файлів містилося від 2 до 9 вибірок в залежності від типу та об'єму лічильника, що підлягав метрологічному випробуванню) розраховувались коефіцієнти асиметрії та ексцесу з метою «перенесення» отриманих значень на графік Пірсона та встановлення можливого закону розподілу даних. Проте на даному етапі дослідження виявлено, що розрахункові значення β_1 та β_2 є настільки малими ($\beta_1 = (0; 1)$ $\beta_2 = (0; 1)$), що робити висновок про вид закону розподілу на основі графіка Пірсона не можливо, адже вони знаходяться в критичній області.

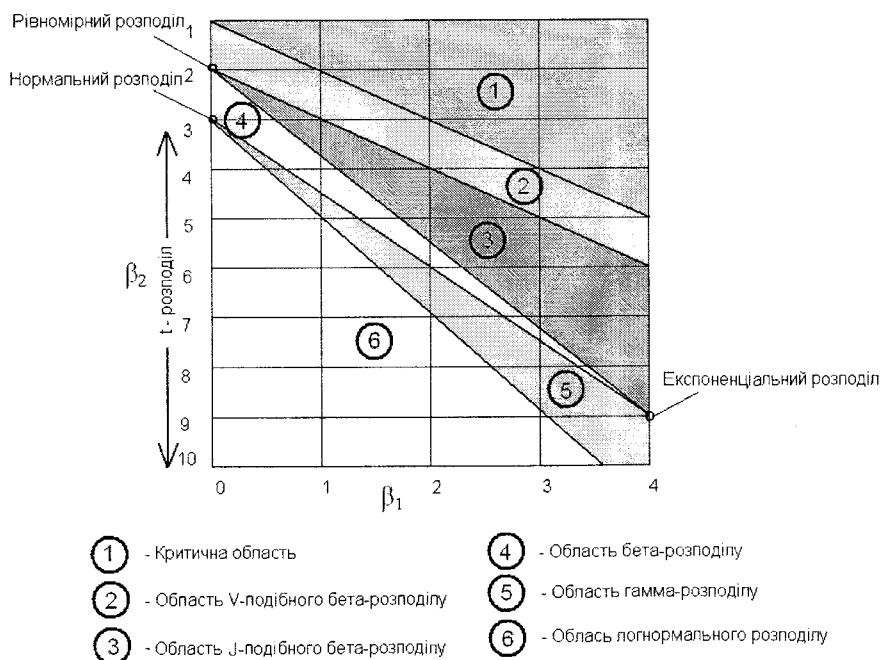


Рис. 3.4. Графік Пірсона для ідентифікації законів розподілу в площині $(\beta_1; \beta_2)$

На основі отриманих результатів зроблено висновок: графічний метод є нечутливим до вибірок малого об'єму або ж вплив додаткових факторів є настільки вагомим, що «маскує» реальні результати дослідження, оскільки на першому етапі перевірки закону розподілу встановлено, що за розрахунковими значеннями коефіцієнтів асиметрії та ексцесу неможливо зробити висновок про вид кривої розподілу, а також при ідентифікації закону ($\beta_1; \beta_2$) виявлено, що кожна із дослідних вибірок знаходиться у критичній області, тобто віднести вибірку до конкретної групи розподілів не вдалося [27].

Наступним етапом було вирішено застосувати експрес метод і охарактеризувати закон розподілу за допомогою гістограми, побудованої на основі наявних вибірок, отриманих в результаті випробування лічильників в умовах ПАТ «Івано-Франківськгаз».

Як вже згадувалося вище, головним фактором, який ускладнює завдання ідентифікації форми кривої закону розподілу малих вибірок є сама випадковість появи різних значень випадкової величини. Звісно, уникнути цієї проблеми можна за умови збільшення об'єму вибірки, та іноді, як і в нашому випадку, це не є можливим за самою суттю експерименту. Оперуючи невеликою кількістю елементів вибірки, необхідно перш за все спиратися на максимальне використання апріорної інформації про вид розподілу, а саме, як і в попередньому випадку, береться до уваги дві апріорних аксіоми: плавність та симетричність кривої розподілу [88], що видно із рисунку гістограми. Власне саме цей метод дає змогу ще раз підтвердити або ж спростувати попередні судження про форму закону розподілу, зроблені на попередньому етапі.

Перейдемо до самої процедури побудови гістограми. Для найменшого спотворення кривої в області центру розподілу число стовпців рекомендується вибирати непарним, а центральний стовпець розміщувати симетрично відносно прийнятого центру розподілу, згідно з однією із вищезгаданих аксіом. Варто зауважити, що оптимальне число інтервалів вибраних для побудови гістограми сильніше залежить від форми розподілу аніж від об'єму вибірки, що видно із формули [90]:

$$m = \frac{\varepsilon + 1.5}{6} n^{0.4} = \frac{1}{3} \sqrt[5]{\frac{n^2}{\chi^8}}, \quad (3.4)$$

де m – кількість інтервалів; n – об'єм вибірки; ε – ексцес; χ – контрексцес.

З метою полегшення розрахунків і для графічного представлення дослідних даних створено програмне забезпечення (робоче вікно якої показано на рис.3.5). Беручи до уваги рекомендації подані в [90], мінімальне і максимальне число інтервалів побудови гістограми вибиралося як:

$$m_{\min} = 0.55n^{0.4} \quad \text{та} \quad m_{\max} = 1.25n^{0.4}. \quad (3.5)$$

Користувач може сам вибрати число інтервалів, тим самим збільшуючи або зменшуючи ширину кожного з інтервалів, враховуючи необхідність нерозривності інтервального ряду. Разом з тим, розраховані для попереднього методу точкові оцінки асиметрії та ексцесу, які мають асимптотично нормальний розподіл, використовувалися для перевірки належності вибірки до нормального закону розподілу на основі експрес-методу. Оскільки очікуваної результативності із використання графіка Пірсона не було отримано, то на даному етапі для кожної з вибірок формувався висновок про гостровершинність (плосковершинність) та правосторонню (лівосторонню) асиметрію кривої розподілу за принципом поданим в попередньому підрозділі. Проте для середніх ($n=50\dots60$) та малих ($n \leq 25$) вибірок розподіл оцінок асиметрії та ексцесу вже значно відхиляється від нормального, що різко знижує ефективність методу. Тому вибраного виду розподілу за формою побудованої гістограми та отриманого припущення на основі експрес-методу перевірки нормальності недостатньо для остаточного висновку.

Провівши детальний аналіз кожної з вибірок, на даному етапі можна говорити, що прослідковується певна закономірність і тенденція: для лічильників, які розраховані на малі витрати, притаманна переважаюча більшість плосковершинних законів розподілу з лівосторонньою асиметрією, а для більших витрат – з правосторонньою асиметрією. Разом з тим виявлено схильність до двохмодальності при малих об'ємах вибірок. Проте і тут однозначного висновку не

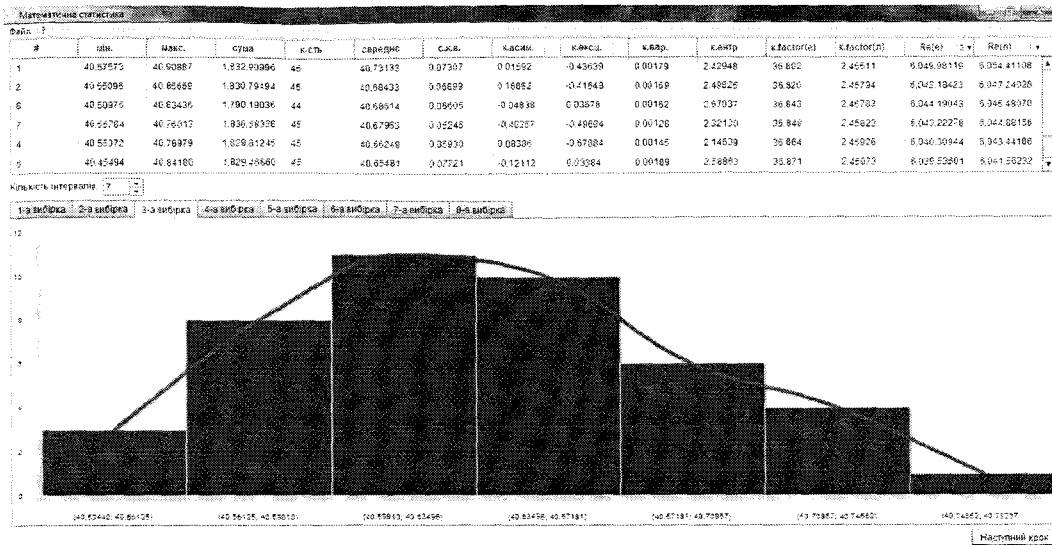


Рис. 3.5. Робоче вікно програми для визначення параметрів вибірки з результатами метрологічних досліджень турбінних лічильників газу

отримано, оскільки було порушено кілька важливих принципів при побудові, що часто зумовлено малим обсягом та «випадковістю» самої вибірки. Важливою перевагою застосування графічного методу є те, що саме з рисунку гістограми можна зробити попереднє припущення про вид закону розподілу (віднести криву до певного класу розподілів) та про наявність можливих промахів.

Отже, за результатами аналізу аналітичного та графічного методів, що використовуються для ідентифікації законів розподілу результатів визначення об'єму природного газу турбінними лічильниками, можна зробити висновок про недоцільність їх використання, адже вони не дають змоги отримати остаточний висновок про вид закону розподілу, тому необхідно досліджувати вибірки з результатами випробувань турбінних лічильників за інформаційним методом, в основі якого лежить визначення ентропійного коефіцієнта, як параметра закону розподілу.

На етапі перевірки виду закону розподілу параметричними методами однозначності висновків досягнути не вдалося, отож, зважаючи на рішення запропоновані в попередньому розділі, необхідно додатково дослідити вибірки із застосуванням критеріальних методів.

№	мін.	макс.	сума	к-сть	середнє	с.в.	к.вжн.	к.всц.	к.впр.	к.впр.	к.факт(а)	к.факт(а)	Рез	Рез1
1	40.67973	40.80667	1.832.50995	45	40.73133	0.07307	0.01662	-0.42050	0.00179	2.42648	35.802	2.45511	6.048.98119	6.054.41108
2	40.55008	40.89809	1.830.79194	45	40.68433	0.09809	0.16892	-0.41648	0.00199	2.42825	35.820	2.45794	6.043.18423	6.047.24028
3	40.50975	40.83426	1.790.18035	44	40.68514	0.08505	-0.04838	0.03579	0.00192	2.67037	36.843	2.45785	6.044.19945	6.045.48070
7	40.55784	40.78013	1.820.68329	45	40.67963	0.05246	-0.40357	-0.40694	0.30126	2.32130	36.348	2.46023	6.043.22575	6.044.60155
4	40.55372	40.78079	1.829.81245	45	40.66249	0.05910	0.08386	-0.07881	0.00145	2.14520	36.064	2.46023	6.040.50944	6.043.44185
6	40.45464	40.84180	1.829.46660	45	40.65481	0.07721	-0.12112	0.03384	0.00189	2.58853	36.871	2.45973	6.039.53601	6.041.93232

Вибір №	Складені критерії	Критерії Шапиро-Уїлла
1	підтверджено	підтверджено
2	підтверджено	підтверджено
3	підтверджено	підтверджено
4	підтверджено	підтверджено
5	підтверджено	підтверджено
6	підтверджено	підтверджено
7	підтверджено	підтверджено
8	підтверджено	підтверджено

Рис.3.7. Перевірка нормальності в програмі статистичного опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу

№	мін.	макс.	сума	к-сть	середнє	с.в.	к.вжн.	к.всц.	к.впр.	к.впр.	к.факт(а)	к.факт(а)	Рез	Рез1
1	40.57952	40.03967	1.832.90090	45	40.73133	0.07307	0.01662	-0.43659	0.00179	2.42848	35.802	2.45511	6.045.98119	6.054.41108
2	40.55009	40.59995	1.830.79194	45	40.68433	0.09809	0.16892	-0.41648	0.00199	2.42825	35.820	2.45794	6.043.18423	6.047.24028
3	40.52440	40.75237	1.747.42545	43	40.63780	0.05704	0.21728	-0.47328	0.00140	2.53452	36.952	2.46075	6.004.45550	6.040.13972
4	40.55372	40.78079	1.829.81245	45	40.66249	0.05910	0.08386	-0.07884	0.00145	2.14639	36.064	2.46023	6.040.50944	6.043.44185
5	40.50975	40.78533	1.839.77934	46	40.64737	0.06231	-0.64599	-0.47367	0.80153	2.20628	36.853	2.46018	6.038.24718	6.041.01095
6	40.45464	40.84180	1.829.46660	45	40.65481	0.07721	-0.12112	0.03384	0.00189	2.58853	36.871	2.45973	6.039.53601	6.041.93232

Вибір №	Критерій варіаційного розмаху	Критерій Романовського	Критерій Раяна
1	не виконано	не виконано	не виконано
2	не виконано	не виконано	не виконано
3	не виконано	не виконано	не виконано
4	не виконано	не виконано	не виконано
5	не виконано	не виконано	не виконано
6	не виконано	не виконано	не виконано
7	не виконано	не виконано	не виконано
8	не виконано	не виконано	не виконано

Рис. 3.8. Перевірка на промахи в програмі статистичного опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу

Відповідно до отриманих результатів, бачимо, що необхідно внести зміни у існуючий алгоритм опрацювання результатів випробувань лічильників в умовах лабораторії ПАТ «Івано-Франківськгаз».

3.3 Застосування інформаційного підходу під час опрацювання виміральної інформації турбінних лічильників газу

Результати метрологічних досліджень турбінних лічильників на природному газі оформлені у вигляді протоколів, що подаються у додатку Б (результати скореговані коректором газу, за допомогою якого здійснюється опрацювання

результатів і приведення їх до стандартних умов). Систематизувавши дані досліджень лічильників і беручи до уваги інформацію про задану витрату і типорозміри лічильників, що піддають дослідженню, необхідно, перш за все, вивчити апріорну інформацію про метрологічні дослідження.

Перш ніж перейти до ідентифікації закону розподілу шляхом застосування інформаційного підходу, для кожної вибірки із результатами вимірювання об'ємної витрати турбінним лічильником G400 було отримано закон розподілу на основі аналітичного методу. Застосовуючи розроблене програмне забезпечення, вибірки з результатами вимірювання об'ємної витрати були статистично перевірені на відсутність промахів критеріями Романовського [56,89] та варіаційного розмаху (алгоритм наведений у додатку А) та на відтворюваність критеріями Кохрена і Бартлетта (алгоритм наведений у додатку А). На рис. 3.9 - 3.14 представлено графіки густини та функції розподілів ймовірностей для вибірок з результатами вимірювання значень об'ємної витрати у контрольних точках $25 \text{ м}^3/\text{год}$, $130 \text{ м}^3/\text{год}$ та $650 \text{ м}^3/\text{год}$.

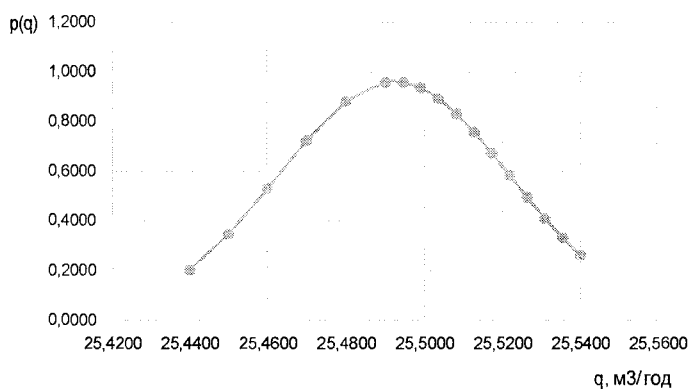


Рис.3.9. Графік густини розподілу ймовірностей (при $\bar{q}=25,49 \text{ м}^3/\text{год}$).

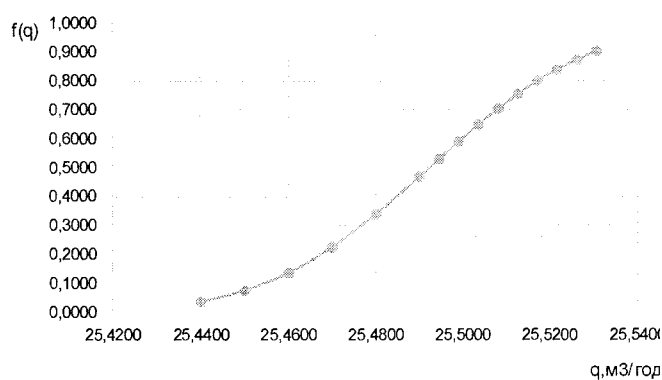


Рис.3.10. Графік функції розподілу ймовірностей (при $\bar{q}=25,49 \text{ м}^3/\text{год}$).

Як видно із графіків закон розподілу результатів вимірювання значень об'ємної витрати на контрольній точці $q_{min}=25 \text{ м}^3/\text{год}$ нормальний і аналітично його можна записати як:

$$f(q_{v_{min}}) = \frac{1}{0.03\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(q_v - 25.49)^2}{0.0018}}, \quad (3.6)$$

при середньому значенні вибірки $\bar{q}=25,49 \text{ м}^3/\text{год}$, СКВ складає $\sigma_1=0,03 \text{ м}^3/\text{год}$.
 Довірчі межі становлять: $25,4798 \text{ м}^3/\text{год} < q_{\text{vmin}} < 25,5047 \text{ м}^3/\text{год}$, для $P=0,95$.

Таблиця 3.4

Значення густини та функції розподілів ймовірностей для вибірок з результатами вимірювання значень об'ємної витрати (25 м³/год)

q_{min}	$f(q)$	$p(q)$	q_{min}	$f(q)$	$p(q)$
25,4401	0,0309	0,1732	25,4945	0,5103	0,9906
25,4513	0,0697	0,3324	25,4991	0,5729	0,9744
25,4526	0,0759	0,3550	25,5036	0,6338	0,9347
25,4602	0,1213	0,5006	25,5082	0,6915	0,8745
25,4706	0,2098	0,7156	25,5127	0,7447	0,7980
25,4718	0,2221	0,7394	25,5173	0,7928	0,7103
25,4754	0,2611	0,8074	25,5218	0,8350	0,6166
25,4857	0,3890	0,9524	25,5264	0,8712	0,5220
25,4862	0,3957	0,9569	25,5309	0,9015	0,4310
25,4898	0,4446	0,9814	25,5355	0,9263	0,3471
25,4900	0,4474	0,9823	25,5400	0,9459	0,2727

Аналогічним чином визначалися закони розподілу експериментальних значень об'ємної витрати у кожній контрольній точці. При цьому простежується закономірність, що на витратах $q_{\text{min}} \cdot 0,2q_{\text{max}}$ закон розподілу нормальний, а на витратах $0,2q_{\text{max}} \cdot q_{\text{max}}$ – Лапласа. Наведемо графіки для значень $q=0,2q_{\text{max}} = 130 \text{ м}^3/\text{год}$ і $q=q_{\text{max}} = 650 \text{ м}^3/\text{год}$.

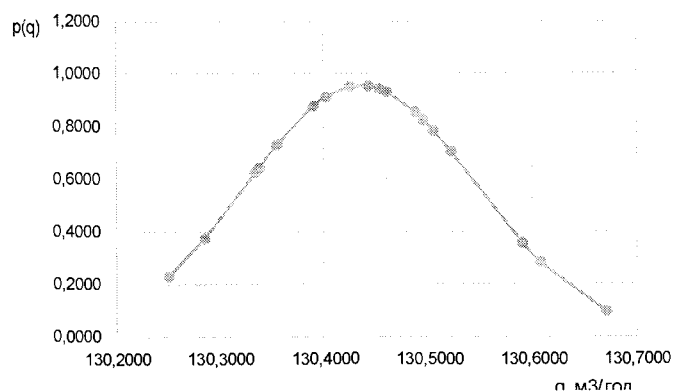


Рис.3.11. Графік густини розподілу ймовірностей (при $\bar{q}=130,44 \text{ м}^3/\text{год}$)

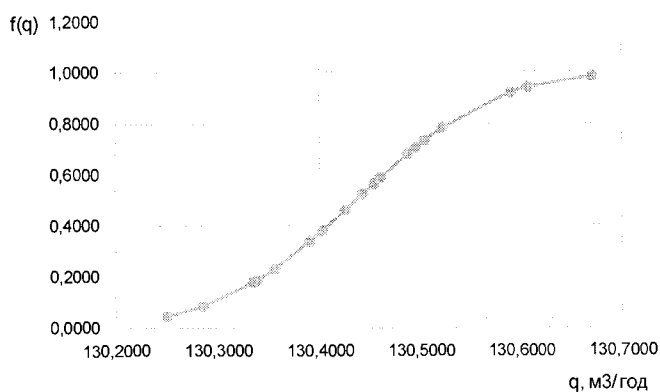


Рис.3.12. Графік функції розподілу ймовірностей (при $\bar{q}=130,44 \text{ м}^3/\text{год}$)

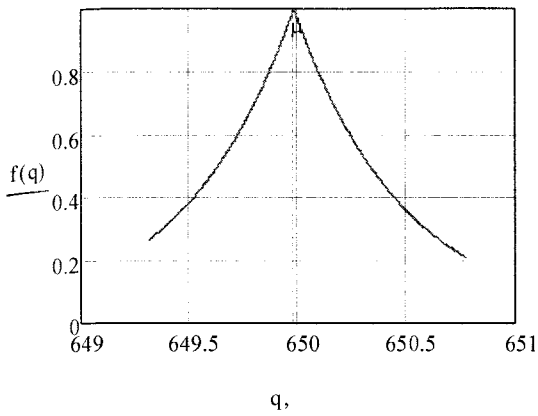


Рис.3.13. Графік густини розподілу імовірностей (при $\bar{q}=649,98 \text{ м}^3/\text{год}$).

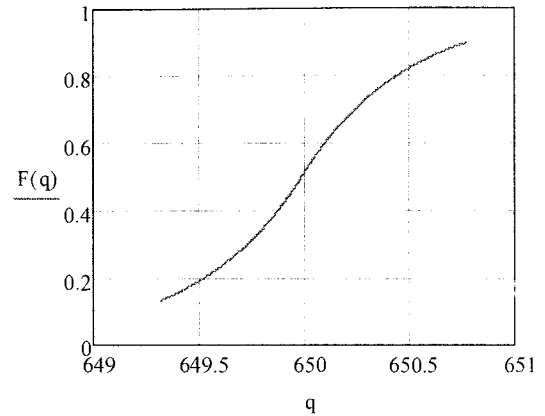


Рис.3.14. Графік функції розподілу імовірностей (при $\bar{q}=649,98 \text{ м}^3/\text{год}$).

Таблиця 3.5

Значення густини та функції розподілів ймовірностей для вибірок з результатами вимірювання значень об'ємної витрати ($130 \text{ м}^3/\text{год}$)

q	$f(q)$	$p(q)$	q	$f(q)$	$p(q)$
130,2504	0,0461	0,2314	130,4425	0,5254	0,9527
130,2853	0,0859	0,3753	130,4534	0,5646	0,9421
130,2853	0,0859	0,3753	130,4600	0,5882	0,9312
130,3343	0,1787	0,6250	130,4875	0,6817	0,8538
130,3376	0,1867	0,6423	130,4951	0,7059	0,8245
130,3376	0,1867	0,6423	130,5045	0,7348	0,7840
130,3551	0,2323	0,7306	130,5216	0,7831	0,7028
130,3901	0,3396	0,8764	130,5216	0,7831	0,7028
130,4023	0,3814	0,9121	130,5899	0,9198	0,3566
130,4250	0,4620	0,9503	130,6070	0,9405	0,2833
130,4250	0,4620	0,9503	130,6706	0,9837	0,0972

Закон розподілу результатів вимірювання значень об'ємної витрати у контрольній точці $q=130 \text{ м}^3/\text{год}$ нормальний і аналітично його можна записати як:

$$f(q_v) = \frac{1}{0.11\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(q_v - 130.44)^2}{0.0242}}, \quad (3.7)$$

при середньому значенні вибірки $\bar{q}=130,44 \text{ м}^3/\text{год}$, СКВ складає $\sigma_2=0,11 \text{ м}^3/\text{год}$.

Довірчі межі становлять: $130,3896 \text{ м}^3/\text{год} < q_v < 130,4815 \text{ м}^3/\text{год}$, для $P=0,95$.

значення густини та функції розподілів ймовірностей для вибірок з результатами вимірювання значень об'ємної витрати (649,98 м³/год)

q	$f(q)$	$p(q)$	q	$f(q)$	$p(q)$
649,3119	0,0411	0,2069	650,0396	0,5564	0,9274
649,3603	0,0534	0,2551	650,0883	0,6054	0,9039
649,3845	0,0605	0,2816	650,0055	0,5213	0,9354
649,4324	0,0768	0,3386	650,0055	0,5213	0,9354
649,5312	0,1207	0,4717	650,0010	0,5168	0,9359
649,6244	0,1760	0,6074	650,1439	0,6594	0,8609
649,7685	0,2882	0,8015	650,2019	0,7125	0,8004
649,8743	0,3877	0,8994	650,3134	0,8020	0,6534
649,8938	0,4071	0,9112	650,3949	0,8553	0,5344
649,9128	0,4263	0,9207	650,4294	0,8746	0,4845
649,9792	0,4943	0,9367	650,4569	0,8886	0,4454
650,0028	0,5186	0,9357	650,6366	0,9539	0,2270
650,0396	0,5564	0,9274	650,7713	0,9789	0,1190

Закон розподілу результатів вимірювання значень об'ємної витрати у контрольній точці $q=649,98$ м³/год – розподіл Лапласа і аналітично його можна записати як:

$$f(q_v) = \frac{1}{2} e^{-|q_v - 649,98|} \quad (3.8)$$

при середньому значенні вибірки $\bar{q}=649,98$ м³/год. Довірчі межі становлять: 649,8359 м³/год $< q_v < 650,1336$ м³/год, для $P=0,95$.

Пропонується підтвердити або заперечити отримані результати, застосовуючи для цих самих вибірок ідентифікацію закону розподілу на основі інформаційного підходу. Застосування інформаційного підходу передбачає використання ентропійного коефіцієнта як основного носія інформації про вимірювальний процес.

Аналізуючи останні праці, присвячені малим вибіркам [86-88], чільне місце займає ідея застосування інформаційного підходу для визначення виду кривої закону розподілу, в основі якого лежить інформація, яку несе в собі досліджувана

вибірка. Власне, саме інформаційний підхід порівняно з іншими дає змогу виявити «випадковість» набору даних, оскільки Шеннон, аналізуючи дезінформацію випадкових впливів, довів, що на результуючу похибку впливає не лише сама потужність фактора впливу, але і його закон розподілу, що у свою чергу дає можливість робити висновки про «випадковість». Критерієм належності кривої закону розподілу до того чи іншого сімейства розподілів є ентропійний коефіцієнт k [90]:

$$k = \frac{\Delta_e}{\sigma}, \quad (3.9)$$

де $\Delta_e = \frac{d \cdot n}{2} 10^{-\frac{1}{n} \sum_{j=1}^m n_j \lg n_j}$ – вибіркове ентропійне значення похибки; d – ширина інтервалу вибіркового розподілу; n_j – частоти.

Як згадувалося вище форма закону розподілу часто чисельно характеризується значенням ексцесу ε . Але ексцес різних розподілів коливається у нескінченних межах $(1 \dots \infty)$, що робить цей параметр не завжди зручним.

Як незалежну ознаку форми закону розподілу ймовірності пропонується значення ентропійного коефіцієнта, який для будь-яких законів розподілу змінюється в межах $k \in \left[0; \sqrt{\frac{\pi e}{2}} \approx 2.066 \right]$.

Для кожної вибірки з результатами вимірювання об'ємної витрати вимірної турбінними лічильниками типорозмірами G160 та G400 розраховувалися середнє значення, СКВ, коефіцієнти асиметрії, ексцесу, варіації та ентропії, оскільки саме ці параметри дають змогу робити висновок про закон розподілу, застосовуючи один із розглянутих у першому розділі методів.

Виникає необхідність у вдосконаленні алгоритму визначення похибки турбінного лічильника не залежно від об'єму вибірки, проте із врахуванням закону розподілу похибки, що дозволяє оцінити випадкову складову похибки. Відповідно, щоб оцінити і дослідити вид закону розподілу, було застосовано інформаційний підхід до визначення виду закону розподілу випадкової величини за значенням ентропійного коефіцієнта.

В результаті метрологічних досліджень турбінних лічильників газу типорозмірами G160 та G400 одержано 150 вибірок опрацьованих значень об'ємної витрати природного газу. З метою встановлення виду закону розподілу було знайдено відсоткове співвідношення між встановленими видами закону розподілу за значеннями ентропійного коефіцієнта. У [90] подані значення ентропійного коефіцієнта та характерні йому види закону розподілу. Відповідно до цього за опрацьованими результатами значень ентропійних коефіцієнтів окремо для двох типорозмірів лічильників у табл.3.7 наведено, якій кількості вибірок притаманний той чи інший закон розподілу.

Таблиця 3.7

Співвідношення між законами розподілу для турбінних лічильників типорозмірами G160 та G400

Типорозмір/ Закон розподілу	160	400
Рівномірний (k=1.73)	12%	-
Лапласа (k=1.93)	16%	71%
Нормальний (k=2.066)	76%	29%

Результати, наведені у табл. 3.7 доводять, що закон розподілу часто відмінний від нормального і апріорне твердження нормальності закону розподілу результатів визначення об'ємної витрати природного газу призводить до зміни області допустимих значень та невизначеності результату змінюються. Відповідно, необхідно вводити корекцію на вид закону розподілу при визначенні похибки лічильника при калібруванні.

Відомо, що у випадку, коли деякі значення випадкової величини коефіцієнта виходять за межі 3σ , їх можна виключити зі спостережень. З цією метою для кожного значення витрати було обчислено межі допустимих значень. Разом з тим здійснено розрахунок середнього значення ентропійного коефіцієнта на кожному фіксованому значенні з метою оцінювання закону розподілу на різних діапазонах витрат. Результати наведено у табл. 3.8

Таблиця 3.8

результати розрахунку середнього значення ентропійного коефіцієнта та області $M \pm 3\sigma$ для різних витрат

$q, \text{ м}^3/\text{год}$	13	18	20	30	40	46
K	2,039	1,99	2,07	2	2,04	2,039
$M-3\sigma; M+3\sigma$	2,27;2,95*	0,648; 3,780	2,289;2,35*	1,904;2,38*	1,464;3,508	1,708;2,769

Продовження таблиці 3.8

$q, \text{ м}^3/\text{год}$	50	60	70	100	130	150
K	1,979	2,061	2,025	1,964	2,027	1,8
$M-3\sigma; M+3\sigma$	0,463;3,495	1,689;2,433	1,425;2,625	0,981;2,943	1,904;2,15	0,107;3,493

Продовження таблиці 3.8

$q, \text{ м}^3/\text{год}$	160	167	195	200	215	218
K	1,846	1,846	1,935	1,856	1,892	1,739
$M-3\sigma; M+3\sigma$	1,402;2,29*	1,395;2,297	1,048;2,822	1,150;2,562*	1,273;2,511	1,795;1,86*

Продовження таблиці 3.8

$q, \text{ м}^3/\text{год}$	230	250	280	310	360	375
K	1,732	1,856	1,89	1,812	1,738	1,834
$M-3\sigma; M+3\sigma$	1,235;2,249	1,80;1,93*	1,612;2,168	1,724;1,900	1,569;1,995	1,692;1,980*

Продовження таблиці 3.8

$q, \text{ м}^3/\text{год}$	420	470	510	565	590	649
K	1,824	1,79	1,9	1,896	1,902	1,928
$M-3\sigma; M+3\sigma$	1,64;2,008	1,432;2,15	1,753;2,047	1,724;2,068	1,812;1,992	1,786;2,07

* - для об'ємної витрати, де було три і менше вибірок, у полі $M-3\sigma; M+3\sigma$ наведено максимальне і мінімальне значення з діапазону значень ентропійного коефіцієнта.

У табл.3.8 всі обчислені значення ентропійного коефіцієнта знаходяться в межах $M-3\sigma; M+3\sigma$ що не дає можливості нехтувати жодним із них. Простежується закономірність: на значеннях об'ємної витрати $q_{min} \cdot 0, 2q_{max} \cdot q_{max}$ закон розподілу результатів вимірювання витрати природного газу близький до нормального, а на значеннях витрати $0, 2q_{max} \cdot q_{max}$ переходить у рівномірний або Лапласа. Відповідно, виникає необхідність урахування закону розподілу результатів вимірювального експерименту для коректної оцінки похибки.

Простежується характерність для турбінних лічильників типорозмірами G160 нормального закону розподілу, а для G400 – Лапласа, що підтверджує результати отримані на основі аналітичного методу ідентифікації закону розподілу.

Однією із задач дисертаційної роботи є дослідження статистичної залежності між ентропійним коефіцієнтом як параметром закону розподілу та значенням об'ємної витрати природного газу, з метою внесення поправок у алгоритм опрацювання результатів вимірювання на етапі ідентифікації закону розподілу. У результаті опрацювання даних метрологічних досліджень одержано графічну залежність зображену на рис. 3.15.

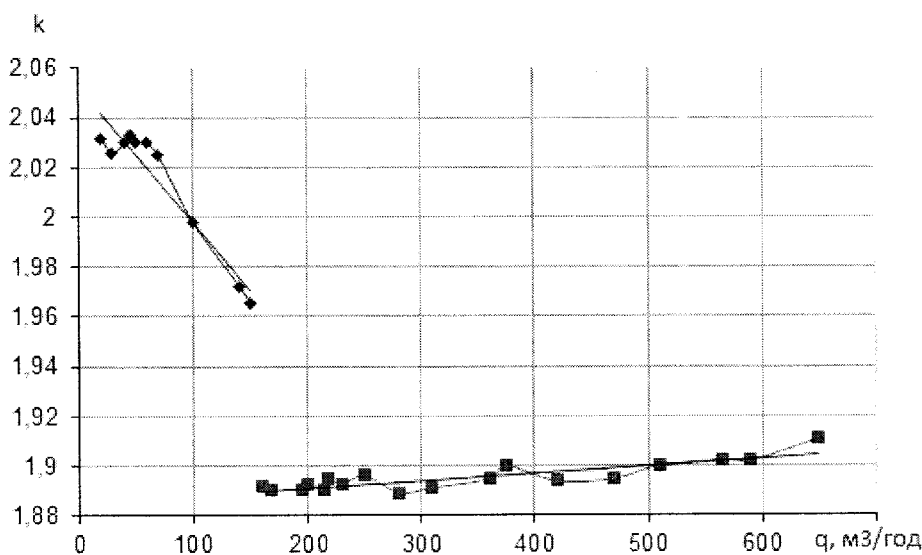


Рис.3.15. Залежність ентропійного коефіцієнта від робочої об'ємної витрати через турбінний лічильник газу

Рис.3.15 відображує результати визначення ентропійного коефіцієнту на основі даних метрологічних досліджень серії турбінних лічильників газу вітчизняного виробництва типорозмірами G160 та G400, відповідно діапазон значень об'ємної витрати на рис.3.15 становить від 25м³/год до 650 м³/год (діапазон вимірювання значень об'ємної витрати турбінним лічильником типорозміром G400). Результати апроксимовані двома лінійними залежностями, відповідно до встановлених норм максимально допустимих значень похибки лічильника у діапазонах $q_{min} \cdot 0,2q_{max} \cdot q_{max}$:

$$k = -0,0005q + 2,053, \quad \text{в діапазоні витрат } q_{min} \cdot 0,2q_{max}$$

$$k=0.00003q+1.8852, \text{ в діапазоні витрат } 0, 2q_{max} \cdot q_{max}. \quad (3.10)$$

Одержана залежність ентропійного коефіцієнта як функції від об'ємної витрати дає змогу оцінити закон розподілу і скоригувати алгоритм визначення похибки лічильника із врахуванням виду закону розподілу.

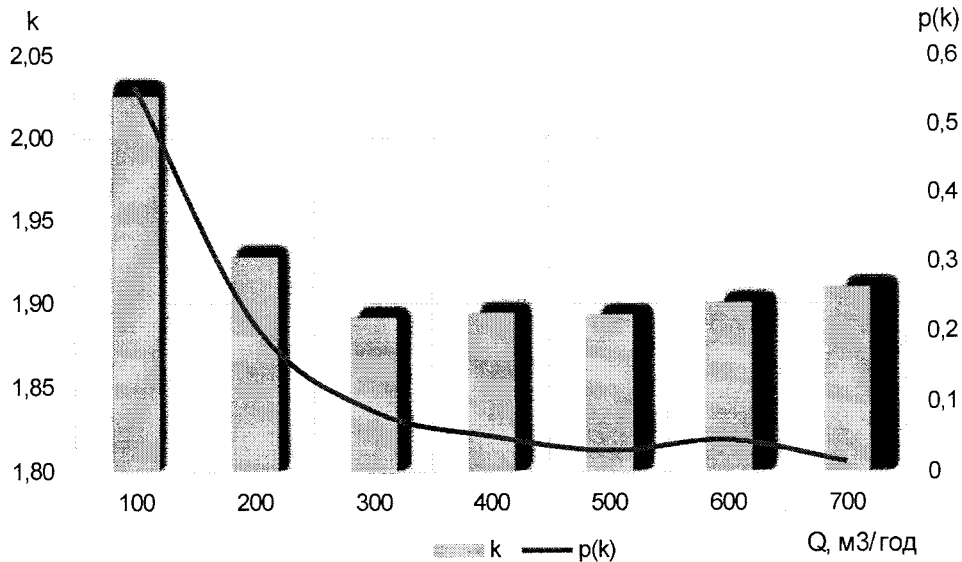


Рис.3.16. Співвідношення між значеннями ентропійних коефіцієнтів та імовірністю їх отримання.

3.4 Дослідження закономірностей зміни ентропійного коефіцієнту при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників

Важливим етапом у проведенні вимірювального експерименту є етап планування інженерного експерименту, особливо, коли мова йде про вимірювання об'ємної витрати газу. Ентропійний коефіцієнт вибрано як основне джерело інформації про вимірювальний процес та встановлено залежність між ним та відповідними значеннями об'ємної витрати. Оскільки відомо, що об'єм газу розраховується за стандартних умов, тобто приводяться у відповідність тиск і температура, то необхідно перевірити чи впливають значення тиску і температури на формування закону розподілу результатів вимірювання об'єму турбінними лічильниками газу.

У нашому випадку, коли мова йде про опрацювання результатів метрологічних досліджень лічильників газу, окремі досліди яких є адекватними за своїм змістовим навантаженням (незалежні вимірювання тиску, температури та об'ємної витрати) і чітко виділяються три фактори, то доцільно застосовувати метод зі строго обмеженою рандомізацією, а саме метод Латинського квадрата [22,23,91].

Лінійна математична модель, яку знаходять за планом латинського квадрата з трьома i, j, k - факторами, матиме вигляд;

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + \varepsilon_{ijk}, \quad (3.11)$$

де Y_{ijk} - результат спостереження, який знаходиться в координатах i -рядка, j - стовпчика і k - рівня третього фактора; μ - математичне сподівання за усією таблицею даних в квадраті; A_i - математичне сподівання ефекту i -рядка першого фактора (або блоків); B_j - математичне сподівання ефекту j -стовпчика другого фактора (або варіантів); C_k - математичне сподівання ефекту k -рівня третього фактора (або субблоків); ε_{ijk} - похибка спостереження, яка знаходиться в координатах i -рядка (блоків), j -стовпчика (варіантів) і k -рівня третього фактора (субблоків).

Опрацювання результатів методом дисперсійного аналізу проводиться знаходженням:

- загальної суми квадратів відхилень за блоками, варіантами і субблоками досліджень (за усією таблицею) відносно загального середнього SS_{Σ} ;
- суми квадратів відхилень за блоками від загального середнього SS_i ;
- суми квадратів відхилень за варіантами дослідів від загального середнього SS_j ;
- суми квадратів відхилень за субблоками від загального середнього SS_k ;
- суми квадратів похибки, що знаходиться за формулою[91]:

$$SS_{\varepsilon} = SS_{\Sigma} - SS_i - SS_j - SS_k; \quad (3.12)$$

- дисперсій за формулами [91]:

$$SS_{\Sigma}^2 = \frac{SS_{\Sigma}}{f_{\Sigma}}; \quad SS_i^2 = \frac{SS_i}{f_i}; \quad SS_j^2 = \frac{SS_j}{f_j}; \quad SS_k^2 = \frac{SS_k}{f_k}; \quad (3.13)$$

- значущості за критерієм Фішера.

Необхідно детальніше зупинитись на використанні нуль-гіпотези в статистичних висновках під час розв'язку трифакторної задачі. Проста гіпотеза підтверджує, що два незалежні вимірювання, для прикладу тиску та температури, тиску та об'ємної витрати, температури та об'ємної витрати, є різними. Такого змісту можуть набути три гіпотези в трифакторній задачі: H_{12} , H_{13} , H_{23} . розглянемо перший варіант, де нуль гіпотеза H_{12} говорить, що вплив зовнішніх факторів на залежність тиску, температури і витрати під час перевірки турбінних газових лічильників є несуттєвим і ним можна знехтувати. У протилежному випадку необхідно далі досліджувати залежність і вводити поправки на зміну зовнішніх умов проведення вимірювання. Водночас, нуль-гіпотеза – це гіпотеза, яка стверджує присутність значущої різниці між результатами двох незалежних вимірювань. Для двох дисперсій запишемо:

$$H_0: S_1^2 = S_2^2.$$

Перевірка нуль-гіпотези здійснюється порівнянням розрахованого критерію Фішера з його табличним значенням, а саме:

- коли гіпотеза підтверджується $F_{\alpha;f;f_2l} \leq F_{tabl}$;

- коли гіпотеза не підтверджується $F_{\alpha;f;f_2l} > F_{tabl}$.

Під час розв'язку трифакторної задачі у висновку відзначають:

- вплив кожного з трьох факторів, а в нашому випадку то є тиск, температура і витрата, на результат формування закону розподілу, тобто на ентропійний коефіцієнт;

- поділ впливаючих факторів за їх значущістю.

Під час загального розв'язку трифакторної задачі методом латинського квадрата 4x4 після побудови матриці планування, матриці даних (суміщеної матриці) та знаходження відповідних сум спостережень для кожного з 12-ти рівнів (3 фактори, кожний на 4-х рівнях) матимемо:

- загальну суму квадратів відхилень за експериментальними даними усіх досліджень (за усією таблицею) відносно загального середнього $(\frac{T^2}{16})$ [91]:

$$SS_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 y_{ijk}^2 - \frac{T_{-}^2}{16}; \quad (3.14)$$

• суму квадратів відхилень за $n=4$ і-их рівнів x_i - фактора від загального середнього [91]:

$$SS_i = \sum_{i=1}^4 \frac{T_{i-}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16}; \quad (3.15)$$

• суму квадратів відхилень за $n=4$ j-их рівнів x_j - фактора від загального середнього [91]:

$$SS_j = \sum_{j=1}^4 \frac{T_{-j}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16}; \quad (3.16)$$

• суму квадратів відхилень за $k=4$ k-их рівнів x_k - фактора від загального середнього [91]:

$$SS_k = \sum_{k=1}^4 \frac{T_{-k}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16}; \quad (3.17)$$

• суму квадратів похибки, що знаходиться за формулою (3.12) з використанням (3.14)-(3.17);

• кількість ступенів свободи для кожного з факторів, для усіх досліджень та для ентропійного коефіцієнта, що відповідно визначається як:

$$f_i = f_j = f_k = n - 1 = 4 - 1 = 3; \quad (3.18)$$

$$f_{\Sigma} = N - 1 = n^2 - 1 = 16 - 1 = 15 \quad (3.19)$$

$$f_{\varepsilon} = f_{\Sigma} - f_i - f_j - f_k = 15 - 3 - 3 - 3 = 6 \quad (3.20)$$

• дисперсії чи середній квадрат кожного з розглянутих відхилень, що визначаються за формулами (3.13) та даними (3.18)-(3.20) як:

$$SS_{\Sigma}^2 = \frac{SS_{\Sigma}}{15}; \quad SS_i^2 = \frac{SS_i}{3}; \quad SS_j^2 = \frac{SS_j}{3}; \quad SS_k^2 = \frac{SS_k}{3}; \quad SS_{\varepsilon}^2 = \frac{SS_{\varepsilon}}{6} \quad (3.21)$$

За вище наведеною методикою та алгоритмом здійснимо перевірку впливу змін тиску, температури, об'ємної витрати на ентропійний коефіцієнт.

Результати вимірювання робочої об'ємної витрати через турбінний лічильник газу

Об'ємна витрата, м ³ /год	246,6965	151,0772	46,32138	20,49107
Температура, К	14.626	13.37	14.16714	15.635
Тиск, МПа	330.553	330.785	331.2353	330.991
Коеф. ентропії	1,856	1,253	2,539	2,0786
	1,826	1,408	2,148	1,7972
	1,933	1,567	2,193	2,3514
	1,808	1,589	2,082	2,2885

Матрицю планування побудуємо у вигляді латинського квадрата 4x4 (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Матриця планування у вигляді латинського квадрата 4x4

Об'ємна витрата	Тиск			
	330.553	330.785	331.23529	330.991
246,6965	14.16714	15.635	14.626	13.37
151,0772	13.37	14.16714	15.635	14.626
46,32138	14.626	13.37	14.16714	15.635
20,49107	15.635	14.626	13.37	14.16714

Після проведення експерименту за наведеним планом одержані дані подамо як суміщену матрицю (табл. 3.11).

Таблиця 3.11

Суміщена матриця по значеннях вимірювання тиску та об'ємної витрати

Об'ємна витрата \ тиск	330.553	330.785	331.23529	330.991	T _p
246,6965	14.16714 1,856	15.635 1,253	14.626 2,539	13.37 2,0786	T ₁ = 7.7266
151,0772	13.37 1,826	14.16714 1,408	15.635 2,148	14.626 1,7972	T ₂ = 7.1792
46,32138	14.626 1,933	13.37 1,567	14.16714 2,193	15.635 2,3514	T ₃ = 8.0444
20,49107	15.635 1,808	14.626 1,589	13.37 2,082	14.16714 2,2885	T ₄ = 7.7675
T _t	T ₁ = 7.423	T ₂ = 5.817	T ₃ = 8.962	T ₄ = 8.5157	T _{..}

У цій суміщеній матриці знайдена сума спостережень за факторами витрата і тиск. Для знаходження суми спостережень за фактором температура змінимо координати матриці (табл. 3.12).

Таблиця 3.12

Суміщена матриця по значеннях вимірювання тиску і температури

Т-ра \ тиск	330.553	330.785	331.23529	330.991	T_p
14.626	14.626 1,933	14.626 1,589	14.626 2,539	14.626 1,7972	$T_{-1} = 7.8582$
13.37	13.37 1,826	13.37 1,567	13.37 2,082	13.37 2,0786	$T_{-2} = 7.5536$
14.16714	14.16714 1,856	14.16714 1,408	14.16714 2,193	14.16714 2,2885	$T_{-3} = 7.7455$
15.635	15.635 1,808	15.635 1,253	15.635 2,148	15.635 2,3514	$T_{-4} = 7.5604$
T_{-t}	$T_{-1} = 7.423$	$T_{-2} = 5.817$	$T_{-3} = 8.962$	$T_{-4} = 8.5157$	T_{-}

Відповідно до формул (3.14) обчислюємо необхідні значення відхилень. Загальна сума квадратів відхилень за експериментальними даними усіх дослідів (за усією таблицею) відносно загального середнього:

$$SS_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 y_{ijk}^2 - \frac{T_{-}^2}{16} = 60.84 - \frac{30.72^2}{16} = 1.8576.$$

Сума квадратів відхилень за p -фактором (тиск) від загального середнього:

$$SS_p = \sum_{p=1}^4 \frac{T_{p-}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16} = \frac{236.29}{4} - \frac{30.72^2}{16} = 0.0896.$$

Сума квадратів відхилень за v -фактором (об'ємна витрата) від загального середнього:

$$SS_v = \sum_{v=1}^4 \frac{T_{-v}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16} = \frac{241.77}{4} - \frac{30.72^2}{16} = 1.4601.$$

Сума квадратів відхилень за t -фактором (температура) від загального середнього:

$$SS_t = \sum_{t=1}^4 \frac{T_{-t}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16} = \frac{235.96}{4} - \frac{30.72^2}{16} = 0.00776.$$

Сума квадратів похибки:

$$SS_e = SS_{\Sigma} - SS_p - SS_c - SS_t = 1.8576 - 0.0896 - 1.4601 - 0.00776 = 0.30014.$$

Усі одержані результати дисперсійного аналізу подамо у вигляді результуючої матриці (табл. 3.13). При цьому табличне значення коефіцієнта Фішера дорівнює $F_{0.05;3;6}=4,76$.

Таблиця 3.13

Результуюча матриця

Джерело впливу	Кількість ступенів свободи	Сума квадратів відхилень SS	Середній квадрат відхилень S^2	Перевірка H_0 : $F_{0.05;3;6} = \frac{S_{pct}^2}{S_\varepsilon^2}$
Тиск	3	0.0896	$S_p^2 = 0.02987$	0.597
Об'ємна витрата	3	1.4601	$S_c^2 = 0.48670$	9.7301
Температура	3	0.00776	$S_t^2 = 0.00259$	0.0517
Ентропійний коефіцієнт	6	0.30014	$S_\varepsilon^2 = 0.05002$	-
Сума	15	1,8576	-	-

Отже, нуль-гіпотеза про незначущість факторів впливу зміни температури і тиску на формування ентропійного коефіцієнта справджується (оскільки, як видно із табл.3.13 $F_T < F_{0.05;3;6}$ та $F_P < F_{0.05;3;6}$), проте значення об'ємної витрати впливає ($F_{qv} > F_{0.05;3;6}$). Це, у свою чергу, говорить про те, що додаткової поправки на результати вимірювання тиску і температури при одержаній математичній моделі для визначення коефіцієнта перетворення лічильника не потрібно, достатньо введеної поправки на формування виду закону розподілу похибки (невизначеності) турбінних лічильників газу.

3.5 Дослідження моделей вимірювання об'єму газу турбінним лічильником

За основу уточнення рівняння вимірювання турбінними лічильниками газу було взяти фізичну модель запозичену в іноземних авторів [41,42]. Доповнення уже існуючих моделей залежностями, якими визначається число Рейнольдса, в результаті дало уточнену параметрами природного газу та геометрією турбінки математичну модель для визначення залежності коефіцієнта перетворення турбінного лічильника від наведених параметрів. Одержана модель (2.18) є лише

наближеним виразом для визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника K , оскільки не враховує впливу кількох гальмівних моментів турбіни. Тим не менш, показує, що нелінійність зміни кутової швидкості за рахунок зміни витрати при нормальних умовах експлуатації, є функцією деяких основних геометричних параметрів та критерію Рейнольдса. Крім того, гальмівний момент робочого середовища за умов протікання процесів, що супроводжують зміну виду потоку від перехідного і до ламінарного, призводить до сильних коливань значення K на малих витратах з низькими значеннями чисел Рейнольдса [47].

Оскільки прослідкувати за впливом вищезгаданих факторів практично неможливо, пропонується ввести експериментально визначений коефіцієнт, який максимально би наблизив теоретичні значення до експериментальних, тим самим враховуючи параметри, зв'язок з якими важко врахувати теоретично. У табл.3.14 наведено результати обчислених теоретично значень коефіцієнта перетворення лічильника та експериментально отримані значення.

Таблиця 3.14

Результати визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника

q_v м ³ /ГОД	$K_{експ}$ імП/м ³	$K_{мод}$ імП/м ³	K_{Re} імП/м ³	q_v м ³ /ГОД	$K_{експ}$ імП/м ³	$K_{мод}$ імП/м ³	K_{Re} імП/м ³
25,47	27243,05	26697,83	2726,00	360,08	26767,63	26839,24	2789,34
49,82	27033,73	26716,68	2739,00	375,20	26775,64	26848,67	2789,97
101,70	26759,72	26763,82	2756,00	421,33	26765,97	26829,81	2792,07
126,08	26753,15	26801,53	2768,23	470,64	26768,89	26839,24	2792,92
160,75	26749,65	26820,38	2775,13	510,64	26782,27	26867,52	2795,00
200,29	26771,63	26829,81	2779,56	565,33	26777,87	26876,95	2797,00
249,73	26763,28	26848,67	2782,51	590,57	26857,84	26876,95	2797,33
279,76	26766,44	26848,67	2784,00	649,66	26955,37	26895,80	2799,35
310,66	26771,16	26829,81	2786,54				

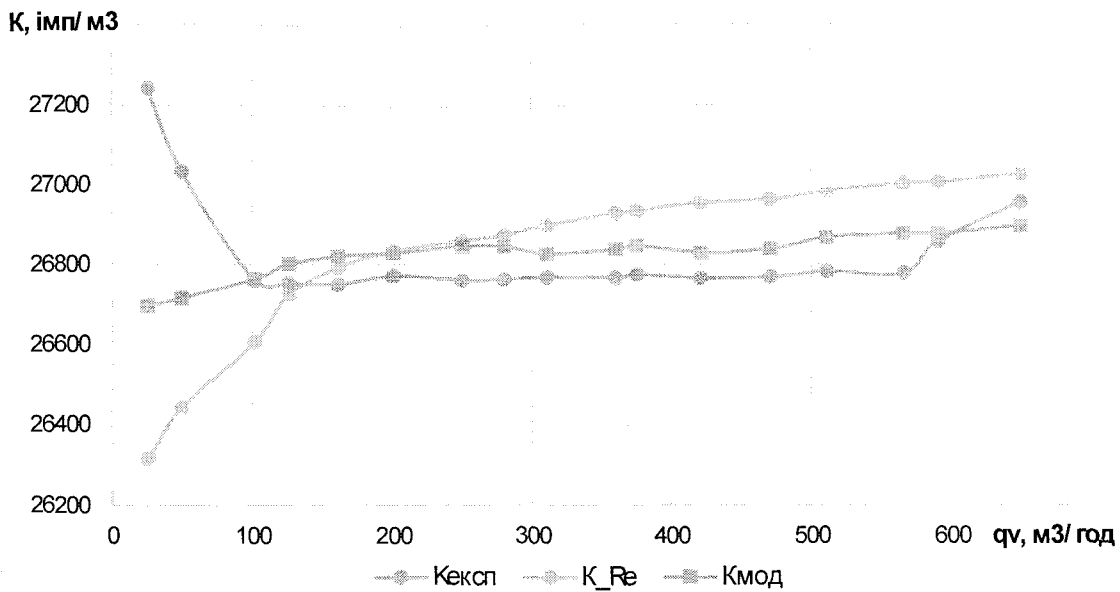


Рис.3.17. Графічне представлення дослідження моделей вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками.

У табл.3.14 $K_{експ}$ – експериментально отримані значення, $K_{мод}$ – значення, отримані із використанням моделі (2.18), K_{Re} – значення розраховані за моделлю, де не врахована частота пульсацій потоку. Графічна інтерпретація отриманих результатів подана на рис. 3.17.

Для якісного оцінювання результатів порівняння обчислювалась похибка репрезентативності вибірки, яка виникає як наслідок того, що опрацюванню підлягала не вся генеральну сукупність значень коефіцієнтів перетворення лічильника, а тільки її частина. Як відомо [92], похибка репрезентативності залежить від об'єму вибірки і буде тим меншою, чим більший об'єм досліджуваної вибірки. Оцінка похибки репрезентативності m вибірки об'ємом до 30 елементів здійснюється за формулою [92]:

$$m = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n-1}}, \quad (3.22)$$

де m – похибка репрезентативності вибірки; n – об'єм вибірки; σ – СКВ вибірки.

За результатами аналітичного порівняння моделей вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками одержано:

- для експериментальних K : $\overline{K_{експ}} = 26827 \text{ імп/м}^3$, СКВ=132,48 імп/м³, довірчі межі становлять $26764,28 \leq K_{експ} \leq 26890,23$ при імовірності 0,95, похибка репрезентативності $m_{експ} = 33,12$;

- для значень отриманих з використанням моделі (3.7): $\overline{K_{мод}} = 26825,38 \text{ імп/м}^3$, СКВ=53,96 імп/м³, довірчі межі $26799,72 \leq K_{мод} \leq 26890,23$ при імовірності 0,95, похибка репрезентативності $m_{мод} = 19,49$;

- для значень розрахованих за моделлю, де число Рейнольдса береться з експериментальних даних: $\overline{K_{Re}} = 26832,93 \text{ імп/м}^3$, СКВ=203,12 імп/м³, довірчі межі $26736,38 \leq K_{Re} \leq 26929,49$ при імовірності 0,95, похибка репрезентативності $m_{Re} = 50,78$.

Отже, судячи зі значень СКВ та довірчого інтервалу можна зробити висновок, що розсіювання значень при розрахунку коефіцієнта перетворення турбінного лічильника за запропонованою моделлю (2.18) найменше, що дозволило зменшити похибку репрезентативності результатів визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника у 2,5 рази та звужити довірчі межі, тим самим підвищуючи достовірність отриманого результату та стабільність значень K на всьому діапазоні вимірювання об'ємної витрати. На основі цього пропонується визначати коефіцієнт перетворення лічильника при його калібруванні за формулою (2.18).

3.6 Висновки до третього розділу

Проведено експериментальні дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу G160 та G400 в умовах випробувальної лабораторії ПАТ «Івано-Франківськгаз», які дали можливість отримати закономірності зміни коефіцієнтів перетворення лічильників від значень робочих об'ємних витрат.

Здійснено ідентифікацію законів розподілу результатів вимірювання турбінними лічильниками та числовий аналіз ентропійного коефіцієнта як вибраного параметра закону розподілу. Одержано регресійну залежність зміни ентропійного коефіцієнта від об'ємної витрати.

Досліджено вплив тиску, температури та об'ємної витрати природного газу на ентропійний коефіцієнт та встановлено, що зміна тиску та температури не впливають на ентропійний коефіцієнт, і відповідно, на вид закону розподілу результатів вимірювання турбінними лічильниками газу. Доведено, що вид закону розподілу залежить головним чином від значень об'ємної витрати через турбінний лічильник.

Досліджено вплив різних моделей на закономірності зміни коефіцієнта перетворення турбінних лічильників, які дають можливість правильно оцінити довірчі межі коефіцієнта перетворення, чим досягається підвищення достовірності результату вимірювання.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ПРИ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень, які викладені у попередніх розділах, розглянуто новий підхід до визначення коефіцієнта перетворення еталонних турбінних лічильників газу. Викладено суть удосконаленого алгоритму опрацювання результатів метрологічних досліджень (калібрування, метрологічна атестація) турбінних лічильників газу шляхом врахування закону розподілу результатів визначення об'ємної витрати природного газу і його практичне застосування для написання нормативних документів.

4.1 Методика визначення коефіцієнта перетворення для корекції систематичної похибки турбінних лічильників газу

Існуючі алгоритми опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу на реальному середовищі спираються, в основному, на визначення коефіцієнту перетворення лічильника. Даний параметр, як уже згадувалося вище, є функцією від числа Re . На основі отриманих результатів досліджень пропонується розробити градуювальну таблицю, яка б дала змогу визначати коефіцієнт перетворення лічильника за заданими значеннями об'ємної витрати, тобто $K=f(q_v)$. Перевагою такого підходу до визначення K було б врахування конструктивних параметрів турбіни, які пропонується уточнювати при градуюванні лічильника, та параметрів природного газу. Проте реалізацію підходу необхідно робити в умовах калібрування нових турбінних газових лічильників, коли надійність засобу вимірювання досягає свого максимального значення та виключений знос підшипників турбіни.

Для практичного втілення даного підходу при градуювання турбінного лічильника необхідно уточнювати наступні параметри:

- кут нахилу лопаті (кут атаки), як основний параметр, від якого фізично залежить коефіцієнт перетворення лічильника, що видно із запропонованої моделі вимірювання турбінними газовими лічильниками;
- зовнішній та внутрішній радіуси турбінки;
- площа поверхні леза лопаті;
- кількість лопатей турбінки;
- діаметр труби, на якій може бути встановлено турбінний лічильник;

Ця інформація залишається незмінною для будь яких умов проведення експерименту. Відповідно, для уточнених значень та паспортом газу за моделлю (2.18) визначають теоретичне значення коефіцієнту перетворення турбінного лічильника $K_{i_теор}$ на всьому діапазоні відтворюваних робочих витрат еталонного лічильника.

Оцінювання систематичної складової похибки еталонного лічильника відбувається за наступним алгоритмом:

Оцінювання систематичної складової похибки еталонного турбінного лічильника відбувається за наступним алгоритмом:

- оцінка абсолютного відхилення Δ_{ic} між теоретичними значеннями номінального $K_{i_ном}$ та модельного $K_{i_мод}$ коефіцієнта перетворення лічильника K для i -го значення робочої витрати:

$$\Delta_{ic} = K_{i_ном} - K_{i_мод}; \quad (4.1)$$

- поправка ∇_i на значення систематичної складової похибки для i -го значення робочої витрати:

$$\nabla_i = -\Delta_{ic};$$

- відносне значення систематичної похибки Δ_E еталонного лічильника:

$$\Delta_E = \frac{K_{i_ном} + \nabla_i - K_{i_експ}}{K_{i_експ}} \times 100\%, \quad (4.2)$$

де $K_{i_експ}$ – експериментальне значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника отримане під час його калібрування;

- відносна похибка зумовлена дискретністю інформаційних імпульсів $\Delta_{\text{імп}}$ з еталонного лічильника:

$$\Delta_{\text{імп}} = \frac{2}{N_{\text{мін}}} \times 100\%, \quad (4.3)$$

де $N_{\text{мін}}$ – мінімальна кількість імпульсів, що відповідає пропущеному контрольному об'єму при калібруванні лічильника;

- границі невилученої систематичної похибки еталонного лічильника із врахуванням границь основної допустимої похибки еталонної установки Δ_y :

$$\Theta = 1.1 \times \sqrt{\Delta_y^2 + \Delta_E^2 + \Delta_{\text{імп}}^2}. \quad (4.4)$$

Такий алгоритм визначення невиключеної систематичної похибки турбінного лічильника дозволяє коригувати систематичну складову похибки турбінних лічильників газу в межах до 0,1-0,2% на стадії проектування і калібрування.

4.2 Методика визначення ентропійного коефіцієнта для оцінювання випадкової похибки турбінних лічильників газу

Для підвищення точності опрацювання результатів вимірювання об'ємної витрати на етапі калібрування (метрологічної атестації) в одній контрольній точці необхідно мати як мінімум 10 усереднених значень витрати для встановлення статистичної залежності між об'ємною витратою та ентропійним коефіцієнтом. Методика розрахунку значення ентропійного коефіцієнта при умові, що є можливість відтворити експеримент у фіксованій контрольній точці наступна:

- відтворити не менше як 10 дослідів для розрахунку усередненого значення об'ємної витрати;
- побудувати гістограму частот для отриманої вибірки з врахуванням того, що мінімальна кількість інтервалів розраховується за формулою (3.5);
- розрахувати ексцес вибірки;
- визначити значення ентропійного коефіцієнту за (3.9) та присвоїти відповідний закон розподілу, значення брати з [90];

Відповідно до наведеного алгоритму встановити значення ентропійного коефіцієнта у кожній контрольній точці. Побудувати залежність ентропійного коефіцієнта від об'ємної витрати (як це зроблено у роботі для типорозмірів G160 та G400 і відображено на рис.3.16). Рекомендується розбити криву залежності $k=f(q_v)$ на два інтервали: $q_{min}..0,2q_{max}$ $0,2q_{max}..q_{max}$. Відповідно до отриманих значень зробити висновки про вид закону розподілу похибки та розраховувати довірчі межі та невизначеність результатів вимірювання із врахуванням закону розподілу, як це зроблено в дисертаційній роботі для лічильників типорозмірами G160 та G400.

Такий підхід дозволяє з більшою достовірністю оцінювати випадкову складову похибки результатів вимірювання з врахуванням конкретного закону розподілу і робочої витрати через лічильник. Врахування виду закону розподілу результатів вимірювання турбінними лічильниками газу дає можливість підвищити оцінку точності не менше як на 0,05% шляхом уточнення діапазону зміни випадкової складової похибки результатів вимірювання об'єму за різних витратних режимів турбінних лічильників газу.

4.3 Удосконалення алгоритму опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу при їх метрологічних дослідженнях

Для проведення досліджень турбінних лічильників на природному газі застосовуються калібрувальні установки з еталонними лічильниками газу роторного та турбінного типів, що працюють на природному газі.

Калібрувальні установки повинні бути атестовані Головною організацією з вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. Діапазон відтворюваних калібрувальною установкою об'ємних витрат повинен перекривати діапазон робочих витрат випробовуваного лічильника газу. Границі основної допустимої відносної похибки передачі одиниці об'єму калібрувальної установки не повинні перевищувати 0,4%.

У першому розділі дисертації обґрунтовано необхідність врахування етапів математичної статистики при опрацюванні результатів метрологічних досліджень

турбінних лічильників газу, зокрема ідентифікації закону розподілу експериментальних даних, перевірки на наявність промахів, перевірки відтворюваності дослідів. При високоточних вимірюваннях об'ємної витрати (при калібруванні чи метрологічній атестації) наявність промахів може бути зумовлена збоями в електромережі та іншими суб'єктивними факторами, як і відтворюваність дослідів. Відповідно оцінювання похибок експериментальним шляхом при можливості відтворювання дослідів необхідно проводити із врахуванням всіх етапів математичної статистики.

Наведемо удосконалений алгоритм опрацювання результатів вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу на основі результатів проведених теоретичних та експериментальних досліджень. Оцінювання похибок експериментальним шляхом проводиться для конкретних екземплярів лічильників газу після проведення їх повірки відповідно до наступного алгоритму:

1) визначення усередненого значення об'ємної витрати за результатами миттєвих значень:

$$q_v = \frac{V_E \cdot 3600}{t}, \quad (4.5)$$

де t – час проходження контрольної дози робочого середовища V_E (визначається за результатами вимірювання еталонного лічильника газу).

2) для отриманих усереднених значень провести ідентифікацію закону розподілу оцінивши ентропійний коефіцієнт за формулою (3.9) (за умови, що вимірювання в контрольній точці проводилися багаторазово). Для турбінних лічильників ЛГК-Ех типорозмірами G160 та G400 значення ентропійних коефіцієнтів наведені у табл.3.8.

3) дослідити вибірку з усереднених значень певної контрольної витрати на наявність промахів у результатах спостережень за критерієм варіаційного розмаху або критерієм Романовського за формулами, які наведені в додатку А.

4) дослідити вибірку з усереднених значень певної контрольної витрати на відтворюваність дослідів критеріями Кохрена і Бартлетта.

У випадку, якщо у вибірці виявлено промахи, необхідно їх відсіяти та продовжувати опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу без врахування того значення. Аналогічним чином у разі виявлення за допомогою статистичних критеріїв, що досліди були не відтворені, нехтувати результатами вимірювань у тій контрольній точці. Результати, для яких проведено ідентифікацію закону розподілу, відсіювання промахів та перевірено відтворюваність, підлягають подальшому опрацюванню за визначеним алгоритмом:

6) визначення контрольного об'єму газу за робочих умов за результатами вимірювань еталонного лічильника (турбінного типу):

$$V_{P_E} = \frac{N}{K_i}, \quad (4.6)$$

де N – кількість імпульсів отриманих з робочого еталона.

7) визначення коефіцієнтів стисливості K_2 робочого середовища для умов досліджуваного лічильника та еталонного лічильника відповідно до [52];

8) визначення об'єму газу за стандартних умов за результатами вимірювань еталонного та досліджуваного лічильника:

$$V_{P_{EЛ}} = V_{P_{EЛ}} \cdot \frac{P \cdot T_C}{P_C \cdot T \cdot K_2}, \quad (4.7)$$

9) об'єм газу виміряний досліджуваним лічильником визначається, як:

$$V_{P_L} = V_{L_{КН}} - V_{L_{Поч}}, \quad (4.8)$$

де $V_{L_{КН}}, V_{L_{Поч}}$ – кінцеве і початкове значення об'єму газу на відліковому пристрої досліджуваного лічильника газу, відповідно, m^3 ;

10) визначення абсолютної похибки лічильника газу за відповідних значень об'ємної витрати для робочих умов (V_{P_E}) розрахованого для умов лічильника (V_{P_L}):

$$\Delta V = V_{P_L} - V_{P_E}, \quad (4.9)$$

11) розрахунок відносної похибки лічильника газу за відповідних значень об'ємної витрати за робочих умов розрахованого для умов лічильника:

$$\delta_j = \frac{\Delta V}{V_{ПЕ}} \cdot 100, \quad (4.10)$$

14) за результатами визначеннями похибки лічильника на кожній витраті визначають:

– середнє значення похибки:

$$\delta(q_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_j}{n}, \quad (4.11)$$

– оцінку СКВ:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_j - \delta(q_i))^2}{n(n-1)}}. \quad (4.12)$$

При цьому необхідно зберігати основні вимоги до засобів вимірювальної техніки. В експлуатаційних документах на ЗВТ, що використовуються під час досліджень, повинні бути чинні за терміном відмітки (свідоцтва) про повірку згідно з [94] чи державну метрологічну атестацію згідно з [95].

Лічильник газу повинен бути встановленим між двома прямим ділянками трубопроводу круглого перерізу з тим же умовним внутрішнім діаметром D_y , що і у лічильника газу.

Довжини прямих ділянок трубопроводу повинні відповідати вимогам технічної документації на лічильники газу.

Умови проведення досліджень турбінних лічильників газу повинні залишатися стандартними, а саме:

- Температура навколишнього середовища: $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- Атмосферний тиск: 84,6 до 106 кПа;
- Вологість повітря навколишнього середовища: до 80 %;
- Робоче середовище: природний газ;
- Температура робочого середовища на еталонних лічильниках: $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;

- Температура робочого середовища на досліджуваних лічильниках аналогічна, як в умовах експлуатації.

- Зміна температури робочого середовища за час одного вимірювання не більше $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- Зміна тиску робочого середовища за час одного вимірювання не більше $0,1\%$ від значення абсолютного робочого тиску. (стабільність тиску та температури відповідає за стабільність пульсацій потоку, як це було розглянуто в другому розділі роботи).

На кожній витраті проводиться не менше трьох вимірювань. Під час кожного вимірювання фіксується значення об'ємної витрати, розрахованих чисел Рейнольдса для умов робочого еталона та лічильника, тиску та температури на робочому еталоні та лічильнику, що випробовується.

Отже, запропонована методика може застосовуватися з метою визначення відносної похибки турбінного лічильника газу за результатами звіряння показників еталонного та робочого лічильника, а також і для визначення миттєвих значень витрати природного газу за відомими конструктивними параметрами, характеристиками газу та коефіцієнтом перетворення лічильника.

На рис. 4.1 зображено блок схему вдосконаленого алгоритму визначення похибки турбінного лічильника газу із врахуванням результатів дисертаційних досліджень.

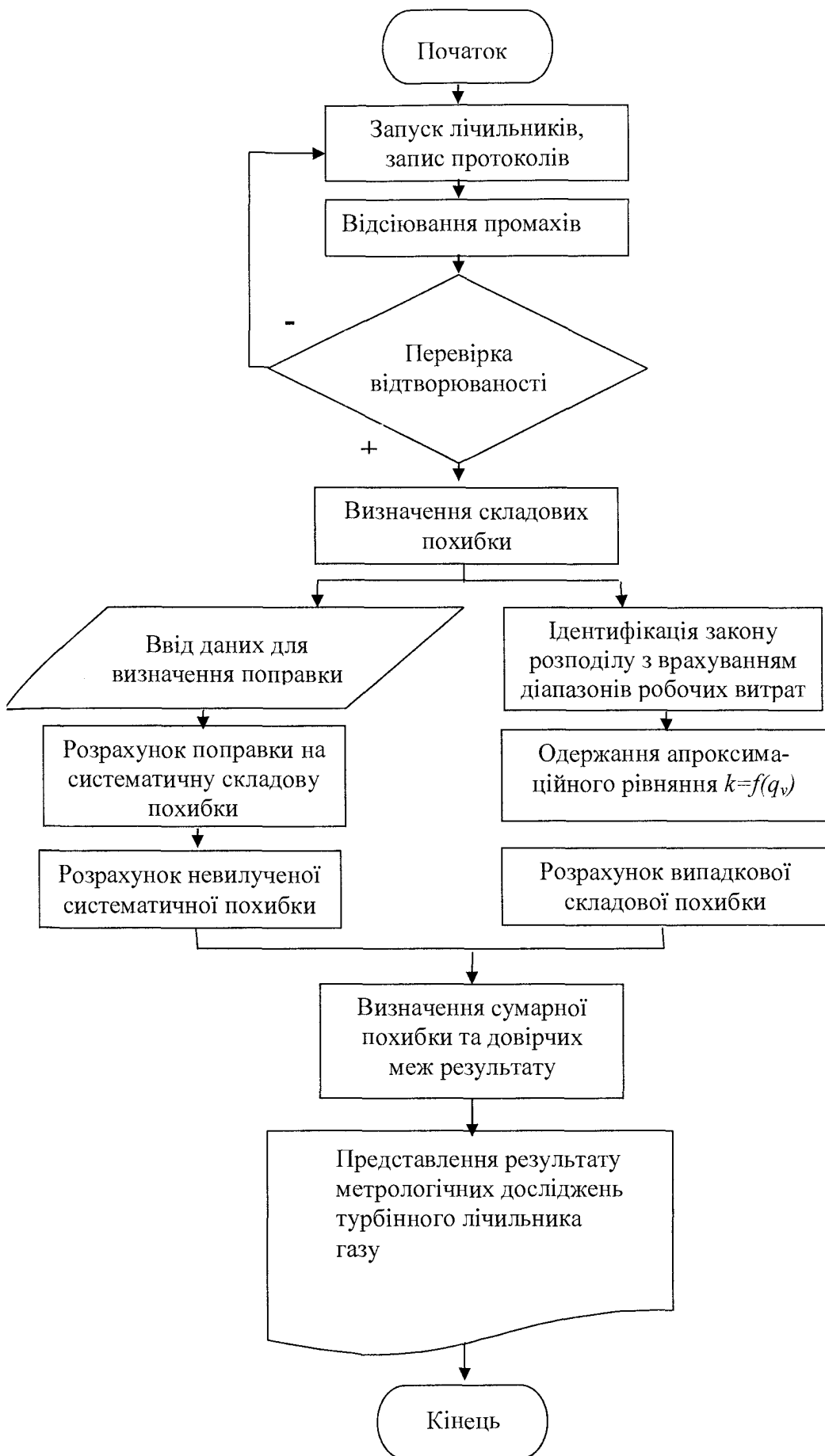


Рис. 4.1. Блок схема вдосконаленого алгоритму визначення похибки турбінного лічильника газу

4.4 Апробація методики опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу із врахуванням основних етапів математичної статистики

В основному, запропоновані в результаті дисертаційних досліджень удосконалення щодо корекції випадкової похибки стосуються етапів визначення довірчих границь відносної похибки еталонного лічильника та невизначеності. Результати експериментальних досліджень еталонного турбінного лічильника газу типорозміром G400 при заданих значеннях об'ємної витрати газу 50 м³/год (що знаходиться в діапазоні $q_{\min}..0,2q_{\max}$) та 200 м³/год (що знаходиться в діапазоні $0,2q_{\max}..q_{\max}$) подані в табл.4.1-4.2.

Відповідно до діючої методики [93] довірчі границі визначають в наступній послідовності:

а) обчислюють границі невилученої систематичної похибки еталонного лічильника:

$$\Theta = 1.1 \cdot \sqrt{\delta_E^2 + \delta_{\text{імп}}^2}, \quad (4.13)$$

де δ_A – похибка передачі одиниці об'єму еталонном одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, %; $\delta_{\text{імп}}$ – відносна похибка зумовлена дискретністю лічильника імпульсів, яка визначається за формулою:

$$\delta_{\text{імп}} = \frac{2}{N_{\min}} \cdot 100\%, \quad (4.14)$$

$$\Theta = 0.0019 \text{ імп/м}^3,$$

де N_{\min} – мінімальна кількість імпульсів з еталонного лічильника, що відповідає пропущеному контрольному об'єму ($N_{\min} = 27000 \text{ імп/м}^3$).

б) обчислюють коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової та невилученої систематичної похибок:

Результати калібрування еталонного турбінного лічильника газу типорозміром G400 ($q_v=50 \text{ м}^3/\text{год}$).

Задане значення об'ємної витрати $50 \text{ м}^3/\text{год}$													
P_a	P_E	P_I	T_E	T_I	N	t	q_v	q_n	V_K	P_E/P_I	T_I/T_E	V	K
98900	2393	2365	20,58	20,58	27982	6,960	52,09	52,10	0,100705	1,000277	1,00000	0,1007	277784,27
98900	2393	2367	20,59	20,48	27980	6,980	51,94	51,93	0,100705	1,000257	0,99963	0,1007	277873,96
98900	2393	2366	20,58	20,40	27923	7,030	51,57	51,55	0,100705	1,000267	0,99939	0,1007	277371,28
98900	2393	2365	20,57	20,34	27906	7,023	51,62	51,60	0,100705	1,000277	0,99922	0,1007	277246,90
98900	2393	2366	20,55	20,34	27905	7,200	50,35	50,33	0,100705	1,000267	0,99928	0,1007	277220,83
						$u_A(K), \%$		$u_B(N), \%$					
						$0,11$		$0,0041$					
						$u_B(V), \%$		$U(K), \%$					
						$0,08$		$0,27$					

Таблиця 4.2

Результати калібрування еталонного турбінного лічильника газу типорозміром G400 ($q_v=200 \text{ м}^3/\text{год}$).

Задане значення об'ємної витрати $200 \text{ м}^3/\text{год}$													
P_a	P_E	P_I	T_E	T_I	N	t	q_v	q_n	V_K	P_E/P_I	T_I/T_E	V	K
98900	2393	2348	20,55	20,38	26898	1,830	198,11	198,08	0,100705	1,000444	0,99942	0,1007	267132,93
98900	2393	2349	20,53	20,28	26897	1,830	198,11	198,03	0,100705	1,000435	0,99915	0,1007	267198,48
98900	2393	2348	20,54	20,41	26900	1,820	199,20	199,20	0,100705	1,000444	0,99956	0,1007	267116,40
98900	2393	2348	20,51	20,45	26926	1,810	200,30	200,35	0,100705	1,000444	0,99980	0,1007	267310,84
98900	2393	2349	20,53	20,59	26982	1,840	197,03	197,16	0,100705	1,000435	1,00020	0,1008	267760,00
						$u_A(K), \%$		$u_B(N), \%$					
						$0,10$		$0,0043$					
						$u_B(V), \%$		$U(K), \%$					
						$0,08$		$0,25$					

$$t_{\Sigma j} = \frac{\Theta + k_c \cdot \sigma_{Kj}}{S_{\Theta} + \sigma_{Kj}} , \quad (4.15)$$

$$t_{\Sigma j} = 2,43$$

де k_c – квантиль Стьюдента [92]; $S_{\Theta} = \frac{\Theta}{\sqrt{3}}$.

в) обчислюють довірчі границі відносної похибки еталонного лічильника для j - того значення об'ємної витрати:

$$\delta_j = \pm t_{\Sigma j} \cdot \sqrt{S_{\Theta}^2 + \sigma_{Kj}^2} . \quad (4.16)$$

Відповідно, довірчі межі похибки еталонного лічильника становлять:

$$\delta_j = \pm 0.56 \% .$$

При цьому, апріорі вважається, що закон розподілу нормальний і довірна ймовірність становить $P=0.95$.

Оцінювання невизначеності результату вимірювання починається із визначення джерел невизначеності. Основними джерелами невизначеності при метрологічній атестації (калібруванні) еталонного лічильника є:

- невизначеність відтворення еталонною одиницею об'єму газу;
- випадковий ефект, що характеризує повторюваність результатів вимірювань;
- складова, що зумовлена дискретністю лічильника імпульсів;
- відтворюваність результатів вимірювань.

Стандартну невизначеність середнього значення коефіцієнта перетворення за j - того значення об'ємної витрати визначають за наступною формулою:

$$u_A(\bar{K}_j) = \frac{S_{Kj}}{\sqrt{n}} 100\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{ji} - \bar{K}_j)^2}{n(n-1)}} . \quad (4.17)$$

$$u_A(\bar{K}_j) = 0,11\% .$$

Оцінюють стандартну невизначеність кількості імпульсів. Ця складова зумовлена тим, що на початку і в кінці вимірювання можливо не врахувати по 1 імпульсу.

Стандартну невизначеність кількості імпульсів розраховують за формулою:

$$u_B(N) = \frac{2\sqrt{3}}{K_j} \times 100\% \quad . \quad (4.18)$$

$$u_B(N) = 0,0041\% \quad .$$

Оцінюють стандартну невизначеність контрольного об'єму газу. Ця складова визначається за результатами атестації еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що застосовується при метрологічній атестації еталонного лічильника.

$$u_B(V) = \frac{U(V)}{\sqrt{3}} \quad . \quad (4.19)$$

$$u_B(V) = 0,08\% \quad .$$

Оцінку стандартної невизначеності, зумовлену відтворюваністю результатів вимірювань визначається за формулою:

$$u_B(K) = \frac{\delta_{B\max}}{\sqrt{3}} \quad , \quad (4.20)$$

де $\delta_{A\max}$ – максимальне значення оцінки відтворюваності.

$$u_B(K) = 0,0057\% \quad .$$

Всі вхідні величини вважаємо некорельованими. Сумарну стандартну невизначеність коефіцієнта перетворення за j – того значення об'ємної витрати визначають так:

$$u_{c_j}(\bar{K}_j) = \sqrt{u_A^2(\bar{K}_j) + \left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial N}\right)^2 \cdot u_B^2(N) + \left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial V}\right)^2 \cdot u_B^2(V) + u_B^2(K)} \quad (4.21)$$

$$u_{c_j}(\bar{K}_j) = 0,135\%$$

Розширену невизначеність розраховуємо, приймаючи довірчу ймовірність рівною 0,95, приймаючи коефіцієнт охоплення $k_0=2$:

$$U_{0,95_j}(K) = k_0 u_{c_j}(\bar{K}_j) \quad , \quad (4.22)$$

$$U_{0,95}(q_v = 50 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,27\% \quad .$$

Результати оцінювання невизначеності результату вимірювання при заданому значенні об'ємної витрати $q_v=200 \text{ м}^3/\text{год}$ подані у табл.4.2.

Основна відмінність у визначенні довірчих границь між існуючою методикою та запропонованою полягає у врахуванні в останній закону розподілу результатів вимірювання об'ємної витрати. При обчисленні коефіцієнта, що залежить від співвідношення випадкової та невилученої систематичної похибок, замість квантиля Стюдента, який характерний для нормального закону розподілу, пропонується брати визначений і поданий у табл.3.8 ентропійний коефіцієнт k , що залежить від виду закону розподілу. Відповідно, $t_{\Sigma j}$ із врахуванням формул (про систематичну похибку) набуде значення:

$$t_{\Sigma j} = \frac{\Theta + k \cdot \sigma_{Kj}}{S_{\Theta} + \sigma_{Kj}} \quad , \quad (4.23)$$

$$t_{\Sigma j} = 1,815 \quad .$$

При цьому довірчі границі відносної похибки еталонного лічильника для j - того значення об'ємної витрати становлять:

$$\delta_j = \pm 0.46 \% \quad .$$

При цьому, закон розподілу результатів вимірювання об'ємної витрати при заданому значенні $q_v=50 \text{ м}^3/\text{год}$ близький до нормального .

При оцінюванні розширеної невизначеності коефіцієнт охоплення відповідно до діючої методики [93] приймається рівним $k_0=2$. Відомо [96], що коефіцієнт охоплення в теорії невизначеності – це квантиль розподілу похибки у теорії похибок. Відповідно пропонується при визначенні розширеної невизначеності результату вимірювання об'ємної витрати еталонними турбінними лічильниками газу коефіцієнт охоплення приймати рівним ентропійному коефіцієнту k , як основної характеристики закону розподілу результатів вимірювання. Формула (4.22) набуде вигляду:

$$U_{0.95j}(K) = k u_{c_j}(\bar{K}_j). \quad (4.24)$$

І розширена невизначеність об'ємної витрати при заданому значенні $q_v=50 \text{ м}^3/\text{год}$ становитиме $U_{0.95}(q_v = 50 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,267\%$.

Для порівняння до уваги бралися і результати отримані при метрологічних дослідженнях того ж еталонного турбінного лічильника газу типорозміром G400 при заданому значенні об'ємної витрати $q_v=200 \text{ м}^3/\text{год}$. Розширена невизначеність, як видно із табл.4.2, відповідно до діючої методики [93] становила $U_{0,95}(q_v = 200 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,25\%$, а із врахуванням запропонованих змін $U_{0,95}(q_v = 200 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,232\%$. З одержаних результатів можна зробити висновок, що врахування закону розподілу результатів вимірювання об'ємної витрати турбінним лічильником газу дає можливість підвищити оцінку точності результату вимірювання.

4.5 Розроблення нормативного документа з методики калібрування турбінних лічильників на реальному середовищі

Враховуючи вимоги до турбінних еталонних лічильників газу та отримані результати експериментальних досліджень, розроблено методику калібрування лічильників газу «Метрологія. Турбінні лічильники газу. Методика калібрування».

Особливістю розробленої методики є відображення в ній методологічного та алгоритмічного підходу до визначення систематичної складової похибки турбінних лічильників із врахуванням поправки на експериментально отримані значення коефіцієнта перетворення. В ній також викладено концепція оцінювання випадкової складової похибки турбінних лічильників шляхом врахування виду закону розподілу результатів вимірювання об'єму.

Методика передбачає визначення коефіцієнтів перетворення еталонного лічильника з врахуванням статистичного опрацювання результатів їх експериментальних досліджень.

Методика відображає процедуру визначення довірчих границь відносної похибки еталонного лічильника із врахуванням поправки на систематичну складову похибки та виду закону розподілу випадкової похибки лічильника.

У розробленому нормативному документі також передбачено оцінювання метрологічних характеристик еталонних турбінних лічильників здійснювати на базі основних положень теорії невизначеності у вимірюваннях.

Розроблений нормативний документ подається в додатку Д дисертації.

Розроблена методика калібрування дозволяє підвищити достовірність отриманих результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу шляхом застосування основних етапів математичної статистики, а саме: відсіювання промахів, ідентифікація закону розподілу та перевірка відтворюваності дослідів. Крім цього, це також забезпечує покращення оцінювання точності турбінних лічильників на основі врахування конкретного виду закону розподілу та уточнення на його базі довірчих меж похибки лічильників.

Розроблена методика калібрування турбінних лічильників газу на реальному середовищі впроваджена у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», акт впровадження подано у Додатку Е до дисертації.

4.6 Висновки до четвертого розділу

Отримав подальший розвиток підхід до визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу з врахуванням конструктивних параметрів турбінки, параметрів вимірного середовища та критеріїв гідродинамічної подібності потоку. Запропоновано алгоритм для визначення та коригування систематичної складової похибки лічильника. Розроблений алгоритм врахування ентропійного коефіцієнту при оцінюванні випадкової складової похибки лічильника.

Удосконалено алгоритм опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу на основі методів математичної статистики та шляхом врахування закону розподілу результатів вимірювання об'єму. Такий підхід дає змогу відсіяти не репрезентативні результати та підвищити точність та достовірність результатів метрологічного контролю. Експериментально підтверджено доцільність врахування закону розподілу результатів вимірювання об'єму, що дозволяє зменшити розширену невизначеність результату вимірювання

турбінними лічильниками типорозміру G400 на 1,1% порівняно з результатами отриманими без врахування виду закону розподілу при об'ємній витраті $50\text{м}^3/\text{год}$ та на 7,2% при $200\text{м}^3/\text{год}$.

Розроблено методику калібрування еталонних турбінних лічильників газу, яка оформлена у вигляді нормативного документа з метрології, що дозволяє підвищити достовірність отриманих результатів та конкретизувати на основі знання закону розподілу довірчі границі відносної похибки лічильника.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень методів оцінювання точності турбінних лічильників газу здійснено удосконалення наукових і прикладних (в аспекті інформаційного забезпечення) підходів щодо покращення їх метрологічних характеристик, а також розроблений проект нормативного документа для проведення калібрування турбінних лічильників, що є практичним результатом впровадження удосконалених методів оцінювання точності функціонування турбінних лічильників. При цьому отримані такі наукові та практичні результати:

1. Проведено моделювання функціонування турбінних лічильників газу, за результатами якого запропоновано використовувати математичну модель, яка враховує конструктивні параметри турбіни, критерії подібності гідродинамічних потоків турбіни, умови її експлуатації та параметри природного газу, що на відміну від існуючих моделей дозволяє зменшити похибку репрезентативності даних у 2,5 рази і коригувати систематичну складову похибки турбінних лічильників газу на стадії проектування і метрологічної атестації в межах до 0,1-0,2%.

2. Експериментально досліджено метрологічні характеристики турбінних лічильників газу вітчизняного виробництва ВАТ Івано-Франківський завод «Промприлад» (м.Івано-Франківськ) моделей ЛГ-К-Ех типорозмірів G160 та G400 на реальному середовищі і встановлені види законів розподілу результатів вимірювання об'єму газу за різних заданих фіксованих значень об'ємної витрати. За результатами досліджень встановлено, що закон розподілу результатів вимірювання об'єму газу для турбінного лічильника типорозміром G400 в діапазоні витрат $q_{min} \dots 0,2q_{max}$ є нормальний, а в діапазоні $0,2q_{max} \dots q_{max}$ характеризується розподілом Лапласа, що дає можливість підвищити оцінку точності результатів вимірювання не менше як на 0,05% шляхом уточнення діапазону зміни випадкової складової похибки результатів вимірювання об'єму за різних витратних режимів турбінних лічильників газу.

3. За результатами теоретичних досліджень, здійснено оцінювання впливу параметрів природного газу на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника газу

та обґрунтовано необхідність врахування параметрів робочого середовища при визначенні коефіцієнта перетворення еталонних лічильників, оскільки зміна густини та абсолютної температури на 10% призводять до зміни коефіцієнта перетворення лічильника на 0,01% та 0,007% відповідно. Водночас вплив зміни вмісту азоту та діоксиду вуглецю в природному газі на коефіцієнт перетворення лічильника є суттєво меншими.

4. Вдосконалено концепцію застосування методів математичної статистики шляхом ідентифікації виду закону розподілу на базі інформаційного підходу з використанням ентропійного коефіцієнта при опрацюванні результатів вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками, що дозволяє підвищити оцінку точності та достовірності результатів вимірювання об'єму природного газу турбінними лічильниками, а саме зменшити розширену невизначеність результату визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника на 1,1% при об'ємній витраті $50\text{м}^3/\text{год}$ та на 7,2% при $200\text{м}^3/\text{год}$ шляхом врахування виду закону розподілу.

5. Удосконалено методи оцінювання точності турбінних лічильників газу шляхом одночасного коригування систематичної складової похибки результатів вимірювання об'єму та оцінювання випадкової складової, які лягли в основу розроблення нормативного документу з оцінювання точності турбінних лічильників газу при їх калібруванні, що відкриває нові практичні аспекти створення еталонних засобів вимірювання об'єму газу.

6. Розроблено та впроваджено у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» нормативний документ «Метрологія. Турбінні лічильники газу. Методика калібрування», який дозволяє метрологічно атестувувати турбінні лічильники як еталонні засоби при їх роботі на природному газі, чим розширюється сфера практичного застосування цих лічильників в еталонній витратометрії і в цілому досягається покращення метрологічного забезпечення промислових засобів обліку природного газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бродин И.С. Теория, принципы построения и внедрение испытательных расходоизмерительных комплексов для технического и метрологического обеспечения измерений расхода газа: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.11.01. «Приборы и методы измерения механических величин», 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение» / И.С. Бродин. – СПб, 1992. – 36 с.
2. Пістун Є.П. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску / Є.П. Пістун, Л.В. Лесовой – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. – 576 с.
3. Петришин І.С. Метрологічне забезпечення вимірювань об'єму та об'ємної витрати природного газу в комунально-побутовій сфері (діапазон витрат від $2,8 \cdot 10^{-6}$ до $4,4 \cdot 10^{-3}$ м³/с (від 0,01 до 16 м³/год). Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1997.
4. Вимірювання витрати та кількості газу: довідник / [М.П.Андрієшин, С.О.Канєвський, О.М.Карпаш, Я.С.Марчук, І.С.Петришин, А.А.Руднік, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський]; за ред. О.М.Карпаша. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004. – 160 с.
5. Петришин І.С. Особливості повірки лічильників газу при робочих умовах / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Вимірювання витрати та кількості газу: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2005. – с. 22.
6. Петришин І.С. Науково-методологічні та технічні засади забезпечення точності вимірювань витрати природного газу: дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.11.01 /Петришин Ігор Степанович . – Львів, 2007. – 380 с.
7. Середюк О.Є. Метрологічне забезпечення відтворення і передавання одиниць об'єму і об'ємної витрати природного: дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.01.02 /Середюк Орест Євгенович. – Львів, 2009. – 384 с.

8. Власюк Я. М. Вдосконалення засобів і нормативної документації для метрологічного забезпечення вузлів обліку природного газу : автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.01.02 / Ярослав Михайлович Власюк . – Івано-Франківськ : Б.в., 2012 . – 20 с.
9. Воцинський В.С. Установка з робочими еталонами об'єму газу типу УПЛГ-2500 / Воцинський В.С., Іроденко В.В., Воцинський В.В. // Методи та прилади контролю якості. - № 4. – 1999. – С.104-106.
10. Воцинський В.В. Математична модель швидкостей потоку в кільцевому січєнні турбінного лічильника газу. / Воцинський В.В. // Методи та прилади контролю якості - №6. - 2000- С.61-63.
11. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник: Кн.1 / П.П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
12. Архипов А. В. Методика проектирования сложных расходоизмерительных и дозирующих систем : Учеб. пособие / А. В. Архипов, Г. Н. Бобровников, А. А. Тупиченков ; Всесоюз. ин-т повышения квалификации руководящих и инж.-техн. работников в обл. стандартизации, качества продукции и метрологии: - М. Изд-во стандартов, 1986.
13. Исходные уравнения и уравнения измерения массового и объемного расходов газа / А.П. Герасимов, В.П. Иванов, В.М. Красавин [и др.] // Измерительная техника. –2005. – №4. – С.44-48.
14. Кабза Е. Математическое моделирование расходомеров с сужающими устройствами / Е.Кабза; [пер. с польского; под ред. П. П. Кремлевского]. –Л.: Машиностроение: Ленинградское отделение, 1981. – 115 с.
- 15 Предпосылки процесса гармонизации в Европе единицы объема природного газа под высоким давлением / Д. Допхайде, Б. Миккан, Крамер, М. П. ван дер Бек. // Український метрологічний журнал. – 2004. – Вип. 2. – С. 29-36.
16. R. E. Thompson. Turbine flowmeter performance model / R/E/ Nhompson, J. Grey // Trans. ASME, J. Basic Eng. – 1970. – 92 (4). – p. 712-723.
17. W. F. Z. Lee. Density effect and Reynolds number effect on gas turbine flowmeters / W. F. Z. Lee , H. J. Evans // Trans. ASME, J. Basic Eng. – 1965. – 87 (4). – p.1043-1057.

18. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. Частина 1 / В.М. Чинков. – Х.: ХВУ, 2001. – 424 с.
19. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. Частина 2 / В.М. Чинков. – Х.: ХУПС, 2007. – 86 с.
20. Володарський Є.Т. Статистична обробка даних: Навч. Посібник / Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева – К.: НАУ, 2008. – 308 с.
21. Кошева Л.О. Оцінювання правильності результатів вимірювань та випробувань / Л.О. Кошева // Український метрологічний журнал. – 2010. – №1. – С. 3–6.
22. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н.Джонсон, Ф.Лион – М.:Мир, 1980. – 610 с.
23. Кендалл М. Дж. Статистические выводы и связи (пер.англ.) / М.Дж. Кендалл, А. Стьюарт – М.:Наука, 1976. – 524с.
24. Долішня Н.Б. Вдосконалення алгоритму опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінним лічильником газу / Н.Б. Долішня // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2(18). - С.127-131.
25. Чеховський С.А. Дослідження метрологічних характеристик витратовимірювального комплексу для виявлення витоків природного газу в газорозподільних мережах / С.А. Чеховський, Б.І. Прудников, О.Є. Середюк, Н.М. Піндус, Н.Б. Долішня, Г.О. Сенів, І.О. Ярошенко// Системи обробки інформації. – 2011. – Вип. 1 (91). – С.123-127.
26. Чеховський С.А. Розробка віртуальних лабораторних стендів для вимірювання тиску, температури та витрати / С.А. Чеховський, Н.М. Піндус, Л.А. Витвицька, В.В. Остапів, Н.Б.Долішня, С.М. Белей, Б.І. Прудніков // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип 4(85). – С.77-80
27. Долішня Н.Б. Застосування параметричних підходів для перевірки закону розподілу статистичних даних в умовах обмеженого об'єму вибірок / Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус, С.А. Чеховський // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2010. – Вип. 4 (26). – С.112-114.
28. Долішня Н.Б. До питання застосування статистичних методів обробки експериментальних даних / Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус, С.А. Чеховський //

Приладобудування 2010: стан і перспективи: 9-а наук.–техн. конф., 27–28 квітня 2010 р., Київ: зб. тез доп. – Київ: ПБФ,НТУУ “КП”, 2010.– С.105

29. Сенів Г.О. Метрологічне забезпечення вимірювального комплексу для виявлення втрат природного в газорозподільних мережах / Г.О. Сенів, І.О. Ярошенко, Т.В. Марчук, Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус// Приладобудування: стан і перспективи: 11-а міжнародна наук.–техн. конф., 24–25 квітня 2012 р., Київ: зб. тез доп. – Київ: ПБФ,НТУУ “КП”, 2012.– С.253-254

30. Долішня Н.Б. Порівняльний аналіз теоретичних методів статистичної обробки експериментальних даних /Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус // Математичне моделювання. – 2012. – Вип. № 1(26). – С.62-65.

31. Долішня Н.Б. Підвищення точності опосередкованого вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників / Н.Б. Долішня, Л.А. Витвицька, Н.М. Піндус // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 06(82). – С.198-204.

32. Долішня Н.Б. Впровадження інноваційних технологій навчання при вивченні проблем обліку витрати газу /Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус, С.А. Чеховський, Л.А. Витвицька// Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей 1-а всеукраїнська наукова-метод. конф., 10-12 жовтня 2012р, м.Івано-Франківськ, 2012. – С.94-95

33. Клочко Н.Б. Вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу / Н.Б. Клочко, С.А.Чеховський // Метрологія та прилади. – 2014. – №11(45). – С.101-105. (Наукометрична публікація в базі даних Index Copernicus)

34. Бошняк Л.Л. Тахометрические расходомеры / Л.Л. Бошняк, Л.Н. Бызов – Л.: Машиностроение, 1968 – 212 с.

35. Плотников В.М. Приборы и средства учета природного газа и конденсата/ В.М. Плотников, В.А. Подрешетников, Л.Н. Тетеревятников – Л.: Недра, 1989. – 238с.

36. Методика експериментальних досліджень впливу параметрів природного газу на метрологічні характеристики лічильників газу / А.Г. Бестелесний, Я.М. Власюк, І.С.

- Кісіль, Б.І. Прудніков, О.Є. Середюк, С.А. Чеховський // Методи та прилади контролю якості. – 2007. – № 18. – С.46–50.
37. Коробко І.В. Дослідження моменту в'язкого тертя в швидкісних турбінних перетворювачах витрат / І.В. Коробко, А.В. Писарець // Вестник НТУУ “КПІ”. Серія машиностроение. – 2003. – Вып. 44. – С. 233-235.
38. Писарець А.В. Визначення врівноважуючої сили турбінного витратоміра із гідродинамічним врівноваженням ротора / А.В. Писарець, І.В. Коробко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. - 2004. - № 4. - С. 115–120.
39. Писарець А.В. Визначення осьового зусилля в турбінному первинному перетворювачі витрат з гідродинамічним врівноваженням ротора/ А.В. Писарець, І.В. Коробко // Вібрації в техніці та технологіях. - 2005. - № 2 (40). - С. 67 – 70.
40. Бошняк Л.Л. Современное состояние исследований и разработок тахометрических расходомеров/ Л.Л. Бошняк, В.М. Соловский // Приборы и системы управления. — 1972. — № 9. — С. 44-48.
41. Wadlow D. Chapter 28.4 Turbine and vane flowmeters / Wadlow D., Webster J.G. // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. – Boca Raton, FL: CRC Press. – Dec. 1998.
42. John D. Wright. What is the “best” transfer standard for gas flow? National Institute of Standards and Technology, 2003. – p.27.
43. G. E. Mattingly. Fluid Measurement: Standards, Calibrations, and Traceabilities, Proc. 17th Meas. Science Conf. / Mattingly G. E. // Long Beach, CA, 1987. – p.575-587.
44. John D. Wright. Nist measurement services: NIST Calibration Service for Gas Flow Meters / John D. Wright, George E. Mattingly // Piston Prover and Bell Prover Gas Flow Facilities. – 1998. – p. 1-4.
45. Jos G.M. van der Grinten. The primary standard for gas flow measurement in the Netherlands / Jos G.M. van der Grinten. –Flomeko'93, Seoul, Korea. – 1993. – p.9.
46. Jongerins P.F.M. Calibration facilities for industrial gas flow meters in the Netherlands / P.F.M. Jongerins, M.P. van der Beek, J.G.M. van der Grinten. // Flow Meas. Instrum. – 1993. – №2. – P.77– 84.

47. Turbine gas meter. Handbook.// Instromet International. Gas measurement and control equipment - 2000. - p.27
48. Eujen Ernst. Betrachtungen uber den Enfluz von Gasart und Gasdruck auf die Anzeige von Drehkolbengaszdhlern / E.Ernst // GWF-Gas/Erdgas. – 1970. – №12. – P. 657-666.
49. M. P. Van Der Beek. A New Reference Meter for Gasmeter Calibration / M. P. Van Der Beek //Instromet International, Essen, Belgium, Nederland's Meetinstituut NMI, Dordrecht, Netherlands. – 2000. – 9 p
50. Методики выполнения измерений. Основные положения: ДСТУ ГОСТ 8.010:99. ГСИ. - [Введен с 2001-06-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 17 с. – (Межгосударственный стандарт).
- 51 Газ природний горючий. Вимірювання витрати. Терміни та визначення понять: ДСТУ 4313:2004. – [Чинний від 2004-07-05]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – III, 37 с. – (Національний стандарт України).
52. Газ природний. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. – [Введен с 1997-07-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 54 с. – (Межгосударственный стандарт).
53. Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови (EN 12261:2002, IDT): ДСТУ EN 12261:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – V, 33 с. – (Національний стандарт України).
54. 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).
55. Петришин І.С. Аналіз комплексного показника якості турбінних лічильників газу/ І.С. Петришин, Д.О. Середюк // Матеріали третьої науково-технічної конференції "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи": Збірка наукових праць. – Київ, 2004. – С.242
56. Третьяк Л.Н. Обработка прямых измерений с многократными наблюдениями: Учебное пособие / Л.Н. Третьяк – Оренбург: ИПК ОГУ, 2002. – 60 с.

57. Викулин И.М. Оценка пригодности результатов измерений и исключение аномальных значений / Викулин И.М., Горбачев В.Э., Коробицын Б.В., Криськив С.К. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. – №2. – С.106-111
58. Чеховський С.А. Дослідження поведінки критерія Грабса для вибірок різного об'єму на базі експериментальних даних вихорового перетворювача витрати газу типу «ИРВИС-К-300» / С.А. Чеховський, Н.М. Піндус, Н.Б. Долішня // Приладобудування 2008: стан і перспективи: 7-а міжнародна наукова.–техн. конф., 22–23 квітня 2008 р., Київ: зб. тез доп. – Київ: ПФФ,НТУУ “КПІ”, 2008.– С.240-241.
59. Лемешко Б.Ю. Исследование критериев типа Граббса / Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. // Измерительная техника. – 2005. – № 6. – С.20-32
60. Сафарян Г.Г. Підвищення достовірності вимірювань показників якості електричної енергії з урахуванням ефекту кореляції даних: дис. кандидата техн. наук: 05.01.02 / Сафарян Григорій Гагікович. – Харків, 2008. – 223с.
61. Основи метрології та вимірювальної техніки: у 2 т.: підруч. для студ. вищих навч. закл. / М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник [та ін.]; за ред. проф.Б.Стадника. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2005. – Т.1: Основи метрології. – 2005. — 532с.
62. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення: ДСТУ ГОСТ ISP 5725-1-2003, IDT - [чинний від 2006-07-01]. – К.:Держспоживстандарт України, 2006. – 29с. – (Міждержавний стандарт).
63. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 2. Основний метод визначення повторюваності і відтворюваності стандартного методу вимірювання: ДСТУ ГОСТ ISO 5725-2:2005, IDT. - [чинний від 2006-07-01]. – К.:Держспоживстандарт України, 2006. – 59с. – (Міждержавний стандарт).
64. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 4. Основні методи визначення правильності стандартного методу вимірювання: ДСТУ ГОСТ ISO 5725-4-2003, IDT. - [чинний від 2006-07-01]. – К.:Держспоживстандарт України, 2006. – 36с. – (Міждержавний стандарт).

65 Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 6. Використання значень точності на практиці: ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-6-2003, IDT IDT. - [чинний від 2006-07-01]. – К.:Держспоживстандарт України, 2006. – 51с. – (Міждержавний стандарт).

66. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения: ГОСТ Р ИСО 5479-2002. - [введен с 2002-03-27] - ИПК.: Изд-во стандартов. 2002. - 32 с. – (Госстандарт России).

67. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч.посіб. для студ. вищих навч. закл./ Є.Т.Володарський, В.В.Кухарчук, В.О.Поджаренко, Г.Б.Сердюк. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.

68. Statistical interpretation of data - Part 6: Determination of statistical tolerance intervals (ISO 16269-6:2005, IDT) – [valid from 2005-04-01]. – International Standard Organization, 2005. – 32p. – (International Standard).

69. Statistical interpretation of data - Part 8: Determination of prediction intervals (ISO 16269-8:2004, IDT) – [valid from 2004-09-30]. – International Standard Organization, 2004. – 108p. – (International Standard).

70. Лемешко Б.Ю. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона. / Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. // Метрология. – 2005. – № 2. – С.3-23

71. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии: Р 50.1.037-2002. – [введен с 2002-07-01] - ИПК.: Изд-во стандартов. 2002. - 66 с. – (Госстандарт России).

72. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро – М.: Мир, 1969. – 395 с.

73. Pearson E.S. Test for departure from normality: Comparison of powers / E.S. Pearson, R.V. D'Agostino, K.O. Bowmann // Biometrika. – 1977. – №64. – P.231-246.

74. Pearson E.S. Biometrika tables for Statisticians / E.S. Pearson, H.O. Hartley// Cambridge University Press. – 1966. – Vol. 1. – P.207-208.

75. D'agostino R.B., Simulation probability points of b_2 for small samples / R.B. D'agostino, G.L. Tietjen // *Biometrika*. – 1971. – №58. – P.669-672.
76. Shapiro S.S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S.S. Shapiro, M.B. Wilk // *Biometrika*. – 1965. – №52. – P.591-611.
77. Винничук А. Г. Вдосконалення методу вимірювання витрати газу з використанням торцевих звужувальних пристроїв [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / Винничук Анна Григорівна; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Л., 2012. - 20 с..
78. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги: ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держстандарт України, 2009. – 100 с. – (Державний стандарт України).
79. Метрологія. Об'єм природного газу за стандартних умов. Типова методика виконання вимірювань з використанням лічильника газу, манометра та термометра: МВУ 016-03-2003 / І.Петришин, Я.Безгачнюк, Д.Середюк. – [Чинна від 2003-10-08]. – Івано-Франківськ: ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", 2003. – 12 с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Інструкція).
80. Чеховський С.А. Дослідження теоретичних методів статистичної обробки вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників / С.А. Чеховський, Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус // Вимірювання витрати та кількості газу: 7-а всеукр. наук.–техн. конф., 25–27 жовтня 2011 р., Івано-Франківськ: зб. тез доп. – Івано-Франківськ: Івано-Франківськ, 2011.– С.88-90.
81. Середюк О.Є. Порівняльна характеристика зразкових витратовимірювальних установок та їх метрологічне забезпечення/ О.Є. Середюк, Н.М. Піндус, Н.Б. Долішня, Б.В. Остапів, С.А. Чеховський// Вимірювання витрати та кількості газу: 6-а всеукраїнська наукова-технічна конф., 20-21 жовтня 2009р., Івано-Франківськ: зб. тез доп.- Івано-Франківськ, 2009.-С.38-39
82. Гордюхин А.И. Измерения расхода и количества газа и его учет / И.А. Гордюхин, Ю.А. Гордюхин – Л.: Недра, 1987. – 213 с.

83. Демидова Н.М. Дослідження метрологічних характеристик турбінного витратоміра автомобільного палива. / Н.М. Демидова, В.О. Поджаренко // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація : [зб. наук. пр.] / відп. ред. О. Грабовська. -Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", 2007. -С. 42-49.
84. Павловский А.Н. Измерение расхода и количества жидкостей газа и пара. – Изд.3, перераб. и доп. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 416 с.
85. Бобровников Г.Н. Теория и расчёт турбинных расходомеров / Г.Н.Бобровников, Л.А. Камышев – М.: Издательство стандартов, 1978. – 128 с.
86. Петришин І.С. До питання ідентифікації закону розподілу похибок еталонів / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – 1(7). – С.59-62.
87. Долішня Н.Б. Вдосконалення алгоритму опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінним лічильником газу / Н.Б. Долішня // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2(18). - С.127-131.
88. Ишемгужин И.Е. Специальные критерии согласия для малой выборки при оценке надежности нефтепромыслового оборудования / И.Е. Ишемгужин, А.Р. Атнагулов, А.Н. Зотов // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 1. – С.56-61.
89. Барковський В.В. Теорія ймовірностей та математична статистика: Навч.посібник / В.В. Барковський, Н.В. Барковська, О.К. Лопатін – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 424с.
90. Новицький П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицький, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 2001. – 303 с.
91. Сиденко В.М. Основы научных исследований / В.М. Сидоренко, И.М. Грушко – Харьков: Вища школа, 1977. – 225с.
92. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи. Учебное пособие для вузов / [Хромой Б.П., Кандинов А.В., Сенявский А.Л. и др.]; под ред. Б. П. Хромого. — М: Радио и связь, 1986. — 424 с.
93. Метрологія. Еталонні лічильники газу. Типова програма та методика державної метрологічної атестації: МДУ 016/03-2006 / І.Петришин, Я.Безгачнюк, Д.Середок. – [Чинна від 2006-05-18]. – Івано-Франківськ: ДП "Івано-

Франківськстандартметрологія", 2006. – 12 с. – (Нормативний документ Держспоживстандарту України: Інструкція).

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

95. ДСТУ 3215-95. Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної

техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 3215-95.- [Чинний від 1996-07-01; із змінами №1 чинний від 2000-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2000. – 10 с.

– (Державний стандарт України).

96. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях: Учебное пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.

97. Метрологія. Турбінні лічильники газу. Методика калібрування: МК 03/03-2013 / Я.Безгачнюк, В.Гулик, П. Джочко, Н Ключко. – [Чинна від 2013-06-07]. – Івано-

Франківськ: ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", 2013. – 13 с. – (Нормативний документ Мінекономрозвитку України: Інструкція).

ДОДАТКИ

Таблиця А.1 – Аналіз критеріїв перевірки нормальності закону розподілу

Критерій	Статистика критерію	Особливості	Область застосування	Елемент недосконалості
Критерій Пірсона	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n p_i)^2}{n p_i}$ <p>n – число спостережень, m – число результатів, що потрапили в визначений інтервал з ймовірністю p.</p> $p = \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right)$	Важко на групуванні даних; Потребує якомога більшої кількості інтервалів розбиття, для того, щоб зменшити кількість можливих альтернативних законів розподілу.	Далі можливості перевірити гіпотезу про відно відповідності вибірки результатів спостережень, будь-якому теоретичному закону розподілу, а також перевірити на односторонність результати спостережень шоків і більше вибірок [100,101].	- коректність його застосування для великих вибірок; - необхідність групування результатів спостережень; - на виходові порядку відхилення частот випробитого та теоретичного розподілів; - складний алгоритм розрахунку статистики Пірсона.
Складові критерії	<p>критерій I:</p> $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k d_i$ $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \frac{d_i}{2^{i-1}}$ $s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k d_i^2 - \bar{d}^2$ <p>критерій II перевіряється по статистичних таблицях.</p>	$q = q_1 + q_2 + \dots + q_k$ (4) q_1, q_2, \dots, q_k – рівень значущості критерію I h_1, h_2, \dots, h_k – рівень значущості критерію II d_1, d_2, \dots, d_k – квантілі розподілу Результуючий рівень значущості складного критерію: $q = q_1 + q_2$ (5)	рекомендований для вибірок 10 ? n ? 50 [100]; якщо виявиться, що хоча б один з критеріїв не виконується, то вважають, що розподіл досліджуваної сукупності результатів випробування не відповідає нормальному закону.	- застосування різних алгоритмів для розрахунку критеріїв; - використання зміщеної та незміщеної оцінки СКВ для I та II критеріїв відповідно.
Критерій згоди Колмогорова	$D(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2^{ k }} e^{- k x^2}$ $A = D \cdot \sqrt{n}$ $D = \max F_n(x) - F(x) $	Якщо ймовірність $p(x)$ досить велика, то гіпотезу про відповідність дослідного розподілу теоретичному слід розглядати як правдоподібну, яка не суперечить експериментальним даним. Для підрахунку D досить знати значення модуля різниці в то чл.членках варіаційного ряду	Використовується для перевірки виду закону розподілу в тому числі і відхилення від нормального.	- ідентифікація виду теоретичного та випробитого законів розподілу; визначає попередньої побудови гістограми; - на визначено конкретного критеріального значення модуля $D(x)$, сказано лише: досить велика.
Критерій перевернутої симетричності	$\sqrt{B_1} = \frac{h_1}{\sigma_1}$	У [100] говориться про те, що розподіл статистики дуже швидко наближається до нормального з нульовим математичним очікуванням і визначено дисперсією, що дорівнює:	перевірки гіпотез про симетричність спостережуваного закону розподілу об'ємах вибірок 8 ? n ? 5000 [18,100].	Ного використання коректне при перевірці нормальності, але прийняття гіпотези про симетричність не є підтвердженням нормальності (умова необхідна, але не достатня); розподіл статистики (9) залежить від виду спостережуваного закону
Критерій перевернутої асиметрії	$\beta_2 = \frac{\beta_4}{\beta_2^2}$	Результати випробувань дозволяють робити висновки про потужність критерію перевірки на асиметрію; дозволяє робити висновки про ступінь відхилення даної вибірки від нормального закону	У стандарті передбачено використання перевірки на асиметрію при об'ємах вибірок 8 ? n ? 5000	Розподіл статистики залежить від об'єму вибірок згідно з [100] розподіл статистики навіть при великих об'ємах вибірок з далеким від нормального
Критерій Шапиро-Уїлкса	$W = S^2 / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ $S = \sum_{i=1}^n a_i [X_{(n-i)} - X_{(i)}]$	Використовується при відсутності апріорної інформації про тип відхилення від нормального закону розподілу. Індекс W змінюється від 1 до величини n/2 або ж від 1 до (n-1)/2 при парних і непарних n відповідно. Коefіцієнти a_i приведені в стандарті першоджерел відповідно [19,82].	Для 8 ? n ? 50 і у випадку, коли можна вибрати альтернативну гіпотезу наступного виду: - приблизно симетричний розподіл; - асиметричний розподіл.	При n ? 20 не ідентифікує нормальності закону розподілу експоненціального сімейства з плоскішим в порівнянні з нормальним густинною розподілів. Складність застосування критерію полягає в тому, що у стандарті подано лише на експериментально необхідних для критерію коefіцієнтів. В першоджерелах відсутня інформація про аналітичний вид розподілу статистики, приводяться лише процентні точки. При малих об'ємах вибірок важко розрізнити альтернативні гіпотези.

Таблиця А.2 – Аналіз критеріїв перевірки наявності промахів

Критерій	Статистика критерію	Обов'язки	Об'єкт застосування	Елементи недозвільності
Критерій Браун	$L = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{S} \quad (15)$ де x_i – од. – дв. максимальні значення варіаційного ряду; \bar{x} – середнє арифметичне, S – дисперсія; n – СКВ вибірки	Універсальність застосування даного критерію [64, 65, 100].	Дан змогу перевірити вибірку на однорідність, оскільки отримані результати дають можливість оцінити про коректність його класифікації при виборі класів. Прямим чином дані не передбачають обробки статистичних даних. Застосовується для вибірок до кількості елементів $n \geq 1000$.	- великі кроки між значимими критичними точками; - перевіряє лише максимальні значення вибірки, не має модифікації для найменшого значення.
Критерій Рашварського	$ r_{i+1} - r_i = \tau \cdot S_i \quad (16)$ де τ – значення розподілу Стюдента при певній довірчій ймовірності; S_i – дисперсія стандартного нормального розподілу; r_i – значення підпорядкованих результатів спостережень	Точкові оцінки розподілу $N(\mu, \sigma^2)$ СКВ. В результаті спостереження обчислюється без урахування підпорядкованих результатів.	Застосовується як критерій згоди для підтвердження нормальності за наяву розподілу. У [32] говориться про коректність застосування його модифікації як критерію перевірки на аномальність.	- не чутливий до великих вибірок (після $n \geq 100$ для критичні значення порівнюються до останнього); - великі кроки між значимими критичними точками після $n \geq 20$.
Критерій варіаційного ряду	$V = \frac{R_n - R_1}{n} = \frac{R_n - R_1}{n} \quad (17)$ де \bar{X} – вибіркове середнє арифметичне значення; n – таблиці критеріальні значення. $R_n - R_1 = \tau_1 \quad (18)$	Застосовується для вибірок з кількістю елементів $n \geq 100$; дан можливість перевіряти на промах як максимального так і мінімального результату на промах; розрахунок \bar{X} ; розрахунок середнього значення передбачає виключення підпорядкованого результату	Застосовується виключно для перевірки наявності промахів у результаті аналізу даних, потребує впорядкування даних у варіаційній ряд	- широта стосується для перевірки виключно дубльованих промахів.
Критерій Діксона	Коефіцієнти d_1, d_2 застосовують, коли є один аномальний результат, а d_1, d_2 та n – випадку наявності двох	Дан змогу відразу перевірити максимальні (мінімальні) значення вибірки на промах; рекомендується застосовувати критерій Діксона, коли вибірка може містити більше однієї грубої помилки; враховує розмір.	Застосовується виключно для перевірки наявності промахів у результатах вимірювання, потребує впорядкування даних у варіаційній ряд	- застосовується для обмеженого об'єму вибірок; - нечутливий до малих промахів; - залежність статистики від кількості промахів;
Критерій "Z", Райта	$ z_{max} - \bar{x} \leq 1.5 \quad (19)$	Є одним з найпростіших для перевірки результатів, що підпорядковуються нормальному закону розподілу	Потребує впорядкування даних у варіаційній ряд; Відмінні від критеріальних значень; Застосовується для нормально розподілених результатів; Допільність їх застосування виражена тоді, коли відомо значення генерального середньоквадратичного відхилення (S).	- малочутливий до малих вибірок з малим варіаційним розмахом; - обидва критерії (трих сім та Райта) надійні при кількості результатів спостережень більше 20 ... 30; - може виявитися, що при нових значеннях $X_{i,r}$ і S інші результати потрапляють у категорію аномальних
Критерій Сьюрлова	$s = \frac{\max(x_{i,r}) - \bar{x}}{S} \quad (20)$	встановлює межі чіткі межі промахів.	Використовується для перевірки однорідності вибірок. У [102] пропонується застосовувати даний критерій для перевірки на відсутність аномальних результатів для вибірок об'ємом $n \geq 25$.	- не коректний для перевірки наявності промахів у малих вибірках, хоча має критичні значення статистики для кількості елементів вибірки від 1.
Критерій Шюлене	коэф. $0,5$ (21) $r_{i+1} = r_i + \tau \cdot S_i \quad (22)$ $r_{i+1} = r_i + \tau \cdot S_i \quad (23)$ $r_{i+1} = r_i + \tau \cdot S_i \quad (24)$ $r_{i+1} = r_i + \tau \cdot S_i \quad (25)$	враховує параметр τ – константа, тобто існує чітка межа між двома варіантами та гостро верхніми розподілами	Алгоритми (21)-(24) застосовуються для сімейства нормально розподілених величин, а для двох останніх критеріїв гостровершинних, композицій дискретного дво-значного розподілу і розподілу Лапласа з експонентою $\alpha = 1,5, 0,0$; композицій рівномірного розподілу з експоненціальним розподілом зі значимим експонентою $\alpha = 1,5, 0,0$ і класом експоненційних розподілів в межах зміни експоненти $\alpha = 1,5, 0,0$ межа промахів визначається	- потребує чіткої попередньої ідентифікації виду закону розподілу і сімейства нормально розподілених;

Таблиця А.3 – Розрахунок статистик Грабса при різних модифікаціях прорахунку на промах

Перерізка на промах	Однок		Два		Три		Однократно найбільшого і найменшого значень
	Найбільше значення	Найменше значення	Найбільше значення	Найменше значення	Найбільше значення	Найменше значення	
Механізм розрахунку статистик єдиний для критерію	$G_1 = \frac{(X_n - \bar{X})}{s}$ $g_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i$	$G_2 = \frac{(X_1 - \bar{X})}{s}$ $g_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i - 2s^2$	$G_{1,2} = \frac{X_n - X_1}{s}$ $g_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i - 3s^2$	$G_{1,2} = \frac{X_n - X_1}{s}$ $g_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i - \pi_{1,2}^2$	$G_{1,2,3} = \frac{X_n - X_1 + X_2 - X_{n-2}}{s}$ $g_{1,2,3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i - \sum_{i=1}^k (X_i - X_{n-i})$	$G_{1,2,3} = \frac{X_n - X_1 + X_2 - X_{n-2}}{s}$ $g_{1,2,3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i - \sum_{i=1}^k (X_i - X_{n-i})$	$G_{1,2,3} = \frac{X_n - X_1 + X_2 - X_{n-2}}{s}$ $g_{1,2,3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i - \sum_{i=1}^k (X_i - X_{n-i})$
Поведінка розподілу статистик у випадку наявності окремозначимого відхилення							
Примітки	Значення X_i та X_k є відірваними на промах, тобто є піпсами на те, що вони знаходяться у критичній зоні		Висновок про аномальність однократно двох найменших чи двох найбільших вибірковок значень приймається по лівому «квісту» розподілу статистик		Значення статистик більше за інші залежить від об'єму вибірки		Обидва значення вказуються промахами при заданому рівні значимості α , якщо розраховане значення статистики G_i вижитися вище критичного: $G_i < G_{i,c}$

Таблиця А.4 – Аналіз критеріїв перевірки відворуваності дослідів

Критерій	Статистика критерію	Особливості	Область застосування	Елемент недосконалості
Критерій Кофмана	$T_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_{ij}$ $S_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (X_{ij} - T_j)^2$ $S_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k S_i^2}$ $S_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k S_i^2$ $j - \text{номер серії};$ $i - \text{номер дослідів в серії};$ $k - \text{число паралельних дослідів}.$	Залежний, кількість серій не \leq більше ніж 2-3, а кількість дослідів в серії теж може бути невеликою (достатньо навіть двох), простота в обчисленні.	використовується для перевірки гіпотези про належність двох вибірок до однієї генеральної сукупності (к однорідності), а відповідно і рівності значень серій відтворення (показник відтвореності дослідів у експерименті) [39,64]; пропонується стандартом ISO 5725 для кількісної оцінки міцності безбарвних спостережень	<ul style="list-style-type: none"> - у кожній із серій число результатів відтворення повинне бути однаковим; - обмеження на число ступенів вільності дисперсій, критерій вилучає відхилення лише в більшу сторону;
Критерій Барнетта	$F_j = n_j - 1$ $S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (X_{ij} - T_j)^2}{n_j - 1}$ $T_j = \frac{\sum_{i=1}^k X_{ij}}{n_j}$ $S_j = \sqrt{\frac{1}{n_j - 1} \left(\sum_{i=1}^k X_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k X_{ij})^2}{n_j} \right)}$ $B = \frac{2.303}{c} \left(\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^k X_{ij} - T_j \right)$ $B \leq Z_{1-\alpha/2}(n_j - 1)$	При його застосуванні не вимагається рівне число ступенів вільності дисперсій (тобто вибірки можуть бути різного об'єму), критерій ідентифікує двохстороннє відхилення, як в найменшу так і в найбільшу сторону	використовується для перевірки гіпотези про відворуваність дослідів в тих випадках, коли маємо результати декількох серій паралельних дослідів, однак число дослідів в цих серіях різне [39,100].	<ul style="list-style-type: none"> - кількість розрахунків; - число ступенів вільності будь-якої дисперсії повинне бути більше трьох; - критерій дуже чутливий до відхилення від нормального розподілу даних.
Критерій Фішера	$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$ $s_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2$ $s_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k Y_i^2$	За результатами розрахунків у випадку, коли $F_j < F_{\alpha}$ робимо висновок, що відмінність між групами генеральних і значущою і вибірки належить до однієї генеральної сукупності, у випадку, коли ж $F_j > F_{\alpha}$, то це відмінність вважаємо суттєвою та, відповідно, ці вибірки належать до різних генеральних сукупностей.	використовується для перевірки гіпотези про відворуваність дослідів в тих випадках, коли мова йде про однофакторний дисперсійний аналіз	- вказується вимога необхідності нормального закону розподілу величин, як і в попередніх випадках.

Протокол метрологічних досліджень турбінного лічильника на природному газі

```

-----
Початок Вимірювання: -----02.12.2011-----
Еталон: #2, DELTA G250 (#2); (ro=0,7080, N2=0,7170, CO2=0,2560
Робочий лічильник: ЛГК (Промприлад)-160, №6895, секція № 1
12:43:35 -> Очікування НЧ імпульсу від робочого лічильника...
-----
Початок Вимірювання: -----02.12.2011-----
Еталон: #2, DELTA G250 (#2); (ro=0,7080, N2=0,7170, CO2=0,2560
Робочий лічильник: ЛГК (Промприлад)-160, №6895, секція № 1
12:45:46 -> Очікування НЧ імпульсу від робочого лічильника...
12:46:12
12:46:12
12:46:12
12:46:12 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
12:46:13 Te=0.00 Pe=101.983347 Tl=0.00 Pl=101.921836 Q=51.956568
12:46:16 Te=15.44 Pe=101.971104 Tl=16.57 Pl=101.909160 Q=51.905416
12:46:19 Te=15.43 Pe=101.966073 Tl=16.56 Pl=101.904096 Q=51.981232
12:46:22 Te=15.42 Pe=101.966073 Tl=16.57 Pl=101.903843 Q=51.866647
12:46:26 Te=15.44 Pe=101.988246 Tl=16.56 Pl=101.925909 Q=51.686114
12:46:29 Te=15.42 Pe=102.007570 Tl=16.56 Pl=101.946108 Q=51.810957
12:46:32 Te=15.43 Pe=102.011242 Tl=16.56 Pl=101.949346 Q=51.893590
12:46:35 Te=15.44 Pe=102.011921 Tl=16.55 Pl=101.949936 Q=51.801530
12:46:38 Te=15.43 Pe=102.014091 Tl=16.56 Pl=101.951468 Q=51.983605
12:46:42 Te=15.43 Pe=102.006473 Tl=16.55 Pl=101.943908 Q=51.839731
12:46:45 Te=15.41 Pe=102.002253 Tl=16.55 Pl=101.940591 Q=51.877043
12:46:48 Te=15.41 Pe=102.002396 Tl=16.55 Pl=101.947583 Q=51.732347
12:46:52 Te=15.41 Pe=102.000894 Tl=16.55 Pl=101.938406 Q=51.867591
12:46:55 Te=15.41 Pe=102.007022 Tl=16.55 Pl=101.955310 Q=51.952775
12:46:58 Te=15.41 Pe=102.013411 Tl=16.56 Pl=101.959998 Q=51.911568
12:47:01 Te=15.41 Pe=102.000894 Tl=16.56 Pl=101.939622 Q=51.933821
12:47:04 Te=15.40 Pe=102.000894 Tl=16.56 Pl=101.940534 Q=51.943297
12:47:08 Te=15.41 Pe=101.996817 Tl=16.56 Pl=101.926597 Q=51.983605
12:47:11 Te=15.40 Pe=101.995590 Tl=16.54 Pl=101.918266 Q=51.971743
12:47:14 Te=15.40 Pe=102.003887 Tl=16.56 Pl=101.938468 Q=51.983605
12:47:17 Te=15.40 Pe=102.024438 Tl=16.55 Pl=101.944700 Q=51.794933
12:47:20 Te=15.41 Pe=102.000894 Tl=16.54 Pl=101.938631 Q=51.924350
12:47:24 Te=15.39 Pe=102.000894 Tl=16.54 Pl=101.938901 Q=51.830765
12:47:27 Te=15.39 Pe=101.990428 Tl=16.55 Pl=101.938280 Q=52.010671
12:47:30 Te=15.38 Pe=101.978996 Tl=16.55 Pl=101.938509 Q=51.886497
12:47:33 Te=15.36 Pe=102.000215 Tl=16.54 Pl=101.930702 Q=52.019699
12:47:36 Te=15.38 Pe=101.996949 Tl=16.56 Pl=101.924120 Q=51.867591
12:47:39 Te=15.39 Pe=101.998582 Tl=16.55 Pl=101.916158 Q=51.848700
12:47:43 Te=15.38 Pe=102.000894 Tl=16.51 Pl=101.938770 Q=51.820388
12:47:46 Te=15.37 Pe=101.991238 Tl=16.51 Pl=101.936338 Q=51.905416
12:47:49 Te=15.39 Pe=101.966073 Tl=16.53 Pl=101.903687 Q=51.914881
12:47:52 Te=15.40 Pe=101.966073 Tl=16.58 Pl=101.903900 Q=51.759151
12:47:55 Te=15.40 Pe=101.966073 Tl=16.57 Pl=101.904178 Q=51.924350
12:47:59 Te=15.41 Pe=101.972332 Tl=16.50 Pl=101.905012 Q=51.688673
12:48:02 Te=15.37 Pe=101.966073 Tl=16.56 Pl=101.904129 Q=52.010671
12:48:05 Te=15.40 Pe=101.981857 Tl=16.52 Pl=101.904186 Q=51.801530
12:48:08 Te=15.38 Pe=101.994505 Tl=16.54 Pl=101.925479 Q=51.893590
12:48:11 Te=15.37 Pe=101.986744 Tl=16.56 Pl=101.935766 Q=51.705570
12:48:15 Te=15.37 Pe=102.003624 Tl=16.55 Pl=101.940505 Q=51.803887
12:48:18 Te=15.38 Pe=102.024569 Tl=16.53 Pl=101.960177 Q=51.598740
12:48:21 Te=15.36 Pe=102.020492 Tl=16.56 Pl=101.953923 Q=51.895955
12:48:24 Te=15.38 Pe=101.995733 Tl=16.54 Pl=101.936408 Q=51.820388
12:48:28 -> Отримано кінцевий імпульс( №2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
12:48:28 Номер робочого еталону, Etalon= 2
12:48:28 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1711 (864.91
імпл/м3 )
12:48:28 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=101.994 кПа
12:48:28 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=15.40 град. С

```

12:48:28 Номер робочого лічильника, Lich= 1
 12:48:28 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nI1= 2 (1.00 імп/м3)
 12:48:28 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.931 кПа
 12:48:28 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 16.55 град.С
 12:48:28 -> Обчислено:
 12:48:28 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02327 м3
 12:48:28 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99988926
 12:48:28 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.03610 м3
 12:48:28 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99992119
 12:48:28 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.63 %
 12:48:28 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 51.887

12:49:38
 12:49:38
 12:49:38
 12:49:38 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...

12:49:39	Te=15.37	Pe=101.966073	Tl=16.53	Pl=101.903965	Q=51.803887
12:49:42	Te=15.35	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.905086	Q=52.028730
12:49:45	Te=15.36	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.904055	Q=51.983605
12:49:49	Te=15.35	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.904268	Q=51.792107
12:49:52	Te=15.36	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.904162	Q=51.992624
12:49:55	Te=15.35	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.903802	Q=51.829821
12:49:59	Te=15.35	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.904456	Q=51.952775
12:50:02	Te=15.34	Pe=101.963355	Tl=16.54	Pl=101.900814	Q=52.009720
12:50:05	Te=15.36	Pe=101.931920	Tl=16.54	Pl=101.870057	Q=51.990725
12:50:09	Te=15.34	Pe=101.937773	Tl=16.54	Pl=101.883135	Q=51.886497
12:50:12	Te=15.34	Pe=101.964846	Tl=16.55	Pl=101.899828	Q=51.886497
12:50:15	Te=15.35	Pe=101.944437	Tl=16.54	Pl=101.878710	Q=52.082983
12:50:18	Te=15.33	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.901591	Q=51.895955
12:50:21	Te=15.34	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.904129	Q=51.911568
12:50:25	Te=15.34	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.910183	Q=51.785983
12:50:30	Te=15.34	Pe=101.971915	Tl=16.52	Pl=101.909970	Q=51.848700
12:50:34	Te=15.34	Pe=101.967432	Tl=16.53	Pl=101.905112	Q=52.146421
12:50:37	Te=15.34	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.903949	Q=51.914881
12:50:40	Te=15.33	Pe=101.960494	Tl=16.54	Pl=101.899106	Q=52.073933
12:50:44	Te=15.34	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.904293	Q=51.785983
12:50:47	Te=15.34	Pe=101.959672	Tl=16.54	Pl=101.899319	Q=51.895955
12:50:50	Te=15.34	Pe=101.964440	Tl=16.55	Pl=101.890892	Q=51.839731
12:50:53	Te=15.34	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.903851	Q=51.911568
12:50:56	Te=15.33	Pe=101.970556	Tl=16.56	Pl=101.904170	Q=51.839259
12:51:00	Te=15.34	Pe=101.969340	Tl=16.55	Pl=101.905934	Q=52.028730
12:51:03	Te=15.33	Pe=101.967838	Tl=16.55	Pl=101.926417	Q=51.905416
12:51:06	Te=15.33	Pe=101.959672	Tl=16.54	Pl=101.908899	Q=51.914881
12:51:09	Te=15.34	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.901719	Q=51.983605
12:51:12	Te=15.34	Pe=101.964440	Tl=16.55	Pl=101.904129	Q=51.839259
12:51:16	Te=15.32	Pe=101.956549	Tl=16.55	Pl=101.893917	Q=51.839259
12:51:19	Te=15.32	Pe=101.944580	Tl=16.55	Pl=101.882439	Q=51.886497
12:51:22	Te=15.33	Pe=101.931240	Tl=16.54	Pl=101.869116	Q=51.895955
12:51:26	Te=15.33	Pe=101.931240	Tl=16.56	Pl=101.869860	Q=51.812843
12:51:29	Te=15.31	Pe=101.941850	Tl=16.56	Pl=101.879709	Q=51.962258
12:51:32	Te=15.32	Pe=101.960494	Tl=16.54	Pl=101.898215	Q=51.867591
12:51:35	Te=15.32	Pe=101.957228	Tl=16.56	Pl=101.895439	Q=51.820388
12:51:38	Te=15.33	Pe=101.965799	Tl=16.54	Pl=101.903569	Q=51.782686
12:51:41	Te=15.33	Pe=101.966073	Tl=16.53	Pl=101.904129	Q=51.974590
12:51:45	Te=15.32	Pe=101.992872	Tl=16.55	Pl=101.930813	Q=51.895955
12:51:48	Te=15.33	Pe=101.972058	Tl=16.54	Pl=101.909917	Q=51.933821
12:51:51	Te=15.31	Pe=101.966073	Tl=16.54	Pl=101.904129	Q=51.678821

12:51:54 -> Отримано кінцевий імпульс(№2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
 12:51:54 Номер робочого еталону, Etalon= 2
 12:51:54 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1711 (864.91 імп/м3)
 12:51:54 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=101.961 кПа
 12:51:54 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=15.34 град. С
 12:51:54 Номер робочого лічильника, Lich= 1

12:51:54 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nI1= 2 (1.00 імп/м3)
 12:51:54 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.899 кПа
 12:51:54 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 16.54 град.С
 12:51:54 -> Обчислено:
 12:51:54 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02308 м3
 12:51:54 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99988822
 12:51:54 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.03549 м3
 12:51:54 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99992173
 12:51:54 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.61 %
 12:51:54 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 51.905

12:53:03
 12:53:03
 12:53:03 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...

12:53:04	Te=15.31	Pe=101.942673	Tl=16.54	Pl=101.880565	Q=51.714492
12:53:08	Te=15.31	Pe=101.934781	Tl=16.55	Pl=101.872591	Q=51.902578
12:53:11	Te=15.30	Pe=101.931515	Tl=16.55	Pl=101.869096	Q=51.829821
12:53:14	Te=15.30	Pe=101.931240	Tl=16.54	Pl=101.868699	Q=51.974590
12:53:17	Te=15.31	Pe=101.931240	Tl=16.56	Pl=101.869615	Q=52.101092
12:53:20	Te=15.30	Pe=101.931240	Tl=16.55	Pl=101.868863	Q=51.952775
12:53:24	Te=15.30	Pe=101.931240	Tl=16.55	Pl=101.868732	Q=51.929559
12:53:27	Te=15.30	Pe=101.965251	Tl=16.54	Pl=101.902652	Q=51.875625
12:53:30	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.58	Pl=101.903777	Q=52.009720
12:53:33	Te=15.28	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903475	Q=51.992624
12:53:36	Te=15.29	Pe=101.940765	Tl=16.55	Pl=101.878535	Q=52.119215
12:53:40	Te=15.31	Pe=101.931240	Tl=16.56	Pl=101.869083	Q=51.877043
12:53:43	Te=15.31	Pe=101.920762	Tl=16.57	Pl=101.859055	Q=52.101092
12:53:46	Te=15.30	Pe=101.919546	Tl=16.55	Pl=101.857618	Q=51.839731
12:53:49	Te=15.30	Pe=101.930966	Tl=16.54	Pl=101.868785	Q=51.971743
12:53:52	Te=15.30	Pe=101.962402	Tl=16.57	Pl=101.899787	Q=52.009720
12:53:56	Te=15.31	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903753	Q=51.820388
12:53:59	Te=15.30	Pe=101.961305	Tl=16.55	Pl=101.898919	Q=51.886497
12:54:02	Te=15.30	Pe=101.954641	Tl=16.55	Pl=101.892918	Q=51.829821
12:54:05	Te=15.29	Pe=101.963487	Tl=16.55	Pl=101.901665	Q=51.877043
12:54:08	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903835	Q=51.810957
12:54:12	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.903508	Q=51.933821
12:54:15	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903696	Q=51.877043
12:54:18	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903998	Q=51.886497
12:54:21	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.904440	Q=51.723418
12:54:24	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.55	Pl=101.902853	Q=52.037764
12:54:28	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903712	Q=51.745040
12:54:31	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.904129	Q=51.933821
12:54:34	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903990	Q=51.812843
12:54:37	Te=15.30	Pe=101.959267	Tl=16.56	Pl=101.897110	Q=52.019223
12:54:40	Te=15.30	Pe=101.962807	Tl=16.56	Pl=101.900953	Q=51.741278
12:54:43	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.57	Pl=101.903279	Q=51.902578
12:54:47	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.904039	Q=51.943297
12:54:50	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.904178	Q=52.046802
12:54:53	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.57	Pl=101.903957	Q=52.037764
12:54:56	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.904456	Q=51.678821
12:55:00	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903679	Q=51.886497
12:55:03	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903859	Q=51.794933
12:55:06	Te=15.30	Pe=101.966073	Tl=16.57	Pl=101.903655	Q=52.037764
12:55:09	Te=15.28	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.904203	Q=51.867591
12:55:13	Te=15.29	Pe=101.962259	Tl=16.56	Pl=101.903172	Q=52.019699
12:55:17	Te=15.29	Pe=101.966073	Tl=16.56	Pl=101.903843	Q=51.785983

12:55:20 -> Отримано кінцевий імпульс(№2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
 12:55:20 Номер робочого еталону, Etalon= 2
 12:55:20 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1710 (864.91 імп/м3)
 12:55:20 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=101.955 кПа
 12:55:20 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=15.30 град. С
 12:55:20 Номер робочого лічильника, Lich= 1

12:55:20 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nI1= 2 (1.00 імп/м3)
 12:55:20 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.893 кПа
 12:55:20 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 16.56 град.С
 12:55:20 -> Обчислено:
 12:55:20 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02205 м3
 12:55:20 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99988730
 12:55:20 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.03526 м3
 12:55:20 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99992226
 12:55:20 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.65 %
 12:55:20 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 51.902
 12:55:20

----- Початок Вимірювання: -----02.12.2011-----

13:00:26 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
 13:00:29 Te=14.80 Pe=102.140214 T1=16.40 P1=101.955306 Q=100.092970
 13:00:32 Te=14.79 Pe=102.137210 T1=16.40 P1=101.951206 Q=100.145586
 13:00:35 Te=14.79 Pe=102.115312 T1=16.40 P1=101.929307 Q=100.110502
 13:00:39 Te=14.79 Pe=102.107015 T1=16.40 P1=101.922228 Q=100.232452
 13:00:42 Te=14.79 Pe=102.080896 T1=16.39 P1=101.895366 Q=100.163136
 13:00:45 Te=14.77 Pe=102.101436 T1=16.41 P1=101.915709 Q=100.106237
 13:00:48 Te=14.78 Pe=102.088513 T1=16.40 P1=101.901846 Q=100.088232
 13:00:52 Te=14.77 Pe=102.080347 T1=16.38 P1=101.894065 Q=100.124248
 13:00:55 Te=14.77 Pe=102.070548 T1=16.39 P1=101.885918 Q=100.214401
 13:00:58 Te=14.75 Pe=102.035727 T1=16.39 P1=101.850238 Q=100.250508
 13:01:02 Te=14.76 Pe=102.057769 T1=16.39 P1=101.872263 Q=100.163136
 13:01:05 Te=14.76 Pe=102.054777 T1=16.39 P1=101.869827 Q=100.128041
 13:01:08 Te=14.76 Pe=102.070548 T1=16.39 P1=101.884871 Q=100.110502
 13:01:12 Te=14.75 Pe=102.070548 T1=16.39 P1=101.885983 Q=100.057923
 13:01:15 Te=14.75 Pe=102.093270 T1=16.38 P1=101.899824 Q=100.124248
 13:01:19 Te=14.74 Pe=102.105381 T1=16.39 P1=101.918099 Q=100.106237
 13:01:22 Te=14.74 Pe=102.105381 T1=16.39 P1=101.919532 Q=100.214401
 13:01:25 Te=14.73 Pe=102.105381 T1=16.39 P1=101.917001 Q=100.214401
 13:01:28 Te=14.73 Pe=102.105381 T1=16.38 P1=101.916941 Q=100.250508
 13:01:32 Te=14.73 Pe=102.105381 T1=16.38 P1=101.919426 Q=100.178321
 13:01:35 Te=14.73 Pe=102.070548 T1=16.39 P1=101.890654 Q=100.268571
 13:01:36 -> Отримано кінцевий імпульс(№2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
 13:01:36 Номер робочого еталону, Etalon= 2
 13:01:36 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1697 (861.69
 імп/м3)
 13:01:36 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.089 кПа
 13:01:36 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=14.76 град. С
 13:01:36 Номер робочого лічильника, Lich= 1
 13:01:36 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nI1= 2 (1.00 імп/м3)
 13:01:36 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.904 кПа
 13:01:36 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 16.39 град.С
 13:01:36 -> Обчислено:
 13:01:36 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02062 м3
 13:01:36 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99986994
 13:01:36 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.03665 м3
 13:01:36 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99991765
 13:01:36 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.79 %
 13:01:36 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 100.170
 13:01:36

13:02:12
 13:02:12
 13:02:12

13:02:12 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
 13:02:13 Te=14.73 Pe=102.093949 T1=16.38 P1=101.886163 Q=100.160290
 13:02:16 Te=14.70 Pe=102.052047 T1=16.37 P1=101.866525 Q=100.160290
 13:02:19 Te=14.68 Pe=102.070548 T1=16.37 P1=101.884536 Q=100.178321
 13:02:22 Te=14.69 Pe=102.070548 T1=16.37 P1=101.886138 Q=100.178321
 13:02:26 Te=14.69 Pe=102.070548 T1=16.36 P1=101.883972 Q=100.268571
 13:02:29 Te=14.68 Pe=102.041438 T1=16.37 P1=101.855973 Q=100.180694
 13:02:33 Te=14.67 Pe=102.035727 T1=16.37 P1=101.848872 Q=100.250983
 13:02:36 Te=14.67 Pe=102.035727 T1=16.36 P1=101.849150 Q=100.080386

13:02:39 Te=14.67 Pe=102.035727 Tl=16.36 Pl=101.849429 Q=100.145586
13:02:43 Te=14.67 Pe=102.035727 Tl=16.37 Pl=101.849568 Q=100.340889
13:02:47 Te=14.66 Pe=102.035727 Tl=16.35 Pl=101.850214 Q=100.196358
13:02:50 Te=14.65 Pe=102.003624 Tl=16.36 Pl=101.818200 Q=100.215826
13:02:53 Te=14.65 Pe=102.030148 Tl=16.37 Pl=101.843809 Q=100.160290
13:02:57 Te=14.65 Pe=102.026477 Tl=16.36 Pl=101.839622 Q=100.160290
13:03:00 Te=14.64 Pe=102.035727 Tl=16.37 Pl=101.850017 Q=100.160290
13:03:04 Te=14.64 Pe=102.005663 Tl=16.35 Pl=101.846953 Q=100.303766
13:03:07 Te=14.64 Pe=102.035584 Tl=16.35 Pl=101.833702 Q=100.092970
13:03:10 Te=14.64 Pe=102.035727 Tl=16.36 Pl=101.850279 Q=100.040409
13:03:14 Te=14.64 Pe=102.052870 Tl=16.35 Pl=101.849690 Q=100.092970
13:03:17 Te=14.64 Pe=102.070548 Tl=16.36 Pl=101.884339 Q=100.088232
13:03:20 Te=14.63 Pe=102.070548 Tl=16.36 Pl=101.884209 Q=100.070234
13:03:22 -> Отримано кінцевий імпульс(№2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:03:22 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:03:22 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1700 (861.69
імп/м3)
13:03:22 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.043 кПа
13:03:22 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=14.66 град. С
13:03:22 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:03:22 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 2 (1.00 імп/м3)
13:03:22 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.857 кПа
13:03:22 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 16.36 град.С
13:03:22 -> Обчислено:
13:03:22 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02399 м3
13:03:22 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99986818
13:03:22 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.03594 м3
13:03:22 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99991783
13:03:22 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.59 %
13:03:22 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 100.178
13:03:22
13:03:59
13:03:59
13:03:59
13:03:59 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
13:04:00 Te=14.60 Pe=102.070548 Tl=16.35 Pl=101.884822 Q=100.109667
13:04:03 Te=14.59 Pe=102.071371 Tl=16.33 Pl=101.891551 Q=100.075443
13:04:06 Te=14.58 Pe=102.070548 Tl=16.34 Pl=101.884977 Q=100.180694
13:04:10 Te=14.59 Pe=102.062800 Tl=16.35 Pl=101.883996 Q=100.233402
13:04:13 Te=14.58 Pe=102.070548 Tl=16.33 Pl=101.885975 Q=100.163136
13:04:16 Te=14.59 Pe=102.068784 Tl=16.33 Pl=101.884503 Q=100.180694
13:04:19 Te=14.59 Pe=102.070548 Tl=16.33 Pl=101.884445 Q=100.075443
13:04:23 Te=14.58 Pe=102.084699 Tl=16.33 Pl=101.885206 Q=100.092970
13:04:26 Te=14.57 Pe=102.105250 Tl=16.34 Pl=101.903790 Q=100.110502
13:04:29 Te=14.58 Pe=102.100887 Tl=16.34 Pl=101.918535 Q=100.016278
13:04:33 Te=14.58 Pe=102.105381 Tl=16.32 Pl=101.919933 Q=99.980340
13:04:36 Te=14.58 Pe=102.071776 Tl=16.34 Pl=101.893544 Q=100.198257
13:04:39 Te=14.57 Pe=102.070548 Tl=16.33 Pl=101.883942 Q=100.233402
13:04:42 Te=14.56 Pe=102.066603 Tl=16.34 Pl=101.858850 Q=100.165837
13:04:46 Te=14.56 Pe=102.068784 Tl=16.34 Pl=101.884691 Q=100.268571
13:04:49 Te=14.55 Pe=102.054634 Tl=16.32 Pl=101.878408 Q=100.321372
13:04:52 Te=14.55 Pe=102.038720 Tl=16.33 Pl=101.850917 Q=100.303766
13:04:56 Te=14.56 Pe=102.070548 Tl=16.33 Pl=101.881028 Q=100.106237
13:04:59 Te=14.55 Pe=102.051237 Tl=16.32 Pl=101.884503 Q=100.232452
13:05:02 Te=14.55 Pe=102.035727 Tl=16.32 Pl=101.850223 Q=100.178321
13:05:06 Te=14.54 Pe=102.036812 Tl=16.33 Pl=101.850979 Q=100.286165
13:05:08 -> Отримано кінцевий імпульс(№2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:05:08 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:05:08 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1697 (861.69
імп/м3)
13:05:08 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.067 кПа
13:05:08 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=14.57 град. С
13:05:08 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:05:08 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 2 (1.00 імп/м3)

13:05:08 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.882 кПа
 13:05:08 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 16.33 град.С
 13:05:08 -> Обчислено:
 13:05:08 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02154 м3
 13:05:08 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99986521
 13:05:08 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.03665 м3
 13:05:08 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99991650
 13:05:08 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.75 %
 13:05:08 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 100.167
 13:05:08

----- Початок Вимірювання: -----02.12.2011-----

Еталон: #2, DELTA G250 (#2); (ro=0,7080, N2=0,7170, CO2=0,2560

Робочий лічильник: ЛГК (Промприлад)-160, №6895, секція № 1

13:13:40 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...

13:13:43	Te=13.56	Pe=102.349176	Tl=15.92	P1=101.929884	Q=150.269212
13:13:46	Te=13.56	Pe=102.349176	Tl=15.92	P1=101.930522	Q=150.269212
13:13:49	Te=13.54	Pe=102.349176	Tl=15.92	P1=101.928789	Q=150.166276
13:13:53	Te=13.54	Pe=102.347412	Tl=15.91	P1=101.929690	Q=150.430243
13:13:56	Te=13.54	Pe=102.349176	Tl=15.91	P1=101.928699	Q=150.269212
13:13:59	Te=13.54	Pe=102.349176	Tl=15.91	P1=101.929950	Q=150.322851
13:14:02	Te=13.52	Pe=102.349176	Tl=15.91	P1=101.928609	Q=150.215611
13:14:06	Te=13.52	Pe=102.349176	Tl=15.91	P1=101.930817	Q=150.242407
13:14:09	Te=13.53	Pe=102.349176	Tl=15.91	P1=101.931373	Q=150.108525
13:14:12	Te=13.52	Pe=102.349176	Tl=15.91	P1=101.930694	Q=150.242407
13:14:16	Te=13.50	Pe=102.349176	Tl=15.90	P1=101.929639	Q=150.166276
13:14:19	Te=13.50	Pe=102.365913	Tl=15.91	P1=101.949843	Q=150.215611
13:14:22	Te=13.50	Pe=102.383997	Tl=15.90	P1=101.966349	Q=150.113688
13:14:25	Te=13.49	Pe=102.369037	Tl=15.89	P1=101.952116	Q=150.271564

13:14:26 -> Отримано кінцевий імпульс(№2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:

13:14:26 Номер робочого еталону, Etalon= 2

13:14:26 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1692 (861.68
 імп/м3)

13:14:26 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.354 кПа

13:14:26 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=13.52 град. С

13:14:26 Номер робочого лічильника, Lich= 1

13:14:26 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 2 (1.00 імп/м3)

13:14:26 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.935 кПа

13:14:26 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 15.91 град.С

13:14:26 -> Обчислено:

13:14:26 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02871 м3

13:14:26 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99983024

13:14:26 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.04072 м3

13:14:26 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99990410

13:14:26 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.59 %

13:14:26 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 150.243

13:14:26

13:14:50

13:14:50

13:14:50

13:14:50 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...

13:14:52 Te=13.48 Pe=102.349176 Tl=15.87 P1=101.928388 Q=150.108525

13:14:55 Te=13.45 Pe=102.349176 Tl=15.88 P1=101.930293 Q=150.242407

13:14:58 Te=13.45 Pe=102.349176 Tl=15.87 P1=101.930293 Q=150.349684

13:15:02 Te=13.44 Pe=102.349176 Tl=15.87 P1=101.928658 Q=150.297908

13:15:05 Te=13.44 Pe=102.314343 Tl=15.86 P1=101.892893 Q=150.324263

13:15:09 Te=13.44 Pe=102.279522 Tl=15.86 P1=101.859028 Q=150.376999

13:15:12 Te=13.44 Pe=102.279522 Tl=15.86 P1=101.860214 Q=150.324263

13:15:15 Te=13.44 Pe=102.286186 Tl=15.86 P1=101.875240 Q=150.349684

13:15:18 Te=13.41 Pe=102.293804 Tl=15.86 P1=101.863693 Q=150.430243

13:15:22 Te=13.42 Pe=102.279522 Tl=15.87 P1=101.858505 Q=150.429772

13:15:25 Te=13.42 Pe=102.279522 Tl=15.85 P1=101.859625 Q=150.376999

13:15:28 Te=13.41 Pe=102.279522 Tl=15.85 P1=101.860419 Q=150.430243

13:15:32 Te=13.40 Pe=102.279522 Tl=15.85 P1=101.858546 Q=150.403381

13:15:35 Te=13.40 Pe=102.279522 Tl=15.85 P1=101.859495 Q=150.430243

```

13:15:36 -> Отримано кінцевий імпульс( №2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:15:36 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:15:36 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1690 (861.68
імп/м3 )
13:15:36 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.302 кПа
13:15:36 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=13.43 град. С
13:15:36 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:15:36 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 2 ( 1.00 імп/м3 )
13:15:36 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.884 кПа
13:15:36 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 15.86 град.С
13:15:36 -> Обчислено:
13:15:36 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02593 м3
13:15:36 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99982885
13:15:36 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.04001 м3
13:15:36 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99990400
13:15:36 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.70 %
13:15:36 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 150.340
13:16:01
13:16:01
13:16:01 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
13:16:02 Te=13.37 Pe=102.279522 Tl=15.85 Pl=101.859282 Q=150.287775
13:16:06 Te=13.36 Pe=102.279522 Tl=15.82 Pl=101.860386 Q=150.245228
13:16:09 Te=13.35 Pe=102.279522 Tl=15.84 Pl=101.859347 Q=150.296026
13:16:12 Te=13.36 Pe=102.279522 Tl=15.82 Pl=101.858734 Q=150.349684
13:16:15 Te=13.35 Pe=102.279522 Tl=15.82 Pl=101.859503 Q=150.215611
13:16:19 Te=13.35 Pe=102.279522 Tl=15.83 Pl=101.861539 Q=150.242407
13:16:23 Te=13.34 Pe=102.314069 Tl=15.81 Pl=101.895350 Q=150.297908
13:16:26 Te=13.33 Pe=102.314343 Tl=15.82 Pl=101.896687 Q=150.215611
13:16:29 Te=13.33 Pe=102.314343 Tl=15.82 Pl=101.895207 Q=150.215611
13:16:32 Te=13.32 Pe=102.348902 Tl=15.82 Pl=101.932513 Q=150.192584
13:16:36 Te=13.32 Pe=102.349176 Tl=15.80 Pl=101.930400 Q=150.081777
13:16:39 Te=13.31 Pe=102.349176 Tl=15.81 Pl=101.928838 Q=150.028310
13:16:42 Te=13.32 Pe=102.349176 Tl=15.82 Pl=101.931127 Q=150.215611
13:16:46 Te=13.31 Pe=102.349176 Tl=15.81 Pl=101.929933 Q=150.162049
13:16:47 -> Отримано кінцевий імпульс( №2) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:16:47 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:16:47 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 1690 (861.68
імп/м3 )
13:16:47 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.311 кПа
13:16:47 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=13.34 град. С
13:16:47 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:16:47 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 2 ( 1.00 імп/м3 )
13:16:47 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.892 кПа
13:16:47 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 15.82 град.С
13:16:47 -> Обчислено:
13:16:47 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 2.02678 м3
13:16:47 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99982607
13:16:47 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 2.04049 м3
13:16:47 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99990267
13:16:47 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.68 %
13:16:47 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 150.219
3:23:07
13:23:07 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
13:23:08 Te=12.17 Pe=102.871587 Tl=15.11 Pl=101.853835 Q=247.305038
13:23:12 Te=12.17 Pe=102.871587 Tl=15.10 Pl=101.850466 Q=247.134313
13:23:15 Te=12.17 Pe=102.871587 Tl=15.10 Pl=101.854048 Q=247.177799
13:23:18 Te=12.14 Pe=102.871587 Tl=15.10 Pl=101.851815 Q=247.261034
13:23:22 Te=12.14 Pe=102.858534 Tl=15.10 Pl=101.854072 Q=247.261034
13:23:25 Te=12.14 Pe=102.836766 Tl=15.10 Pl=101.826152 Q=247.308351
13:23:28 Te=12.12 Pe=102.836766 Tl=15.08 Pl=101.820609 Q=247.177799
13:23:31 Te=12.12 Pe=102.866008 Tl=15.09 Pl=101.837687 Q=247.217045
13:23:35 Te=12.12 Pe=102.839484 Tl=15.09 Pl=101.823379 Q=247.261034

```



```

13:23:38 Te=12.11 Pe=102.871587 Tl=15.06 Pl=101.852300 Q=246.909561
13:23:41 Te=12.11 Pe=102.871587 Tl=15.06 Pl=101.853345 Q=247.034972
13:23:45 Te=12.08 Pe=102.871587 Tl=15.05 Pl=101.856067 Q=247.217045
13:23:48 Te=12.08 Pe=102.871587 Tl=15.03 Pl=101.853058 Q=247.264818
13:23:49 -> Отримано кінцевий імпульс( №3) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:23:49 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:23:49 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 2505 (858.03
імп/м3 )
13:23:49 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.862 кПа
13:23:49 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=12.13 град. С
13:23:49 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:23:49 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 3 ( 1.00 імп/м3 )
13:23:49 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.843 кПа
13:23:49 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 15.08 град.С
13:23:49 -> Обчислено:
13:23:49 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 3.04622 м3
13:23:49 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99977999
13:23:49 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 3.06713 м3
13:23:49 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99988401
13:23:49 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.69 %
13:23:49 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 247.206
13:23:49
13:24:04
13:24:04
13:24:04 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
13:24:04 Te=12.04 Pe=102.895131 Tl=15.03 Pl=101.851644 Q=247.225467
13:24:08 Te=12.03 Pe=102.871587 Tl=15.02 Pl=101.853541 Q=247.173072
13:24:11 Te=12.04 Pe=102.871587 Tl=15.01 Pl=101.851529 Q=247.221301
13:24:14 Te=12.03 Pe=102.871587 Tl=15.02 Pl=101.853451 Q=247.221301
13:24:18 Te=12.01 Pe=102.871587 Tl=15.00 Pl=101.855683 Q=247.177799
13:24:21 Te=12.02 Pe=102.871587 Tl=15.00 Pl=101.856624 Q=247.041246
13:24:24 Te=12.01 Pe=102.871587 Tl=14.99 Pl=101.856509 Q=247.173072
13:24:27 Te=12.00 Pe=102.871587 Tl=14.97 Pl=101.852077 Q=247.003945
13:24:31 Te=12.00 Pe=102.871587 Tl=14.99 Pl=101.855413 Q=247.047385
13:24:34 Te=12.00 Pe=102.871587 Tl=14.98 Pl=101.855013 Q=247.186956
13:24:37 Te=11.98 Pe=102.871587 Tl=14.97 Pl=101.850916 Q=247.085172
13:24:40 Te=11.97 Pe=102.871587 Tl=14.96 Pl=101.854538 Q=247.217045
13:24:44 Te=11.97 Pe=102.871587 Tl=14.96 Pl=101.854931 Q=247.177799
13:24:45 -> Отримано кінцевий імпульс( №3) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:24:45 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:24:45 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 2508 (858.03
імп/м3 )
13:24:45 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.872 кПа
13:24:45 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=12.01 град. С
13:24:45 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:24:45 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 3 ( 1.00 імп/м3 )
13:24:45 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.855 кПа
13:24:45 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 14.99 град.С
13:24:45 -> Обчислено:
13:24:45 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 3.05149 м3
13:24:45 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99977634
13:24:45 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 3.06849 м3
13:24:45 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99988125
13:24:45 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.56 %
13:24:45 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 247.145
13:24:45
13:25:00
13:25:00
13:25:00 -> Отримано стартовий імпульс від роб. лічильника, починаю збір даних...
13:25:00 Te=11.93 Pe=102.871587 Tl=14.96 Pl=101.852977 Q=247.134313
13:25:03 Te=11.92 Pe=102.871587 Tl=14.94 Pl=101.853075 Q=247.085172
13:25:07 Te=11.92 Pe=102.871587 Tl=14.93 Pl=101.855585 Q=247.085172

```

13:25:10 Te=11.90 Pe=102.904918 Tl=14.94 Pl=101.863255 Q=247.016747
13:25:13 Te=11.91 Pe=102.880564 Tl=14.92 Pl=101.888570 Q=247.047385
13:25:17 Te=11.90 Pe=102.903154 Tl=14.91 Pl=101.886774 Q=246.997336
13:25:20 Te=11.89 Pe=102.906420 Tl=14.91 Pl=101.890369 Q=246.909561
13:25:23 Te=11.89 Pe=102.906420 Tl=14.91 Pl=101.889960 Q=247.047385
13:25:26 Te=11.88 Pe=102.906420 Tl=14.89 Pl=101.889232 Q=246.821849
13:25:30 Te=11.88 Pe=102.906420 Tl=14.91 Pl=101.887450 Q=246.967448
13:25:33 Te=11.86 Pe=102.890637 Tl=14.90 Pl=101.886215 Q=247.047385
13:25:36 Te=11.86 Pe=102.906825 Tl=14.88 Pl=101.885345 Q=247.085172
13:25:40 Te=11.86 Pe=102.929547 Tl=14.87 Pl=101.925501 Q=246.865697
13:25:42 -> Отримано кінцевий імпульс(№3) від роб. лічильника; зібрано такі дані:
13:25:42 Номер робочого еталону, Etalon= 2
13:25:42 Кількість імпульсів, отриманих з еталона, nIe= 2504 (858.03
імп/м3)
13:25:42 Тиск в еталоні протягом виміру, Pse=102.899 кПа
13:25:42 Температура в еталоні протягом виміру, Tse=11.89 град. С
13:25:42 Номер робочого лічильника, Lich= 1
13:25:42 Кількість імпульсів, отриманих з роб. лічильника, nIl= 3 (1.00 імп/м3)
13:25:42 Тиск в робочому лічильнику протягом виміру, Psl= 101.881 кПа
13:25:42 Температура в робочому лічильнику протягом виміру Tsl= 14.91 град.С
13:25:42 -> Обчислено:
13:25:42 Об'єм газу, пропущений через еталон, Ve= 3.04864 м3
13:25:42 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), еталон Ke= 0.99977249
13:25:42 Об'єм газу, пропущений через роб. лічильник, VL= 3.07017 м3
13:25:42 Коефіцієнт стисливості газу(GERG91), роб. ліч KL= 0.99987841
13:25:42 Відносна похибка робочого лічильника, Delta= 0.71 %
13:25:42 Витрата (сер. за вимір) м3/год, = 246.991

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.Ф. Голови управління
 ПАТ "Івано-Франківськгаз"
 Шульга В.А.
 "01" 04 2014р.

АКТ

апробації результатів дисертаційної роботи Ключко Н.Б. «Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу» представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія в складі начальника управління метрології – головного метролога ПАТ "Івано-Франківськгаз" Пруднікова Б.І., начальника відділу метрологічного забезпечення обліку газу ПАТ "Івано-Франківськгаз" Коляджина І.М., професора кафедри Інформаційно-вимірювальної техніки (ІВТ) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) Чеховського С.А., асистента кафедри ІВТ ІФНТУНГ Ключко Н.Б.

склали цей акт про таке:

1. У період з 27.03.2014р. по 28.03.2014р. комісія здійснила апробацію запропонованого алгоритму опрацювання результатів вимірювання об'ємної витрати природного газу турбінними лічильниками. Удосконалений алгоритм створений при виконанні дисертаційної роботи «Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу».
2. Робоча група провела експериментальні дослідження визначення коефіцієнта перетворення турбінних лічильників газу та розрахунок невизначеності результату вимірювання на середніх та низьких тисках роботи випробувальної установки, що працює на природному газі в умовах ПАТ "Івано-Франківськгаз". Результати подані у табл.1-2.
3. Комісія підтвердила адекватність та ефективність вдосконаленого алгоритму опрацювання результатів вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу, що дало змогу підвищити оцінку точності результатів вимірювання. Як видно із табл.1-2, відповідно до діючої методики розширена невизначеність становила $U_{0,95}(q_v = 50 \text{ м}^3/\text{год}) = 0,27\%$

Таблиця 1

Результати калібрування еталонного турбінного лічильника газу типорозміром G400 ($q_v = 50 \text{ м}^3/\text{год}$).

Задане значення об'ємної витрати $50 \text{ м}^3/\text{год}$		Номинальний коефіцієнт $27000 \text{ імпл}/\text{м}^3$											
P_a	P_E	P_I	T_E	T_I	N	I	q_v	q_n	V_K	P_E/P_I	T_I/T_E	V	K
98900	2393	2365	20,58	20,58	27982	6,960	52,09	52,10	0,100705	1,000277	1,00000	0,1007	277784,27
98900	2393	2367	20,59	20,48	27980	6,980	51,94	51,93	0,100705	1,000257	0,99963	0,1007	277873,96
98900	2393	2366	20,58	20,40	27923	7,030	51,57	51,55	0,100705	1,000267	0,99939	0,1007	277371,28
98900	2393	2365	20,57	20,34	27906	7,023	51,62	51,60	0,100705	1,000277	0,99922	0,1007	277246,90
98900	2393	2366	20,55	20,34	27905	7,200	50,35	50,33	0,100705	1,000267	0,99928	0,1007	277220,83
						$u_N(K), \%$	$u_N(N), \%$	0,0041					
						$u_B(V), \%$	$U(K), \%$	0,27					

Таблиця 2

Результати калібрування еталонного турбінного лічильника газу типорозміром G400 ($q_v = 200 \text{ м}^3/\text{год}$).

Задане значення об'ємної витрати $200 \text{ м}^3/\text{год}$		Номинальний коефіцієнт $27000 \text{ імпл}/\text{м}^3$											
P_a	P_E	P_I	T_E	T_I	N	I	q_v	q_n	V_K	P_E/P_I	T_I/T_E	V	K
98900	2393	2348	20,55	20,38	26898	1,830	198,11	198,08	0,100705	1,000444	0,99942	0,1007	267132,93
98900	2393	2349	20,53	20,28	26897	1,830	198,11	198,03	0,100705	1,000435	0,99915	0,1007	267198,48
98900	2393	2348	20,54	20,41	26900	1,820	199,20	199,20	0,100705	1,000444	0,99956	0,1007	267116,40
98900	2393	2348	20,51	20,45	26926	1,810	200,30	200,35	0,100705	1,000444	0,99980	0,1007	267310,84
98900	2393	2349	20,53	20,59	26982	1,840	197,03	197,16	0,100705	1,000435	1,00020	0,1008	267760,00
						$u_N(K), \%$	$u_N(N), \%$	0,0043					
						$u_B(V), \%$	$U(K), \%$	0,25					

та $U_{0.95}(q_v = 200 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,25\%$, а із врахуванням удосконаленого алгоритму $U_{0.95}(q_v = 50 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,267\%$ та $U_{0.95}(q_v = 200 \text{ м}^3 / \text{год}) = 0,232\%$, що дозволило зменшити розширену невизначеність на 1,1% при заданому значенні об'ємної витрати $50 \text{ м}^3 / \text{год}$ та на 7,2% при $200 \text{ м}^3 / \text{год}$ відносно результатів, отриманих за діючою методикою.

4. Впровадження запропонованого алгоритму опрацювання результатів вимірювання об'ємної витрати природного газу для метрологічних досліджень (калібрування, метрологічна атестація) турбінних лічильників дозволить підвищити оцінку точності та достовірність результатів вимірювання.

Головний метролог

ПАТ "Івано-Франківськгаз"

Б.І. Прудніков

Начальник відділу метрологічного забезпечення

обліку газу ПАТ "Івано-Франківськгаз"

І.М. Коляджин

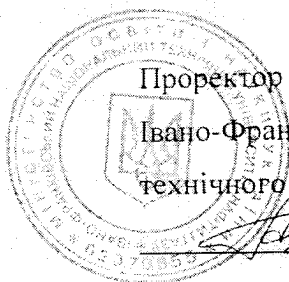
Завідувач кафедрою ІВТ, професор

С.А. Чеховський

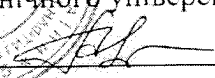
Асистент кафедри ІВТ

Н.Б. Клочко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор з науково-педагогічної роботи
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу


М.О. Галушак

ДОВІДКА

про використання у навчальному процесі наукових результатів дисертаційної роботи Клочко Н.Б. «Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу у навчальному процесі за напрямком підготовки «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» використовуються матеріали дисертаційної роботи аспіранта кафедри інформаційно-вимірювальної техніки Клочко Н.Б, а саме:

1. При вивченні дисципліни «Вимірювальний експеримент та обробка результатів» – теми: «Планування експерименту», «Обробка результатів багаторазових вимірювань», «Обробка результатів опосередкованих вимірювань» – методи статистичної обробки вимірювальної інформації.

2. При вивченні дисципліни «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади в нафтогазовій промисловості» – розділ «Вимірювання витрати», тема «Турбінні витратоміри» – фізичні основи роботи турбінних лічильників газу.

3. При вивченні дисципліни «Теоретичні основи метрологічного забезпечення витратовимірювання» – теми: «Еталонні засоби вимірювання витрати», «Еталонні установки типу набір еталонних витратомірів» – шляхи підвищення точності вимірювання витрати природного газу.

При вивченні перелічених дисциплін використовуються як додаткова література наступні роботи Н.Б. Клочко:

1. Чеховський С.А. Розробка віртуальних лабораторних стендів для вимірювання тиску, температури та витрати / С.А. Чеховський, Н.М. Піндус, Л.А. Витвицька, В.В. Остапів, Н.Б.Долішня, С.М. Белей, Б.І. Прудніков // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип 4(85). – С.77-80

2. Долішня Н.Б. Застосування параметричних підходів для перевірки закону розподілу статистичних даних в умовах обмеженого об'єму вибірок / Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус, С.А. Чеховський // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил, Вип.. 4 (26). Харків, 2010. – С.112-114

3. Чеховський С.А. Дослідження метрологічних характеристик витратовимірювального комплексу для виявлення витоків природного газу в

газорозподільних мережах / С.А. Чеховський, Б.І. Прудников, О.Є. Середюк, Н.М. Піндус, Н.Б. Долішня, Г.О. Сенів, І.О. Ярошенко// Системи обробки інформації, Вип. 1 (91). Харків, 2011. – С.123-127;

4. Долішня Н.Б. Порівняльний аналіз теоретичних методів статистичної обробки експериментальних даних. /Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус// Математичне моделювання, Вип. № 1(26). Дніпродзержинськ, 2012. – С.62-65

5. Долішня Н.Б. Підвищення точності опосередкованого вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників /Н.Б. Долішня, Л.А. Витвицька, Н.М. Піндус// Електротехнічні та комп'ютерні системи № 06(82), 2012. - С.198-204.

6. Долішня Н.Б. Вдосконалення алгоритму опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінним лічильником газу / Н.Б. Долішня // Нафтогазова енергетика № 2(18), 2012. - С.127-131.

7. Ключко Н.Б. Вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу. / Н.Б. Ключко, С.А.Чеховський // Науково-виробничий журнал. Метрологія та прилади, № III(45),2014. -С. 101-105.

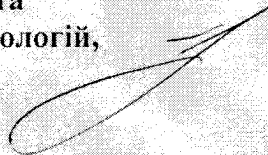
Начальник навчального відділу,
доцент



Б.В. Сверида

1.07.2014р

Декан факультету Електрифікації та
інформаційно-вимірювальних технологій,
д.т.н., проф.



В.С.Костишин

МЕТОДИЧНИЙ ДОКУМЕНТ З МЕТРОЛОГІЇ.

Метрологія

ТУРБІННІ ЛІЧИЛЬНИКИ ГАЗУ

Методика калібрування

МК 03/03-2013

ТУРБІННІ ЛІЧИЛЬНИКИ ГАЗУ

Методика калібрування

ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНО: Державним підприємством "Івано-Франківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації" (ДП "Івано-Франківськстандартметрологія) – метрологічним центром Держспоживстандарту України з вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу

РОЗРОБНИКИ: к.т.н. Безгачнюк Я., Гулик В., Джочко П., Клочко Н.

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказом ДП "Івано-Франківськстандартметрологія" від 07 червня 2014 року № 189

3 ВВЕДЕНА ВПЕРШЕ

Чинна від 2013-06-07

Дана методика калібрування поширюється на турбінні лічильники газу, які оснащені перетворювачами об'єму газу, що протік через них, в частотні імпульсні сигнали, (далі – еталонні лічильники) і встановлює методику їх калібрування.

Методика розроблена у відповідності з вимогами ДСТУ 3215, ДСТУ 3383.

1 РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

1.1 На калібрування турбінного лічильника повинна бути подана наступна технічна документація:

- технічне завдання (далі – ТЗ) на розробку еталонного лічильника або документ, який його замінює;
- експлуатаційна документація (паспорт, керівництво з експлуатації, тощо).

1.2 Під час розгляду технічної документації здійснюється:

- перевірка ТЗ на розробку еталонного турбінного лічильника вимогам діючих нормативних документів, що поширюються на еталонні лічильники;
- перевірка відповідності метрологічних та технічних характеристик наведених в експлуатаційній документації (далі – ЕД) вимогам ТЗ та інших нормативних документів, що поширюються на турбінні лічильники;
- перевірка повноти, правильності та способу вираження метрологічних характеристик в технічній документації;
- оцінка ЕД щодо зручності користування нею споживачами.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 При калібрування турбінних лічильників повинні бути виконані операції, перелік яких наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Перелік операцій при калібруванні турбінних лічильників на природному газі.

Назва операції	Пункт програм и	Засоби вимірювальної техніки та обладнання, що застосовуються при ДМА (далі – засоби ДМА)
1 Зовнішній огляд	3.3	Візуально
2 Перевірка герметичності турбінного лічильника	3.4	ЗВТ, що входять до складу еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу та допоміжне обладнання
3 Перевірка функціонування турбінного лічильника	3.5	Випробувальна установка на природному газі. Точність установки становить 0,3%, діапазон значень об'ємної витрати від 0,6 м ³ /год до 2500 м ³ /год
4 Визначення коефіцієнтів перетворення та довірчих границь відносної похибки	3.6	
5 Визначення відтворюваності	3.7	
6 Оцінювання невизначеності	3.8	—

2.2 При негативних результатах будь-якої з операцій, калібрування турбінного лічильника припиняють.

2.3 Всі засоби калібрування повинні бути повірені або атестовані в органах державної метрологічної служби.

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Робочим середовищем, що використовується при калібруванні турбінних лічильників є природний газ.

Калібрування турбінного лічильника 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 ДМА еталонного лічильника;
- 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 еталонного лічильника у відносному вираженні більше ніж на ± 2 %;
- наявність перед і після еталонного лічильника (турбінного типу) прямих ділянок труб, довжина яких повинна бути не менше 10 DN до, та не менше 5 DN після еталонного лічильника;
- еталонний лічильник та прямі ділянки труб повинні бути розміщені на одній осі.

3.2 Підготовка до калібрування.

3.2.1 Турбінний лічильник до початку калібрування повинен бути витриманий в приміщенні, де проводитиметься його калібрування, в умовах, зазначених в п. 3.1 цієї програми, не менше 24 годин.

3.2.2 Перед проведенням калібрування турбінний лічильник повинен пройти напрацювання протягом не менше 200 год. за номінальної витрати. Напрацювання турбінного лічильника проводиться виробником або організацією, що подає еталонний лічильник на калібрування.

3.2.3 Засоби калібрування та турбінний лічильник повинні бути підготовлені до роботи згідно вимог технічної документації, яка на них поширюється.

3.2.4 При проведенні калібрування турбінного лічильника обслуговуючий персонал повинен суворо дотримуватись вимог техніки безпеки.

3.3 Зовнішній огляд

3.3.1 При зовнішньому огляді турбінного лічильника перевіряють:

- відповідність його вимогам, визначеним в ЕД на турбінний лічильник;
- комплектність, маркування і пломбування згідно вимог ЕД на турбінний лічильник;
- відсутність видимих дефектів та пошкоджень корпусу та інших елементів лічильника, які перешкоджають його правильній роботі.

3.4 Перевірка герметичності турбінного лічильника

Перевірку герметичності турбінного лічильника проводять на еталоні об'єму та об'ємної витрати газу, що використовується при калібрування турбінного лічильника, шляхом під'єднання його до еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати, подальшої герметизації виходу еталонного лічильника і створення максимально можливого надлишкового тиску в системі «еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу – еталонний лічильник». Витримують в такому стані систему протягом 5 хвилин, при цьому слідкують

за зміною показів еталонного лічильника та системи вимірювання еталона, що використовується при калібруванні. Допускається додаткова перевірка турбінного еталонного лічильника шляхом промилювання його мильним розчином.

Систему і еталонний турбінний лічильник вважають герметичними, якщо за час дослідження витік повітря з системи менший від двох величин: $0,1 \text{ дм}^3/\text{год}$ або об'єму, що не перевищує $0,1\%$ від пропущеного об'єму за найменшого значення витрати.

3.5 Перевірка функціонування турбінного лічильника

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

Якщо турбінний лічильник 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 турбінного лічильниками вважають позитивними.

3.6 Визначення коефіцієнтів перетворення та довірчих границь відносно похибки

3.6.1 Визначення коефіцієнтів перетворення турбінного еталонного лічильника

Перед проведенням досліджень необхідно не менше 5 раз пропустити контрольний об'єм природного газу, за максимального значення об'ємної витрати, через турбінний лічильник для досягнення врівноваження температур перед ним та в еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що застосовується при калібруванні.

Визначення коефіцієнта перетворення лічильника проводять шляхом пропускання через нього контрольного об'єму природного газу, що відтворюється еталонном одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, за витрат визначених в ТЗ на турбінний лічильник. За кожного значення об'ємної витрати, дослідження повторюють не менше 7 разів.

Значення об'ємної витрати задається відповідно до ТЗ на турбінний лічильник із відхиленням не більше $\pm 2\%$.

Дослідження за об'ємної витрати $q_{\text{зад}}$ обов'язково слід проводити рівномірно змінюючи її значення при кожному наступному експерименті від $(q_{\text{зад}} - 2\%)$ до $(q_{\text{зад}} + 2\%)$, спочатку в сторону збільшення, а потім в сторону зменшення.

Місця вимірювання тиску та температури на турбінному лічильнику визначаються згідно ТЗ.

Коефіцієнти перетворень та їх довірчі границі турбінного лічильника визначають за об'ємних витрат, значення яких наведені в ТЗ на лічильник, але не менше ніж за 7 значень об'ємної витрати.

При кожному вимірюванні за встановленого значення об'ємної витрати проводять зняття показів та запис у протокол, рекомендована форма якого наведена в додатку А, наступних параметрів:

- контрольного об'єму, що відтворюється еталоном (V_{kj}), м³;
- часу проходження контрольного об'єму (t_{ji}), с;
- кількості імпульсів з еталонного лічильника (N_{ji});
- надлишкового тиску у еталоні (P_{Ei}) та перед (або у) еталонним лічильником, (P_{ji}), Па;
- температури у еталоні (T_{Eji}), та на виході (вході) в еталонний лічильник (T_{ji}), °С
- 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 турбінний лічильник:

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

- коефіцієнта перетворення турбінного лічильника:

$$K_{ji} = \frac{N_{ji}}{V_{ji}} \quad (2)$$

- фактичного значення об'ємної витрати:

$$q_{vji} = \frac{3600 \cdot V_{ji}}{t_{ji}} \quad (3)$$

За результатами вимірювань за кожної об'ємної витрати:

- а) визначають середнє значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника за j -того значення об'ємної витрати:

$$\overline{K}_j = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ji}}{n}, \quad (4)$$

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

- б) визначають середнє значення об'ємної витрати:

$$\overline{q}_{vj} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{vji}}{n}, \quad (5)$$

- в) дослідити вибірку з усереднених значень коефіцієнта перетворення на наявність промахів у результатах спостережень за критеріями варіаційного розмаху та критерієм Романовського за формулами (6)-(7) відповідно:

$$\overline{K}_j - z \times R_j < K_n < \overline{K}_j + z \times R_j, \text{ де } K_j = K_j - K_1 \quad (6)$$

де z – табличні критеріальні значення, q_n - значення, яке різко відрізняється від інших.

$$|K_j - \overline{K}_j| \geq t_p S \quad (7)$$

де t_p - квантиль розподілу Стюдента.

Якщо гіпотеза про відсутність промахів у результатах метрологічних досліджень турбінних лічильників газу без врахування того значення підтверджується, то опрацювання результатів продовжують відповідно до алгоритму. Якщо ж у вибірці усереднених значень коефіцієнта перетворення присутні промахи, їх виключають та продовжують перевірку.

г) дослідити вибірку з усереднених значень коефіцієнта перетворення на відтворюваність критеріями Кохрена і Бартлетта.

Для критерію Кохрена необхідно для m паралельних дослідів:

- для кожного з дослідів обчислити построківі дисперсії:

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \overline{K_i})^2}{n-1} \quad (8)$$

- визначити розрахункові значення критерію Кохрена:

$$K_{k.p.} = \frac{\max D_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \quad (9)$$

де $\max D_i$ – максимальна дисперсія проведених дослідів.

- порівняти розрахункові значення критерію з табличним:

$$K_{k.p.} \leq K_{k.m.}$$

Якщо умова виконується, то результати досліджень метрологічних характеристик турбінних лічильників газу відтворювані та підлягають подальшому опрацюванню.

Статистику критерію Бартлетта обчислюють зі співвідношення:

$$B = \frac{T}{C}, \quad (10)$$

$$\text{де } T = (N - j) \times \ln(S_p^2) - \sum_{i=1}^j (n_i - 1) \times \ln(S_i^2), \quad C = 1 + \frac{1}{3(j-1)} \left(\sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{n_i - 1} \right) - \frac{1}{N - j} \right).$$

При цьому $N = \sum_{i=1}^j n_i$, а сумарна оцінка дисперсій $S_p^2 = \frac{1}{N - j} \sum_{i=1}^j (n_i - 1) \times S_i^2$.

Для $n_i > 3$ ($i=1 \dots j$) отримане значення B порівнюють із табличним значенням χ^2 . Якщо значення статистики не перевищує табличне, то говорять про відтворюваність дослідів та продовжують опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу.

д) проводять ідентифікацію закону розподілу інформаційним методом, а саме шляхом визначення ентропійного коефіцієнта за формулою:

$$k = \frac{\Delta_e}{S_{Kj}}, \quad (11)$$

де $\Delta_e = \frac{d \cdot n}{2} 10^{-1} \sum_{i=1}^m n_j \lg n_j$ - вибіркове ентропіне значення похибки; d - ширина

інтервалу вибіркового розподілу; n_j - частоти

е) обчислюють середньоквадратичне відхилення (СКВ) середнього значення коефіцієнта перетворення за j - того значення об'ємної витрати:

- в абсолютному вираженні:

$$S_{Kj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{ji} - \overline{K_j})^2}{n(n-1)}} \quad (12)$$

- у відносному вираженні:

$$\sigma_{Kj} = \frac{S_{Kj}}{K_j} \cdot 100, \% \quad (13)$$

3.6.2 Визначення довірчих границь відносної похибки турбінного лічильника

Довірчі границі відносної похибки еталонного лічильника визначають в наступній послідовності:

а) оцінювання систематичної складової похибки еталонного турбінного лічильника відбувається за наступним алгоритмом:

- оцінка абсолютного відхилення Δ_{jc} між теоретичними значеннями номінального $K_{j_ном}$ та модельного $K_{j_мод}$ коефіцієнта перетворення лічильника K для j -го значення робочої витрати:

$$\Delta_{jc} = K_{j_ном} - K_{j_мод} \quad (14)$$

- поправка ∇_j на значення систематичної складової похибки для i -го значення робочої витрати:

$$\nabla_j = -\Delta_{jc}$$

- відносне значення систематичної похибки Δ_E еталонного лічильника:

$$\Delta_E = \frac{K_{j_ном} + \nabla_j - K_{j_експ}}{K_{j_експ}} \times 100\% \quad (15)$$

де $K_{j_експ}$ - експериментальне значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника отримане під час його калібрування за j -го значення витрати;

- відносна похибка зумовлена дискретністю інформаційних імпульсів $\Delta_{імп}$ з еталонного лічильника:

$$\Delta_{імп} = \frac{2}{N_{\min}} \times 100, \% \quad (16)$$

де N_{\min} - мінімальна кількість імпульсів, що відповідає пропущеному контрольному об'єму при калібруванні лічильника;

- границі невилученої систематичної похибки еталонного лічильника:

$$\Theta = 1.1 \times \sqrt{\Delta_y^2 + \Delta_E^2 + \Delta_{імп}^2} \quad (17)$$

У практичному аспекті застосування корекції систематичної похибки турбінного лічильника необхідно ввести в його коректор значення поправок ∇_i на розрахунок коефіцієнта перетворення лічильника або алгоритм їх визначення для різних робочих витрат.

б) обчислюють коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової та невилученої систематичної похибок:

$$t_{\Sigma j} = \frac{\Theta + k \cdot \sigma_{Kj}}{S_{\Theta} + \sigma_{Kj}}, \quad (18)$$

де k – ентропійний коефіцієнт обчислений за (11); $S_{\Theta} = \frac{\Theta}{\sqrt{3}}$.

в) обчислюють довірчі границі відносної похибки турбінного лічильника для j - того значення об'ємної витрати:

$$\delta_j = \pm t_{\Sigma j} \cdot \sqrt{S_{\Theta}^2 + \sigma_{Kj}^2} \quad (19)$$

З масиву значень довірчих границь відносної похибки турбінного лічильника за кінцеве приймають максимальне її значення.

У випадку, якщо результати визначення закону розподілу показали, що вид розподілу на проміжках $q_{min} \cdot 0,2q_{max}$ та $0,2q_{max} \cdot q_{max}$ не є однаковим, то представити результати визначення довірчих границь відносної похибки турбінного лічильника окремо на двох проміжках відповідно.

3.6.3 Визначення коефіцієнтів апроксимаційного полінома та відхилення експериментальних точок від апроксимованих значень

За отриманими результатами досліджень турбінного лічильника за п. 3.6.1, розраховують, використовуючи метод найменших квадратів, коефіцієнти апроксимаційного полінома виду:

$$K(q) = A_{-2}q^{-2} + A_{-1}q^{-1} + A_0 + A_1q^1 + A_2q^2 \quad (20)$$

де A_i – коефіцієнти апроксимаційного полінома.

Далі розраховують відхилення експериментальних точок від значень розрахованих за апроксимаційним поліномом:

$$e_j = \frac{\bar{K}_j - K(q_j)}{K(q_j)} \cdot 100 \quad (21)$$

3.7 Визначення відтворюваності

3.7.1 Визначення відтворюваності проводять після 24 годин технологічного прогону турбінного лічильника, який проводять після першого циклу його досліджень.

3.7.2 Відтворюваність визначають шляхом порівняння коефіцієнтів перетворення еталонного лічильника визначених згідно п.3.6 цієї програми із коефіцієнтами перетворення визначеними при повторному циклі досліджень.

3.7.3 Повторний цикл досліджень проводять аналогічно п.3.6 для всіх значень витрат визначених при першому циклі досліджень. За кожного значення витрати проводять не менше 3 досліджень.

3.7.4 Обчислюють коефіцієнти перетворення турбінного лічильника за формулами (2,4).

3.7.5 Обчислюють оцінку відтворюваності для j - того значення об'ємної витрати за формулою:

$$\delta_{Vj} = \frac{(\overline{K}_{Vj} - \overline{K}_j)}{\overline{K}_j} \cdot 100, \quad (22)$$

де \overline{K}_{Vj} – середнє значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника за j - того значення об'ємної витрати, що визначений при повторному циклі досліджень.

З множини значень оцінки відтворюваності за кінцеве приймають максимальне значення.

3.7.6 Турбінний лічильник вважається таким, що пройшов калібрування, якщо довірчі границі відносної похибки еталонного лічильника не перевищують значення наведені в ДСТУ 3383, максимальне значення відхилення експериментальних коефіцієнтів перетворення від значень, розрахованих за апроксимаційним поліномом не перевищують 0,2 %, оцінка відтворюваності не перевищує половини довірчих границь відносної похибки турбінного лічильника за j - того значення витрати.

3.7.7 У випадку не відповідності однієї із метрологічних характеристик еталонного лічильника вимогам п. 3.7.6 турбінний лічильник вважається непридатним і не допускається до застосування.

3.8 Оцінювання невизначеності

3.8.1 Основними джерелами невизначеності при калібрування турбінного лічильника є:

- невизначеність відтворення еталоном одиниці об'єму газу;
- випадковий ефект, що характеризує повторюваність результатів вимірювань;
- складова, що зумовлена дискретністю лічильника імпульсів;
- відтворюваність результатів вимірювань.

3.8.2 Рівняння вимірювання, що застосовується при визначенні коефіцієнтів перетворення турбінного лічильника описується формулами (2) та (4).

3.8.3 Стандартну невизначеність середнього значення коефіцієнта перетворення за j – того значення об'ємної витрати визначають за наступною формулою:

$$u_A(\overline{K}_j) = \frac{S_{Kj}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{ji} - \overline{K}_j)^2}{n(n-1)}} \quad (23)$$

3.8.4 Оцінюють стандартну невизначеність кількості імпульсів. Ця складова зумовлена тим, що на початку і в кінці вимірювання можливо не врахувати по 1 імпульсу.

Стандартну невизначеність кількості імпульсів розраховують за формулою:

$$u_B(N) = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

3.8.5 Оцінюють стандартну невизначеність контрольного об'єму газу. Ця складова визначається за даними калібрування еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що застосовується при калібруванні еталонного лічильника.

$$u_B(V) = \frac{U(V)}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

3.8.6 Оцінку стандартної невизначеності, зумовлену відтворюваністю результатів вимірювань визначається за формулою:

$$u_B(K) = \frac{\delta_{B\max}}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

де $\delta_{A\max}$ – максимальне значення оцінки відтворюваності (14).

3.8.7 Всі вхідні величини вважаємо некорельованими.

3.8.8 Сумарну стандартну невизначеність коефіцієнта перетворення за j – того значення об'ємної витрати визначають так:

$$u_{c_j}(\bar{K}_j) = \sqrt{u_A^2(\bar{K}_j) + \left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial N}\right)^2 \cdot u_B^2(N) + \left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial V}\right)^2 \cdot u_B^2(V) + u_B^2(K)} \quad (27)$$

де

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial V} = -\frac{N}{V^2}$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial N} = \frac{1}{V}$$

3.8.9 Розширену невизначеність розраховуємо, приймаючи довірчу ймовірність рівною 0,95, приймаючи коефіцієнт охоплення відповідно до розрахованого значення ентропійного коефіцієнта в залежності від виду закону розподілу:

$$U_{0,95_j}(K) = k u_{c_j}(\bar{K}_j) \quad (28)$$

3.8.10 Розраховуємо розширену невизначеність у відносній формі:

$$U_{0,95_j}(K) = \frac{k u_{c_j}(\bar{K}_j)}{\bar{K}_j} \cdot 100, \% \quad (29)$$

3.8.11 З множини значень розширеної невизначеності в якості метрологічної характеристики турбінного лічильника приймається її максимальне значення.

3.8.12 У випадку, якщо результати визначення закону розподілу показали, що вид розподілу на проміжках $q_{min} \cdot 0,2q_{max}$ та $0,2q_{max} \cdot q_{max}$ не є однаковим, то представити результати визначення розширеної невизначеності окремо на двох проміжках відповідно.

4 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРУВАННЯ

4.1 У випадку позитивних результатів калібрування турбінного лічильника оформляється свідоцтво згідно ДСТУ 3215.

4.2 Метрологічні характеристики турбінного лічильника заносять в протокол калібрування, рекомендована форма якого наведена в Додатку Б.

4.3 Міжпіврічний інтервал турбінних лічильників – 1 рік.

Додаток А
(рекомендований)
ПРОТОКОЛ № _____
калібрування турбінного лічильника газу

Тип _____
Зав. № _____ Рік виготовлення _____
Виробник: _____
Власник: _____

Умови проведення досліджень:

1. Атмосферний тиск _____ Па
 2. Температура довкілля _____ °С
 3. Відносна вологість _____ %
- Задане значення об'ємної витрати _____ м³/год
Контрольний об'єм _____ м³

Виміряні значення						Обчислені значення	
P _{Ei} , Па	T _{Ei} , °С	t _i , с	P _i , Па	T _i , °С	N _i , імп	V _i , м ³	K _i , імп/м ³
<i>Перший цикл</i>							
$\overline{K} =$ імп/м ³		$\overline{q_v} =$ м ³ /год					
$\sigma_K =$ %		$\delta_{\text{імп}} =$ %		$\Theta =$ %			
$t_{\Sigma} =$				$\delta =$ %			
Довірчі границі відносної похибки за витрати _____ м ³ /год складають ± _____, _____ %							
<i>Другий цикл</i>							
$q_v =$ м ³ /год		$K_B =$ імп/м ³		$\delta_B =$ %			

Дослідження провів _____
(підпис, прізвище, ініціали)

Додаток Б
(рекомендований)

ПРОТОКОЛ № _____
калібрування
турбінного лічильника газу

Тип _____
Зав. № _____ Рік виготовлення _____
Виробник: _____
Власник: _____

Умови проведення калібрування:

1. Атмосферний тиск _____ Па
2. Температура довкілля _____ °С
3. Відносна вологість _____ %

Засоби калібрування:

- 1.
- 2.

Результати метрологічних досліджень

№	Фактичне значення об'ємної витрати, м ³ /год	Коефіцієнт перетворення, імп./м ³	Довірчі границі, %	Відхилення від апроксимаційного полінома, %
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
11.				

Коефіцієнти апроксимаційного полінома:

$A_0 =$ $A_1 =$ $A_2 =$ $A_{-1} =$ $A_{-2} =$
Невизначеність вимірювань: $U(k=___) =$ %

Висновок: За результатами калібрування турбінний лічильник визнаний таким, що відповідає (не відповідає) технічному завданню та допускається (не допускається) до застосування.

Дослідження провів: _____

Дата: _____



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Ключко Н.Б. „Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу“, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі: начальника науково-дослідної лабораторії ДП „Івано-Франківський стандартметрологія“ Безгачюка Я.В., наукового співробітника Гулика В.Я. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Ключко Н.Б. на тему: „Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу“, впроваджені у метрологічну практику діяльності ДП „Івано-Франківський стандартметрологія“ при розробленні методики калібрування лічильників газу турбінних на реальному робочому середовищі.

Впровадження зазначеної методики дозволило підвищити достовірність проведення калібрування турбінних лічильників газу на реальному робочому середовищі.

Начальник науково-дослідної лабораторії,
вчений зберігач еталона ВЕТУ 03-01-01-08, к.т.н.

Я.В. Безгачюк Я.В. Безгачюк

Науковий співробітник,
вчений зберігач еталона ВЕТУ 03-01-04-12

В.Я. Гулик В.Я. Гулик



d524