

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ ТА ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ,
СЕРТИФІКАЦІЇ ТА ЗАХИСТУ ПРАВ СПОЖИВАЧІВ»

На правах рукопису

Кузьменко Юрій Володимирович

УДК 681.121

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ
УДОСКОНАЛЕННЯ ВІДТВОРЕННЯ ОДИНИЦЬ ВИТРАТИ ПЛИННИХ
СЕРЕДОВИЩ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ**

Спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне
забезпечення

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Є.П. Пістун

доктор технічних наук

Київ 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ.....	15
1.1 Метрологічне забезпечення витратометрії.	15
1.2 Огляд зарубіжних еталонів.	28
1.2.1 Національний еталон Німеччини.....	28
1.2.2 Національний еталон Словаччини.....	29
1.2.3 Державний первинний еталон одиниць масової і об'ємної витрати рідини Російської Федерації.	31
1.2.4 Вихідний еталон одиниць масової та об'ємної витрати води Білорусі.	33
1.3 Висновки та постановка задач дослідження.	34
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТИ ВОДИ В ВИТРАТОМІРНИХ УСТАНОВКАХ.....	37
2.1 Встановлення узагальненої залежності вимірювання витрати.....	37
2.1.1 Відмінність густини реальної води в установці від густини дистильованої води.....	39
2.1.2 Випаровування води в ємності для зважування.	40
2.1.3 Нерівномірність спрацьовування дивертера.....	40
2.1.4 Остигання води в трубопроводі вимірювальної ділянки.	42
2.1.5 Відмінність тиску у вимірювальній ділянці і в ємності для зважування.	43
2.2 Аналіз джерел невизначеності вимірювань в установці.	44
2.3 Експериментальна оцінка джерел невизначеності.	47
2.3.1 Дослідження ваг.	47
2.3.2 Дослідження вимірювачів температури.	48
2.3.3 Дослідження вимірювача інтервалів часу.....	50
2.3.4 Дослідження дивертера.	51

2.3.5 Дослідження засобів вимірювання параметрів навколишнього повітря.....	52
2.3.6 Дослідження випаровування води в ємності для зважування.....	54
2.4 Вплив вхідних невизначеностей на точність результатів вимірювань витрати.....	58
2.5 Висновки.....	61
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВОК.....	63
3.1 Метод забезпечення стаціонарності потоку води у вимірювальній ділянці установки.....	63
3.2 Метод оцінювання загального та інтервальних значень об'єму міри місткості.....	75
3.3 Метод динамічного зважування при вимірюванні витрати.....	87
3.4 Висновки.....	91
РОЗДІЛ 4. КАЛІБРУВАННЯ ВИТРАТОМІРНИХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ КОМПАРУВАННЯ.....	92
4.1 Простежуваність результатів вимірювання.....	92
4.2 Метод калібрування витратомірних установок за допомогою компаратора.....	95
4.3 Метод визначення метрологічних характеристик вимірювального засобу порівняння.....	101
4.3.1 Експериментальний метод.....	102
4.3.2 Експериментально-розрахунковий метод визначення K -фактора.....	104
4.4 Розробка повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної і масової витрати гарячої води.....	107
4.5 Міжнародні звірення еталона.....	115
4.5.1 Учасники звірень.....	115
4.5.2 Еталони порівняння.....	115
4.5.3 Процедура випробувань.....	116
4.5.3.1 Метод.....	116

	4
4.5.3.2 Нормальні умови.....	116
4.5.4 Інструкції для вимірювань.	117
4.5.5 Експериментальні дослідження в рамках звірень.....	118
4.5.6 Результати вимірювань.	119
4.5.6.1 Середня відносна похибка та невизначеність.	119
4.5.6.2 Відхилення від заданих параметрів.	120
4.5.7 Оцінка.....	121
4.5.7.1 Визначення опорного значення звірень.	121
4.5.8 Визначення різниці «Лабораторія до ОЗЗ» та «Лабораторія до лабораторії» і рівня еквівалентності.	124
4.5.9 Висновки.	125
4.6 Висновки.	125
ВИСНОВКИ.	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	131
ДОДАТОК А. Документи, що впроваджують результати роботи.	141
ДОДАТОК Б. Наказ про затвердження державного первинного еталона.	145
ДОДАТОК В. Звіт з міжнародних звірень.....	147
ДОДАТОК Г. Методика атестації державного первинного еталона.	150
ДОДАТОК Д. Свідectво про калібрування проливної установки – робочого еталона.	184
ДОДАТОК Е. Національний стандарт Державної повірочної схеми.....	185

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Q_m	– масова витрата води
Q_V	– об’ємна витрата води
c_V	– коригуючий коефіцієнт
m_n	– покази ваг на початку вимірювання
m_k	– покази ваг в кінці вимірювання
T	– час
ρ_a	– густина навколишнього повітря при умовах вимірювання
ρ_z	– густина матеріалу стандартних об’єктів
ρ_{pu}	– густина реальної води при умовах вимірювання
ρ_{du}	– густина дистильованої води при атмосферному тиску
ρ_{p20}, ρ_{d20}	– густина реальної і дистильованої води при температурі 20 °C
V_o	– об’єм води, що випаровувалась
o	– інтенсивність випаровування води
$Q_{вкл}(T),$ $Q_{вук}(T)$	– залежність витрати води від часу під час включення та виключення дивертера
$V_{difT_{div}}$	– об’єм води, який не враховується через різницю часу переправлення потоку води
$difT_{div}$	– різниця часу переправлення потоку води
t	– температура
$V_{\Delta t_2}$	– об’єм води, який не враховується через різні коефіцієнти температурного розширення матеріалу трубопроводу і води
V_{mp}	– об’єм трубопроводу на ділянці від витратоміра до виходу
α	– коефіцієнт лінійного розширення матеріалу трубопроводу
β	– коефіцієнт об’ємного розширення води
Δt_2	– різниця температури води у вимірювальній ділянці і на виході з трубопроводу

$V_{\Delta p}$	– об’єм води, що не враховується через різницю тиску у вимірювальній ділянці та в ємності для зважування
Δp	– різниця тиску у вимірювальній ділянці та в ємності для зважування
I_p	– індекс пульсації
F_p	– коригуючий фактор витрати
α_p	– коефіцієнт форми сигналу
b_p	– частотний коефіцієнт
V_{z_f}	– інтервальна місткість
V_z	– об’єм дзвона
z_f	– абсолютна висота рівня рідини в дзвоні, для якої обчислюється інтервальна місткість
L	– відстань
$\tau_1, \dots, \tau_k$	– геометричні параметри поверхні ЗВО
S_{z_f}	– площа поверхні дзвона до висоти z_f
$\bar{g}_{z_f}$	– середнє радіальне відхилення дзвона до абсолютної висоти z_f
K_{QV}	– K -фактор об’ємного витратоміра
МНК	– метод найменших квадратів
ЗВО	– засіб вимірювання об’єму
ОЗЗ	– опорне значення звірень
ВЗП	– вимірювальний засіб порівняння – компаратор

Математичні операції та спеціальні функції позначені загальноприйнятими символами.

Позначення величин, що зустрічаються не більше двох разів, роз’яснені в тексті.

ВСТУП

Актуальність теми

Забезпечення єдності вимірювань є найважливішою умовою соціально-економічного розвитку країни, забезпечення безпеки громадян, суспільства і держави, підвищення якості та конкурентоспроможності товарів, робіт і послуг, науково-технічного прогресу. Досягнення енергетичної безпеки України, виробництва, постійне підтримання якості продукції, оптимізація технологічних процесів – це тільки деякі причини, які були підкреслені в посланні Президента України до Верховної Ради «Європейський вибір. Концептуальні засади стратегії економічного та соціального розвитку України на 2002 – 2011 роки» і які обумовили витратометрію, як один із найважливіших інструментів енергозбереження.

Оскільки витратоміри та лічильники плинного середовища застосовуються в сфері законодавчо регульованої метрології, вони підлягають оцінці відповідності під час випуску з виробництва і повірці після ремонту та під час експлуатації. Для цього застосовуються робочі еталони – різноманітні витратомірні установки (ВУ), які є найважливішою ланкою в забезпеченні метрологічної простежуваності та єдності вимірювань одиниць витрати плинних середовищ.

Необхідність забезпечення єдності вимірювання витрати рідини та міжнародного визнання вимірювальних можливостей країни, які б позитивно відобразилися на просуванні українських витратомірів та лічильників води, наряду із вирішенням позначених вище національних проблем в галузі витратометрії, на світовому ринку, робить тему даної дисертаційної роботи своєчасною і актуальною.

Розглядається розробка та удосконалення експериментально-конструктивних методів, спрямованих на створення прецизійних еталонних ВУ як комплексу засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та конструктивних елементів, з метою створення еталонної бази метрологічного забезпечення

високоточного відтворення одиниць витрати плинних середовищ і передачі їх розміру відповідним робочим ЗВТ з врахуванням конкретних впливних величин на загальне рівняння вимірювань витрати.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана в ДП «Укрметртестстандарт», в рамках Державної програми розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки (затвердженої Постановою КМУ від 01.03.2006 р.) та Державної програми розвитку еталонної бази на 2011-2015 роки (затвердженої Постановою КМУ від 22.12.2010 р.), а також у таких науково-дослідних та дослідно-конструкторських роботах, фінансованих з державного бюджету та госпрозрахункових коштів:

- тема 31.24.00.01 «Створення вторинного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати рідин» (РК 0106U010936, ОК 0206U007866);
- тема 03.00.24.01 «Створення державного первинного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води» (РК 0107U009493 ОК 0211U004526)
- тема 03.00.24.02 «Розробка раціональних схем та визначення похибок вимірювань на вузлах обліку гарячої води в багатоквартирних будинках у місті Києві» (РК 0107U009492, ОК 0208U005612);
- тема 21 «Забезпечення відтворення та зберігання одиниць вимірювань державними еталонами, що знаходяться у ДП «Укрметртестстандарт»» (РК 0113U002970, ОК 0214U006704).

У всіх роботах здобувач брав участь як відповідальний виконавець та виконавець.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є вдосконалення відтворення одиниць витрати плинних середовищ та забезпечення їх простежуваності шляхом розробки експериментально-конструктивних методів, які дозволяють мінімізувати похибки ВУ при відтворенні і передачі одиниць витрати цих середовищ відповідним ЗВТ.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи і засоби вимірювання витрати у ВУ і створити математичну модель вимірювання витрати рідини, яка дозволила б виявити джерела похибок цих вимірювань залежно від виконання ВУ;
- встановити експериментальним шляхом та теоретично обґрунтувати вплив метрологічних характеристик ЗВТ, що входять до складу ВУ, а також параметрів плинного середовища і конструктивних елементів ВУ на точність вимірювання;
- провести дослідження впливу пульсацій потоку рідини в вимірювальній ділянці ВУ і розробити конструктивні методи і засоби зменшення впливу пульсацій на точність вимірювань;
- розробити експериментально-розрахунковий підхід, який дозволяє оцінити невизначеності інтервальних місткостей в ВУ з еталонними засобами місткості;
- провести дослідження динаміки вимірювання витрати у вимірювальній ділянці ВУ і розробити конструктивні методи і засоби, спрямовані на покращення техніко-економічних показників.

Об'єкт дослідження – відтворення, вимірювання та передача одиниць витрати при повірці (калібруванні) витратомірів плинних середовищ.

Предмет дослідження – вимірювальні аспекти ВУ при відтворенні, вимірюванні і передачі одиниць витрати плинних середовищ при повірці (калібруванні) витратомірів.

Методи дослідження: математичне моделювання та обчислювальний експеримент для дослідження факторів, що впливають на точність ВУ; методи прикладної метрології для оцінки похибки відтворення одиниць витрати в ВУ і передачі їх розмірів за допомогою компаратора; методи теорії вимірювань при проведенні метрологічної атестації ВУ, планування експерименту та експериментальних дослідженнях.

Наукова новизна одержаних результатів

В результаті виконаних досліджень дисертаційної роботи було отримано такі нові наукові результати:

- вперше отримано математичну модель вимірювання витрати рідини, яка описує ВУ як цілісний комплекс ЗВТ, конструктивних елементів та властивостей плинного середовища, яка відрізняється тим, що дозволяє враховувати характеристики точності та особливості складових частин ВУ та їх взаємозв'язок;

- вперше запропоновано конструктивний метод демпфування пульсацій витрати рідини, заснований на встановленій залежності точності вимірювань витрати від пульсацій потоку рідини в вимірювальній ділянці ВУ;

- вперше запропоновано комплексний метод компарування, який у порівнянні із відомим методом поелементної простежуваності дозволяє підвищити точність та зменшити час, що витрачається на калібрування ВУ;

- удосконалено спосіб калібрування дзвонового мірника, який відрізняється від відомих способів калібрування можливістю врахування реального рельєфу з корекцією на відхил від горизонтальності шляхом автоматизованого введення поправок до інтервальних місткостей дзвону за відхиленням форми поверхонь від апроксимуючого циліндру, що дозволяє значно підвищити точність градуювання засобу вимірювання об'єму (ЗВО);

- вперше розроблено експериментально-розрахунковий метод оцінки внутрішнього рельєфу ЗВО за рахунок оцінки невизначеностей інтервальних місткостей у ВУ з еталонними засобами місткості, який на відміну від існуючих методів враховує радіальні відхилення реальної поверхні ЗВО та їх прив'язку до осі циліндра;

- вперше розроблено метод визначення метрологічних характеристик вимірювального засобу порівняння (ВЗП), який відрізняється від відомого в галузі витратометрії експериментального методу застосуванням експериментально-розрахункового підходу, який дозволяє істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів для метрології України полягає в наступному:

- розроблено схему передачі розміру одиниці витрати від еталонної ВУ робочим установкам нижчого рівня та робочим засобам вимірювання витрати, яка була застосована при розробці ДСТУ 7476:2013 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води. Національний стандарт на повірочну схему було затверджено наказом Мінекономрозвитку від 11 грудня 2013 року № 1470;

- на основі методу компарування проведено звірення розробленої ВУ із зарубіжними зразками в рамках теми KOOMET № 452/SK/08 Coomet.M.FF.-S «Звірення калібрувальних лабораторій витратомірів холодної води в діапазоні витрат від 3 до 20 м³/год» для підтвердження її нормованих метрологічних характеристик;

- запропоновано конструкцію ВУ, в якій за рахунок застосування методу динамічного вимірювання витрати і відповідних засобів спрощено конструкцію та зменшено вартість;

- розроблені і внесені до Реєстру нормативних документів України шість методик калібрування ВУ, компаратора та витратомірів-лічильників різних видів на ВУ.

Теоретичні та практичні результати роботи впроваджені в ДП «Укрметртестстандарт» при створенні Державного первинного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної і масової витрати гарячої води ДЕТУ 03-04-11, розробленні ВУ й методики її метрологічних досліджень, за якою проведено метрологічну атестацію еталона. Первинний еталон введено в дію наказом Державного комітету України з питань технічного регулювання від 23.12.2010 № 575 та проведено його міжнародні звіряння на основі методу компарування. Метод динамічного вимірювання витрати було застосовано у ВУ, яка запроваджена у серійне виробництво на фірмі «НПП «Центр енергообліку», м. Київ.

Особистий внесок здобувача

Всі основні результати дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно. Серед них: визначення факторів, що впливають на точність вимірювання витрати плинних середовищ; розробка математичної моделі; теоретичні дослідження невизначеності вимірювань; розробка методики калібрування витратомірів, що використовуються в якості компараторів. Розробка програми атестації еталона та експериментальні дослідження його метрологічних характеристик, розробка повірочної схеми для засобів вимірювання витрати гарячої води, розробка технічних рішень щодо поліпшення характеристик робочих еталонів і експериментальні дослідження їх ефективності проведені автором у співавторстві, але внесок здобувача є визначальним. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [2] – запропоновано метод зменшення пульсацій потоку у вимірювальній ділянці ВУ; [3] – здійснено оцінку невизначеності при калібруванні витратомірів; [4] – виконано аналіз стану метрологічного забезпечення обліку холодної та гарячої води в Україні; [6] – запропоновано метод передавання одиниці фізичної величини в галузі витратометрії за допомогою компаратора, виконано аналіз джерел невизначеності вимірювань при калібруванні; [7] – проаналізовано похибки вимірювань об'єму засобами вимірювань об'єму, здійснено оцінку впливу основних дестабілізуючих факторів при вимірюванні внутрішнього рельєфу засобів вимірювань об'єму з корекцією на відхил від горизонтальності; [8] – запропоновано метод і засоби зменшення пульсацій потоку у вимірювальній ділянці ВУ; [9] – запропоновано метод динамічного вимірювання витрати рідини за допомогою штатного вагового пристрою; [10] – розроблено метод передавання одиниці фізичної величини в галузі витратометрії за допомогою компаратора; [11, 12] – підготовлено та проведено експериментальні дослідження метрологічних характеристик ДЕТУ 03-04-11, [14] – запропоновано методику вибору захищеного контролю на основі аналізу ризиків.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати роботи докладались та обговорювались на:

- IV (2004 р.), V (2006 р.), VI (2008 р.), VII (2010 р.), VIII (2013 р.) Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми обліку теплоти та води», м. Київ;
- VI (2008 р.), VIII (2012 р.) Міжнародних науково-технічних конференціях «Метрологія та вимірювальна техніка», м. Харків;
- V (2007 р.), VII (2011 р.) Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ;
- V (2006 р.), XII (2007 р.) Науково-технічних конференціях «Приладобудування 2006: стан і перспективи», м. Київ;
- III (2012 р.) Науково-практичній конференції «Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности», м. Санкт-Петербург, Росія;
- Міжнародній метрологічній конференції «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов» (2013 р.), м. Казань, Росія;
- 26-му національному науковому симпозіумі «Метрология и метрологично осигуряване 2016», м. Созополь, Болгарія.

Публікації

Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 14 наукових публікаціях, з них: 7 статей у спеціалізованих фахових виданнях України (з них 3 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти України на корисну модель, 1 національний стандарт, 4 – у матеріалах конференцій.

Структура та об'єм дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 6 додатків і списку 83 використаних джерел. Загальний обсяг дисертації

становить 186 сторінок, із них 130 сторінок основного тексту, що містить 45 рисунків, додатки та список використаних джерел на 56 сторінках.

Вважаю за потрібне висловити подяку своєму першому вчителю у науці Пістуну Євгену Павловичу, колегам та співробітникам ДП «Укрметртестстандарт», КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інституту технічної теплофізики НАН України.

РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ

1.1 Метрологічне забезпечення витратометрії

В області витратометрії виділяють кілька фізичних величин, що характеризують потік плинного середовища – рідини або газу (далі – середовище), у трубопроводі [15]: об'ємна і масова витрата, об'єм і маса середовища, що пройшло через поперечний переріз трубопроводу (далі – вимірювані величини).

Об'ємна витрата середовища – це фізична величина, що дорівнює границі відношення приросту об'єму середовища, що протікає в трубопроводі через перетин, перпендикулярний напрямку швидкості потоку, до інтервалу часу, за який це прирощення сталося, при необмеженому зменшенні інтервалу часу.

Масова витрата середовища – це фізична величина, що дорівнює границі відношення приросту маси середовища, що протікає в трубопроводі через вказаний перетин до інтервалу часу, за який це прирощення відбулося, при необмеженому зменшенні інтервалу часу.

Об'єм середовища, що протік через вказаний перетин, визначається як інтеграл об'ємної витрати по часу.

Маса середовища, що протекла через вказаний перетин, визначається як інтеграл масової витрати по часу.

Для вимірювання зазначених фізичних величин застосовуються відповідні засоби вимірювань: об'ємні і масові витратоміри, лічильники об'єму і лічильники маси середовища.

Найбільш часто використовуються такі види витратомірів: камерні, крильчасті, турбінні, електромагнітні, ультразвукові і вихрові [16].

Камерні витратоміри містять рухливі елементи, які починають рух (безперервний або періодичний) під тиском вимірюваного середовища і при цьому відмірюють певні об'єми вимірюваного середовища. Такі витратоміри застосовуються для малих або середніх навантажень, таких як вимірювання споживання води в житлових будинках і їх номінальний діаметр не перевищує DN50.

У крильчастих витратомірах як чутливий елемент використовується турбінка, розташована тангенціально до напрямку потоку середовища. Так само як і камерні, крильчасті витратоміри застосовуються для малих або середніх навантажень і мають номінальні діаметри до DN50. У крильчастих витратомірах на вході встановлюються фільтри для захисту від попадання у вимірювальну камеру твердих тіл.

При великих витратах, коли застосування камерних або крильчастих витратомірів неможливе, застосовуються турбінні витратоміри. Так само як і в крильчастих, в турбінних витратомірах чутливим елементом є турбіна, але вона розташовується аксіально до напрямку потоку середовища. Турбінні витратоміри можуть бути встановлені в трубопроводі номінальним діаметром до DN300.

В основі електромагнітних витратомірів лежить взаємодія рухомої електропровідної рідини з магнітним полем, що підкоряється закону електромагнітної індукції. У електромагнітних витратомірах відсутні рухомі частини, що робить їх ідеальними для вимірювання витрати забрудненої води, яка може пошкодити механічні витратоміри. Однак електромагнітні витратоміри незастосовні для вимірювання витрати газу і пари а також рідин діелектриків.

Ультразвукові витратоміри засновані на вимірюванні залежного від витрати того чи іншого ефекту, що виникає при проході акустичних коливань через потік рідини чи газу. Основне поширення отримали прилади, засновані на вимірюванні різниці часу проходження акустичних коливань по потоку і проти нього. Висока точність вимірювання, відсутність рухомих частин і внаслідок цього висока надійність – ось основні переваги ультразвукових витратомірів.

Принцип дії вихрового витратоміра заснований на вимірюванні частоти коливань, що виникають в потоці в процесі вихроутворення, що виникає при обтіканні потоком середовища встановленого у вимірювальній камері тіла обтікання. Перевагою вихрових витратомірів є відсутність будь-яких рухомих елементів усередині трубопроводу, досить низька нелінійність в широкому діапазоні вимірювань, частотний вихідний сигнал, а також інваріантність

методу відносно електричних властивостей і агрегатного стану рухомого середовища.

Витратоміри мають тенденцію до погіршення метрологічних характеристик з плином часу, що призводить до отримання недостовірних результатів вимірювань.

У зв'язку з цим контроль метрологічних характеристик витратомірів повинен здійснюватися не тільки при випуску з виробництва, але і в процесі експлуатації з певним часовим інтервалом [17].

Видом контролю метрологічних характеристик витратомірів є повірка [18].

Для забезпечення єдності вимірювань певної фізичної величини складають ієрархічні схеми, що встановлюють метрологічні супідрядності національного еталона, розрядних еталонів і робочих ЗВТ.

Ієрархічна схема – це затверджений в установленому порядку документ, що регламентує засоби, методи і точність забезпечення метрологічної простежуваності одиниці фізичної величини від робочих ЗВТ до національного еталона за допомогою робочих еталонів. На рисунку 1.2 приведена узагальнена ієрархічна схема, яка включає в себе три рівні: I – рівень первинного еталона; II – рівень робочих еталонів; III – рівень робочих ЗВТ [19].

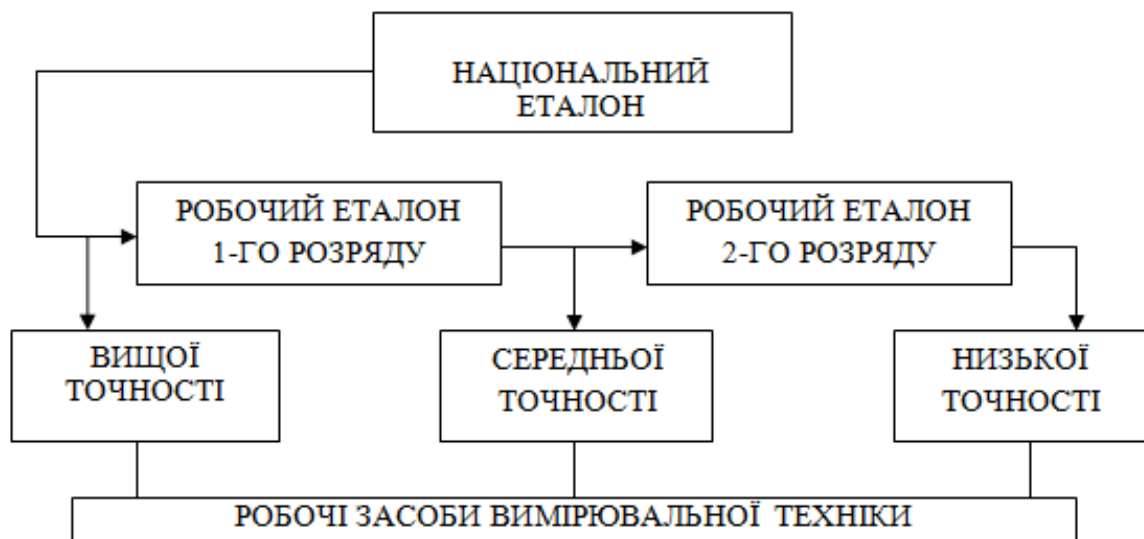


Рис. 1.1. Узагальнена ієрархічна схема

Таким чином, залежно від положення в ієрархічній схемі установки поділяються на:

- національні еталони;
- вторинні еталони – установки, що калібруються безпосередньо на державному первинному еталоні;
- робочі еталони 1-го розряду – установки, що калібруються безпосередньо на вторинному еталоні;
- робочі еталони 2-го розряду – установки, простежені безпосередньо до робочих еталонів 1-го розряду.

Існує кілька методів повірки [20]:

- безпосереднє звірення;
- метод прямих вимірювань;
- звірення за допомогою компаратора;
- метод опосередкованих вимірювань.

При повірці методом безпосереднього звірення [21] відтворюють певне значення фізичної величини і проводять одночасне вимірювання цієї фізичної величини еталонним і тим, що повіряється, приладами. При цьому визначають похибку як різницю показів повіреного і еталонного приладу, приймаючи покази еталонного приладу за дійсне значення.

Переваги цього методу в його простоті, наочності, можливості застосування автоматичної повірки (калібрування), відсутності потреби в складному обладнанні.

Метод прямих вимірювань може реалізуватися:

- шляхом прямих вимірювань приладом, що повіряється, фізичної величини, яка відтворюється еталонної мірою;
- шляхом прямих вимірювань еталонним приладом фізичної величини, що відтворюється мірою, яка повіряється.

Метод звірення за допомогою компаратора застосовується у випадку, коли з тих чи інших причин неможливо порівняти покази еталонного і того, що повіряється засобів вимірювань. Наприклад, при неможливості порівняння

показів приладів, що вимірюють одну і ту ж величину, наприклад, двох вольтметрів, один з яких придатний для постійного струму, а інший – змінного. Також компаратор необхідний за умови, що еталон і той, що повіряється засоби вимірювань є мірами. Вимірювання в цьому випадку виконують шляхом введення в схему перевірки компаратора, що дозволяє опосередковано порівнювати дві однорідні або різнорідні фізичні величини. Компаратором може служити будь-який засіб вимірювання – ВЗП, якщо він однаково реагує на сигнали як того, що повіряється (калібрується), так і еталонного вимірювального приладу. За допомогою ВЗП (далі за текстом – компаратор) послідовно вимірюється фізична величина, відтворена еталонним і тим, що повіряється засобом вимірювання, і виробляється сигнал різниці, який є оцінкою похибки засобу вимірювань, що повіряється (калібрується).

Перевагою даного методу є можливість отримання достовірних результатів звірення навіть при використанні порівняно грубих засобів для вимірювання різниці.

Метод опосередкованих вимірювань використовується, коли дійсні значення вимірюваних величин неможливо визначити прямими вимірюваннями або коли опосередковані вимірювання виявляються більш точними, ніж прямі. Цим методом визначають з самого початку не шукану величину, а інші, пов'язані з нею певною залежністю величини. Шукана величина визначається розрахунковим шляхом.

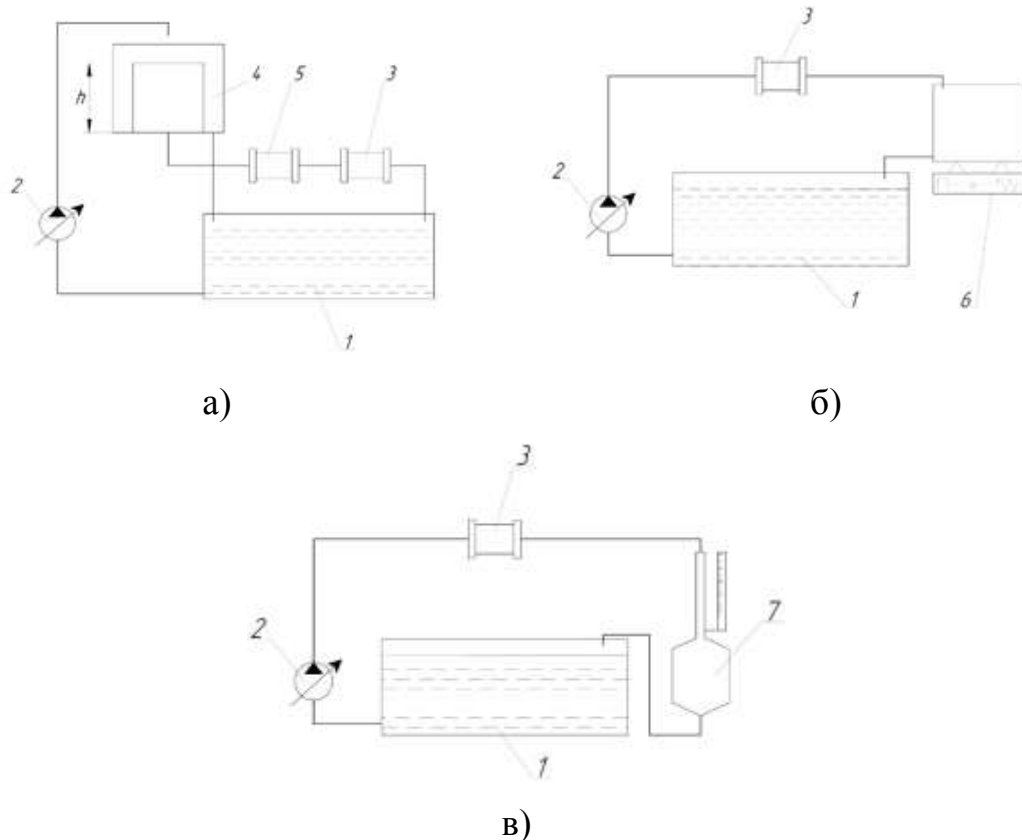
Стосовно до витратомірів із зазначених вище методів можна використовувати метод безпосереднього звірення і метод опосередкованих вимірювань.

У загальному випадку будь-яка повірочна витратомірна установка, призначена для відтворення та вимірювання витрати, складається з наступних технічних систем [22]:

- система зберігання і підготовки робочого середовища;
- система відтворення потоку робочого середовища;
- система регулювання і вимірювання витрати.

Однією з основних конструктивних особливостей проливної установки є система відтворення потоку робочого середовища.

Потік води в гідравлічній ділянці може створюватися за допомогою напірного бака, що забезпечує постійний напір на вимірювальній ділянці установки, як це зазначено на рисунку 1.2 а).



1 – резервуар для зберігання робочої рідини; 2 – насос; 3 – витратомір, що повіряється; 4 – напірний бак; 5 – еталонний витратомір; 6 – ваги;
 7 – міра місткості

Рис. 1.2. Витратомірні установки: а) з напірним баком та еталонним витратоміром; б) з насосом і вагами; в) з насосом та мірником

Бак забезпечений системою переливних лотків, що підтримують постійний рівень рідини, яка надходить в бак. Для забезпечення необхідної максимальної витрати і статичного тиску на установці бак слід монтувати на відповідній, іноді досить значній, висоті. У резервуар за допомогою насосів подається вода, при цьому її рівень в резервуарі підтримується постійним. Під постійним тиском вода самопливом надходить у вимірювальну ділянку установки. Такий спосіб подачі води дозволяє зменшити пульсації витрати, але

він вимагає великих капітальних вкладень і площ для розміщення водонапірної башти.

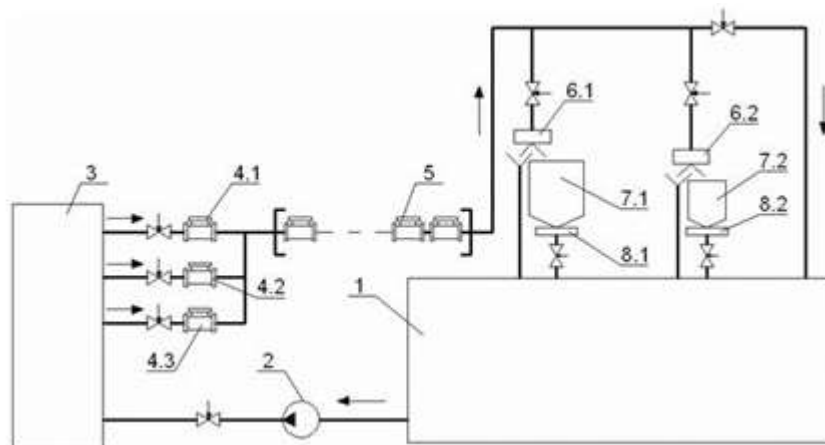
З огляду на те, що сучасні насоси дозволяють отримати потік води з малими пульсаціями, застосовується також спосіб примусової подачі води в вимірювальну ділянку установки за допомогою насосів з регульованим числом обертів, як це зазначено на рисунку 1.2 б), в).

Таким чином, за способом створення потоку води в вимірювальній ділянці установки можна розділити на установки з подачею води самопливом і установки з примусовою подачею води.

Система відтворення потоку робочого середовища повинна забезпечувати рівномірний, вісесиметричний, стабілізований потік робочого середовища в вимірювальній ділянці.

Для створення стаціонарного потоку води в вимірювальній ділянці еталона застосовують спеціальні пристрої для формування профілю потоку. Як такі пристрої використовують ресивери, випрямлячі або прямі ділянки трубопроводу. Вид пристрою формування потоку в вимірювальній ділянці еталона є наступною класифікаційною ознакою.

В установці ВПУ-Енерго стабілізація витрати виконується за допомогою ресивера (рис. 1.3) [23].



1 – резервуар для зберігання робочої рідини; 2 – насос з регульованим електроприводом; 3 – ресивер для деаерації та забезпечення стабільності витрати рідини; 4 – еталонні витратоміри; 5 – вимірювальна ділянка; 6 – перемикачі потоку; 7 – ємності для зважування; 8 – ваги

Рис. 1.3. Установа з ресивером

В [24] наведено різні конструкції випрямлячів потоку. Приклади випрямлячів наведені на рисунку 1.4.

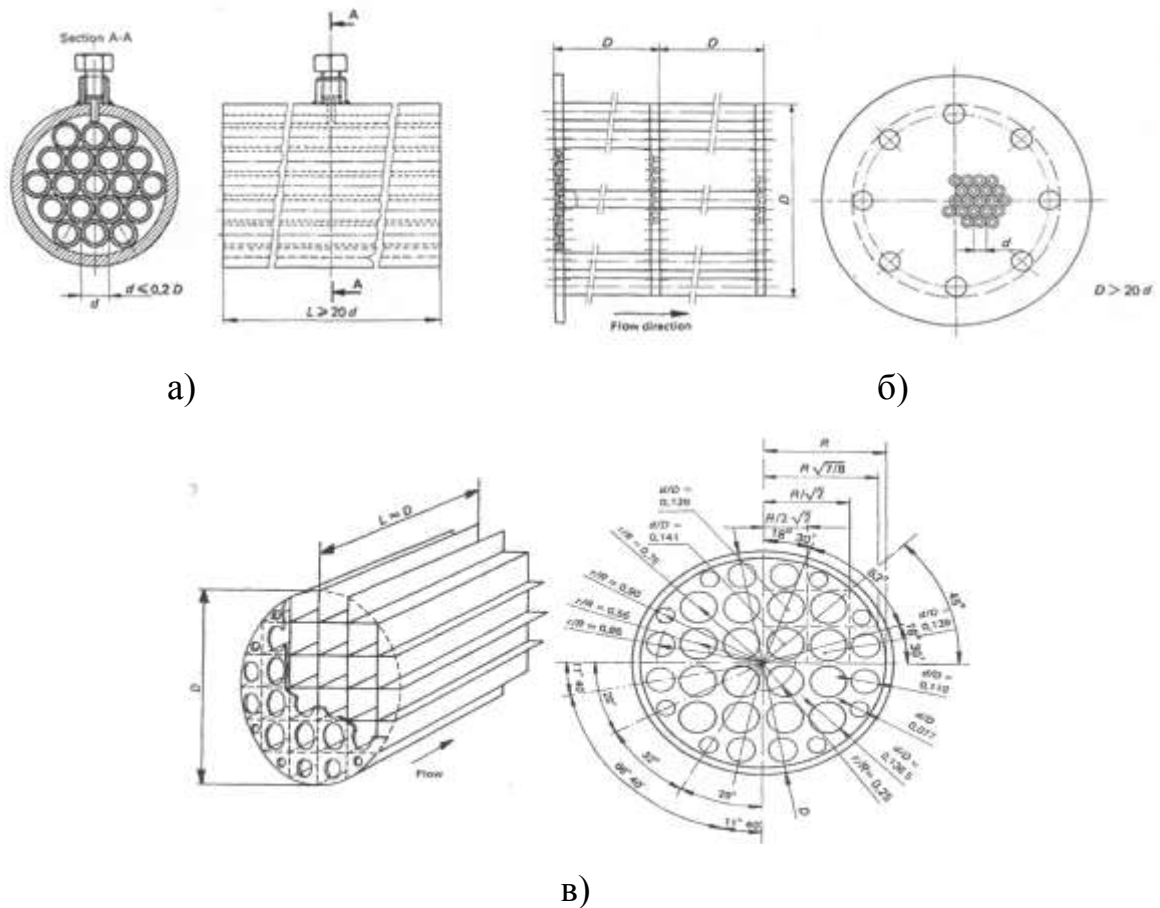


Рис. 1.4. Види пристроїв формування потоку: а) типу пучка труб; б) типу перфорованих пластин; в) типу Занкера

В роботі [25] показано, що при зміні температури води значно змінюється профіль швидкостей потоку води в вимірювальній ділянці еталона (рис. 1.5).

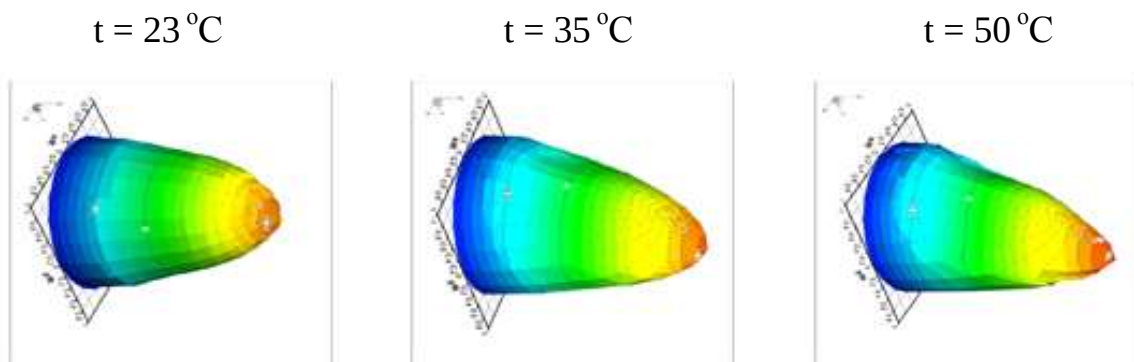


Рис. 1.5. Температурна залежність профіля потоку рідини у вимірювальній ділянці установки

Оскільки профіль швидкостей потоку води, що протікає через витратомір, впливає на градувальну характеристику більшості типів витратомірів, необхідно градування і повірку (калібрування) витратомірів проводити за температури води в установці, яка відповідає температурному діапазону витратоміра. Тому створюються установки з температурою робочої рідини до 30 °С і установки з температурою робочої рідини від 30 °С до 90 °С.

Система регулювання та вимірювання витрати крім регулюючих елементів включає в себе засоби вимірювання, з допомогою яких отримують дійсне значення вимірюваної величини.

У якості засобів вимірювальної техніки можуть застосовуватись еталонний витратомір (метод безпосереднього звірення), ваги (гравіметричний метод) або міри місткості (волюметричний метод) [26].

За методу безпосереднього звірення в якості еталонного засобу вимірювань застосовується витратомір, як це показано на рисунку 1.2 а).

При гравіметричному методі (дивись рис. 1.2б) виконуються прямі вимірювання маси води, що протікає через вимірювальну ділянку установки за один пролив, часу проливу і температури води. Щоб визначити об'ємну витрату необхідно виміряне значення маси поділити на час вимірювання і густину води. Густина води розраховується як функція температури води.

При волюметричному методі (дивись рис. 1.2в) виконуються прямі вимірювання об'єму води, що протікає через вимірювальний ділянку установки за один пролив і часу проливу. Щоб визначити об'ємну витрату необхідно виміряне значення об'єму поділити на час вимірювання.

Витратоміри, що повіряються на установці, можуть мати тільки візуальний вихідний сигнал, а можуть мати вихідний електричний сигнал – силу струму, напругу, імпульсний сигнал [27]. Якщо установка не має в своєму складі жодного спеціального пристрою, знімати покази з витратоміра в процесі вимірювання може тільки оператор, використовуючи вихідний візуальний сигнал витратоміра. До складу установки може входити спеціальний пристрій, що перетворює візуальний сигнал витратоміра в електричний сигнал, який

може оброблятися установкою. І, нарешті, до складу установки може входити спеціальний пристрій, що приймає вихідний електричний сигнал витратоміра [28].

Таким чином, за можливістю сприймати вихідний сигнал витратоміра проливні установки можуть поділятися на:

- установки з візуальним зняттям показів;
- установки з пристроєм перетворення візуального вихідного сигналу витратоміра в електричний сигнал;
- установки з пристроєм, що приймає вихідний електричний сигнал витратоміра.

Знімати покази з витратомірів при проведенні їх повірки на установці можна двома способами [29]. За першого способу, так званого «старту з місця», зняття початкових показів приладу виконується на початку випробувань за відсутності потоку води. Потім потік води створюють відкриттям запірного клапана і припиняють закриттям клапана. Після цього знімають кінцеві покази приладу. Цей спосіб зняття показів може застосовуватися тільки при повірці лічильників води. Схематичне зображення цього способу наведено на рисунку 1.6.

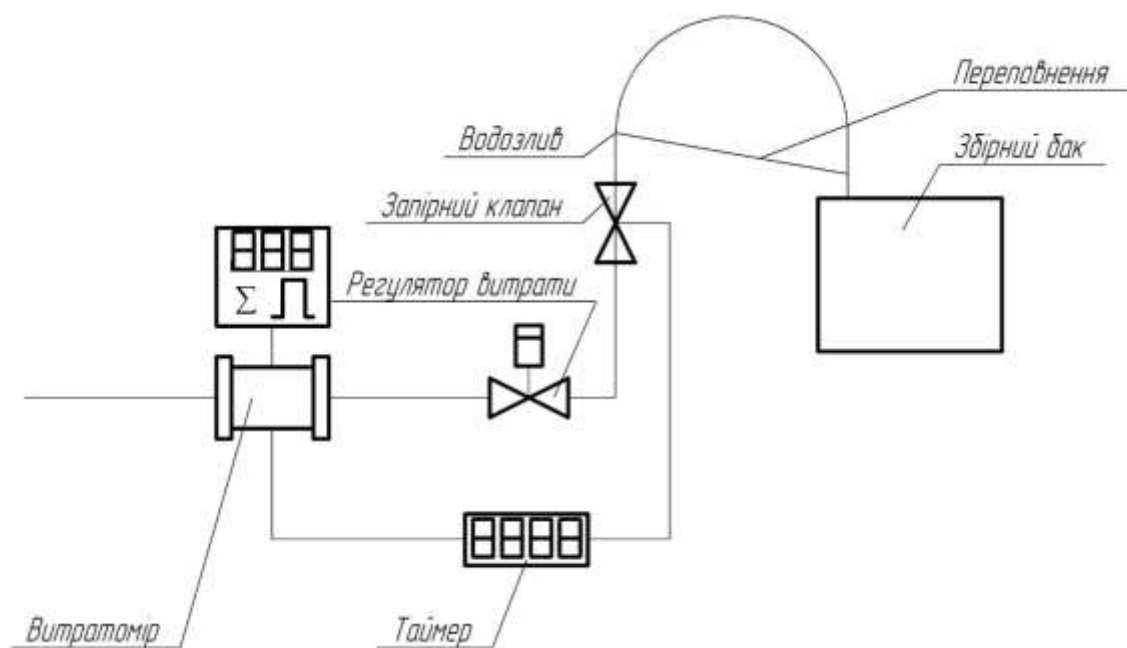


Рис. 1.6. Установка з реалізацією методу «старт з місця»

За другого способу, схематичне зображення якого наведено на рисунку 1.7, зняття показів проводиться при сталому режимі течії води через витратомір при заданому значенні витрати. Це так званий «старт з ходу». Зняття початкових і кінцевих показів приладу здійснюється в певні моменти часу при постійному русі рідини по вимірювальній ділянці установки. Завдання часу початку і закінчення вимірювання проводиться в установках по-різному.

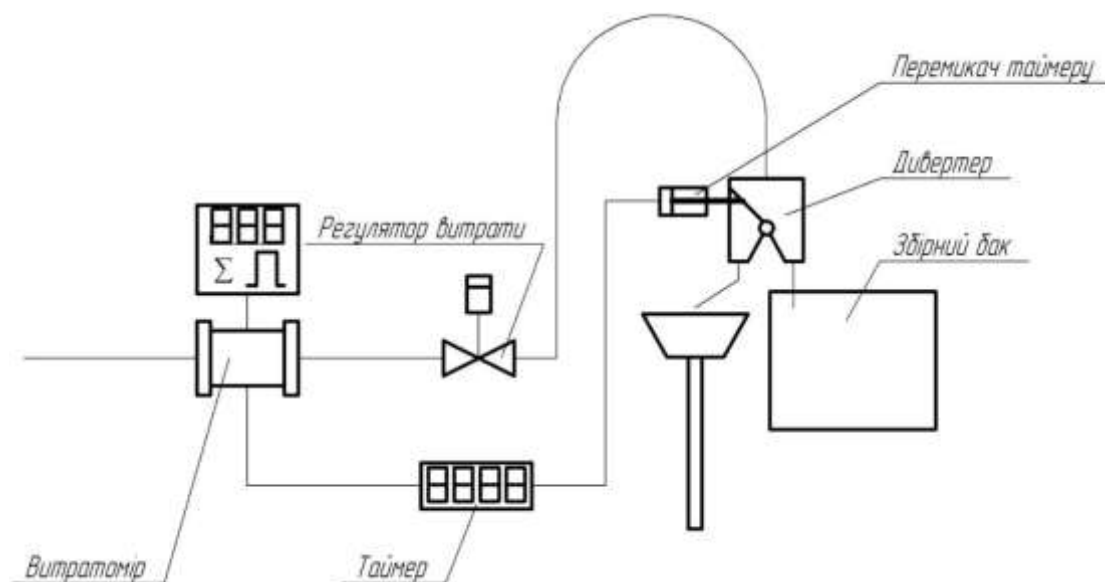


Рис. 1.7. Установка з реалізацією методу «старт з ходу»

У гравіметричних і волюметричних установках еталонне значення витрати реалізується шляхом зважування зібраної на вагах води або визначенням її об'єму за допомогою мірника. Для цього створюється сталий потік води, який протікає через витратомір, що повіряється і далі через байпас надходить в оборотний резервуар. У певний момент часу спеціальний пристрій, званий дивертером, механічно перемикає потік води, що протікає через витратомір, що повіряється (калібрується) з напрямку «на байпас» на напрям «на ваги» («на мірник»). У цей момент в установці починається рахунок вихідних імпульсів витратоміра, пропорційних об'єму, що протікає. В установці в момент перемикання дивертера в напрям «на ваги (на мірник)» починається вимірювання інтервалу часу. При заповненні ємності на вагах (мірника) дивертер механічно перемикає потік води, що протікає через витратомір, що повіряється з напрямку «на ваги» («на мірник») на напрям «на байпас». У цей

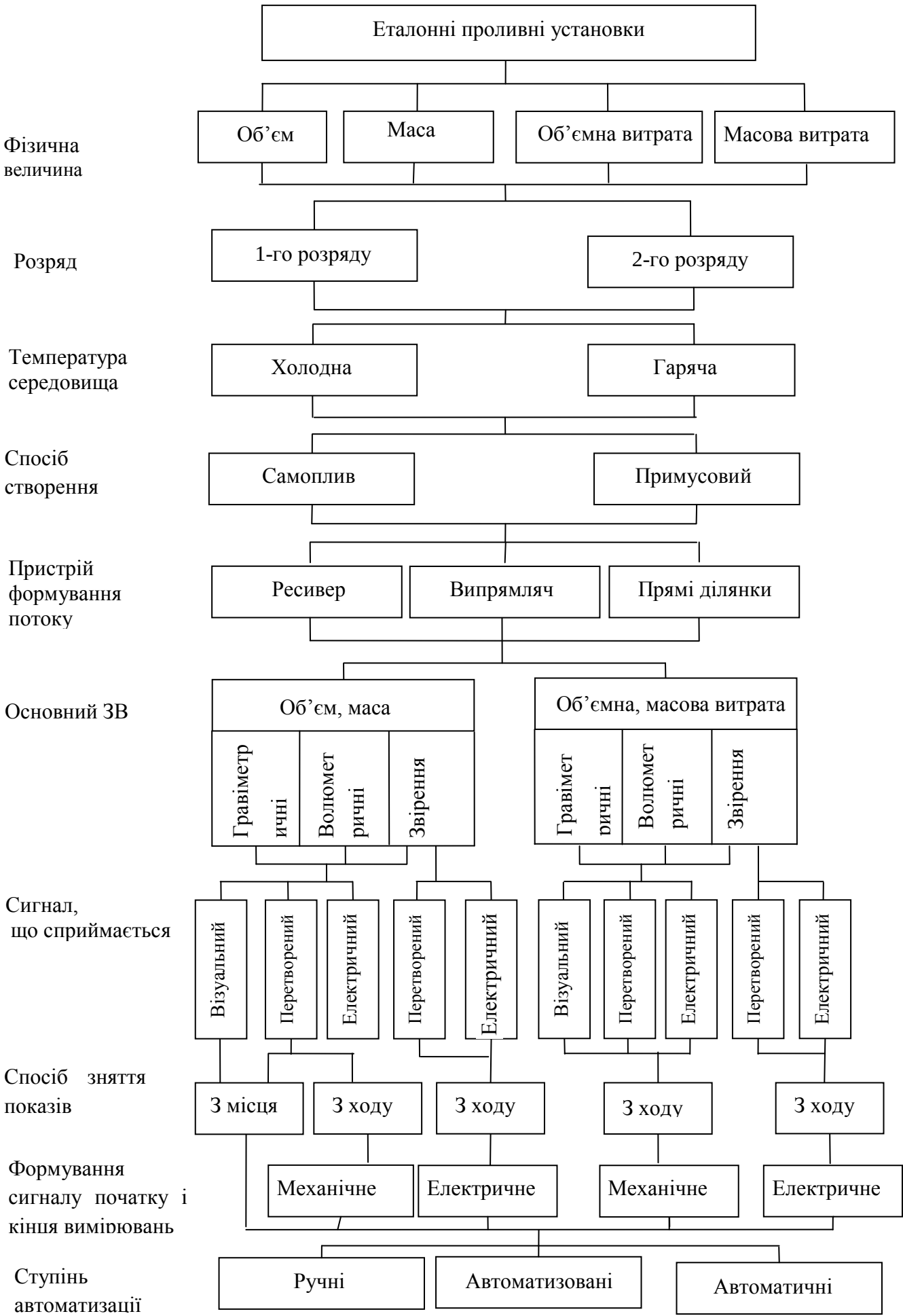
момент в установці рахунок вихідних імпульсів витратоміра, припиняється і закінчується вимірювання інтервалу часу.

В установках звірення еталонне значення об'єму, маси, об'ємної та масової витрати визначається за показами відповідного приладу, що входить до складу установки [30]. У таких установках немає необхідності здійснювати перенаправлення потоку води, а моменти початку і закінчення вимірювання можуть створюватися за допомогою електричного сигналу. При цьому сталий потік постійно протікає через витратомір установки і витратомір, що повіряється і далі через байпас надходить в оборотний резервуар. У певний момент часу за допомогою електричного сигналу «Старт» починаються вимірювання. У цей момент в установці починається рахунок вихідних імпульсів еталонного витратоміра. В установці для перевірки витратомірів починається вимірювання інтервалу часу. Після закінчення певного інтервалу часу за допомогою електричного сигналу «Стоп» закінчуються вимірювання. У цей момент в установці рахунок вихідних імпульсів витратоміра припиняється. Також закінчуються вимірювання інтервалу часу. Цей спосіб зняття показів може застосовуватися для витратомірів які мають вихідний електричний сигнал або установка має спеціальний пристрій для перетворення візуального вихідного сигналу витратоміра в електричний сигнал.

Залежно від необхідної продуктивності установок вони можуть поділятися на установки з ручним керуванням, автоматизовані та автоматичні.

Запропонована класифікація еталонів за наведеними вище ознаками (див, рисунок 1.8), що враховує метрологічні характеристики установок, їх конструктивні особливості та виробничі характеристики [5].

Пропонована класифікація установок дозволяє однозначно визначити установку за її метрологічними характеристиками, конструктивними особливостями і продуктивністю.



1.2 Огляд зарубіжних еталонів

1.2.1 Національний еталон Німеччини

Національний еталон Німеччини [31] зберігається у Фізико-Технічній Установі в м. Брауншвейг (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Загальний вид Національного еталона Німеччини

Національний еталон об'єму й витрати рідин відтворює всі чотири фізичні величини: масу, об'єм, масову і об'ємну витрату рідини. Він працює з рідиною «вода» в діапазоні витрат від $0,3 \text{ м}^3/\text{год}$ до $2100 \text{ м}^3/\text{год}$ і з розширеною відносною невизначеністю вимірювань $0,02 \%$. Фізичні величини вимірюються гравіметричним методом за допомогою трьох зважувальних систем, що базуються на вагах з найбільшою межею зважування 30000 кг , 3000 кг і 300 кг .

Характеристики та калібрувальні можливості еталона наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Характеристики та калібрувальні можливості еталона

Вимірювані величини	Об’ємна витрата Масова витрата Об’єм Маса	Випробування і калібрування витратомірів та лічильників об’єму та маси
Випробувальна рідина	Вода	
Тип вимірювань	Старт з ходу Старт з місця	
Створення потоку води	Напірний бак Насоси	Постійний тиск у вимірювальній ділянці (приблизно 0,35 МПа) Змінний тиск у вимірювальній ділянці (приблизно до 0,6 МПа)
Номінальні діаметри	Секція А Секція В	DN200-DN400 DN20-DN150
Діапазон витрати	Секція А Секція В	3 м ³ /год...2100 м ³ /год 0,3 м ³ /год...320 м ³ /год
Діапазон тиску	0,2 МПа...0,6 МПа	При роботі з насосами
Температура води	20 °С...23 °С	При роботі з напірним баком
Розширена невизначеність вимірювань	± 0,02 %	При роботі з напірним баком

1.2.2 Національний еталон Словаччини

Національний еталон одиниць витрати та об’єму і маси рідини, що протікає по трубопроводу, Словаччини [32] зберігається в Словацькому метрологічному Інституті в м. Братислава (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Загальний вид Національного еталона Словаччини

У 2000 році був затверджений в якості національного еталону. В еталоні реалізується як старт з ходу, так і старт з місця, а також є можливість підключати прилади з механічним відліковим пристроєм і прилади з активним і пасивним вихідним електричним сигналом. Це дає можливість калібрувати витратоміри з вихідним візуальним сигналом, а також з вихідним імпульсним сигналом, пасивним або активним, частотою до 2 кГц. Еталон реалізує гравіметричний метод вимірювання і складається з таких складових частин (гідравлічна схема):

- система створення потоку рідини;
- вимірювальні ділянки – для малих і середніх витратомірів;
- витратомірні гілки – 1-а, 2-а, 3-я і 4-а;
- системи зважування – 2-а, 3-я і 4-а;
- система контролю.

Основні метрологічні характеристики еталона:

- діапазон витрати – $0,020 \text{ м}^3/\text{год} \dots 270 \text{ м}^3/\text{год}$;
- номінальні діаметри – DN15 - DN150;

– температура робочої рідини — 10 °С ... 85 °С.

Забезпечення метрологічних характеристик відтворюваних фізичних величин у всьому діапазоні витрат досягається застосуванням трьох систем зважування (ваги з дивертерами) і чотирьох паралельних витратомірних гілок з регулюючими засувками.

Вимірювальні ділянки, витратомірні гілки і системи зважування сконструйовані так, щоб можна було легко контролювати їх роботу за допомогою прозорих ділянок трубопроводів, сигналізаторів переповнення, малих контрольних вентилів між двома вентилями на виході з трубопроводу в навколишнє середовище.

Всі частини гідравлічної системи, що стикаються з вимірюваним середовищем, виконані з неіржавіючої сталі.

Для знімання даних прилади, що калібруються, можна підключити за допомогою оптичних пристроїв або лічильників вихідних імпульсних сигналів. Якщо використовується метод старту з місця, покази механічних лічильників заносяться до комп'ютера. Можливі такі основні методи випробувань:

- гравіметричний з стартом з ходу з прямим зчитуванням імпульсів;
- гравіметричний з стартом з місця з прямим зчитуванням імпульсів;

Додаткові методи:

- гравіметричний з стартом з ходу з методом цілих імпульсів;
- волюметричний з стартом з ходу з еталонними вимірювачами і прямим зчитуванням імпульсів;
- волюметричний з стартом з ходу з еталонними вимірювачами з методом цілих імпульсів.

1.2.3 Державний первинний еталон одиниць масової і об'ємної витрати рідини Російської Федерації

Державний первинний еталон одиниць масової і об'ємної витрати рідини Російської Федерації [33] зберігається у «Всеросійському науково-дослідному інституті витратометрії», м Казань (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Загальний вид Національного еталона
Російської Федерації

Державний первинний еталон одиниць масової і об'ємної витрати рідини призначений для відтворення і зберігання одиниць масової і об'ємної витрати (маси і об'єму) рідини, що протікає в діапазоні 2,5 – 500 т/год ($\text{м}^3/\text{год}$) і передачі розміру одиниці вторинним еталонам, робочим еталонам 1-го і 2-го розрядів і робочим засобам вимірювань відповідно до ГОСТ 8.142-2013.

Основні технічні характеристики:

- діапазон витрат від 2,5 до 500 т/год ($\text{м}^3/\text{год}$);
- номінальні діаметри умовних проходів засобів вимірювань, що повіряються — від DN 40 до DN200;
- довжина вимірювальної ділянки 3500 мм.

Первинний еталон забезпечує відтворення одиниці з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань, що не перевищує $0,82 \cdot 10^{-4}$ за 11 незалежних вимірювань.

Невиключена систематична похибка не перевищує $1,8 \cdot 10^{-4}$.

Стандартна невизначеність, за типом A:

- маса – $7,8 \cdot 10^{-5}$;

- масова витрата – $8 \cdot 10^{-5}$;
- об'єм – $8,1 \cdot 10^{-5}$;
- об'ємна витрата – $8,2 \cdot 10^{-5}$.

Стандартна невизначеність, типу В:

- маса – $1,59 \cdot 10^{-4}$;
- масова витрата – $1,6 \cdot 10^{-4}$;
- об'єм – $1,61 \cdot 10^{-4}$;
- об'ємна витрата – $1,63 \cdot 10^{-4}$.

Розширена невизначеність:

- маса – $3,54 \cdot 10^{-4}$;
- масова витрата – $3,6 \cdot 10^{-4}$;
- об'єм – $3,61 \cdot 10^{-4}$;
- об'ємна витрата – $3,65 \cdot 10^{-4}$.

1.2.4 Вихідний еталон одиниць масової та об'ємної витрати води Білорусі

Вихідний еталон одиниць масової та об'ємної витрати рідини Білорусі [34] зберігається у Білоруському державному інституті метрології, м. Мінськ (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Загальний вид Вихідного еталону одиниці масової та об'ємної витрати води Білорусі

До складу еталона входять:

- ваги KS 300s «METTLER TOLEDO», $HM3 = 300$ кг;
- ваги KCS 3000 «METTLER TOLEDO», $HM3 = 3\,000$ кг;
- масовий витратомір «PROMASS 83F» (0-100 000) кг/год;
- масовий витратомір «PROMASS 83F» (0-300 000) кг/год;
- вимірювальні перетворювачі тиску: «CEREBAR S PMC 731» і «DELTABAR S PMD 230»;
- еталонні термометри опору платинові ETC-100;
- автоматизований вимірювальний комплекс АІК.

Еталон змонтований в спеціально обладнаних приміщеннях.

Метрологічні характеристики еталона:

- масова витрата води:
- діапазон – від 60 до 300 000 кг/год;
- невиключена систематична похибка, не більше $\pm 0,028$ %;
- випадкова похибка, не більше $\pm 0,01$ %;
- об'ємна витрата води:
- діапазон – від 0,06 до 300 м³/год;
- невиключена систематична похибка, не більше $\pm 0,034$ %;
- випадкова похибка, не більше $\pm 0,02$ %.

Галузь застосування:

- теплоенергетичний комплекс: для систем холодного і гарячого водопостачання промислових, комунальних і сільськогосподарських підприємств, в т.ч. для вузлів комерційного обліку енергоносіїв;
- випробування, повірка та калібрування численних за типами та принципом дії витратомірів, лічильників води, інших засобів обліку енергоносіїв, а також випробування запірно-регулюючої арматури систем водо- і теплопостачання.

1.3 Висновки та постановка задач дослідження

З аналізу існуючих методів відтворення та вимірювання витрати рідини в еталонних установках витікає наступне:

– підвищення точності робочих засобів вимірювання витрати потребує створення високоточних еталонних установок для їх повірки і калібрування в зв'язку з необхідністю забезпечення єдності вимірювань в галузі витратометрії;

– для високоточних еталонних установок для відтворення та вимірювань витрати рідини найбільш прийнятним методом є гравіметричний, заснований на опосередкованому вимірюванні витрати на підставі прямих вимірювань маси, температури рідини і часу наповнення ємності для зважування;

– на точність відтворення витрати в установці впливають не тільки похибки засобів вимірювань, а й конструктивні параметри гідравлічної системи установки.

У зв'язку з вищевикладеним видається доцільною постановка наступних завдань дисертації:

1) провести аналіз підходів та існуючих методів і конструктивних рішень вимірювання в витратомірних установках;

2) за результатами аналізу встановити узагальнену залежність вимірювання витрати рідини, яка дозволила б виявити джерела неточності її вимірювання;

3) встановити за рахунок експериментальних та теоретичних досліджень вплив параметрів вимірюваного середовища і конструктивних елементів витратомірної установки на точність вимірювання;

4) за результатами аналізу методів передачі одиниці витрати від національного еталона вторинним еталонам та робочим засобам вимірювальної техніки визначити шляхи підвищення точності калібрування витратомірів;

5) провести дослідження впливу пульсацій потоку рідини в вимірювальній ділянці установки і розробити конструктивні методи зменшення впливу пульсацій на точність вимірювань;

6) розробити експериментально-теоретичний підхід до оцінки невизначеності інтервальних місткостей в витратомірних установках з еталонними засобами місткості;

7) провести дослідження динамічного методу вимірювання витрати у вимірювальній ділянці установки і розробити конструктивні методи, направлені на покращення техніко-економічних показників установки.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТИ ВОДИ В ВИТРАТОМІРНИХ УСТАНОВКАХ

2.1 Встановлення узагальненої залежності вимірювання витрати

Установка призначена для матеріалізації фізичної величини – витрати води, що протікає крізь вимірювальну ділянку, шляхом створення потоку води крізь цю ділянку і вимірювання витрати опосередкованим методом.

Витратомірні установки мають суттєву особливість – вони являють собою цілісний комплекс засобів вимірювальної техніки, конструктивних елементів та пристосувань: насосів, трубопроводів, засувок, дивертерів.

І якщо засобам вимірювальної техніки можна передати одиницю фізичної величини під час їх калібрування, то інше обладнання не є засобами вимірювальної техніки і не підлягає калібруванню. В той же час всі ці конструктивні елементи впливають на точність установки і таким чином на точність калібрування робочих засобів вимірювальної техніки.

Тому при проведенні оцінки невизначеності вимірювань витрати середовища за допомогою установки необхідно враховувати в моделі невизначеності джерела, які впливають як з невизначеності засобів вимірювальної техніки, що входять до складу установки, так і джерела, які виникають через особливості роботи конструктивних елементів установки.

Для цього насамперед необхідно встановити узагальнену залежність вимірювання витрати плинного середовища від характеристик самого середовища і гравіметричної вимірювальної установки.

Масова витрата води, що протікає через вимірювальну ділянку установки, при застосуванні гравіметричного методу згідно з міжнародним стандартом [35] визначається за формулою:

$$Q_m = c_V \times \frac{m_k - m_n}{T}, \quad (2.1)$$

де Q_m – масова витрата води, кг/год;

c_V – коригуючий коефіцієнт;

m_n – покази ваг на початку вимірювання, кг;

m_k – покази ваг в кінці вимірювання, кг;

T – час вимірювання, год.

Коригуючий коефіцієнт вводиться як поправка на дію виштовхувальної сили і розраховується за формулою [36]:

$$c_V = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_z}\right) / \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{pu}}\right), \quad (2.2)$$

де ρ_a – густина навколишнього повітря за умов вимірювання, кг/м³;

ρ_z – густина матеріалу стандартних об'єктів, за допомогою яких калібруються ваги, кг/м³.

ρ_{pu} – густина реальної води за температури під час вимірювання, кг/м³.

Густина повітря визначається відповідно до [37] як функція атмосферного тиску, відносної вологості та температури навколишнього повітря.

Для вимірювання об'ємної витрати Q_V необхідно масову витрату поділити на густину води:

$$Q_V = c_V \times \frac{m_k - m_n}{\rho_{pu} \times T}. \quad (2.3)$$

Залежність вимірювання витрати (2.3) передбачає, що вся вода, що пройшла через витратомір, встановлений у вимірювальній ділянці установки, потрапляє у ємність для зважування. Однак особливості конструкції, притаманні витратомірній установці, а також методика виконання вимірювань витрати опосередкованим методом обумовлюють відмінність об'єму води, що пройшов через витратомір від об'єму води, що потрапив у ємність для зважування.

За результатами проведеного аналізу встановлено такі причини цієї невідповідності [11]:

- відмінність густини реальної води в установці від густини дистильованої води;
- випаровування води в ємності для зважування;
- нерівномірність спрацьовування дивертера;
- остигання води в трубопроводі вимірювальної ділянки;
- відмінність тиску у вимірювальній ділянці і в ємності для зважування.

Розглянемо ці джерела.

2.1.1 Відмінність густини реальної води в установці від густини дистильованої води

Значення густини води ρ_{pi} може бути розраховане як функція вимірюної температури води згідно з [38]. Однак в [38] наведено залежність густини дистильованої води від температури при атмосферному тиску ρ_{di} . У зв'язку з тим, що у витратомірній установці застосовується недистильована вода і у витратомірній ділянці, де встановлюється витратомір, що калібрується, тиск рідини більше, ніж атмосферний, в розрахунку витрати, що відтворюється витратомірною установкою, виникає неточність.

Запропоновано розраховувати густину реальної води при температурі та тиску у вимірювальній ділянці установки за формулою:

$$\rho_{pi} = (\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_{di}, \quad (2.4)$$

де ρ_{di} – густина дистильованої води за температури під час вимірювання, кг/м^3 ;

ρ_{p20}, ρ_{d20} – густина реальної і дистильованої води за температури 20°C відповідно, кг/м^3 .

Виконання розрахунку густини реальної води за наведеною вище формулою дозволить підвищити точність вимірювання витрати у витратомірній установці.

2.1.2 Випаровування води в ємності для зважування

Одним із джерел невідповідності є випаровування води в ємності для зважування. Вода, що пройшла через вимірювальний ділянку установки, надходить в ємність для зважування, і під час вимірювання частина води випаровується. Встановлено, що при зважуванні води в кінці вимірювання, об'єм води в ємності для зважування буде менше об'єму води, що пройшла через вимірювальну ділянку на величину:

$$V_o = \frac{o \cdot T}{(\rho_{p20} / \rho_{d20}) \cdot \rho_{di}}, \quad (2.5)$$

де V_o – об'єм води, яка випарувалася із накопичувальної ємності за час вимірювання, м³;

o – інтенсивність випаровування води під час вимірювання, кг/с.

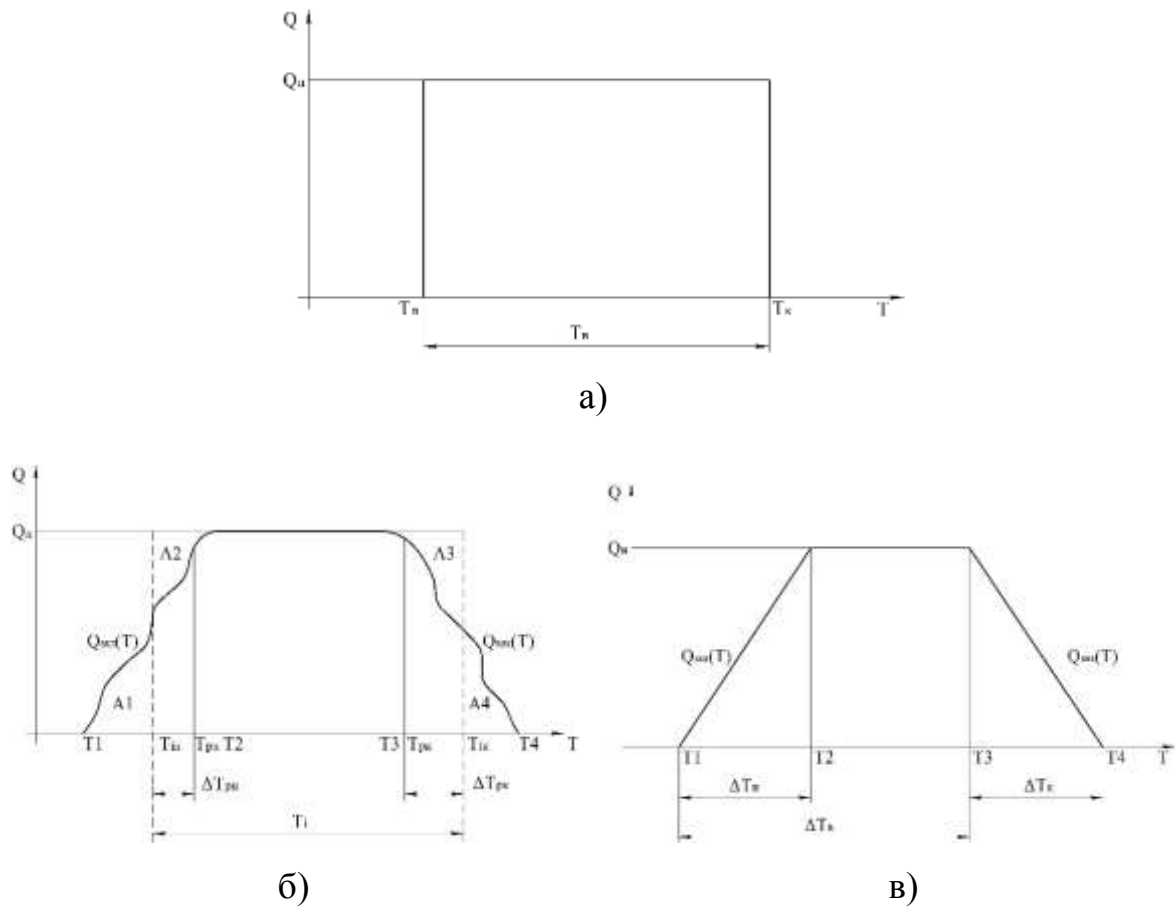
2.1.3 Нерівномірність спрацьовування дивертера

Важливою складовою витратомірної установки є дивертер, який також впливає на точність вимірювання витрати установкою.

Функція дивертера полягає у зміні напрямку потоку води при вимірюванні маси води у ємності для зважування. Зміна напрямку на ємність для зважування відбувається безпосередньо в момент початку процесу вимірювання. Без дивертера неможливо реалізувати процес вимірювань з ходу – за стабільного та заздалегідь визначеного значення витрати. Якщо дивертер працює ідеально, тобто переключення напрямку потоку на ємність для зважування на початку вимірювання та зворотне переключення потоку з ємності для зважування в кінці вимірювання відбувається миттєво, зміна витрати в часі являє прямокутний профіль, як це показано на рисунку 2.1 а), весь об'єм води стікає в ємність для зважування.

В реальності при надходженні сигналу про початок вимірювання при спрацьовуванні дивертера збільшення витрати від нуля до номінального

значення відбувається за інтервал часу між моментами T_1 і T_2 як це показано на рисунку 2.1 б).



а) робота в ідеальних умовах; б) робота в реальних умовах;

в) робота за припущення лінійної зміни витрати

Рис. 2.1. Діаграми роботи дивертера

Аналогічно при спрацьовуванні дивертера в кінці вимірювання зменшення витрати від номінального значення до нуля відбувається за інтервал часу між моментами T_3 і T_4 . Якщо час вимірювання обрати між моментами T_1 і T_4 , в ємність для зважування попаде менше води, чим при ідеальному профілі витрати. Якщо час вимірювання обирати між T_2 і T_3 , в ємність для зважування попаде більше води, чим при ідеальному профілі витрати.

Ідеальними пунктами початку і кінця вимірювання можуть бути моменти T_{in} та T_{ik} , які знаходяться в тих місцях, в яких існує рівність площ $A_1 = A_2$ і

$A_3 = A_4$. В цьому випадку похибка від недолива або перелива води не з'являється.

В реальних дивертерах, завдяки регулюванню положення фотодатчиків створюються реальні моменти запуску T_{pn} і T_{pk} , які обмежують час вимірювання. При цьому створюється похибка часу вимірювання:

$$\Delta T = (T_{pa} - T_{uda}) + (T_{udb} - T_{pb}). \quad (2.6)$$

Знайти цю різницю часу аналітично неможливо, оскільки невідомі залежності $Q_{вкл}(T)$ та $Q_{вук}(T)$.

Однак, якщо зробити припущення, що функції $Q_{вкл}(T)$ та $Q_{вук}(T)$ лінійні, як це показано на рисунку 1в), можна оцінити об'єм води, який не враховується при зважуванні:

$$V_{difT_{div}} = \int_{T_1} Q_{вкл} dT - \int_{T_2} Q_{вук} dT \approx \frac{1}{2} \cdot Q_n \cdot \Delta T_n - \frac{1}{2} \cdot Q_n \cdot \Delta T_k = \frac{1}{2} Q_n \cdot (\Delta T_n - \Delta T_k) = \frac{c_V}{2 \cdot T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_{du}} \cdot difT_{div}, \quad (2.7)$$

де $V_{difT_{div}}$ – об'єм води, який не враховується при вимірюванні через різницю часу перенаправлення потоку води за допомогою дивертера;

$difT_{div}$ – різниця часу перенаправлення потоку води за допомогою дивертера в прямому та зворотному напрямку.

2.1.4 Остигання води в трубопроводі вимірювальної ділянки

Встановлено ще одне джерело, що впливає на точність установки. На рисунку 2.2 це джерело показано схематично. Вода при проходженні по трубопроводу від витратоміра, що калібрується, 1 до виходу з трубопроводу 2 остигає. Тому виникає різниця температур $t_1 - t_2$.

Внаслідок різних коефіцієнтів температурного розширення матеріалу трубопроводу та води зміна об'єму ділянки трубопроводу і води будуть різні, і в ємність для зважування надійде об'єм води, що відрізняється від об'єму води, що пройшов через вимірювальну ділянку, на величину:

$$V_{\Delta t_2} = V_{mp} (3 \cdot \alpha - \beta) \cdot \Delta t_2, \quad (2.8)$$

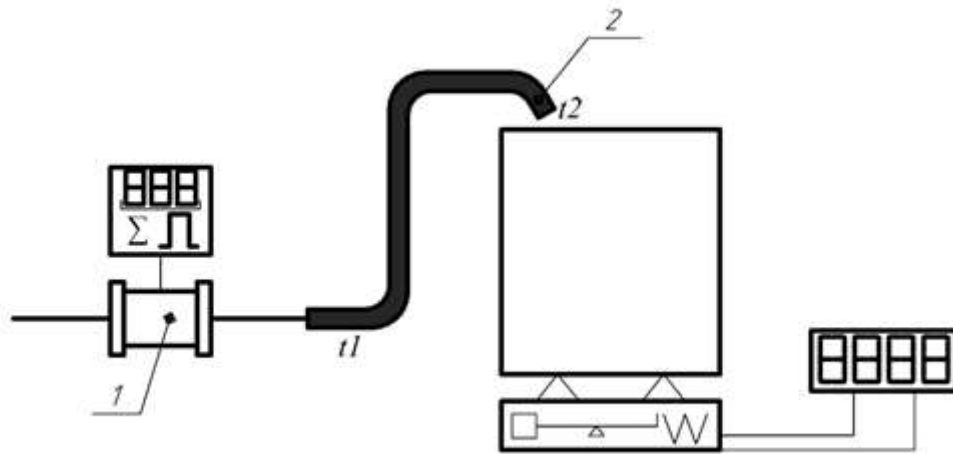
де $V_{\Delta t_2}$ – зміна об'єму води, який не враховується при вимірюванні через різні коефіцієнти температурного розширення матеріалу трубопроводу і води;

V_{mp} – номінальний об'єм трубопроводу на ділянці від витратоміра, що калібрується, до виходу з трубопроводу;

α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу трубопроводу;

β – коефіцієнт об'ємного розширення води;

Δt_2 – різниця температури води у вимірювальній ділянці і на виході з трубопроводу.



1 – витратомір, що калібрується; 2 – вихід з трубопроводу

Рис. 2.2. Остигання води на ділянці від витратоміра, що калібрується, до виходу з трубопроводу

2.1.5 Відмінність тиску у вимірювальній ділянці і в ємності для зважування

Вода в вимірювальній ділянці знаходиться під деяким надлишковим тиском. У ємності для зважування вода опиняється під атмосферним тиском. Об'єм води в ємності для зважування визначається за густиною. Так як густина води залежить від тиску, об'єм води в ємності для зважування буде відрізнятись від об'єму води, що пройшла через вимірювальний ділянку на величину:

$$V_{\Delta p} = c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{\partial u}^2} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \Delta p, \quad (2.9)$$

де $V_{\Delta p}$ – зміна об'єму води внаслідок різниці тиску у вимірювальній ділянці та в ємності для зважування;

$\frac{\partial \rho}{\partial p}$ – перша похідна густини води по тиску, (кг/м³)/МПа;

Δp – різниця тиску у вимірювальній ділянці та в ємності для зважування, МПа.

Таким чином, узагальнена залежність вимірювання витрати виражається формулою:

$$Q_V = \frac{1}{T} (V_m + V_o + V_{difT_{div}} + V_{\Delta t_2} + V_{\Delta p}) = \frac{1}{T} \left[c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{\partial u}} + \frac{c_V \cdot o \cdot T}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_{\partial u}} + \frac{c_V}{2T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_{\partial u}} \cdot difT_{div} t - \right. \quad (2.10)$$

$$\left. - V_{mp} (3 \cdot \alpha - \beta) \cdot \Delta t_2 + c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{\partial u}^2} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \Delta p \right]$$

Отримана залежність показує, що витрата потоку води, що створюється установці, розраховується за формулою (2.10) за результатами прямих вимірювань наступних величин:

- маси води;
- температури води;
- часу вимірювання;
- температури навколишнього повітря;
- атмосферного тиску;
- відносної вологості навколишнього повітря.

Проведено аналіз процесу вимірювання витрати в установці. Встановлено узагальнену залежність вимірювання витрати, у якій витратомірна установка розглядається як комплекс засобів вимірювальної техніки та конструктивних елементів.

2.2 Аналіз джерел невизначеності вимірювань в установці

Аналіз невизначеності вимірювань має значення як на стадії проектування так і при реалізації високоточного вимірювального обладнання і є

основою для присвоєння цьому обладнанню нормованих характеристик точності.

Джерелами невизначеності вимірювань витрати в установці є, насамперед, невизначеності калібрування засобів вимірювань, що входять до її складу, а саме: ваг, вимірювачів температури води і температури навколишнього повітря, вимірювача інтервалу часу, вимірювача атмосферного тиску і вимірювача вологості навколишнього повітря.

До формули (2.10) входять величини $V_o, V_{difT}, V_{\Delta t_2}$ та $V_{\Delta p}$. Для їх вимірювання необхідно оснащувати установку додатковими засобами вимірювальної техніки.

Для обґрунтування застосування додаткових засобів вимірювальної техніки необхідно оцінити вклад всіх джерел невизначеності у невизначеність установки.

В результаті аналізу виявлено джерела невизначеності, зведені в таблицю 2.1

Таблиця 2.1 – Перелік джерел невизначеності і їх коефіцієнтів впливу

Джерело невизначеності	Стандартна невизначеність	Коефіцієнт впливу
Калібрування ваг в точці початку вимірювань	$u(m_n)$	$c_{m_n} = -\frac{c_V}{T} \cdot \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_{\partial u}}$
Калібрування ваг в точці кінця вимірювань	$u(m_k)$	$c_{m_k} = \frac{c_V}{T} \cdot \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_{\partial u}}$
Калібрування вимірювачів температури	$u(t)$	$c_t = -\frac{c_V}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{\partial u}^2} \cdot \frac{\partial \rho_{\partial u}}{\partial t}$
Похибка таблиць густини води	$u(\rho_{\partial u})$	$c_p = -\frac{c_V}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{\partial u}^2}$
Калібрування вимірювача інтервалу часу	$u(T)$	$c_T = -\frac{c_V}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{\partial u}}$

Продовження таблиці 2.1

Джерело невизначеності	Стандартна невизначеність	Коефіцієнт впливу
Випаровування води за час вимірювання	$u(o)$	$c_o = \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial20}) \cdot \rho_{\partial u}}$
Несиметричність роботи перекидного пристрою	$u(difT_{div})$	$c_{difT_{div}} = -\frac{c_V}{T^2} \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial20}) \cdot \rho_{\partial u}}$
Різниця температури води у вимірювальній ділянці і на виході з трубопроводу	$u(\Delta t_2)$	$c_{\Delta t_2} = \frac{1}{T} \cdot V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)$
Різниця тиску в вимірювальній ділянці та в ємності для зважування	$u(\Delta p)$	$c_{\Delta p} = -\frac{c_V}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial20}) \rho_{\partial u}^2} \cdot \frac{\partial \rho_{\partial u}}{\partial p}$
Калібрування барометра	$u(p_a)$	$c_{p_a} = \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial20}) \rho_{\partial u}} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a}$
Калібрування вимірювачів температури навколишнього повітря	$u(t_a)$	$c_{t_a} = \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial20}) \rho_{\partial u}} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a}$
Калібрування гігрометра	$u(B_a)$	$c_{B_a} = \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial20}) \rho_{\partial u}} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial B_a}$
Вимірювання густини реальної води при 20 °C	$u(\rho_{p20})$	$c_{\rho_{p20}} = -\frac{c_V}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20}^2 / \rho_{\partial20}) \rho_{\partial u}}$
Густина дистильованої води при 20 °C	$u(\rho_{\partial20})$	$c_{\rho_{\partial20}} = \frac{c_V}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{\rho_{p20} \cdot \rho_{\partial u}}$

Проведено аналіз узагальненої залежності вимірювань витрати в установці. В результаті аналізу виявлені джерела невизначеності вимірювань витрати і визначено їх коефіцієнти впливу на невизначеність установки.

2.3 Експериментальна оцінка джерел невизначеності

Для підтвердження теоретичних висновків було проведено експериментальну перевірку впливу джерел невизначеності на невизначеність витратомірної установки.

Оцінка вхідних невизначеностей проводилась експериментальним шляхом та шляхом аналізу табличних даних.

2.3.1 Дослідження ваг

Експериментальні дослідження ваг проводились згідно з методикою [39].

Однією з характеристик установки є діапазон вимірювань витрати. Широкий ряд типорозмірів витратомірів зумовлює вимогу розширення діапазону вимірювань витрати установки. Однак в широкому діапазоні витрати важко забезпечити високу точність за допомогою однієї ваги. Тому запропоновано діапазон витрати установки розбити на три піддіапазони, у кожному з яких застосувати ваги з різними значеннями найбільшої межі зважування, як це показано на рисунку 2.3. Застосовано три ваги з номінальними значеннями найбільшої межі зважування 3000 кг, 300 кг та 30 кг. До кожної ваги проведено окрему вимірювальну ділянку. Для ваг 3000 кг та 300 кг встановлено по два дивертери – DIV1, DIV2 та DIV3, DIV4 відповідно. Для ваги 30 кг встановлено дивертер DIV5.

Це було зроблено для оптимального та точного регулювання витрати та забезпечення оптимального режиму протікання середовища у кожній ділянці.

За результатами експериментальних досліджень ваг встановлено залежність невизначеності вимірювань від значення зважуваної маси. Результати досліджень наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати експериментальних досліджень ваг

Найбільша межа зважування ваг, кг	Невизначеність вимірювань, кг
30	$(0,344+0,00003864 \cdot R)/1000$
300	$(2,309+0,00003894 \cdot R)/1000$
3000	$0,113+0,00001547 \cdot R1$
Примітка. R – виміряне значення маси в г; R1 – виміряне значення маси в кг	

2.3.2 Дослідження вимірювачів температури

Для проведення експериментальних досліджень вимірювачів температури було розроблено методику [40].

Для коректного визначення температури води в вимірювальних ділянках установки вимірювачі температури встановлені на їх входах і виходах, як це показано на рисунку 2.3.

Покази з цих вимірювачів температури знімаються на початку вимірювання і в кінці вимірювання. Температура води під час вимірювання приймається середньою з цих показів і визначається за формулою:

$$t = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{вхп} + t_{вихп}}{2} + \frac{t_{вхк} + t_{вихк}}{2} \right) = \frac{t_{вхп} + t_{вихп} + t_{вхк} + t_{вихк}}{4}, \quad (2.11)$$

де t – температура води у вимірювальній ділянці установки під час вимірювання, °C;

$t_{вхп}, t_{вихп}$ – температура води на початку вимірювання на вході та на виході вимірювальної ділянки установки відповідно, °C;

$t_{вхк}, t_{вихк}$ – температура води в кінці вимірювання на вході та на виході вимірювальної ділянки установки відповідно, °C.

Сумарна невизначеність вимірювання середньої температури у вимірювальній ділянці з урахуванням коефіцієнтів впливу буде не більше найбільшої невизначеності. У зв'язку з цим в якості невизначеності вимірювання температури в вимірювальній ділянці установки приймаємо

найбільше значення невизначеності, встановленої при експериментальних дослідженнях вимірювачів температури.

На рисунку 2.4 наведено отримані при експериментальних дослідженнях значення невизначеності вимірювань температури залежно від температури води у вимірювальній ділянці установки а в таблиці 2.3 – апроксимуючі рівняння для цих залежностей.

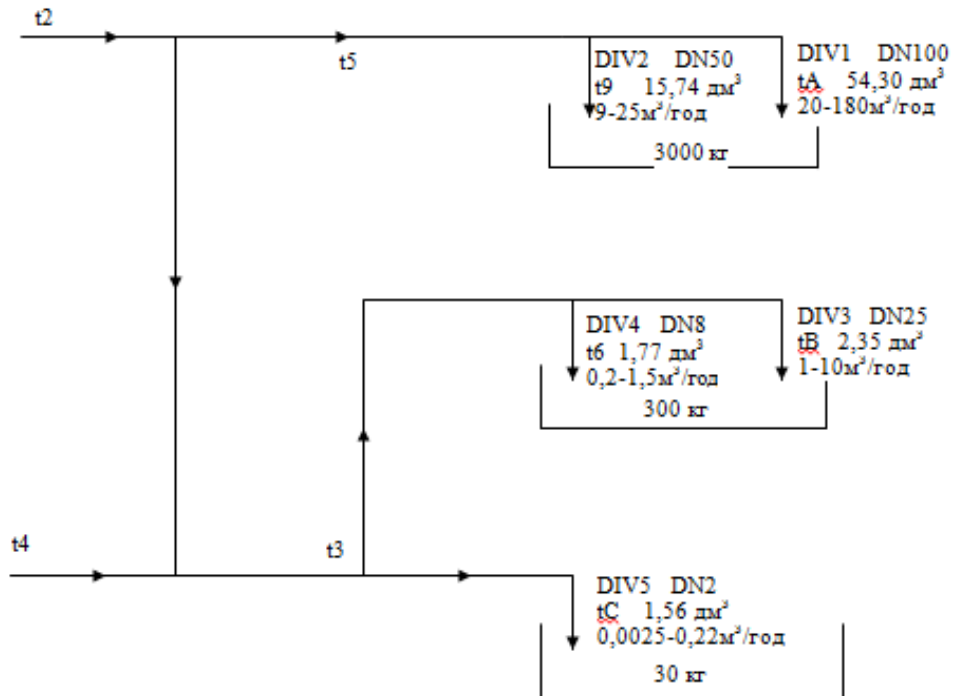


Рис. 2.3. Установка вимірювачів температури у вимірювальних ділянках трубопроводу

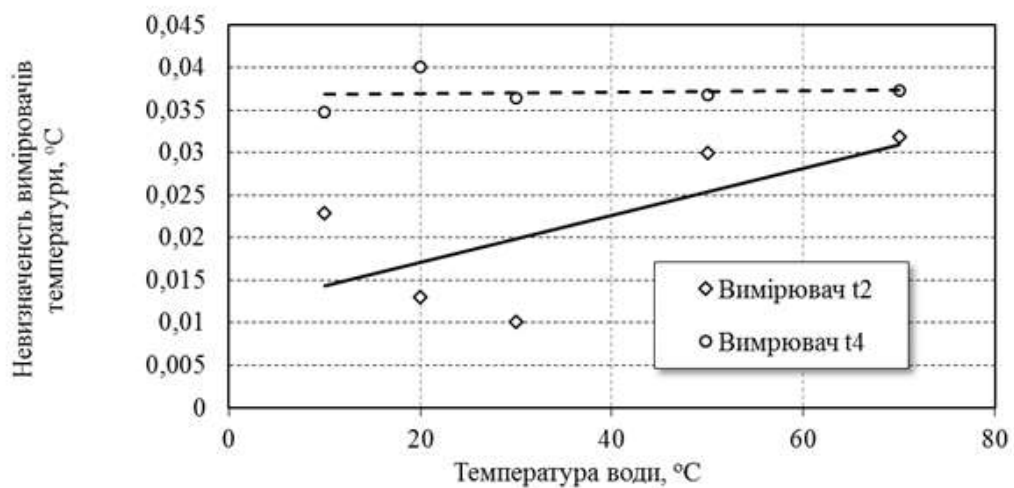


Рис. 2.4. Невизначеність вимірювання температури залежно від температури води

Таблиця 2.3 – Апроксимуючі рівняння для залежностей невизначеності вимірювань температури залежно від температури води

Термоперетворювач	Невизначеність вимірювань температури, °C
t_2	$U(t) = 0,003t + 0,0117$
t_4	$U(t) = 0,000008t + 0,368$

2.3.3 Дослідження вимірювача інтервалів часу

Для проведення експериментальних досліджень вимірювача інтервалу часу було розроблено методику [41].

Результати експериментальних досліджень вимірювача інтервалу часу, а саме залежність невизначеності вимірювання інтервалу часу від значення цього інтервалу наведені на рисунку 2.5.

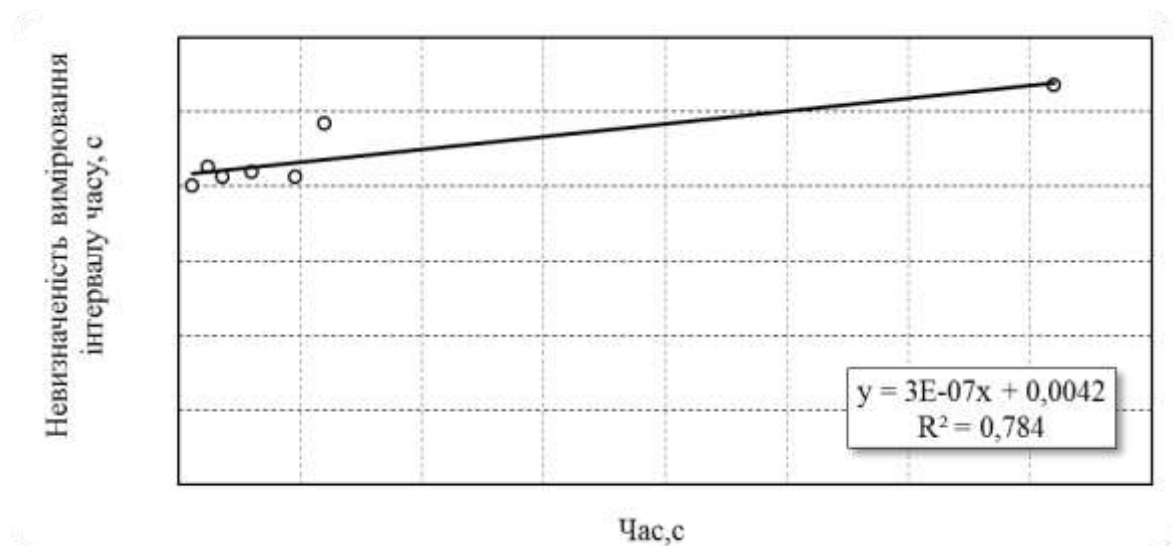


Рис. 2.5. Залежність невизначеності вимірювання інтервалу часу від значення цього інтервалу

За експериментальними даними встановлено аналітичну залежність невизначеності вимірювання інтервалу часу від значення цього інтервалу:

$$U(T) = 0,0000003T + 0,0044. \quad (2.12)$$

2.3.4 Дослідження дивертера

Для проведення експериментальних дослідження нерівномірності перемикання дивертера розроблено наступну методику [42].

Значення різниці часу переключення дивертера необхідно визначити за максимальної та мінімальної витрати для кожного дивертера.

Встановити кінцеві перетворювачі на привід дивертера.

Підключити кінцеві перетворювачі до частотоміру, що працює у режимі вимірювання інтервалу часу.

Виконати перекидання потоку води з одного напрямку на інший (з напрямку «в бак оборотного водопостачання» – у відповідну місткість для зважування). Після кожного перенаправлення потоку за допомогою частотоміра фіксувати час відпрацювання дивертера в одному напрямку T_{1i} . Через деякий час виконати перекидання потоку води з напрямку від відповідної місткості для зважування на напрямок «в бак оборотного водопостачання». Після кожного перенаправлення потоку за допомогою частотоміра фіксувати час відпрацювання дивертера T_{2i} в іншому напрямку.

Для кожного значення витрати i -ту реалізацію різниці часу переключення дивертера $difT_{div}$, в секундах, визначити за формулою:

$$difT_i = T_{1i} - T_{2i}, \quad (2.13)$$

де T_{1i} – час відпрацювання дивертера в одному напрямку, с;

T_{2i} – час відпрацювання дивертера в іншому напрямку, с.

Середнє значення різниці часу переключення дивертера $dif_c T$, в секундах, визначити за формулою:

$$dif_c T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dif_c T_i, \quad (2.14)$$

де $n=10$ – число спостережень.

Стандартну невизначеність, викликану різницею часу переключення дивертера за типом В, в секундах, визначити за формулою:

$$u_{BdifT} = \frac{dif_c T}{\sqrt{3}}. \quad (2.15)$$

СКВ різниці часу S_{difT} , в секундах, визначити за формулою:

$$S_{difT} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (difT_i - dif_c T)^2}{(n-1)}}. \quad (2.16)$$

Стандартну невизначеність викликану різницею часу переключення дивертера за типом А, в секундах, визначити за формулою:

$$u_{AdifT} = S_{difT} \quad (2.17)$$

Результати експериментальних досліджень для кожного дивертера наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати експериментальних досліджень

Дивертер	Невизначеність викликана різницею часу переключення дивертера, с
DIV1	0,020
DIV2	0,011
DIV3	0,009
DIV4	0,019
DIV5	0,011

2.3.5 Дослідження засобів вимірювання параметрів навколишнього повітря

Експериментальні дослідження вимірювача атмосферного тиску, проведені відповідно до розробленої методики [43], показали, що його невизначеність не залежить від значення атмосферного тиску і може бути представлена постійною величиною.

Дослідження вимірювача температури навколишнього повітря показали, що невизначеність вимірювання змінюється в діапазоні вимірювань. Залежність наведена на рисунку 2.6.

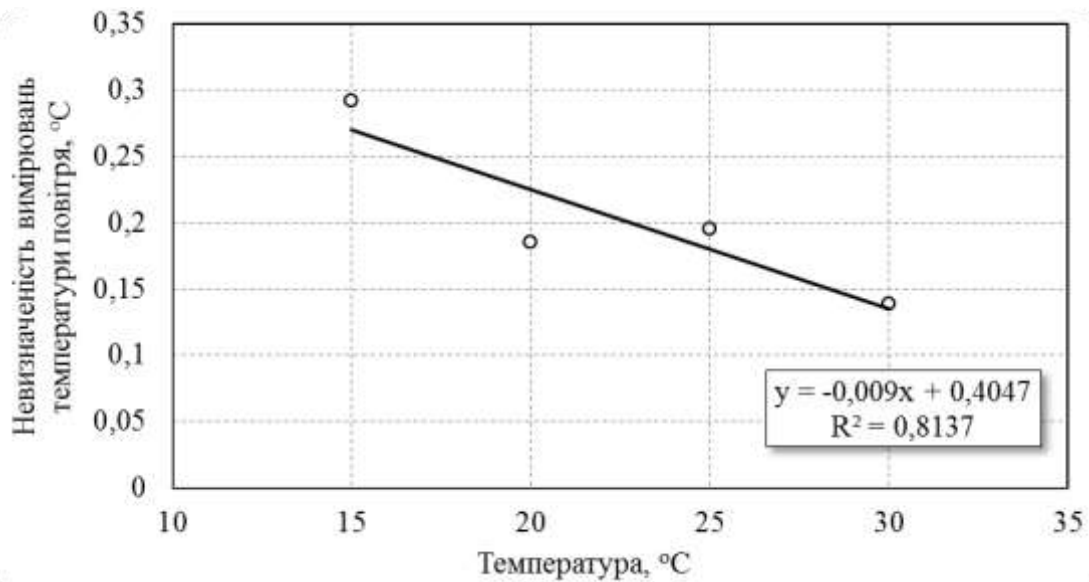


Рис. 2.6. Залежність невизначеності вимірювання температури навколишнього повітря

Залежність апроксимується рівнянням:

$$U(t_a) = -0,009t_a + 0,404. \quad (2.18)$$

Для проведення експериментальних досліджень вимірювача відносної вологості навколишнього повітря була розроблена методика [44]. Дослідження показали, що його невизначеність вимірювань змінюється в діапазоні вимірювань. Результати експериментальної оцінки невизначеності вимірювань наведені на рисунку 2.7.

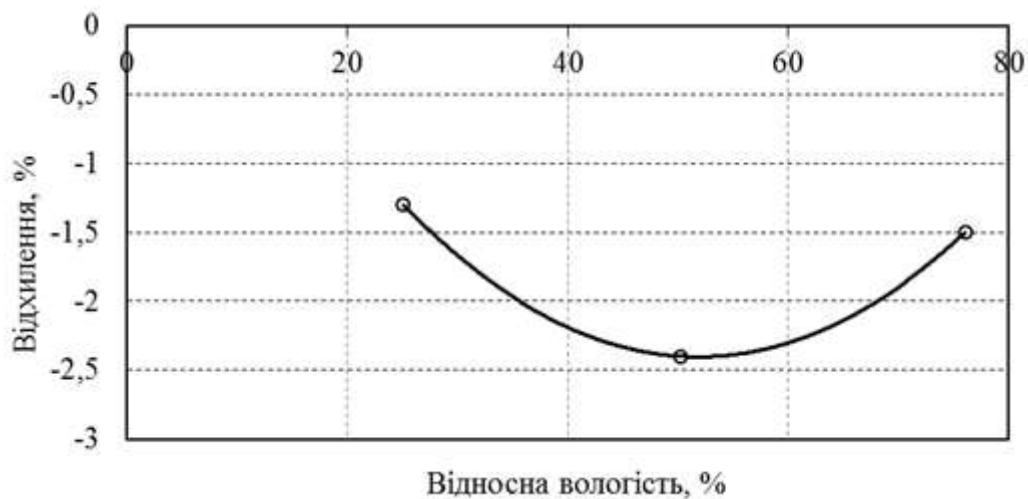


Рис. 2.7. Залежність невизначеності вимірювача відносної вологості навколишнього повітря від значення вимірюваної величини

Залежність апроксимується рівнянням:

$$U(B_a) = - 0,002 \cdot B_a^2 + 0,0221 \cdot B_a - 1,7398 \quad (2.19)$$

2.3.6 Дослідження випаровування води в ємності для зважування

Дослідження інтенсивності випаровування води в ємності для зважування за час вимірювання проводились за допомогою вимірювача вологовмісту у повітрі, розробленого в Інституті технічної теплофізики НАН України [45]. Первинний перетворювач вимірювача встановлюють на кришці ємності для зважування таким чином, щоб повітря, яке витісняється з неї під час наповнення водою, омивало його. Первинний перетворювач вимірює температуру та вологість повітря, що витісняється з ємності. За виміряними значеннями цих величин в обчислювачі розраховується поточне значення вологовмісту у повітрі. Інтегруючи значення вологовмісту за часом, отримують масу води, що випарувалась з ємності для зважування за час вимірювання.

Конструктивна схема і зовнішній вигляд первинного перетворювача вимірювача вологовмісту у повітрі наведено на рисунку 2.8.

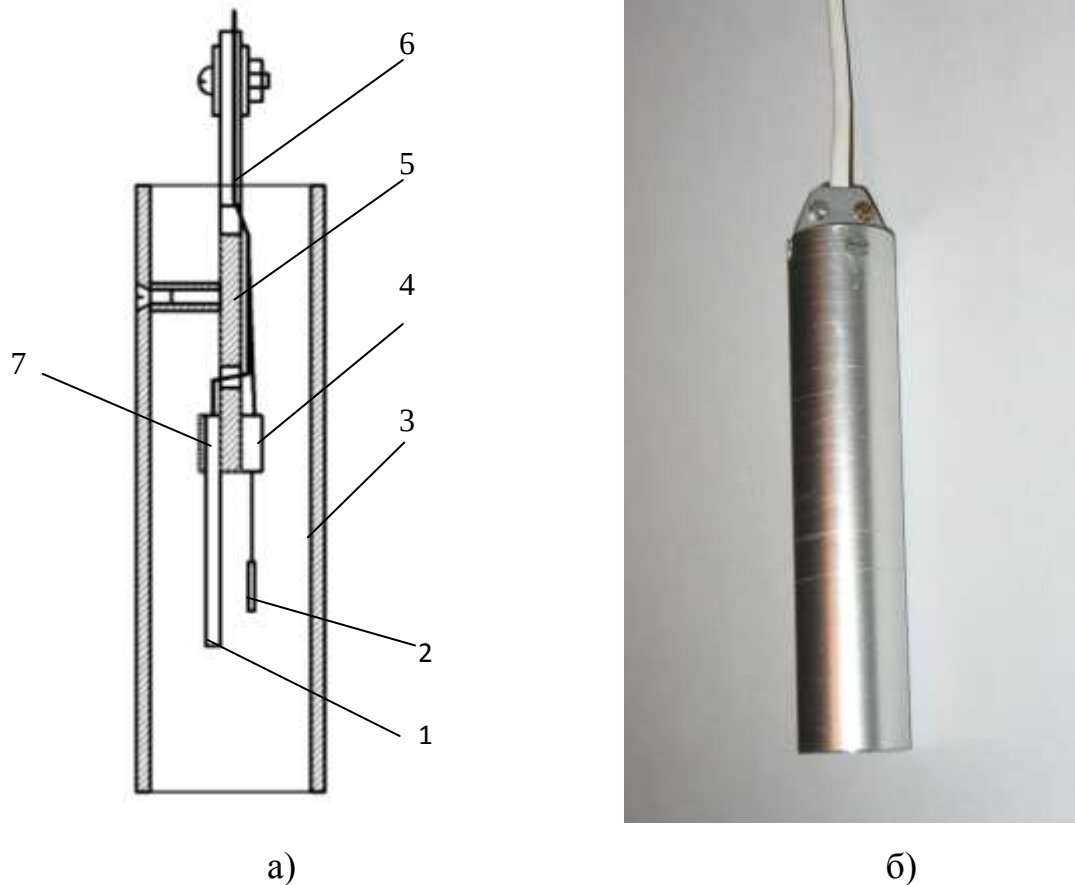
Проведено дослідження інтенсивності випаровування води [12].

Дослідження інтенсивності випаровування води в ємності для зважування під час вимірювання проводилось у двох режимах:

1) вода, що пройшла через вимірювальну ділянку установки збиралась у суху ємність для зважування;

2) перед проведенням вимірювань ємність для зважування заповнювалась гарячою водою і витримувалась в такому стані певний час для прогрівання та насичення повітря у ній вологою.

Як видно з рисунку 2.9 вологовміст повітря в ємності для зважування поступово збільшується, що свідчить про збільшення інтенсивності випаровування. Через деякий час вологовміст стає практично постійним, що свідчить про те, що вода та її пара знаходяться у стані близькому до динамічної рівноваги, коли швидкість випаровування та конденсації однакові [46].

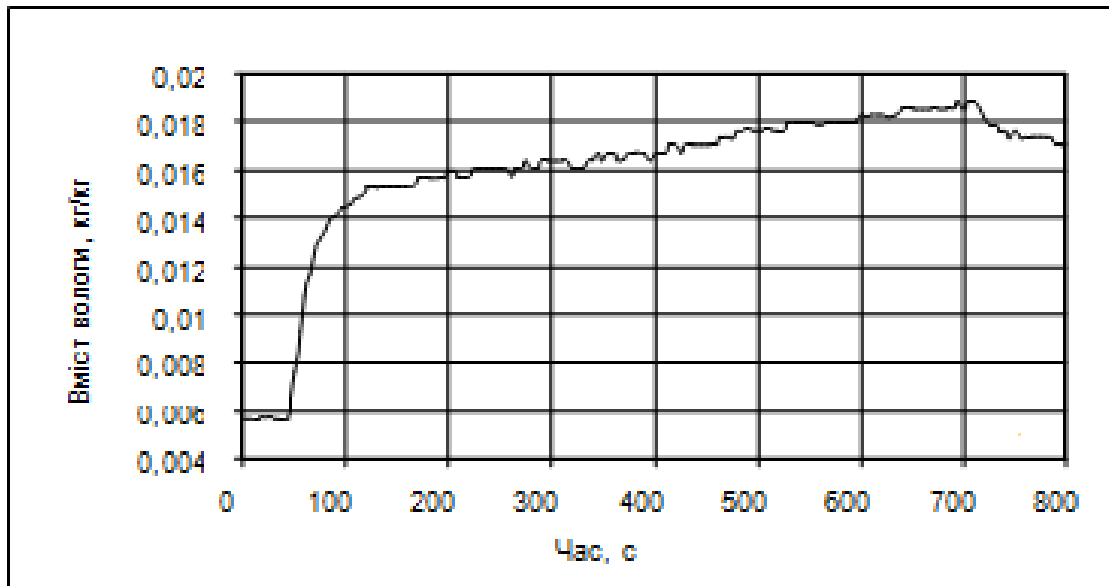


1 – терморезистивний перетворювач температури; 2 – ємнісний перетворювач вологості; 3 – корпус; 4 – роз'єм; 5 – тримач перетворювачів температури і вологості; 6 – кабель; 7 – бандаж

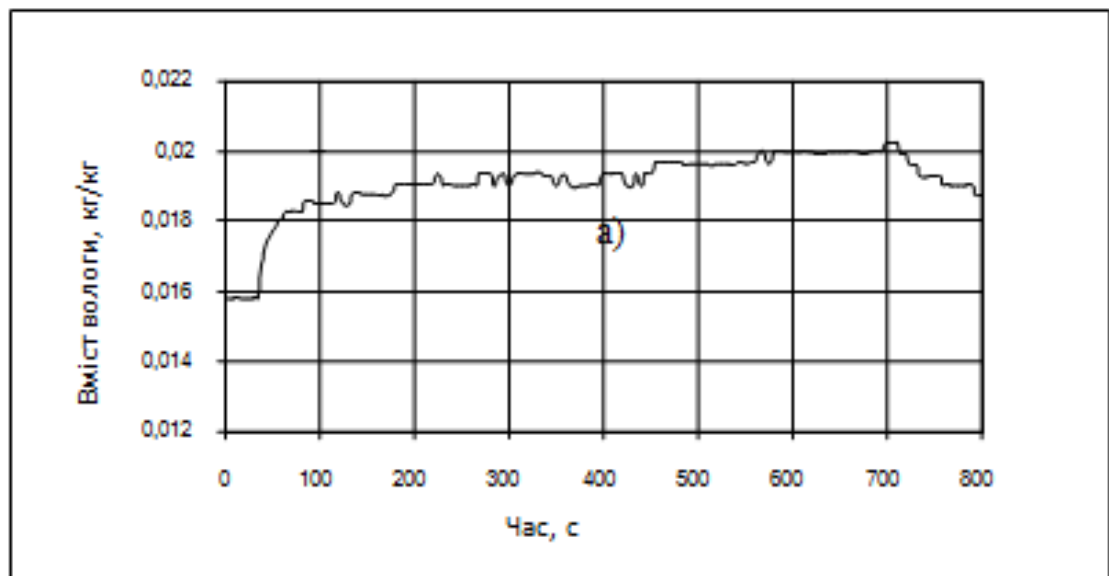
Рис. 2.8. Конструктивна схема (а) і зовнішній вигляд (б) первинного перетворювача вимірювача вологовмісту у повітрі

При цьому час стабілізації швидкості випаровування при заповненні ємності із сухим повітрям складає близько 25 % часу вимірювання, а при заповненні ємності із зволженим повітрям – близько 6 %.

Була розроблена методика виконання вимірювання витрати на витратомірній установці, за якої перед проведенням вимірювань ємність для зважування заповнюється гарячою водою і витримується в такому стані певний час для прогрівання та насичення повітря у ній вологою.



а)



б)

Рис. 2.9. Зміни вмісту вологи в ємності для зважування

а) при збиранні води у ємність з сухим повітрям; б) при збиранні води у прогріту ємність із зволоженим повітрям

Для подальшого зменшення впливу випаровування води на точність установки було запропоновано пристрій для видалення пари та конденсації, наведений на рисунку 2.10. Застосування цього пристрою дозволило на порядок зменшити втрати води через випаровування її з ємності для зважування за час вимірювання.



Рис. 2.10. Пристрій видалення пари та конденсації

У таблиці 2.5 наведені результати досліджень інтенсивності випаровування води під час вимірювання.

Таблиця 2.5 – Інтенсивність випаровування води за час вимірювання

Витрата, м ³ /год	Інтенсивність випаровування, кг/с, за температури води, °C		
	25	50	80
152	0,000463178	0,000121178	0,0007334
24,9	9,04008E-05	5,38117E-05	0,000432983
24,2	8,69E-05	4,53E-05	6,58E-04
10,42	1,33E-05	8,25E-05	5,03E-04
9,89	5,27E-06	6,02E-05	2,97E-04
1,56	1,07E-06	1,72E-05	1,47E-05
1,5	5,27E-06	6,02E-05	2,97E-04
0,2	1,07E-06	1,72E-05	1,47E-05
0,22	8,30E-07	9,48E-06	4,67E-05
0,0025	1,68E-07	2,71E-06	2,31E-06

Проведено експериментальні дослідження джерел невизначеності вимірювань витрати у витратомірній установці. Отримані кількісні оцінки вхідних невизначеностей і встановлено аналітичні залежності їх від параметрів води у витратомірній ділянці установки, що дає можливість провести обчислювальний експеримент для дослідження впливу вхідних невизначеностей складових частин на невизначеність всієї витратомірної установки.

2.4 Вплив вхідних невизначеностей на точність результатів вимірювань витрати

На основі отриманих кількісних оцінок вхідних невизначеностей і встановлених аналітичних залежностей їх від параметрів води у витратомірній ділянці установки проведено обчислювальний експеримент по дослідженню впливу вхідних невизначеностей складових частин на невизначеність всієї витратомірної установки. За результатами аналізу обчислювального експерименту було встановлено, що із всіх складових невизначеності, наведених в таблиці 2.1, суттєво впливають на невизначеність вимірювань витрати установкою такі:

- невизначеність калібрування ваг, перетворювачів температури, вимірювача інтервалу часу;
- випаровування води під час вимірювання;
- різниця часу переключення дивертера в прямому та зворотному напрямку;
- різниця температури води у вимірювальній ділянці та на виході з трубопроводу;
- різниця тиску у вимірювальній ділянці та в ємності для зважування.

Була розроблена математична модель невизначеності вимірювань витрати в установці [3]:

$$U = 2 \left\{ \left(\frac{c_V \rho_{\partial 20}}{T \rho_p 20 \rho_{\partial \theta}} \right)^2 \cdot \left[u_c^2(m_H) + u_c^2(m_K) + \left(\frac{m_K - m_n}{\rho_{\partial \theta}} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 \cdot u_c^2(t) + \left(\frac{m_K - m_n}{T} \right)^2 \cdot u_c^2(T) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{m_K - m_n}{T} \right)^2 \cdot u_c^2(\text{dif} T_{\text{div}}) + \left(\frac{m_K - m_n}{\rho_{\partial \theta}} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)^2 \cdot u_c^2(p) \right] + \left(\frac{\rho_{\partial 20}}{\rho_p 20 \rho_{\partial \theta}} \right)^2 \cdot u_c^2(o) + \left(\frac{3\alpha - \beta}{T} V_{mp} \right)^2 \cdot u_c^2(\Delta t_2) \right\}^{0,5} \quad (2.20)$$

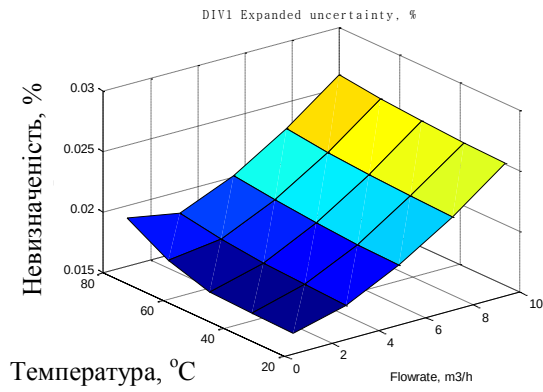
Запропонована модель дозволяє вирішити дві задачі: маючи задану невизначеність вимірювань на установці, визначити вимоги до характеристик точності засобів вимірювання, що входять до її складу, та до конструктивних параметрів установки. У разі, коли підвищення точності складових частин недоцільно з технічних або економічних причин, запропонована модель дозволяє розрахувати поправку до результатів вимірювань.

Рівняння (2.20) дало змогу встановити, що величина невизначеності вимірювань витрати змінюється залежно як від витрати води у витратомірній ділянці установки, так і від температури води.

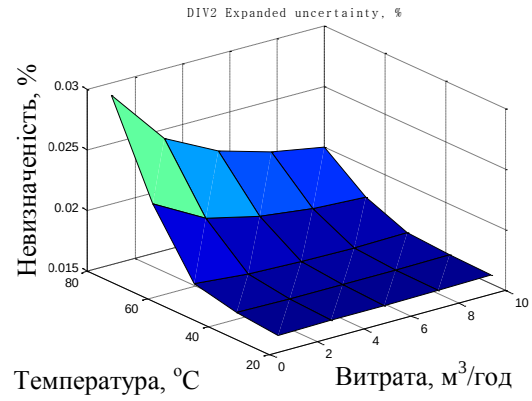
Був проведений обчислювальний експеримент, в рамках якого оцінювалась невизначеність вимірювань витрати витратомірною установкою для різних комбінацій витрати та температури води у діапазонах вимірювань цих величин.

Як було вказано вище, для підвищення точності витратомірної установки діапазон витрати було розділено на три піддіапазони, у кожному з яких застосовано окремі ваги. Окрім того для ваг 3000 кг та 300 кг встановлено по два дивертери – DIV1, DIV2 та DIV3 DIV4 відповідно. Для ваги 30 кг встановлено дивертер DIV5.

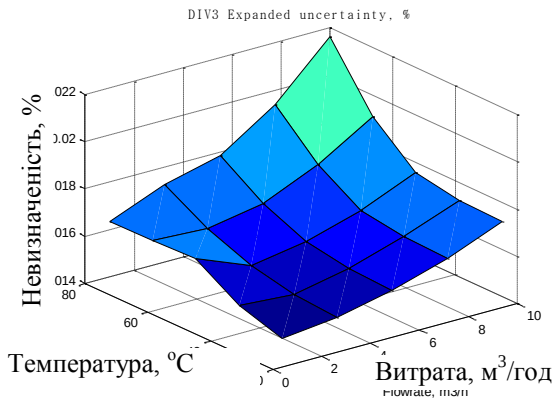
І ваги і дивертери мають індивідуальні значення вхідних невизначеностей. Тому оцінка невизначеності установки проводилась для кожного піддіапазону окремо. Результати обчислювального експерименту наведені на рисунку 2.11.



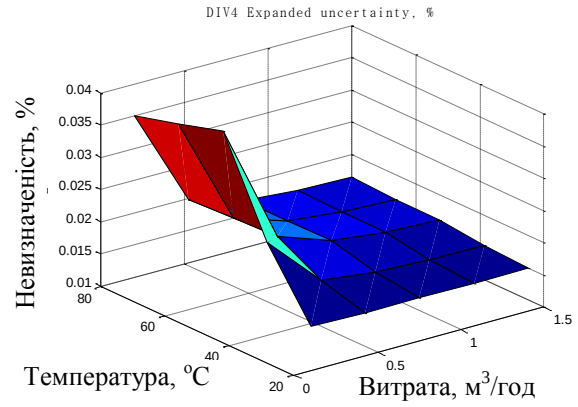
а) DIV1



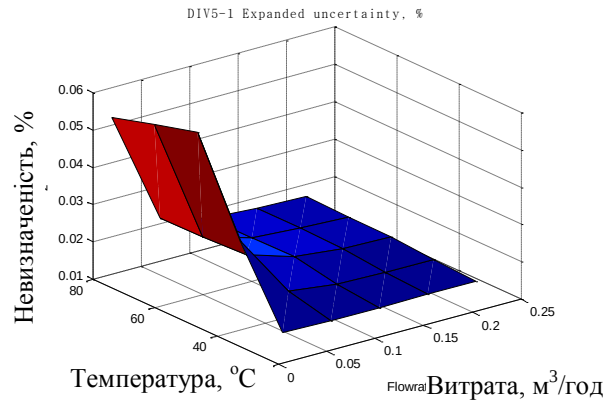
б) DIV2



в) DIV3



г) DIV4



д) DIV5

а) $Q = 20 \text{ м}^3/\text{год} - 160 \text{ м}^3/\text{год}$, б) $Q = 9 \text{ м}^3/\text{год} - 25 \text{ м}^3/\text{год}$,

в) $Q = 1 \text{ м}^3/\text{год} - 10 \text{ м}^3/\text{год}$, г) $Q = 0,2 \text{ м}^3/\text{год} - 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$,

д) $Q = 0,02 \text{ м}^3/\text{год} - 0,22 \text{ м}^3/\text{год}$

Рис. 2.11. Невизначеність вимірювань витрати

Як видно з графіків на рисунку 2.11, невизначеність вимірювання витрати установкою не перевищує 0,08 % у всьому діапазоні вимірювань витрати та температури води у вимірювальній ділянці. Точність установки знаходиться на рівні закордонних національних еталонів.

2.5 Висновки

1. Проведено аналіз процесу вимірювання витрати, за результатами якого витратомірна установка розглядається як комплекс засобів вимірювальної техніки та конструктивних елементів.

2. Встановлено узагальнену залежність вимірювань витрати в установці, за результатами аналізу якої виявлені джерела невизначеності вимірювань витрати і визначено їх коефіцієнти впливу на невизначеність установки.

3. Проведено експериментальні дослідження джерел невизначеності вимірювань витрати у витратомірній установці. Отримані кількісні оцінки вхідних невизначеностей і встановлено аналітичні залежності їх від параметрів води у витратомірній ділянці установки.

4. Розроблено методику виконання вимірювання витрати на витратомірній установці, за якої перед проведенням вимірювань ємність для зважування заповнюється гарячою водою і витримується в такому стані певний час для прогрівання та насичення повітря у ній вологою, що дозволило зменшити невизначеність вимірювання через випаровування води за час вимірювання.

5. Проведено обчислювальний експеримент в результаті якого встановлено складові невизначеності, які суттєво впливають на невизначеність вимірювань витрати установкою, що дозволило спростити процедуру оцінки невизначеності при калібруванні витратомірів.

6. Отримано математичну модель невизначеності вимірювання витрати води у вимірювальній ділянці установки, яка дозволяє вирішити дві задачі: маючи задану невизначеність вимірювань на установці, визначити вимоги до характеристик точності засобів вимірювання, що входять до її складу, та до

конструктивних параметрів установки. У разі, коли підвищення точності складових частин недоцільно з технічних або економічних причин, запропонована модель дозволяє розрахувати поправку до результатів вимірювань. Це дає змогу зменшити невизначеність вимірювань.

7. Проведено обчислювальний експеримент з оцінки невизначеності вимірювань витрати у вимірювальній ділянці установки в діапазоні значень витрати і температури води, який показав, що точність установки знаходиться на рівні закордонних національних еталонів.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВОК

3.1 Метод забезпечення стаціонарності потоку води у вимірювальній ділянці установки

Система відтворення потоку робочого середовища повинна забезпечувати рівномірний, вісесиметричний, стабілізований потік робочого середовища у вимірювальній ділянці [47].

Але при створенні потоку води в вимірювальній ділянці, в ній обов'язково присутні пульсації витрати [48]. Дослідження показують, що витратоміри, як із звужуючими пристроями, так і лінійні (ультразвукові, електромагнітні, турбінні, вихрові) досить чутливі до наявності пульсацій в потоці рідини, витрату якої вони вимірюють [49, 50]. При певній величині пульсацій витрати похибка витратомірів сильно зростає. Оскільки при калібруванні необхідно передати одиницю витрати від еталонного до витратоміра, що перевіряється, з найменшим відхиленням, постає проблема забезпечення стаціонарності потоку води в вимірювальній ділянці еталона. Тому однією з вимог до еталонів є зменшення середнього квадратичного відхилення значень витрати у витратомірній ділянці [51].

Так як у технічних трубопроводах досягти повної стаціонарності потоку не видається можливим, у витратометрії стаціонарним вважається потік, в якому такі параметри як швидкість, тиск, густина і температура змінюються в часі досить незначним чином, щоб провести вимірювання з певним рівнем точності [52].

В роботі [53] встановлено, що для визначення допустимого рівня пульсацій, при якому потік можна вважати ще стаціонарним, може бути використаний такий показник як індекс пульсацій, який визначається як відношення різниці максимального і мінімального значень витрати до середньої витрати:

$$I_P = \frac{(Q_V)_{\max} - (Q_V)_{\min}}{2 \cdot (Q_V)_{av}}, \quad (3.1)$$

де I_P – індекс пульсації;

$(Q_V)_{\max}$ – максимальна об'ємна витрата в пульсуючому потоці;

$(Q_V)_{\min}$ – мінімальна об'ємна витрата в пульсуючому потоці;

$(Q_V)_{av}$ – середнє значення витрати в пульсуючому потоці.

На цьому індексі оснований коригуючий фактор витрати F_p , який визначається за формулою:

$$F_p = \frac{\text{витрата, що індикується}}{\text{середня витрата}} = (1 + 4\alpha_p b_p I_P^2)^n. \quad (3.2)$$

У рівнянні (3.2) α_p – безрозмірний коефіцієнт форми сигналу, який визначається за допомогою Фур'є-аналізу гармонік, що містяться у періодичних сигналах різної форми.

Максимальне значення 0,25 коефіцієнт α_p приймає при прямокутній формі періодичного сигналу. Частотний коефіцієнт b_p змінюється від 0 до 1 і характеризує систему демпфування витратоміра і вплив частоти пульсацій на первинний перетворювач. За певної форми хвилі b_p близький до 0 в частотному діапазоні, якому витратомір може слідувати. Цей діапазон становить від 1 коливання в годину до 10 Гц, залежно від витратоміра. При великих частотах витратомір не може слідувати раптовій зміні і b_p наближається до 1, обумовлюючи максимальну похибку.

За турбулентного потоку n дорівнює 0,5 для звужуючих пристроїв і 1,0 для лінійних витратомірів. Отже, максимальна похибка має місце, коли $n = 0,5$ для звужуючих пристроїв і 1,0 для лінійних витратомірів, і при цьому $b_p = 1,0$.

Коригуючий фактор досягає найбільшого значення для всіх типів витратомірів, коли $n = 1$, $\alpha_p = 0,25$ і $b_p = 1,0$.

Якщо у якості прийнятної границі коригуючого фактора прийняти

$F_p = 1,001$, тобто похибка від пульсацій становитиме 0,1 %, при вказаних значеннях коефіцієнтів отримаємо:

$$F_p = 1,001 = 1 + I_{PT}^2, \quad (3.3)$$

де I_{PT}^2 – граничний індекс пульсації, який визначає стаціонарний потік за опорних умов (тобто у вимірювальній ділянці еталону) і

$$I_{PT} = 0,03. \quad (3.4)$$

Це значення допускає зміну витрати в межах $\pm 3 \%$ для лінійних витратомірів (вихрових, турбінних, ультразвукових і т.п.) і $\pm 6 \%$ зміни диференційного тиску для звужуючих пристроїв.

Додаткова невизначеність вимірювання витрати з'являється і від двофазності середовища – наявності повітря у воді у вигляді мікробульбашок [54]. У вимірювальній ділянці установки може міститися деяка кількість повітря, яке засмоктується через негерметичність у вхідній лінії і в насосі.

Для зниження пульсацій витрати рідини в трубопроводі застосовуються спеціальні пристрої – демпфери, а для видалення повітря з робочої рідини – деаератори. Розглянемо такі пристрої, що застосовуються у промисловості.

В роботі [55] розглянуті принципи побудови і можливі структури гасників коливань робочого середовища.

В [56] наведені результати досліджень демпфера, в якому використовується стисливість повітря, що заповнює акумулюючу ємність, для стабілізації тиску і витрати рідини. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що зі збільшенням об'єму повітря в ємності підвищується ефективність гасіння пульсацій витрати. Однак дана конструкція демпфера призначена для мікровитрат і при збільшенні витрати вимагає значного збільшення габаритів пристрою.

Деаератор, наведений у [57], використовує комбіновану дію кількох фізичних принципів. Активна частина являє собою сукупність сітчастих металевих поверхонь, розташованих віялом. Ці елементи створюють такі вихрові потоки, які сприяють вивільненню мікробульбашок і їх прилипання до

цих поверхонь. Пухирці, зливаючись між собою, збільшуються в обсязі до того моменту, коли гідростатичний тиск не перевищить силу прилипання до конструкції. Потім вони піднімаються до найвищої частини пристрою, з якого видаляються за допомогою автоматичного поплавкового відвідника повітря. Він розроблений таким чином, що в ньому напрямок потоку води є неважливим.

В [58] описаний термічний деаератор, який служить для видалення з води розчиненого в ній кисню і двоокису вуглецю шляхом нагріву її до температури кипіння. Деаератор складається з бака і колонки, усередині якої установлений ряд розподільних тарілок. Пара для підігріву води вводиться в деаератор знизу під водяну завісу, що утворюється при стіканні води з тарілки на тарілку, і, розходячись на всі боки, підіймається вгору, назустріч живильній воді, нагріваючи її до 104 – 106 °С. За цієї температури повітря виділяється з води і разом із залишком несконденсованої пари йде через вістову трубу, розташовану у верхній частині деаераційної головки, безпосередньо в атмосферу.

Розглянуті демпфери призначені для установки на трубопроводах, в яких витікання рідини з трубопроводу не допускається.

В еталоні ж застосовується система оборотного водопостачання з накопичувального резервуара, яка не є замкнутою і допускає витікання води з трубопроводу вимірювальної ділянки установки в накопичувальний резервуар. Для зменшення впливу витікання було розроблено метод, який полягає в тому, що підтримка постійного тиску у вимірювальній ділянці установки забезпечується за рахунок витікання води з трубопроводу установки у накопичувальний резервуар при збільшенні тиску і підживлення трубопроводу з накопичувального резервуару при зменшенні тиску води на вході у вимірювальну ділянку установки. Одночасно з забезпеченням водообміну між трубопроводами установки та накопичувальним резервуаром, за рахунок зменшення швидкості води забезпечується інтервал часу, достатній для видалення повітря з води, що протікає по трубопроводу.

Для реалізації цього методу було розроблено демпфер-деаератор [8], схематичне зображення якого наведено на рисунку 3.1.

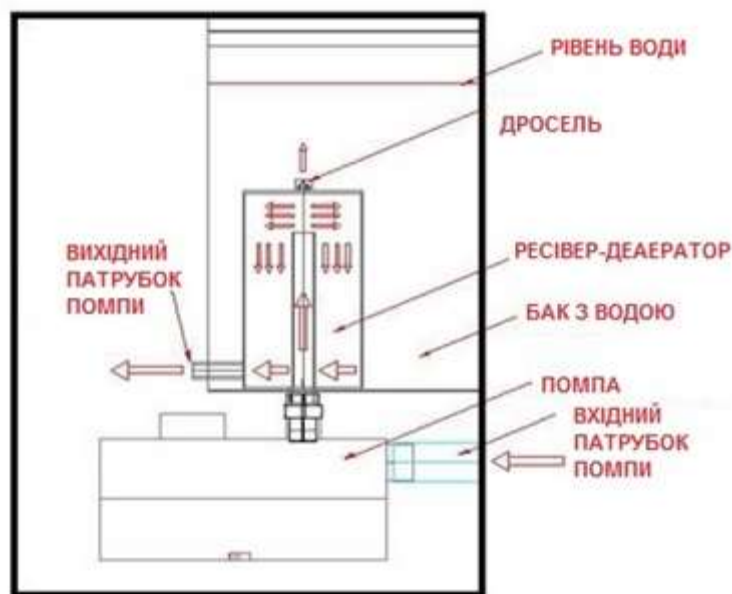


Рис. 3.1. Схема розробленого демпфера-деаератора

Принцип роботи демпфера-деаератора полягає в наступному. Вода через вхідний патрубок за допомогою насоса подається в верхню частину демпфера-деаератора. Відбір води, що подається у вимірювальну ділянку еталона, проводиться по вихідному патрубку, розташованому в нижній частині демпфера-деаератора. При цьому частина води через жиклер витікає з корпусу демпфера-деаератора.

Так як вода подається у верхню частину демпфера-деаератора і діаметр його корпусу набагато більше діаметру вхідного і вихідного патрубків, інтервал часу проходження води від входу в демпфер-деаератор до виходу з нього достатній для ефективного виділення повітря з води. Бульбашки повітря піднімаються у верхню частину демпфера-деаератора і вільно впливають з корпусу через жиклер. Так як вихідний отвір жиклера постійно перебуває під статичним тиском води в резервуарі, витікання повітря з демпфера-деаератора здійснюється ефективно.

Для оцінки ефективності згладжування пульсацій витрати розробленим демпфером-деаератором були проведені експериментальні дослідження [2].

Дослідження проводились на витратомірній установці для перевірки витратомірів, в якій для гасіння пульсацій потоку та видалення повітря з води застосований розроблений демпфер-деаератор. На рисунку 3.2 наведена схема установки для досліджень.

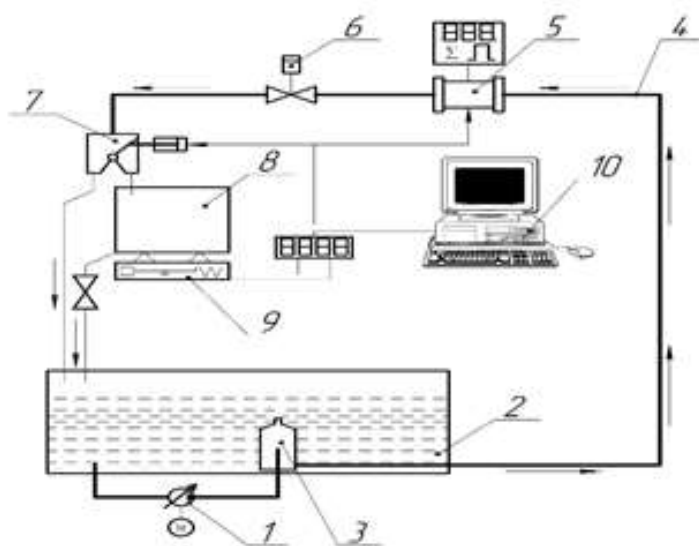


Рис. 3.2. Схема установки для досліджень рівня пульсацій

Вода за допомогою частотно-регульованого насоса 1 з накопичувального резервуара 2 через демпфер-деаератор 3 подається в вимірювальну ділянку 4 еталона. У вимірювальній ділянці послідовно встановлений витратомір, що перевіряється, 5 і регулююча засувка 6. Після проходження вимірювальної ділянки вода за допомогою перекидного пристрою 7 надходить у накопичувальну ємність 8, встановлену на вагах 9 або повертається в накопичувальний резервуар 2. Управління процесом вимірювань проводиться за допомогою комп'ютера 10.

Демпфер-деаератор розміщено в накопичувальному резервуарі таким чином, що вихідний отвір жиклера завжди знаходиться нижче рівня води в резервуарі і знаходиться під постійним статичним тиском води в резервуарі.

Режим протікання води у вимірювальній ділянці установки залежить від багатьох факторів: значення витрати, положення запірної арматури, частоти керування насосом.

Методи досліджень, які базуються на почерговому варіюванні окремих незалежних змінних в умовах в той час, коли інші підтримуються незмінними, вимагають проведення великого обсягу експериментальних досліджень.

Згідно з [59] був розроблений план багатофакторного експерименту, який дозволив суттєво зменшити обсяг експериментів

При виборі параметра, що характеризує процес пульсацій витрати в вимірювальній ділянці установки, виходили з того, що параметр повинен бути ефективним з точки зору досягнення мети, універсальним, кількісним і виражатися одним числом, статистично ефективним, простим і легко обчислюваним, існуючим для всіх розрізняваних станів.

Таким вимогам відповідає індекс пульсацій.

Таким чином, індекс пульсації значень витрати в вимірювальній ділянці установки обраний як параметра досліджень.

При проведенні експерименту необхідно мати можливість впливати на параметр дослідження. При цьому впливи, звані факторами, повинні бути сумісні, тобто всі їх комбінації здійсненні і безпечні. Також фактори повинні бути незалежні, тобто фактор може бути встановлений на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів.

На основі попередніх експериментів можна виділити наступні фактори, що впливають на індекс пульсацій:

- витрата води в вимірювальній ділянці установки;
- частота управління насосом;
- положення регулюючої засувки.

Аналіз показав, що витрата не є незалежним чинником, оскільки його значення залежить як від частоти управління насосом, так і від положення засувки. Певне значення витрати можна отримати різним поєднанням положення засувки і частоти управління насосом, при цьому індекс пульсації значень витрати може змінюватися. Тому експеримент проводився для певних фіксованих значень витрати води.

Частота управління і положення засувки є незалежними параметрами і

можуть бути використані в якості фактора. Враховуючи те, що положення засувки може бути визначене тільки візуально, а частота управління може бути виміряна за допомогою частотоміра з великою точністю, в якості фактора була обрана частота управління насосом.

Витрата, яка є обмежуючим параметром, може бути виміряна за допомогою витратоміра з досить високою точністю.

Для створення потоку води в вимірювальній ділянці застосовувався частотно-регульований насос з шестилопатеvim колесом, діапазон частоти від 10 до 50 Гц.

В якості приладу, що реєструє пульсації потоку, застосовувався електромагнітний витратомір Promag 53H з наступними характеристиками:

- номінальний діаметр DN4;
- діапазон вимірювань витрати від 0,04 до 0,6 м³/год;
- межі допустимої відносної похибки 0,2 %;
- період реєстрації витрати 40 мс.

Дослідження проводилися при трьох значеннях витрати: 0,04 м³/год, 0,32 м³/год і 0,6 м³/год. Для кожного значення витрати задавалося три значення частоти управління насосом, на кожному з них за допомогою регулюючої засувки встановлювалося задане значення витрати. При цьому проводилося по п'ять повторних дослідів. Під час кожного повторного дослідів вимірювальний сигнал витрати з витратоміра надходив на комп'ютер, де реєструвався. Індекс пульсацій розраховувався за формулою (3.1).

Результати експериментальних досліджень наведені в таблиці 3.1.

Після проведення дослідів виконано статистичну обробку результатів. Результати експериментальних досліджень були перевірені на наявність промахів за допомогою критерію Граббса [60]:

$$G_1 = \frac{|I_{p \max} - \bar{I}_p|}{S(I_p)}, G_2 = \frac{|\bar{I}_p - I_{p \min}|}{S(I_p)}, \quad (3.5)$$

де G_1, G_2 – критерії Граббса;

$I_{p \max}$, $I_{p \min}$ – максимальне та мінімальне значення індексу пульсацій з вибірки відповідно;

$S(I_p)$ – середнє квадратичне відхилення індексу пульсацій.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень

№ досліду	Витрата, м³/год	Матриця планування	Робоча матриця	Результати повторних дослідів, I_{pi} , %					Середнє значення I_p , %
		Рівень	Частота, Гц	1	2	3	4	5	
1	0,04	-1	10	0,0074	0,0078	0,0095	0,0086	0,0089	0,0084
2		0	30	0,0381	0,0317	0,0383	0,0330	0,0354	0,0353
3		1	50	0,0781	0,0729	0,0629	0,0711	0,0678	0,0706
4	0,32	-1	10	0,0131	0,0130	0,0120	0,0107	0,0134	0,0125
5		0	30	0,0105	0,0112	0,0110	0,0088	0,0095	0,0102
6		1	50	0,0048	0,0054	0,0049	0,0045	0,0052	0,0050
7	0,6	-1	10	0,0100	0,0108	0,0114	0,0090	0,0121	0,0107
8		0	30	0,0078	0,0079	0,0075	0,0078	0,0074	0,0077
9		1	50	0,0057	0,0066	0,0054	0,0060	0,0063	0,0060

На рисунку 3.3 представлено поле кореляції індексу пульсацій та частоти управління насосом.

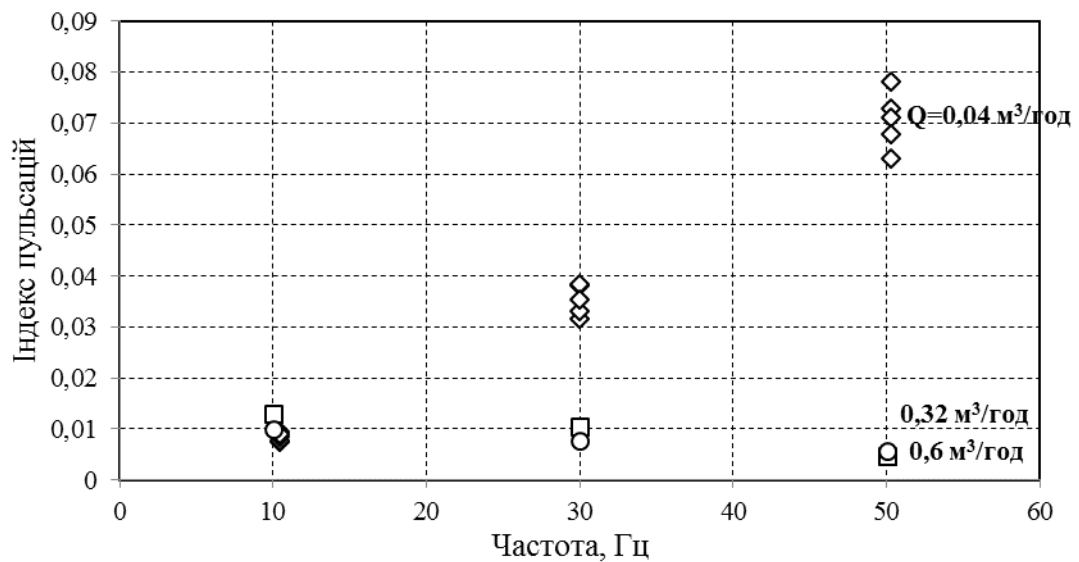


Рис. 3.3. Поле кореляції індексу пульсацій та частоти управління насосом

Отримані значення критеріїв Граббса для експериментальних даних не перевищували теоретичне значення критерію Граббса, отже результати повторних дослідів не можуть вважатися помилковими.

Також було проведено перевірку результатів експериментальних досліджень і на однорідність дисперсій за допомогою критерію Кохрена [61], яка показала, що дисперсії індексу пульсацій в різних дослідях неоднорідні. Для приведення дисперсій до однорідності була проведена зміна масштабу параметра дослідження [59]. Для цього індекс пульсацій замінили його десятковим логарифмом:

$$I_{p\lg} = \lg I_p. \quad (3.6)$$

Після цього перевірка за допомогою критерія Кохрена показала, що дисперсії результатів повторних дослідів однорідні для всіх дослідів.

В якості математичної моделі досліджуваного об'єкта вибираємо поліном першого порядку, оскільки на рисунку 3.3 явно простежується лінійна залежність :

$$\hat{I}_{p\lg} = b_0 + b_1 F, \quad (3.7)$$

де $\hat{I}_{p\lg}$ – значення логарифму індексу пульсацій, розраховане за рівнянням регресії;

F – частота управління насосом, Гц;

b_0 – коефіцієнти рівняння регресії;

b_1 – кутовий коефіцієнти рівняння регресії, Гц⁻¹.

Коефіцієнти регресії визначаються за формулами [61]:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \lg I_{pi} \cdot \sum_{i=1}^N F_i^2 - \sum_{i=1}^N F_i \cdot \lg I_{pi} \cdot \sum_{i=1}^N F_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N F_i^2 - (\sum_{i=1}^N F_i)^2}; \quad (3.8)$$

$$b_1 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N F_i \cdot \lg I_{pi} - \sum_{i=1}^N \lg I_{pi} \cdot \sum_{i=1}^N F_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N F_i^2 - (\sum_{i=1}^N F_i)^2}, \quad (3.9)$$

де N – число дослідів.

Перевіряючи значимість коефіцієнтів за критерієм Стюдента:

і адекватність прийнятої математичної моделі за критерієм Фішера [61], отримали рівняння регресії для кожного значення витрати:

– для витрати $0,04 \text{ м}^3/\text{год}$:

$$\hat{I}_{P\lg} = -2,258837 + 0,023094 \cdot F ; \quad (3.10)$$

– для витрати $0,32 \text{ м}^3/\text{год}$:

$$\hat{I}_{P\lg} = -1,76478444 + -0,010022 \cdot F ; \quad (3.11)$$

– для витрати $0,60 \text{ м}^3/\text{год}$:

$$\hat{I}_{P\lg} = -1,87631012 + -0,007084 \cdot F . \quad (3.12)$$

З метою встановлення узагальненої залежності індексу пульсацій від обох факторів – частоти керування насосом та витрати, за отриманими експериментальними даними були знайдені апроксимуючі залежності коефіцієнтів рівняння регресії від значення витрати:

$$b_0 = -3,743 \cdot Q^2 + 3,080 \cdot Q - 2,38, \quad (3.13)$$

$$b_1 = 0,218 \cdot Q^2 - 0,190 \cdot Q + 0,030 . \quad (3.14)$$

Підставивши формули (3.13, 3.14) у (3.7), отримали математичну модель індексу пульсацій, як функції витрати та частоти управління насосом:

$$\hat{I}_p = 10^{-3,743 \cdot Q^2 + 3,080 \cdot Q - 2,38 + (0,218 \cdot Q^2 - 0,190 \cdot Q + 0,030) \cdot F} . \quad (3.15)$$

Проведено обчислювальний експеримент, який дозволив визначити значення індексу пульсацій для будь-яких заданих значень витрати і частоти управління насосом.

На рисунку 3.4 наведено номограму для визначення індексу пульсацій витрати за значенням частоти управління насосом для різних значень витрати води в вимірювальній ділянці установки.

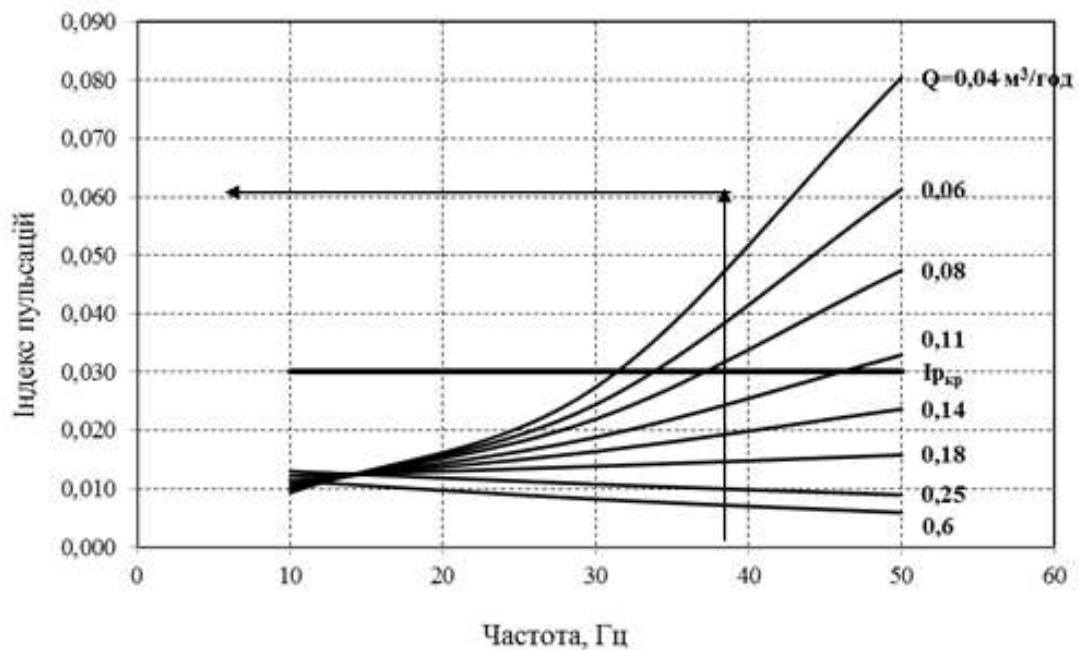


Рис. 3.4. Номограма для визначення індексу пульсацій витрати

Як видно з графіка індекс пульсацій витрати в вимірювальній ділянці установки не перевищує критичного значення для значень витрати більше 0,14 м³/год, що говорить про ефективність гасіння пульсацій за допомогою розробленого демпфера деаератора. У діапазоні витрат від 0,04 до 0,11 м³/год при певних значення частоти управління насосом індекс пульсацій витрати перевищує критичне значення. Це означає, що необхідне значення витрати в цьому діапазоні необхідно встановлювати тільки за допомогою такого поєднання частоти управління насосом і положення засувки, при якому індекс пульсацій не перевищує критичного значення.

Таким чином, розроблено метод зменшення пульсацій потоку у витратомірній ділянці установки, розроблено пристрій, що його реалізує.

Проведено експериментальні дослідження ефективності гасіння пульсацій потоку у витратомірній ділянці установки, за результатами яких розроблено математичну модель індексу пульсацій як функції витрати та частоти керування насосом. Отримана математична модель дозволяє

розрахувати допустимі значення частоти управління насосом, при яких індекс пульсацій не перевищуватиме критичне значення, що дозволить підтримувати допустимий рівень пульсацій потоку під час калібрування витратомірів.

3.2 Метод оцінювання загального та інтервальних значень об'єму міри місткості

Міри місткості широко застосовуються в сфері обліку енергетичних ресурсів. Для вимірювання об'єму спожитої води і газу застосовуються відповідні лічильники [16]. Оскільки ці лічильники застосовуються в сфері законодавчо регульованої метрології, вони підлягають періодичній повірці під час експлуатації. Для повірки лічильників води застосовуються волюметричні установки з мірниками [62], для лічильників газу – установки дзвонового типу [63]. Для ведення облікових і торгових операцій з нафтою і нафтопродуктами застосовують вертикальні і горизонтальні сталеві циліндричні резервуари [64, 65].

Основним засобом вимірювань в зазначених установках є засоби вимірювання об'єму (ЗВО) циліндричної форми.

При проведенні калібрування зазначених ЗВО необхідно визначити залежність реального об'єму їх циліндра від його висоти, тобто виконати градуювання з необхідною невизначеністю (точністю).

Градуювання зазначених ЗВО може здійснюватися геометричним методом.

При цьому класичні методи визначення геометричних розмірів ЗВО, засновані на застосуванні різних механічних засобів вимірювань довжини, вичерпали себе по точності. Хоча застосовувані при вимірюванні геометричних розмірів механічні або електромеханічні засоби вимірювань мають достатню точність, складність методики виконання вимірювань при градуюванні ЗВО вносить в результат вимірювань додаткові невизначеності.

Складність полягає в тому, що при вимірюванні діаметру циліндра нутроміром або іншим засобом вимірювань необхідно знайти максимальне

значення діаметра в площині, перпендикулярній осі циліндра, і мінімальне значення по всій його висоті. Рішення такої суперечливої задачі при кожному вимірюванні діаметру може збільшувати невизначеність результатів вимірювань в десятки разів. Автоматизовані координатно-вимірювальні машини [66] були б ефективні для цих вимірювань, але прилади з діапазоном вимірювань, необхідним для визначення розмірів зазначених ЗВО, дуже рідкісні, дорогі, габаритні і стаціонарні.

Шляхом збільшення точності установок для перевірки лічильників води і газу, а також резервуарів для нафтопродуктів може бути не тільки збільшення точності визначення середнього діаметра ЗВО, а й врахування реального рельєфу його внутрішньої поверхні щодо циліндра середнього радіусу в радіальному напрямку. Визначення цих радіальних відхилень реальної поверхні ЗВО від циліндра робить необхідним проведення великої кількості вимірювань. Класичні нутрометричні вимірювання при цьому не тільки недостатні по точності, вони також дуже трудомісткі й не завжди можливі або вкрай ускладнені при великих розмірах ЗВО [67]. Крім того, кожне вимірювання діаметра не залежить одне від одного і не прив'язане до осі циліндра. Тому, при таких вимірюваннях не складається повного уявлення про відхилення реальної поверхні ЗВО від циліндра. Це робить неможливим відрізнити реальні коливання рельєфу відносно циліндра від промахів.

Завдання полягає в розробці методу оцінки внутрішнього рельєфу ЗВО з корекцією на відхил від горизонтальності за допомогою лазерного трекара [68], який дозволить підвищити точність установок для перевірки лічильників води і газу.

Для підтвердження ефективності методу на вторинному еталоні витрати газу були проведені експериментальні дослідження [7]. Виконувалися вимірювання геометричних розмірів дзвону, що входить до складу вторинного еталону. Для вирішення завдання необхідно вибрати невизначеність та роздільну здатність інструменту для оцінки рельєфу за відповідної статистичної обробки результатів вимірювань

До геометричних параметрів дзвону відносяться:

- параметри положення дзвона в просторі – горизонтальні координати точки перетину найнижчої горизонтальної площини, прийнятої за початок робочої частини дзвону і його осі (для обчислення місткості дзвона не використовуються, але обов'язково входять в (3.17) і необхідні при обчисленнях по (3.18) - (3.23));

- параметри його орієнтування в просторі – кути між віссю дзвона і координатними осями або площинами, наприклад, кут і напрям (азимут) нахилу осі циліндра дзвона;

- параметри розмірів і форми дзвона – середній радіус апроксимуючого циліндра дзвона.

Геометричні параметри орієнтування, розмірів і форми входять у формули для обчислень градуовальної характеристики об'єму дзвона:

$$V_{z_f} = \Psi_V(\tau_1 \dots \tau_k, z_f), \quad (3.16)$$

де z_f – абсолютна висота рівня рідини в дзвоні з поточним номером f , для якої обчислюється інтервальна місткість.

Інтервальна місткість V_{z_f} – об'єм дзвона від найнижчої горизонтальної площини, прийнятий за початок робочої частини дзвона, до горизонтальної площини, абсолютна висота якої дорівнює z_f .

При вимірюваннях дзвін діаметром 0,7 м і довжиною 1,2 м розташовувався горизонтально і був жорстко закріплений на ложементях, встановлених на бетонній підлозі. Лазерний трекер був встановлений на металевій плиті так, щоб його центр розташовувався на осі циліндра на відстані 3,5 м від краю дзвона. Вісь абсцис системи координат трекера була орієнтована паралельно осі циліндра. Установка сферичного відбивача в точках координування проводилася за допомогою спеціальної штанги з магнітним посадковим гніздом. Застосування штанги дозволило значно зменшити температурний вплив оператора на дзвін.

При дослідженнях застосовувався лазерний трекер Faro ION, з

наступними метрологічними характеристиками [68]:

- стандартна невизначеність вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів $(10 + 2,5 \cdot L)$ мкм, де L – виміряне значення відстані, виражене в метрах;
- стандартна невизначеність вимірювання відстаней $(8 + 0,4 \cdot L)$ мкм.

Стандартну невизначеність вимірювань горизонтальних і вертикальних кутів виражають через довжину дуги, відповідну куту, рівному похибці вимірювання кута. Так її легше порівнювати з невизначеністю вимірювання довжини.

Для врахування реальної температури поверхні дзвона на ньому були встановлено вісім датчиків температури, підключені до вторинного приладу. Температура поверхні дзвона вимірювалася з інтервалом 10 хв, невизначеність вимірювань становила $0,1^\circ\text{C}$. В якості температури дзвону приймалося середнє значення всіх вимірних значень вісьмома датчиками.

Узагальнена схема вимірювань представлена на рисунку 3.5.

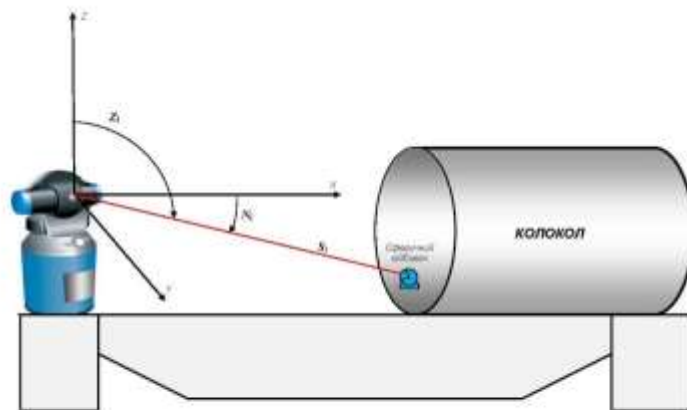


Рис. 3.5. Узагальнена схема вимірювань просторових координат опорних точок на внутрішній поверхні дзвона

Формула вимірювання повного об'єму дзвона із впливом температури матиме вигляд

$$\bar{V}_z = V_z + \Delta V_z + \Delta V_z^t, \quad (3.17)$$

де V_z – об'єм дзвона від найнижчої горизонтальної площини, прийнятий за початок робочої частини дзвона;

ΔV_z – поправка за рельєф;

ΔV_z^t – поправка на зміну температури дзвона (зважаючи на незначний коефіцієнт температурного розширення матеріалу дзвона – неіржавіючої сталі – є нехтовно малою).

Лазерний трекер виконує автоматичне стеження за кутовим відбивачем, вбудованим в спеціальну сферу діаметром півтора дюйма, на центр якої фактично виконуються кутові і лінійні виміри. За допомогою трекера виконують вимірювання відстані, горизонтальних і вертикальних кутів на центр сфери. Обчислені за виміряним значенням відстані і кутів просторові прямокутні координати опорної точки фіксуються в пам'яті трекера. При цьому при обчисленнях координат опорних точок на поверхні враховується відомий діаметр сферичного відбивача.

Під час експерименту визначалися координати 30-38 точок, розташованих по колу циліндра дзвону в кожному з 16 поздовжніх перетинів і ще в одному додатковому перетині по зварному шву. Критерієм для вибору кількості точок в перетинах слугувала рівномірність їх розподілу на всій площині розгортки внутрішньої поверхні дзвона. Всього були визначені координати близько 600 опорних точок.

Перед вимірюваннями координати точок перераховувалися програмою перетворення із прямокутної системи в локальну прямокутну систему координат таким чином, начебто циліндр знаходився приблизно у вертикальному положенні. Перетворення здійснювалось за формулою 7-параметричного перетворення Гельмерта [69].

При розробці методики обробки результатів вимірювань можна виділити такі основні задачі:

- оцінка геометричних параметрів поверхні дзвона за допомогою апроксимації виміряних просторових координат за допомогою методу найменших квадратів (МНК);
- оцінка невизначеності геометричних параметрів поверхні дзвона за допомогою МНК;
- обчислення градувальних характеристик (інтервальних місткостей) дзвону з використанням знайдених геометричних параметрів і реальної форми дзвону щодо апроксимуючої поверхні;
- оцінка за допомогою МНК невизначеності градувальної характеристики об'єму дзвону на основі невизначеності оцінки геометричних параметрів поверхні об'єкту.

В якості моделі вимірювань, що зв'язує координати кожної з опорних точок на поверхні з геометричними параметрами цієї поверхні, прийняті наступні функції:

$$\phi_i(x_i, y_i, z_i, \tau_1, \dots, \tau_k) = 0 \quad i = 1, n, \quad (3.18)$$

де $i = 1, n$ – номер опорної точки на поверхні об'єкта;

x_i, y_i, z_i – горизонтальні координати і абсолютна висота i -тої опорної точки на поверхні об'єкта, які вимірюються трекером;

$\tau_1, \dots, \tau_k$ – геометричні параметри поверхні об'єкта, що визначаються;

n – кількість опорних точок на поверхні, координати яких визначені;

k – кількість геометричних параметрів, що визначаються.

Абсолютна висота i -тої опорної точки – це відстань по вертикалі від найнижчої горизонтальної площини, прийнятої за початок робочої частини дзвону, до i -тої опорної точки.

Через нерівності поверхні і неточність вимірювань координат рівняння (3.18) не виконуються. Тому, для оцінки геометричних параметрів, що визначаються, необхідно скласти рівняння поправок, які отримуються шляхом частинного диференціювання моделі вимірювань (3.18) за виміряними координатами і параметром, що визначається:

$$\Delta\phi_i = \frac{\partial\phi_i}{\partial x_i} v_{x_i} + \frac{\partial\phi_i}{\partial y_i} v_{y_i} + \frac{\partial\phi_i}{\partial z_i} v_{z_i} = \frac{\partial\phi_i}{\partial\tau_1} \delta\tau_1 + \dots + \frac{\partial\phi_i}{\partial\tau_j} \delta\tau_j + \dots + \frac{\partial\phi_i}{\partial\tau_k} \delta\tau_k + l_i \quad (3.19)$$

де $\Delta\phi_i = \vartheta_i$ – поправка в радіальному напрямі для i -ї опорної точки;

$v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i}$ – поправки до вимірюваних координат i -ї опорної точки на поверхні;

$\delta\tau_1, \delta\tau_j, \delta\tau_k$ – поправки до приблизних значень параметрів, що визначаються;

l_i – вільний член рівняння поправок.

У матричному вигляді система параметричних рівнянь поправок (3.19) має вигляд:

$$A \cdot V = B \cdot \delta\tau + l \quad (3.20)$$

або

$$\vartheta = B \cdot \delta\tau + l, \quad (3.21)$$

де A – матриця частинних похідних від моделі вимірювань (3.18) за вимірюваними координатами точок;

V – матриця поправок до вимірюваних координат точок;

ϑ – діагональна матриця радіальних відхилень реальної поверхні дзвона від апроксимуючого циліндру;

B – матриця частинних похідних від моделі вимірювань (3.18) за геометричними параметрами, що визначаються;

$\delta\tau$ – вектор поправок до приблизних значень параметрів, що визначаються;

l – вектор вільних членів рівнянь поправок.

Радіальні відхилення – це найкоротші відстані між реальною поверхнею дзвона і апроксимуючим циліндром в радіальному напрямку. Саме вони мають вирішальне значення при оцінці невизначеності геометричних параметрів та об'єму дзвона.

Враховуючи те, що параметричних рівнянь поправок (3.19) значно більше, ніж геометричних параметрів, що визначаються, складається система нормальних рівнянь, яка в матричному вигляді має вигляд:

$$B^T \cdot B \cdot \delta\tau + B^T \cdot l = 0 \quad (3.22)$$

або

$$N \cdot \delta\tau + L = 0. \quad (3.23)$$

При складанні системи приймалось до уваги те, що $B^T \cdot \vartheta = 0$.

Поправки до приблизних значень геометричних параметрів в матричному виді визначаються по формулі:

$$\delta\tau = -N^{-1} \cdot L = -Q_3 \cdot L, \quad (3.24)$$

де $N^{-1} = Q_3$ – матриця зворотна до матриці коефіцієнтів нормальних рівнянь з (3.22, 3.23).

Стандартне радіальне відхилення σ_ϑ реальної поверхні дзвона від апроксимуючої і кореляційна (коваріаційна) матриця геометричних параметрів поверхні дзвона, що визначаються, обчислюються за формулами:

$$\sigma_\vartheta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2}{n-k}}; \quad (3.25)$$

$$K_{\delta\tau} = \sigma_\vartheta^2 \cdot Q. \quad (3.26)$$

Отримані радіальні відхилення відповідають основним принципам МНК:

$$\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2 = \min. \quad (3.27)$$

Оцінка стандартного відхилення (стандартної невизначеності типу А) невинправленої поправками інтервальної місткості дзвона до висоти z_f визначається за формулою:

$$u_A^2(V_{z_f}) = \sigma_{V_{z_f}}^2 = F_{V_{z_f}} \cdot K_{\delta\tau} \cdot F_{V_{z_f}}^T = \sigma_\vartheta^2 \cdot F_{V_{z_f}} \cdot Q \cdot F_{V_{z_f}}^T, \quad (3.28)$$

де $F_{V_{z_f}} = \left| \frac{\partial \psi_V}{\partial \tau_1} \dots \frac{\partial \psi_V}{\partial \tau_j} \dots \frac{\partial \psi_V}{\partial \tau_k} \right|$ – вектор частинних похідних від функції (3.17) за геометричними параметрами дзвона, що приймають участь в обчисленні його об'єму (інтервальна місткість) до абсолютної висоти z_f .

Поправка в загальну місткість дзвона за радіальні відхилення (поправка за рельєф) поверхні дзвона щодо апроксимуючої поверхні повинна дорівнювати нулю. Однак тільки такі поправки за рельєф у інтервальні місткості дзвона дозволяють істотно підвищити точність відтворення об'єму газу, що пройшов через лічильник.

Враховуючи велику кількість точок, координати яких визначаються лазерним трекером на поверхні дзвона, запропоновано вводити поправки за рельєф за формулами:

$$\bar{\vartheta}_{z_f} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{z_f}} \vartheta_i}{n_{z_f}}; \quad (3.29)$$

$$\Delta V_{z_f} = S_{z_f} \cdot \bar{\vartheta}_{z_f}, \quad (3.30)$$

де $S_{z_f} = \psi_S(\tau_1 \dots \tau_k, z_f)$ – площа поверхні дзвона до висоти z_f ;

$\bar{\vartheta}_{z_f}$ – середнє радіальне відхилення дзвона до абсолютної висоти z_f ;

n_{z_f} – кількість точок на поверхні дзвона до абсолютної висоти z_f ,

координати яких були визначені.

Оцінка стандартного відхилення (стандартної невизначеності типу А) площі поверхні дзвона до висоти z_f визначається за формулою:

$$u_A^2(S_{z_f}) = \sigma_{S_{z_f}}^2 = F_{S_{z_f}} \cdot K_{\delta\tau} \cdot F_{S_{z_f}}^T = \sigma_{\vartheta}^2 \cdot F_{S_{z_f}} \cdot Q_3 \cdot F_{S_{z_f}}^T, \quad (3.31)$$

де $F_{S_{z_f}} = \left| \frac{\partial \psi_S}{\partial \tau_1} \dots \frac{\partial \psi_S}{\partial \tau_j} \dots \frac{\partial \psi_S}{\partial \tau_k} \right|$ – вектор частинних похідних від площі поверхні

дзвона до висоти z_f за геометричними параметрами дзвона, які беруть участь у її обчисленні.

Стандартне відхилення (невизначеність типу А) поправки ΔV_{z_f} за рельєф обчислюється за формулою:

$$u_A(\Delta V_{z_f}) = \sigma_{\Delta V_{z_f}} = \sqrt{\bar{g}_{z_f}^2 \cdot \sigma_{S_{z_f}}^2 + S_{z_f}^2 \cdot \sigma_{\bar{g}_{z_f}}^2}. \quad (3.32)$$

Виправлена поправкою за рельєф інтервальна місткість дзвона до висоти z_f і її невизначеність обчислюються за формулами:

$$\bar{V}_{z_f} = V_{z_f} + \Delta V_{z_f}, \quad (3.33)$$

$$u_A(\bar{V}_{z_f}) = \sqrt{u_A^2(V_{z_f}) + u_A^2(\Delta V_{z_f})}. \quad (3.34)$$

Для дзвона, що займає вертикальне положення, модель вимірювань (3.18) має вигляд:

$$R = \sqrt{\left(x_i - x_o - z_i \cdot \sin \beta_x\right)^2 \cdot \cos^2 \beta_x + \left(y_i - y_o - z_i \cdot \sin \beta_y\right)^2 \cdot \cos^2 \beta_y}, \quad (3.35)$$

де R – середній внутрішній радіус циліндричної частини дзвона;

x_o, y_o – горизонтальні координати точки на осі дзвона при $z_o = 0$;

β_x, β_y – кути нахилу осі дзвона в проекції на площині координат xz і yz .

Для вертикального дзвона у формулах обчислення його інтервальних місткостей (3.16) і площі поверхні з (3.30, 3.31) з п'яти геометричних параметрів, які були визначені, беруть участь три:

$$V_{z_f} = \pi \cdot R^2 \cdot \sqrt{1 + tg^2 \beta_x + tg^2 \beta_y} \cdot z_f = \pi \cdot R^2 \cdot \sqrt{1 + \eta^2} \cdot z_f; \quad (3.36)$$

$$S_{z_f} = \pi \cdot R \cdot (1 + \sqrt{1 + tg^2 \beta_x + tg^2 \beta_y}) \cdot z_f = \pi \cdot R \cdot (1 + \sqrt{1 + \eta^2}) \cdot z_f, \quad (3.37)$$

де $\eta = tg \beta = \sqrt{tg^2 \beta_x + tg^2 \beta_y}$ – нахил осі циліндра.

Обробка результатів вимірювань, проведених описаним вище приладом із застосуванням описаного математичного апарату, показала, що основний внесок у формування невизначеності геометричних параметрів та інтервальних місткостей дзвона вносить точність його виготовлення. Стандартне відхилення

реальної поверхні дзвона від апроксимуючого циліндра склало 546 мкм. Максимальні радіальні відхилення на зварному шві досягають 1 мм (на решті поверхні до 0,5 мм). Тобто внесок невизначеності вимірювань трекером в 20 мкм у сумарну невизначеність нехтовно малий у порівнянні з внеском невизначеності виготовлення поверхні. Тим не менш, розширена невизначеність середнього радіусу, оцінена з 490 точок, прийнятих до обробки, становить 23,3 мкм (0,0068 %).

Недоліком проведення вимірювань координат точок на внутрішній поверхні дзвона, що знаходиться в горизонтальному положенні, є те, що реальний нахил осі η невідомий. Найкращим варіантом були б вимірювання, проведені трекером у вертикальному положенні дзвона при відомих показках приладу, що відповідає за його прив'язку до прямовисної лінії. Але це неможливо через неможливість рівномірного та послідовного руху вимірювальної відбиваючої сфери по рельєфу через вплив гравітації.

При вимірюваннях, проведених у горизонтальному положенні дзвона, координати перетворювалися із декартової системи в систему полярних координат до тих пір, поки нахил не став близький до нуля. Обчислена розширена невизначеність нахилу осі циліндра становить 0,0004. Якщо невідомий реальний нахил осі дзвона η , коли дзвін підвішений, його вплив на об'єм дзвона повинен бути включено в бюджет невизначеності.

З використанням формул (3.36) і (3.37) була складена градувальна характеристика дзвона, що представляє собою його інтервальні місткості (об'єми) обчислені через 1 см по висоті від згаданої вище найнижчої площини. Мінімальна і максимальна поправки за рельєф у об'єм дзвона на інтервалі 1 см, обчислені за формулою (3.30), складають мінус 0,06 % і 0,06 % відповідно, тоді як на найгіршому інтервалі в 27 см складають мінус 0,014 % і 0,014 % відповідно. Зі збільшенням інтервалу у відносному значенні ця поправка зменшується.

На рисунку 3.6 приведена розгортка внутрішньої циліндричної поверхні дзвона на площину. На розгортці ізолініями зображений рельєф реальної

внутрішньої поверхні дзвона щодо апроксимуючого циліндра. Ізолінії, відображатимуть рельєф, побудовані за радіальним відхиленням опорних точок від циліндра, обчислених за формулою (3.19). На розгортці явно виділяється локальна область з великими деформаціями, відповідна зварному шву дзвона. Незважаючи на те, що шов варився в певній послідовності мінімізуючій деформації і ретельно зашліфований, в цьому місці є значні (до 1 мм), у порівнянні з іншими областями внутрішньої поверхні дзвона, відхилення реальної поверхні від апроксимуючої.

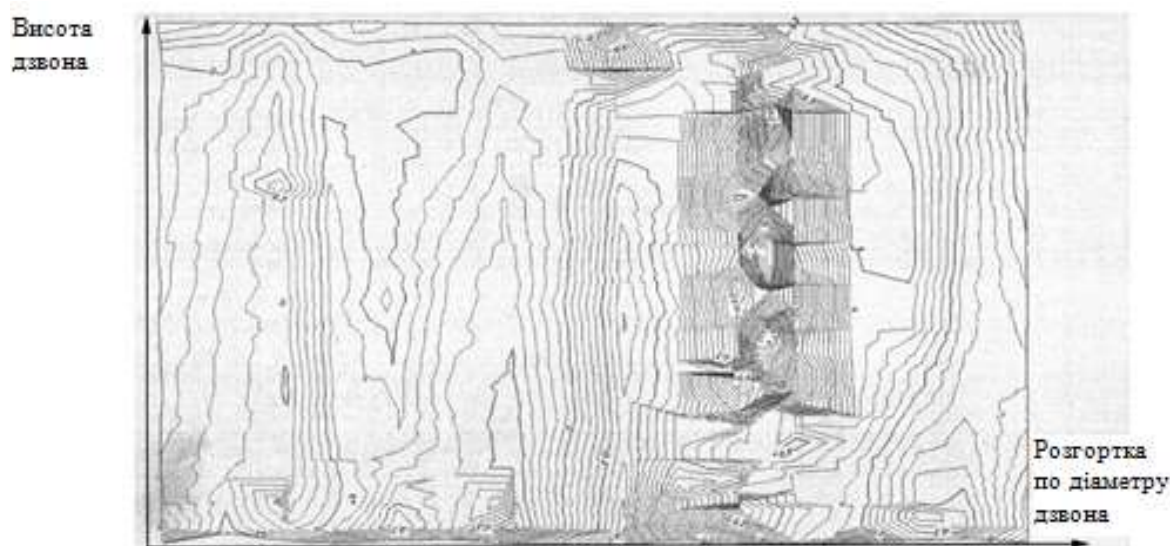


Рис. 3.6. Розгортка внутрішньої циліндричної поверхні дзвона на площину з ізолініями, що відображають рельєф його реальної внутрішньої поверхні щодо апроксимуючої

Запропонований метод оцінки внутрішнього рельєфу ЗВО з корекцією на відхил від горизонтальності дозволяє на порядок підвищити точність обчислення інтервальних місткостей при градуюванні цього ЗВО.

ЗВО застосовуються у якості еталонів в установках для повірки лічильників води, нафтопродуктів і газу. Окрім того ЗВО застосовуються як робочі засоби вимірювання під час облікових і торгових операцій з нафтою і нафтопродуктами.

Застосування запропонованого методу дозволяє значно підвищити точність калібрування лічильників води і газу, резервуарів для нафтопродуктів,

що в свою чергу веде до підвищення достовірності вимірювань в сфері обліку води, газу та енергоресурсів.

3.3 Метод динамічного зважування при вимірюванні витрати

Як зазначалося в розділі 1 для підвищення продуктивності установок виконують їх автоматизацію. Для забезпечення автоматичної роботи установки, а також для управління початком і кінцем виконання вимірювань в системі автоматизації установки необхідно мати сигнал, пропорційний поточному значенню витрати. Так як еталонне значення витрати визначається непрямым методом шляхом ділення об'єму води, пролитого через вимірювальну ділянку установки на час проливу, тобто значення витрати визначається після закінчення вимірювання і в процесі вимірювання поточне значення витрати невідомо. Для отримання такого сигналу установку необхідно додатково оснащувати витратоміром з вихідним електричним сигналом, що веде до її подорожчання.

Для спрощення конструкції установки, зменшення її вартості і підвищення точності повірки витратомірів для вимірювання витрати було запропоновано метод динамічного зважування.

Рисунок 3.7 пояснює процес визначення витрати по динамічній зміні маси води.

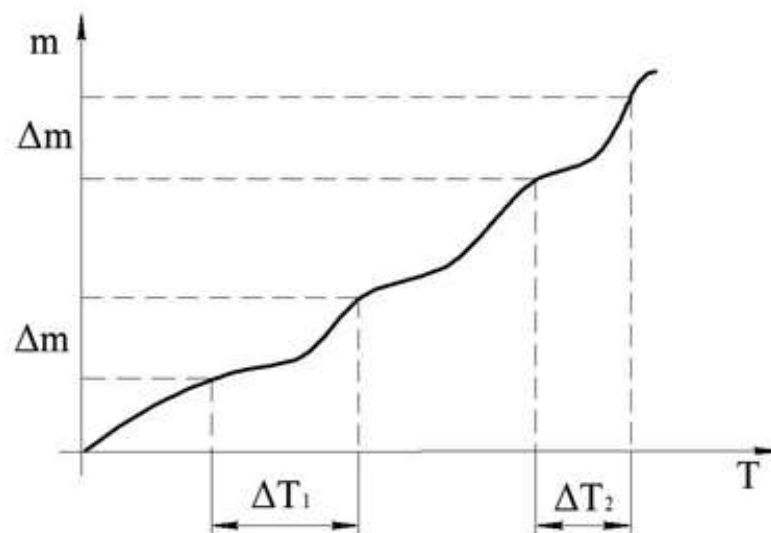


Рисунок 3.7 – Принцип динамічного зважування

При динамічному вимірюванні витрати маса рідини в ємності для зважування вимірюється не тільки на початку і в кінці вимірювання, але і протягом проливу через певні інтервали часу. Для врахування різної швидкості заповнення ємності для зважування при різних значеннях відтвореної витрати, передбачається вимірювання маси і часу вимірювання циклічно за приросту маси Δm води в ємності на певну величину, яка вибирається, виходячи з швидкості заповнення ємності і нормованої похибки вимірювання витрати. З рисунка 3.7 видно, що час циклу вимірювання не постійний і зменшується зі збільшенням вимірюваної витрати. У кожному циклі виконується обчислення об'ємної витрати за формулою:

$$Q_{vi} = \frac{c_v}{\Delta T_i} \cdot \frac{\Delta m}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_{du}}. \quad (3.38)$$

Ці значення виводяться на показувальний пристрій установки. Таким чином в установці генерується сигнал вимірювальної інформації, пропорційний об'ємній витраті рідини в вимірювальній ділянці установки, який може використовуватися для встановлення і автоматичного регулювання витрати.

Для реалізації методу динамічного зважування розроблено проливну установку [9].

На рисунку 3.8 приведена принципова схема запропонованої установки.

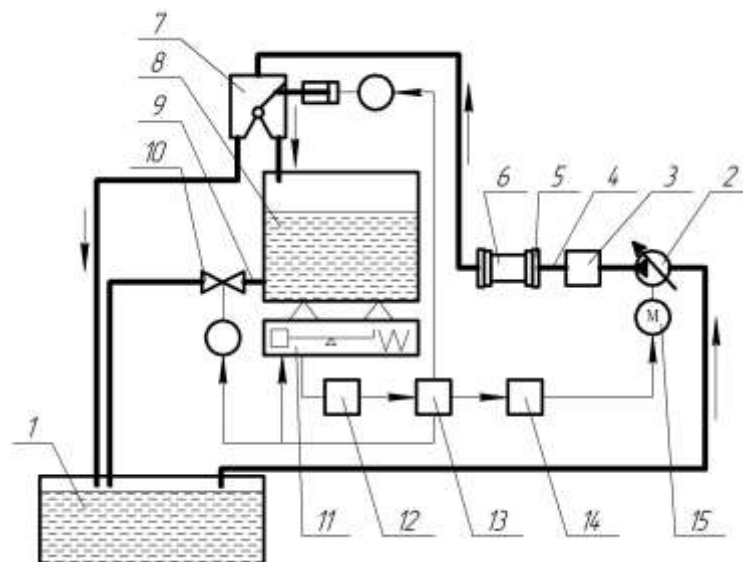


Рис. 3.8. Принципова схема установки для перевірки витратомірів-лічильників

Проливна установка для перевірки витратомірів-лічильників рідини включає резервуар для підготовки та зберігання рідини 1, циркуляційний насос 2, ресивер-деаератор 3, нагнітальний трубопровід 4 з вимірювальною ділянкою, комплект встановлених пристосувань 5 для кріплення витратоміра-лічильника, що повіряється, 6, перемикач 7, прийомний бак 8, зливний трубопровід 9, кран 10 з електроприводом, ваговий пристрій 11, електронний ваговий термінал 12, систему управління, що включає контролер 13, блок збору і обробки інформації 14 і силовий блок 15.

Установка працює таким чином.

Витратомір-лічильник, що повіряється, за допомогою комплекту настановних пристосувань 5 розміщується і кріпиться на вимірювальній ділянці нагнітального трубопроводу 4. Прийомний бак 8, встановлений на ваговому пристрої 11, обладнаному електронним ваговим терміналом 12, пов'язують через контролер 13 з блоком збору та обробки інформації 14. За допомогою системи управління після включення циркуляційного насоса 2 здійснюють холостий хід, при якому рідина з резервуара для підготовки та зберігання рідини 1 після ресивера-деаератора 3 подається в нагнітальний трубопровід 4 і витратомір-лічильник, що повіряється 6 і далі за допомогою перемикача 7 в приймальний бак 8. При закритому крані 10 здійснюється наповнення бака 8 і одночасно вимірювання витрати рідини шляхом оцінки приросту маси рідини в баку 8 за одиницю часу.

Після того, як витрата рідини стабілізується, за допомогою контролера 13 системи управління подається команда на відкриття крана 10 для зливу рідини з бака 8 і на перемикач 7 для направлення рідини по обвідному каналу в бак 1.

Після спорожнення бака 8 за допомогою контролера 13 подається команда початку рахунку об'єму рідини через витратомір-лічильник, що повіряється 6 шляхом рахунку числа імпульсів і одночасно перемикається перемикач 7, направляючий потік рідини в приймальний бак 8. Одночасно в динамічному режимі здійснюється опитування вагового пристрою 11 за допомогою вагового терміналу 12 для вимірювання витрати рідини, що пройшла через витратомір-лічильник, що повіряється 6 (поточного значення витрати). Для підтримання постійного значення витрати рідини при проведенні

розрахунку витрати рідини через витратомір-лічильник, що повіряється 6 системою управління за допомогою вагового терміналу 12 виконується постійне опитування пристрою 11 через істотно малий інтервал часу. Отримані значення порівнюються між собою і у випадку, якщо абсолютна різниця двох наступних даних перевищує попередньо задане обумовлене значення, через контролер 13 подається команда про зміну числа обертів двигуна 15. Після закінчення часу перевірки контролер 13 видає команду про припинення рахунку імпульсів витратоміра-лічильника, що повіряється 6 і одночасно здійснюється зворотнє спрацьовування перемикача 7 для припинення подачі рідини в приймальний бак 8 і напрямок потоку через обвідний трубопровід в резервуар для підготовки та зберігання рідини 1.

Похибка вимірювання витрати методом динамічного зважування визначалася за наступним чином.

У вимірювальній ділянці установки встановлювався еталонний витратомір, в якості якого застосовувалися електромагнітні витратоміри PROMAG виробництва фірми Endress + Hauser, границі допустимої відносної похибки вимірювання витрати $\pm 0,2 \%$. У залежності від значення вимірюваної витрати застосовувалися витратоміри з номінальними діаметрами DN2 і DN6.

Пролив здійснювався при трьох значеннях витрати. При кожному значенні витрати під час проливу фіксувалися значення витрати за показами установки і еталонного витратоміра. За час проливу знімалося не менше 10 пар показів. Результат вимірювання витрати визначався як середнє значення із зафіксованих результатів.

Похибка установки при вимірюванні витрати в вимірювальній ділянці визначається за формулою:

$$\delta_v = \frac{Q_y - Q_{\text{э}}}{Q_{\text{э}}} \cdot 100, \quad (3.39)$$

де Q_y – значення витрати за показами установки, $\text{м}^3/\text{год}$;

$Q_{\text{э}}$ – значення витрати за показами еталонного витратоміра, $\text{м}^3/\text{год}$.

Результати досліджень показали, що похибка динамічного вимірювання витрати не перевищує $2,5 \%$, що відповідає вимогам [70].

Таким чином, виключення зі складу установки для повірки (калібрування) витратомірів-лічильників рідини розміщеного на вимірювальній ділянці еталонного витратоміра і оснащення установки електронним ваговим терміналом для динамічного вимірювання витрати рідини і забезпечення підтримання постійної витрати рідини при проведенні метрологічних робіт, дозволило підвищити точність повірки витратомірів-лічильників і спростити конструкцію установки.

3.4 Висновки

1 Розроблено метод зменшення пульсацій потоку у витратомірній ділянці установки заснований на водообміні між потоком води у вимірювальній ділянці установки і накопичувальним резервуаром. Розроблено демпфер-деаератор, заснований на цьому методі, і проведені його експериментальні дослідження, які підтвердили ефективність розробленого демпфера-деаератора в гасінні пульсацій потоку води та видалення з неї повітря.

2. Запропоновано методику досліджень, яка може застосовуватися при дослідженні пульсацій потоку води в вимірювальній ділянці повірочних витратомірних установок при їх калібруванні та випробуваннях.

3. Отримана математична модель індексу пульсацій, яка дозволяє розрахувати допустимі значення частоти управління насосом, при яких індекс пульсацій не перевищуватиме критичне значення, що дозволить підтримувати допустимий рівень пульсацій потоку під час калібрування витратомірів.

4. Запропоновано метод оцінки внутрішнього рельєфу ЗВО з корекцією на відхил від горизонтальності, який дозволив на порядок підвищити точність обчислення інтервальних місткостей при його градуюванні, що дозволяє значно підвищити точність калібрування лічильників води і газу, резервуарів для нафтопродуктів, що в свою чергу веде до підвищення достовірності вимірювань в сфері обліку води, газу та енергоресурсів.

5. Запропоновано конструкцію установки для повірки витратомірів-лічильників, в якій використовується динамічне вимірювання витрати рідини в вимірювальній ділянці застосований штатний ваговий пристрій з контролером, що дозволило виключити зі складу установки додатковий витратомір, спростити конструкцію і зменшити вартість установки.

РОЗДІЛ 4. КАЛІБРУВАННЯ ВИТРАТОМІРНИХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ КОМПАРУВАННЯ

4.1 Простежуваність результатів вимірювання

Відповідно до [71] калібрування засобів виміральної техніки проводиться тільки тими лабораторіями, які мають документально доведену простежуваність своїх еталонів до національних еталонів, еталонів інших держав або міжнародних еталонів відповідних одиниць фізичних величин.

Метрологічна простежуваність – це властивість результату вимірювань, яка полягає у тому, що цей результат може бути пов'язаний з еталоном через підтверджений документально нерозривний ланцюг калібрування, кожне з яких вносить свій внесок у невизначеність вимірювання [72]. Схематично простежуваність результатів вимірювань показана на рисунку 4.1.

Простежуваність до національного еталону означає, що кожна витратомірна установка повинна бути калібрована еталоном більш високої точності до рівня, при якому еталоном більш високої точності є національний еталон [73].

Задача полягає в тому, щоб забезпечити простежуваність вимірювань до Міжнародної системи одиниць, для того щоб вимірювання в усьому світі були сумісними.

Відмінною ознакою у витратометрії є те, що вимірювані величини – об'ємна і масова витрата, не являють собою постійних матеріальних мір. Ці величини матеріалізуються тільки на час, протягом якого вони генеруються у вигляді циркулюючого потоку води в витратомірних установках.

Можливі два способи реалізації простежуваності результатів вимірювання витрати:

- поелементна простежуваність до основних одиниць величин СІ, одержуваних прямими вимірюваннями, за результатами яких розраховується значення витрати і оцінки її невизначеності;
- простежуваність за допомогою компаратора (динамічна простежуваність).

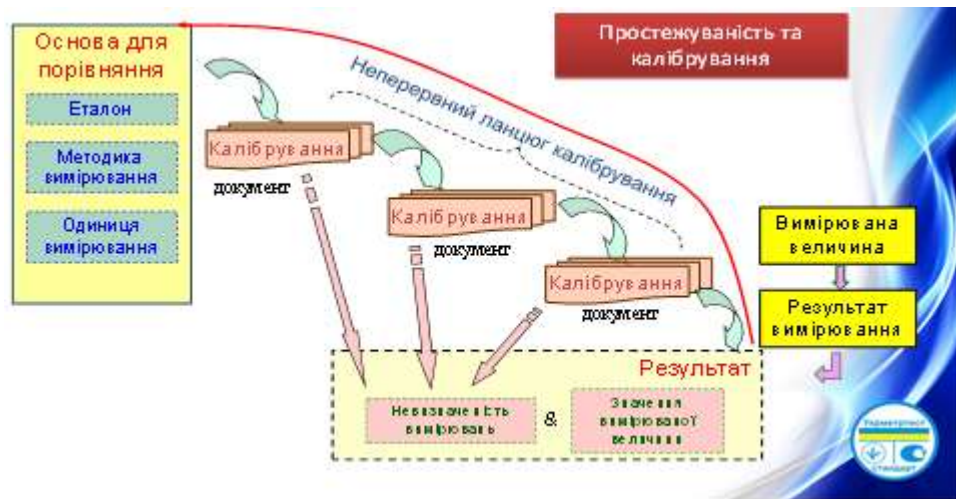


Рис. 4.1. Схема метрологічної простежуваності

З практичних причин простежуваність встановлюється поелементно відповідно до простежуваності величин, що входять до рівняння опосередкованих вимірювань витрати. При цьому вважають, що аналітична модель еталона витрати є всеосяжною і враховує всі фактори, що впливають на невизначеність вимірювання витрати.

Схематично поелементна простежуваність представлена на рисунку 4.2.

Проте, характерною особливістю витратовимірювальної практики є те, що відтворення і передача значень витрати здійснюється сукупністю «невзаємозалежних» витратомірних установок, кожна з яких відтворює потік робочого середовища зі своїми фізико-хімічними властивостями – температурою, в'язкістю, густиною, складом. При цьому потік має певний набір взаємозалежних гідродинамічних параметрів – полем швидкостей і тисків, пульсаційними характеристиками, ступенем «закрутки», у тому числі і витратою [73].

У зв'язку з цим в дійсності аналітична модель еталона не враховує всі параметри потоку рідини і особливості монтажу витратоміра у вимірювальну ділянку.

З цієї причини забезпечення динамічної простежуваності являється необхідним, так як при цьому простежуваність здійснюється до національного еталону одиниці вимірюваної величини, а саме витрати.

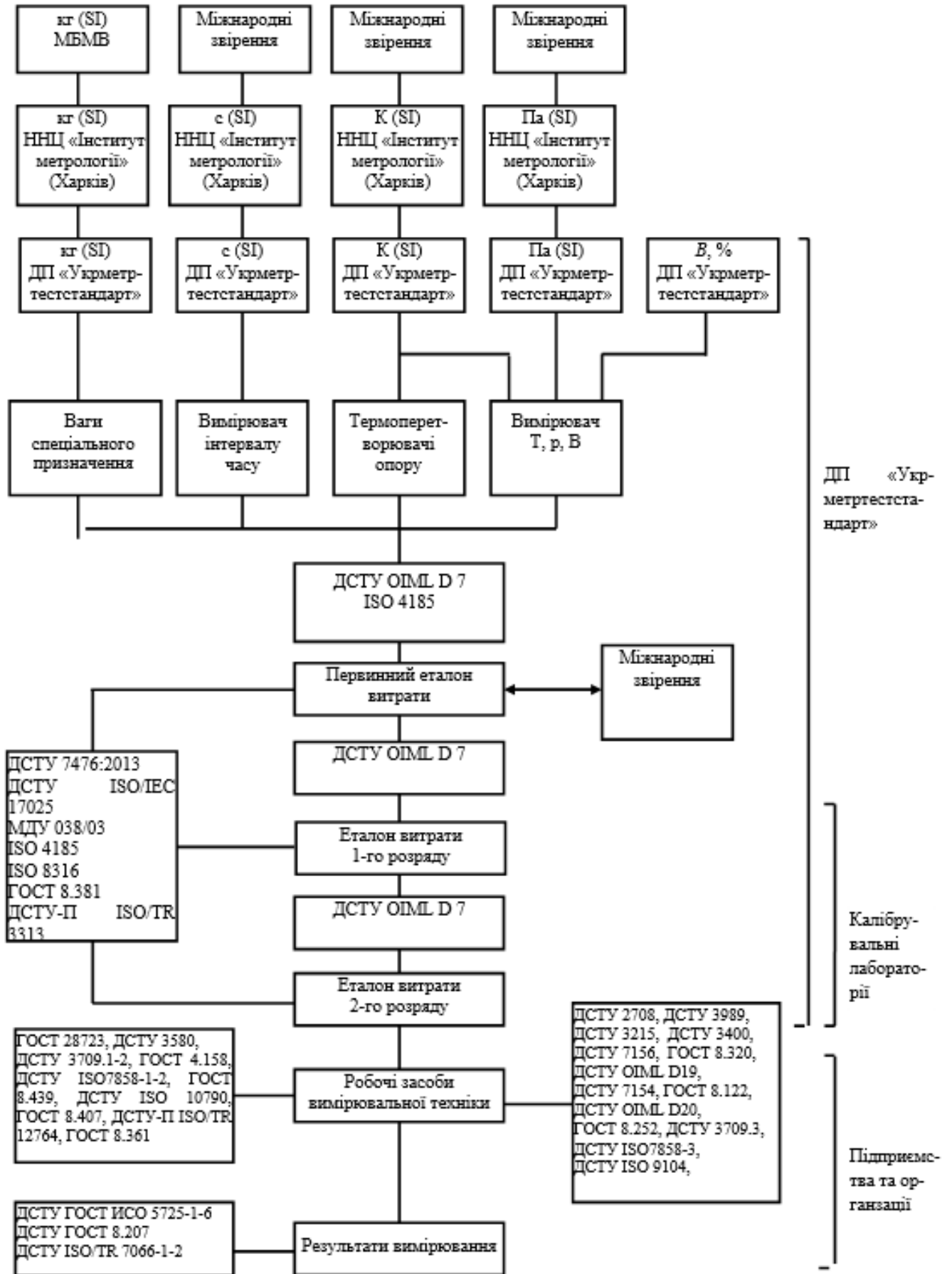


Рис. 4.2. Схема поелементної простежуваності результатів вимірювань

4.2 Метод калібрування витратомірних установок за допомогою компаратора

Динамічна простежуваність еталонів забезпечується калібруванням їх за допомогою ВЗП (далі – компаратора) [74]. Компаратор – це спеціальний прилад, за допомогою якого проводиться порівняння показів робочого еталона, що калібрується і показів первинного еталона.

При цьому метод компарування дозволяє забезпечити простежуваність одиниці вимірюваної величини по всій ієрархії калібрувань – від робочих еталонів до національного еталону. Відповідно до [72] звірення двох еталонів може розглядатися як калібрування, якщо звірення використовується для контролю і, при необхідності, коригування значення величини витрати і невизначеності вимірювань, приписуваних одному з еталонів.

Розроблено метод калібрування еталонів різних рівнів в області витратометрії за допомогою компаратора [6], який полягає в наступному.

Відповідно до [75] в процесі калібрування еталона необхідно встановити його дійсні метрологічні характеристики шляхом встановлення співвідношення між значенням величини, отриманим за допомогою еталона, що калібрується, і відповідним значенням величини, отриманими за допомогою національного еталона. Результати калібрування дозволяють оцінити це співвідношення з властивою йому невизначеністю вимірювань.

У якості компаратора застосовують витратомір, який калібрується почергово на еталоні більш високого рівня та на еталоні, що калібрується.

Величина, яка завжди є предметом калібрування витратомірів – це так званий K -фактор, хоча витратомір калібрується на еталонній установці за об'ємом або за масою. У будь-якому випадку характеристики витратоміра непрямым чином представляються K -фактором, який визначають за формулою:

$$K_{Q_V} = \frac{f}{Q_V} = \frac{N \cdot T}{T \cdot V} = \frac{N}{V}, \quad (4.1)$$

де K_{Q_V} – K -фактор об'ємного витратоміра, $1/\text{м}^3$;

Q_V – об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{год}$;

f – частота вихідного сигналу компаратора, Гц (1/с);

N – число імпульсів вихідного сигналу компаратора;

T – час проливу, с;

V – об'єм води, що пройшла через витратомір за час проливу, м³.

З рівняння (4.1) видно, що K -фактор компаратора, застосовуваного при калібруванні витратомірних установок, дорівнює числу вихідних імпульсів на одиницю об'єму і не залежить від часу. Тому в якості компаратора застосовують лічильники води з імпульсним виходом.

Звірення мір за допомогою компаратора здійснюється методами протиставлення або заміщення [76]. Суть цих методів полягає в наступному. При використанні методу протиставлення дві порівнювані величини подаються на різні входи компаратора, а при використанні методу заміщення – в одну і ту ж частину схеми подається одна величина, а потім інша.

Спільним для цих методів є формування сигналу про наявність різниці порівнюваних величин. Якщо цей сигнал шляхом підбору, наприклад, еталонної міри або шляхом примусової зміни її розміру буде зведений до нуля, то цей метод називають нульовим. Якщо вимірювальний сигнал вказує на наявність різниці розміру, то це диференціальний метод. При використанні в ході калібрування методу протиставлення, виникає невизначеність вимірювань через неоднакове спотворення компаратором сигналів від еталонного та того, що калібрується, засобів вимірювання.

Метод заміщення виключає вплив компаратора і підвищує точність калібрування. При використанні нульового методу необхідно мати засоби вимірювань, які відтворюють будь-яке значення вимірюваної величини без істотного зниження точності. Особливістю диференціального методу при проведенні вимірювань і повірки є можливість отримання достовірних результатів звірення двох засобів вимірювальної техніки навіть при компараторах з досить великою похибкою.

Враховуючи територіальну віддаленість національного еталону від робочих еталонів, застосовується метод заміщення, при якому за допомогою

компаратора послідовно вимірюють фізичну величину, відтворювану національним еталоном і робочим еталоном і потім порівнюють отримані значення (рисунок 4.3).

Значення різниці показів каліброваного робочого еталона і національного еталону Δ визначається за формулою [4.8]:

$$\Delta = X_{к/р} - X_{к/н}, \quad (4.2)$$

де $X_{к/р}$, $X_{к/н}$ – покази компаратора при вимірюванні фізичної величини на робочому етalonі і на національному етalonі відповідно.

Як зазначалося вище, еталони в галузі витратометрії за своїм фізичним принципом не можуть відтворювати з необхідною точністю повторюване цільове значення фізичної величини. Тому для забезпечення порівнянності результатів вимірювань еталонами необхідно визначити величину вихідного сигналу компаратора, що припадає на одиницю вимірюваної величини на національному етalonі $Y_{к/н}^*$ та етalonі, що калібрується $Y_{к/к}^*$ за формулами:

$$Y_{к/н}^* = \frac{Y_{к/н}}{X_{н}}, \quad Y_{к/к}^* = \frac{Y_{к/к}}{X_{к}}, \quad (4.3)$$

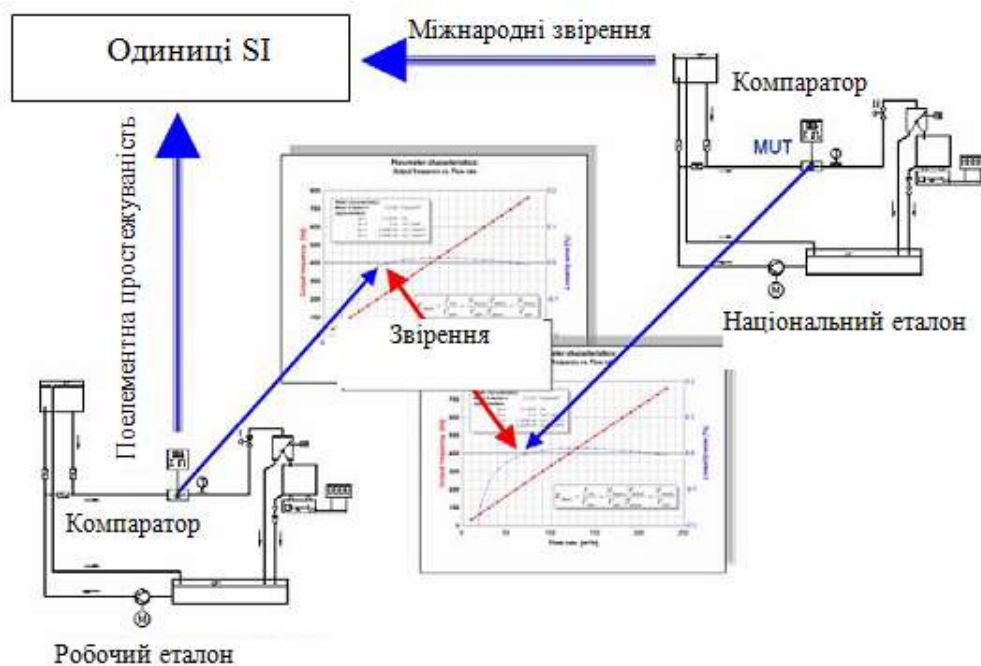


Рис. 4.3. Схема калібрування робочих еталонів за допомогою компаратора

де $Y_{к/н}$, $Y_{к/к}$ – вихідний сигнал компаратора на національному і каліброваному еталоні відповідно;

X_n , X_k – покази національного та робочого – того, що калібрується еталона при вимірюванні фізичної величини відповідно.

Відносні вихідні сигнали компаратора фактично являють собою покази компаратора при вимірюванні одиниці фізичної величини, відтвореної на національному еталоні та робочому еталоні, що калібрується.

Калібрування виконується наступним чином.

Компаратор встановлюють на національний еталон, виконують n проливів при певному значенні витрати Q_i , за результатами кожного проливу фіксують значення фізичної величини, вимірюної національним еталоні X_{ni} і відповідний їй вихідний сигнал компаратора $Y_{к/ni}$.

Після цього визначають відносний вихідний сигнал компаратора на національному еталоні $Y_{к/н}^*$ в даній точці діапазону при i -тому проливі, за формулою:

$$Y_{к/ni}^* = \frac{Y_{к/ni}}{X_{ni}}. \quad (4.4)$$

Значення фізичної величини, виміряне компаратором на національному еталоні $X_{к/ni}^*$ в даній точці діапазону при i -тому проливі, визначається за формулою:

$$X_{к/ni}^* = \frac{Y_{к/ni}^*}{K_k}, \quad (4.5)$$

де K_k – значення K -фактора компаратора в даній точці діапазону витрати.

Виконують цю операцію n раз і за відомими формулами [77] визначають середнє значення фізичної величини, виміряне компаратором на національному еталоні $\bar{X}_{к/н}^*$.

Потім компаратор встановлюють на робочий еталон, що калібрується, виконують n проливів при значенні витрати Q_i , за результатами кожного

проливу фіксують значення фізичної величини, виміряної еталоном, що калібрується $X_{\kappa i}$ і відповідний їй вихідний сигнал компаратора $Y_{\kappa/\kappa i}$. Після цього визначають відносний вихідний сигнал компаратора на еталоні, що калібрується $Y_{\kappa/\kappa}^*$ в даній точці діапазону при i -тому проливі, за формулою:

$$Y_{\kappa/\kappa i}^* = \frac{Y_{\kappa/\kappa i}}{X_{\kappa i}}. \quad (4.6)$$

Значення фізичної величини, виміряне компаратором на еталоні, що калібрується $X_{\kappa/\kappa i}^*$ в даній точці діапазону при i -тому проливі, визначається за формулою:

$$X_{\kappa/\kappa i}^* = \frac{Y_{\kappa/\kappa i}^*}{K_{\kappa}}. \quad (4.7)$$

Виконують цю операцію n раз і визначають середнє значення фізичної величини, виміряне компаратором на еталоні, що калібрується $\bar{X}_{\kappa/\kappa}^*$.

Визначають різницю показів національного еталона та еталона, що калібрується у відносній формі при вимірюванні відповідної фізичної величини δ_X , у відсотках, за формулою:

$$\delta_X = 100 \times \left(\frac{X_{\kappa/\kappa}^* - X_{\kappa/n}^*}{X_{\kappa/n}^*} \right). \quad (4.8)$$

Невизначеність результатів вимірювань при проведенні калібрування за допомогою компаратора оцінюється за методикою, наведеною в розділі 2.

Такий підхід було апробовано при проведенні калібрування робочого еталона 1-го розряду – проливної установки PREMATEST по вторинному еталону ВЕТУ 03-04-01-07.

Результати досліджень наведені на рисунках 4.4, 4.5.

На рисунку 4.4 наведені відносні виміряні значення фізичної величини, виконані за допомогою компаратора на вторинному еталоні ВЕТУ 03-04-01-07 та установці, що калібрується PREMATEST.

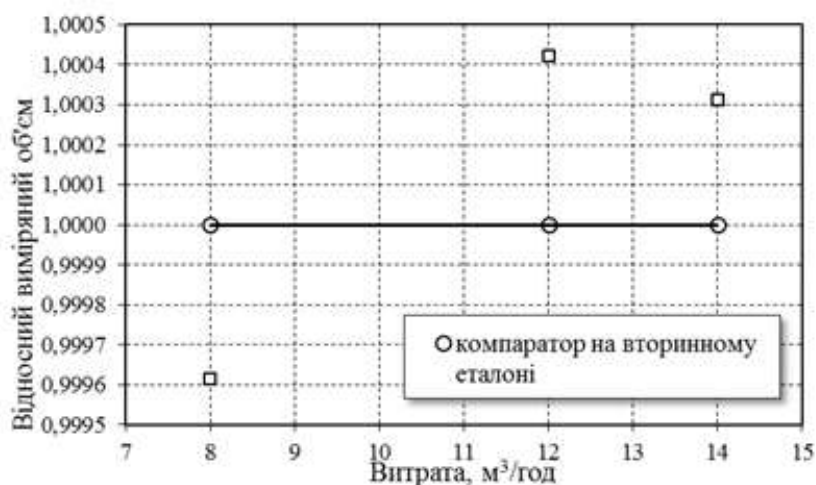


Рис. 4.4. Відносні вимірні значення фізичної величини, отримані за допомогою компаратора на вторинному та робочому еталонах

На рисунку 4.5 наведені значення відхилення показів робочого еталона від показів вторинного еталона з розширеними невизначеностями.

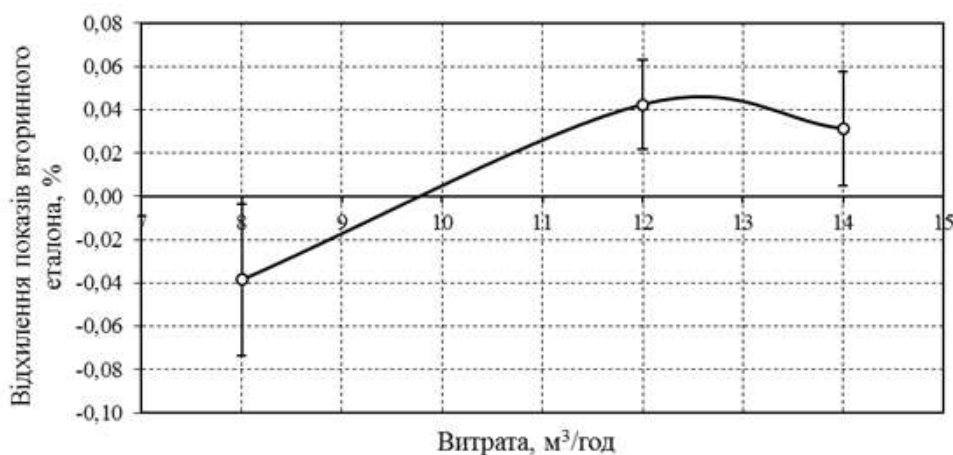


Рис. 4.5. Відхилення показів каліброваного еталона від показів вторинного еталону

Як видно з графіка, в наведеному прикладі значення різниці показів еталона, що калібрується з урахуванням розширеної невизначеності не виходить за межі $\pm 0,08$ %. Отриманий результат дозволяє зробити висновок про придатність даного еталону до використання відповідно до умов застосування.

Калібрування витратомірних установок компаруванням було покладено в основу при розробці методичного документу [78], згідно з яким проводиться калібрування витратомірних установок в Україні.

Запропонована передача одиниці фізичної величини в області витратометрії від національного первинного еталона вторинним і робочим еталонам за допомогою компаратора, що забезпечує динамічну простежуваність результатів вимірювань.

Проаналізовано джерела невизначеності вимірювань під час калібрування витратомірних установок методом компарування і наведено способи зниження цієї невизначеності.

4.3 Метод визначення метрологічних характеристик вимірювального засобу порівняння

У якості ВЗП (компаратора), що застосовується при калібруванні витратомірних установок, може служити засіб вимірювання, який однаково реагує на сигнали як еталона, що калібрується, так і еталонного засобу вимірювань.

Такий компаратор для різночасного порівняння фізичних величин як технічний пристрій не відрізняється від вимірювального приладу, призначеного для вимірювання кожної з фізичних величин, що утворюють вимірювану різницю. Але в зв'язку з іншим призначенням, повинні бути встановлені інші основні метрологічні характеристики [79, 14].

У випадку з проливними установками у якості компаратора використовують витратомір, за допомогою якого вимірюють витрату на еталоні вищого рівня та на еталоні, що калібрується. Для визначення метрологічних характеристик компаратора необхідно виконати його калібрування.

Калібрування витратоміра включає в себе визначення відносної похибки витратоміра в межах діапазону вимірювань витрати витратоміра [80].

Однак компаратор призначений для порівняння двох витрат, і вимірюваною величиною в даному випадку є різниця значень цих витрат, а не кожна з них.

Тому визначальною метрологічною характеристикою компаратора є похибка вимірювання різниці витрат.

Таким чином, в якості компаратора для різночасного порівняння витрат використовують витратомір, приписуючи йому нові метрологічні

характеристики при калібруванні цього витратоміра в якості компаратора. Межі вимірювань витрати витратоміра регламентують як специфічну характеристику компаратора, яка називається межами порівнюваних фізичних величин. Межами вимірювань компаратора є найменше та найбільше значення різниці порівнюваних витрат. Похибкою витратоміра-компаратора є різниця значення, отриманого за допомогою компаратора і дійсного значення різниці порівнюваних витрат.

Так як похибка витратоміра в діапазоні порівнюваних витрат в загальному випадку не є постійною, похибка компаратора при вимірюванні різниці витрат не дорівнює нулю. Дослідження похибки компаратора при вимірюванні різниці витрат є основним змістом визначення метрологічних характеристик компаратора, що створюється на основі витратоміра. Автором розроблено підхід визначення метрологічних характеристик витратомірів, які застосовуються у якості компараторів [1].

У якості компараторів, як правило, використовуються витратоміри з вихідним імпульсним сигналом, які характеризуються K -фактором, що подається у вигляді числа імпульсів N , отриманих на виході компаратора за час проливу об'єму V , як це наведено у формулі (4.1).

K -фактор визначається в індивідуальному порядку для кожного витратоміра i , як правило, приймається постійним в діапазоні вимірювань витрати.

Методи визначення похибки витратоміра-компаратора можна розділити на два види: експериментальний і експериментально-розрахунковий.

4.3.1 Експериментальний метод

Компаратор встановлюють на еталонну проливну установку, пропускають через нього воду при певному значенні витрати Q_1 , фіксують значення об'єму, виміряного еталонною установкою V_{eq1i} , число вихідних імпульсів компаратора N_{q1i} і визначають об'єм пропущеної води за показами компаратора в даній точці діапазону V_{kq1i} :

$$V_{\kappa q1i} = \frac{N_{q1i}}{K}, \quad (4.9)$$

де K – K -фактор компаратора;

N_{q1i} – число вихідних імпульсів компаратора за час проливу.

Виконують цю операцію n раз і за відомими формулами (4.9) визначають середнє значення об'єму, вимірюного еталонною установкою $\bar{V}_{\varepsilon q1}$, і середнє значення об'єму пропущеної води за показами компаратора $\bar{V}_{\kappa q1}$.

Потім виконують таку ж операцію при значенні витрати $Q1 + \Delta Q1$ і визначають середні значення $\bar{V}_{\varepsilon(q1+\Delta q)}$ і $\bar{V}_{\kappa(q1+\Delta q)}$.

Визначають відносну похибку компаратора при вимірюванні різниці витрати $\delta_{\Delta Q1}$, у відсотках, за формулою:

$$\delta_{\Delta Q1} = 100 \times \frac{(\bar{V}_{\kappa(Q1+\Delta Q1)} - \bar{V}_{\kappa Q1}) - (\bar{V}_{\varepsilon(Q1+\Delta Q)} - \bar{V}_{\varepsilon Q1})}{(\bar{V}_{\varepsilon(Q1+\Delta Q)} - \bar{V}_{\varepsilon Q1})}. \quad (4.10)$$

Невизначеність вимірювань різниці витрат враховує невизначеності вимірювань обох витрат і оцінюється за методикою, наведеною в розділі 2.

Джерелами невизначеності вимірювань кожної витрати є:

- невизначеність еталонної проливної установки;
- дискретність вихідного імпульсного сигналу компаратора;
- похибка округлення K -фактора компаратора;
- СКО результату вимірювання об'єму за певного значення витрати.

Таким чином визначають похибку компаратора у всіх точках, рівномірно розподілених по діапазону порівнюваних витрат і діапазону вимірювань різниці витрат.

Перевагою такого методу є висока точність передачі одиниці витрати засобу вимірювань, що калібрується, недоліком – значний обсяг експериментальних досліджень, обумовлений необхідністю їх проведення не тільки в діапазоні вимірювань різниці витрат, але і в діапазоні зміни порівнюваних витрат.

4.3.2 Експериментально-розрахунковий метод визначення K -фактора

У точці діапазону порівнюваних витрат провести n проливів і за результатами кожного проливу визначити K -фактор компаратора в даній точці діапазону K_{qli} .

Виконати вказану операцію для всіх m точок, розподілених по діапазону порівнюваних витрат. В результаті експериментальних досліджень отримують набір даних, що наведені у таблиці 4.1.

Скласти рівняння регресії, як правило, у вигляді полінома, коефіцієнти якого знайти за допомогою методу найменших квадратів [81]:

$$K = a_0 + a_1q + a_2q^2 + \dots + a_nq^n. \quad (4.11)$$

Таблиця 4.1

Точка діапазону	K -фактор
1	$K_{q11}, K_{q12}, \dots, K_{q1n}$
2	$K_{q21}, K_{q22}, \dots, K_{q2n}$
...	...
m	$K_{qm1}, K_{qm2}, \dots, K_{qmn}$

Ступінь полінома вибрати на основі оцінки значущості рівняння регресії за допомогою F -критерію і достовірності апроксимації за критерієм R^2 .

Отримавши рівняння регресії, розрахувати відносну похибку компаратора при вимірюванні різниці витрати $\delta_{\Delta Q1}$, у відсотках, за формулою:

$$\delta_{\Delta Q1} = 100 \times \frac{\left[\frac{(Q1 + \Delta Q1) * K'_{Q1+\Delta Q1}}{K} - \frac{Q1 * K'_{Q1}}{K} \right] - [(Q1 + \Delta Q1) - Q1]}{[(Q1 + \Delta Q1) - Q1]}, \quad (4.12)$$

де $K'_{Q1}, K'_{Q1+\Delta Q1}$ – K -фактор компаратора, розрахований за рівнянням регресії (4.11) для значень витрати $Q1$ і $(Q1 + \Delta Q1)$ відповідно.

Таким же чином розрахувати похибку компаратора у всіх точках, рівномірно розподілених по діапазону порівнюваних витрат і діапазону вимірювань різниці витрат.

Відповідно до представленої методики був досліджений витратомір-лічильник, що входить до складу вторинного еталона і призначений для

передачі розміру одиниці витрати еталонам 1-го і 2-го розрядів – проливним установкам.

В таблиці 4.2 наведені результати визначення K -фактора витратоміра-лічильника.

На рисунку 4.6 представлений результат апроксимації K -фактора за допомогою лінійного рівняння регресії і рівняння регресії у вигляді полінома другого порядку. Як видно з графіка, лінійне рівняння регресії статистично незначуще і критерій достовірності малий. Рівняння регресії у вигляді полінома другого порядку статистично значуще і коефіцієнт достовірності дорівнює 0,83, що свідчить про досить хороше узгодження лінії апроксимації з фактичними даними.

Таблиця 4.2 – Результати визначення K -фактора витратоміра-лічильника

Витрата, м ³ /год	K -фактор, 1/л
0,218171	997,5699
0,217742	997,5141
0,217693	997,8051
0,218039	997,7656
0,217598	997,7327
0,121955	996,8611
0,121622	997,0006
0,121763	996,852
0,121995	996,8411
0,121541	997,0158
0,061149	997,1563
0,06121	997,0428
0,061135	997,1178
0,061155	997,0619
0,061114	997,2508
0,032416	997,8075
0,026707	997,3633
0,031909	997,1849
0,031923	997,4384
0,031959	997,5126

Як показали розрахунки подальше збільшення порядку полінома не дає збільшення коефіцієнта достовірності, тому для апроксимації K -фактора був застосований поліном другого порядку.

За допомогою отриманого на підставі експериментальних даних K -фактора була розрахована похибка компаратора у всьому діапазоні вимірювання різниці витрат з урахуванням діапазону зміни об'ємної витрати.

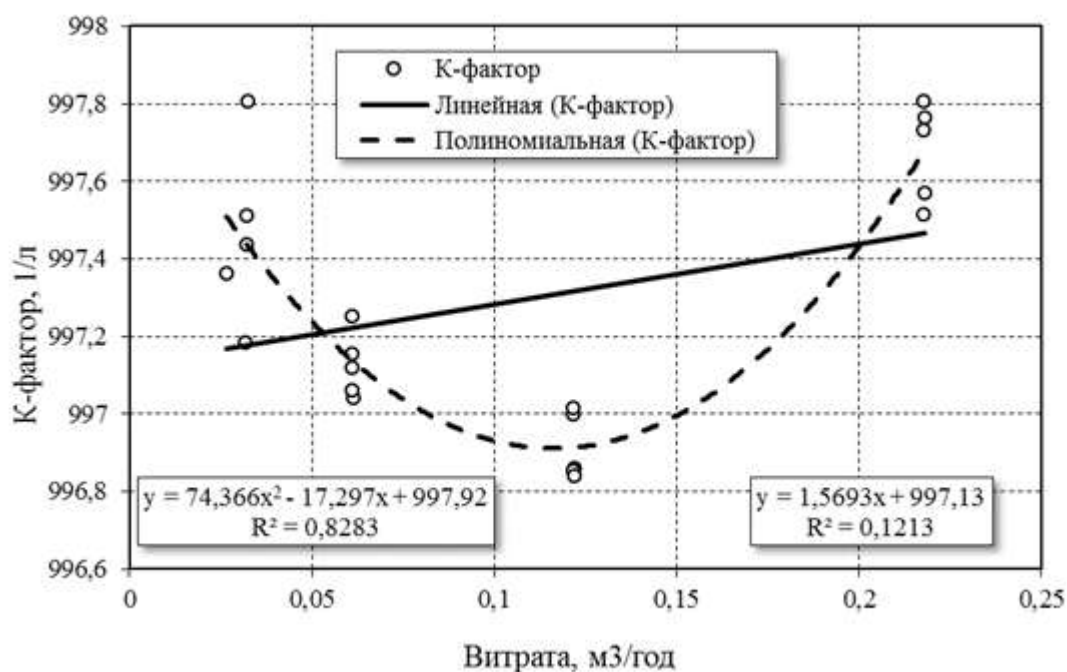


Рис. 4.6. Апроксимація K -фактора

На рисунку 4.7 наведені результати розрахунку похибки.

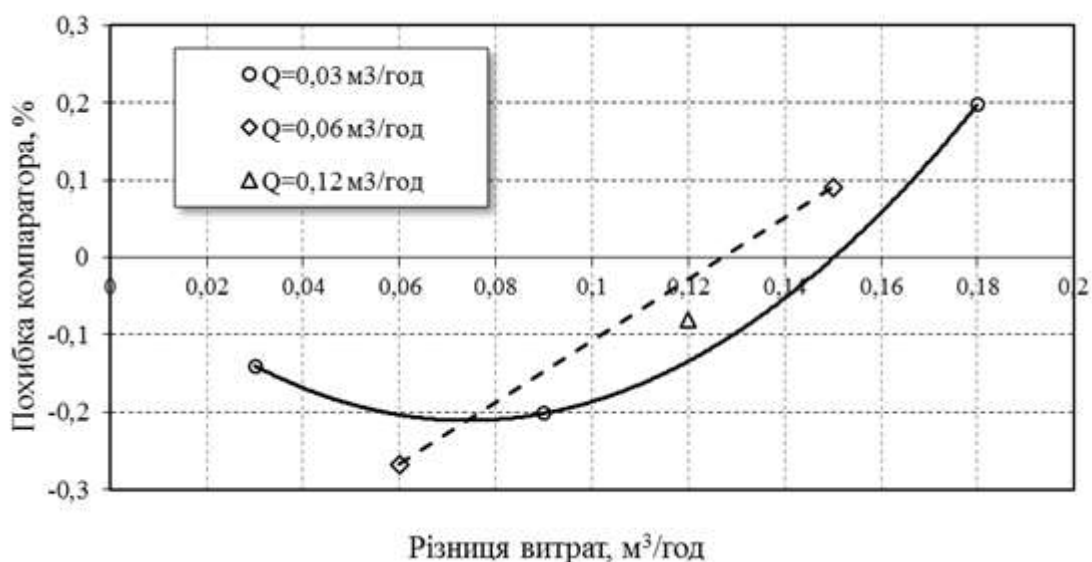


Рис. 4.7. Похибка компаратора

При оцінці невизначеності вимірювань в разі експериментально-розрахункового методу необхідно враховувати ті ж джерела, що і при експериментальному методі, а також залишкову дисперсію регресійного рівняння K -фактора.

Перевагою експериментально-розрахункового методу встановлення метрологічних характеристик компаратора є істотне скорочення експериментальних досліджень, недоліком – збільшення похибки передачі одиниці витрати за рахунок похибки апроксимації K -фактора.

При дослідженні витратоміра, що використовується як компаратор, K -фактор представляють постійним у всьому діапазоні витрат. Однак, якщо апроксимація K -фактора рівнянням регресії на витрату дає статистично значиме зменшення дисперсії K -фактора, запропоновано подати K -фактор у вигляді рівняння регресії, що зменшить похибку компаратора.

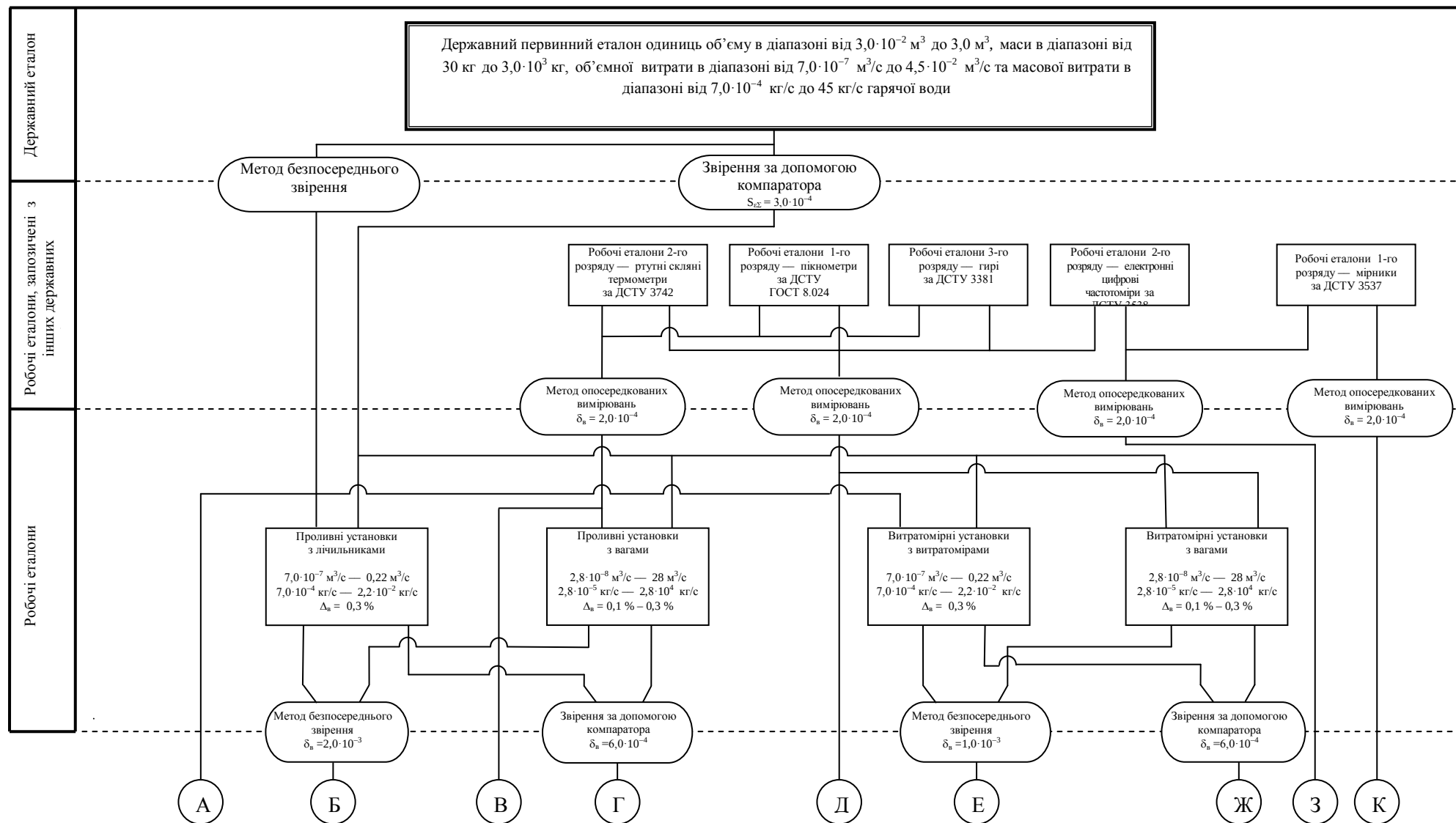
Запропоновано експериментально-розрахунковий метод дослідження витратоміра-компаратора, який дозволяє істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень при калібруванні.

4.4 Розробка повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної і масової витрати гарячої води

Проведені дослідження простежуваності результатів вимірювань в витратометрії були покладені в основу розробки повірочної схеми для засобів вимірювань об'єму, маси, об'ємної і масової витрати гарячої води. Національний стандарт на повірочну схему [10] було затверджено наказом Мінекономрозвитку від 11 грудня 2013 року № 1470.

На чолі повірочної схеми знаходиться державний первинний еталон одиниць об'єму – кубічного метра (м^3), маси – кілограма (кг), об'ємної витрати – кубічного метра за секунду ($\text{м}^3/\text{с}$) и масової витрати – кілограма за секунду (кг/с) гарячої води, що протікає по трубопроводу (рис. 4.8).

ДЕРЖАВНА ПОВІРОЧНА СХЕМА ДЛЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМУ, МАСИ, ОБ'ЄМНОЇ ТА МАСОВОЇ ВИТРАТИ ГАРЯЧОЇ ВОДИ



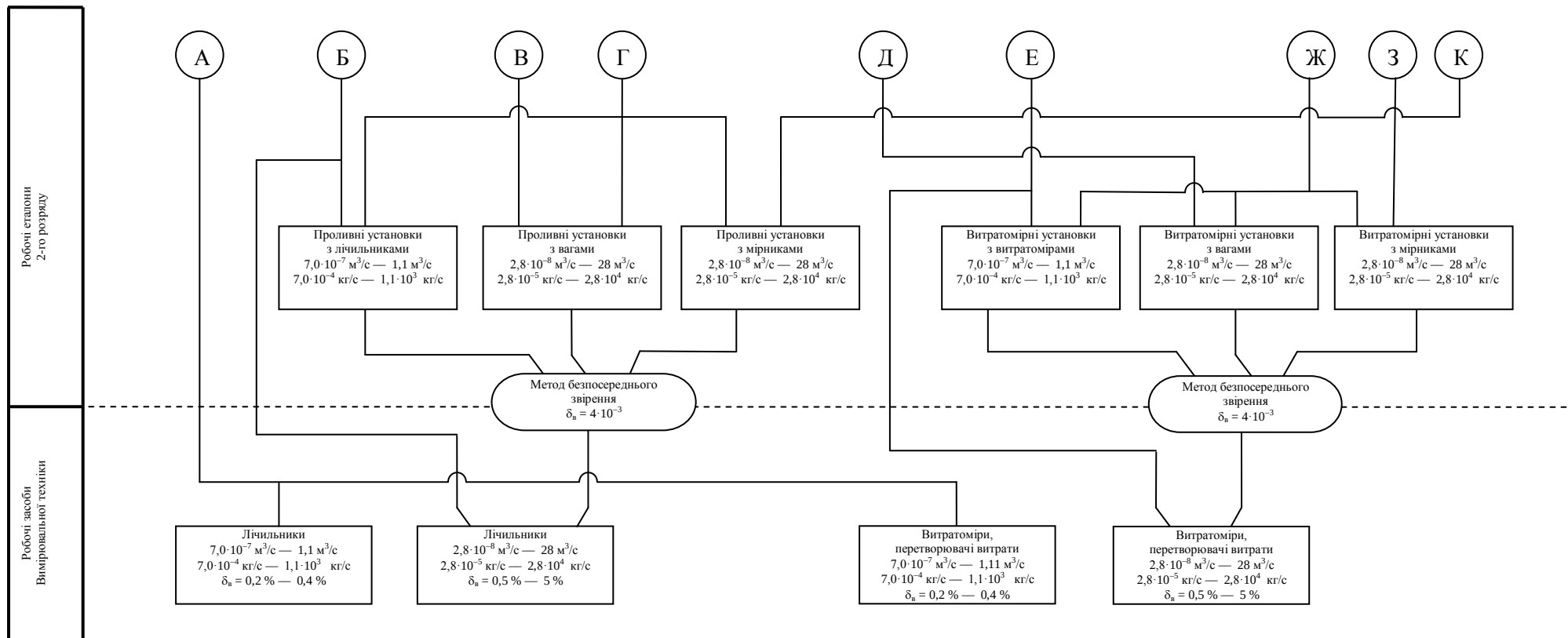


Рис. 4.8. Повірочна схема для засобів вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води

Державний еталон затверджено наказом Держспоживстандарту України від 23 грудня 2010 року № 575.

Державний первинний еталон призначено для відтворення та зберігання одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати та масової витрати гарячої води, і передавання розмірів цих одиниць за допомогою робочих еталонів робочим засобам вимірювальної техніки, які застосовують в економіці України для забезпечення єдності вимірювань в Україні [13].

Загальний вигляд державного первинного еталона наведено на рисунку 4.9.



Рис. 4.9. Загальний вид Державного первинного еталона

Державний первинний еталон складається з таких комплексів засобів вимірювальної техніки й допоміжного обладнання:

- гравіметричного комплексу для відтворення і передавання одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати та масової витрати гарячої води;
- комплексу для передавання розміру одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати й масової витрати гарячої води методом звірення за допомогою компаратора.

Діапазон значень об'єму, маси, об'ємної витрати й масової витрати гарячої води, який відтворюється державним первинним еталonom, становить:

- від $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ до $3,0 \text{ м}^3$ – для об'єму;
- від 30,0 кг до $3,0 \cdot 10^3 \text{ кг}$ – для маси;

- від $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ – для об'ємної витрати;
- від $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$ до $45,0 \text{ кг/с}$ – для масової витрати.

Державний первинний еталон забезпечує відтворення одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати й масової витрати гарячої води з відносним середнім квадратичним відхилом результату вимірювання S_θ , що не перевищує $3 \cdot 10^{-4}$ за 10 незалежних спостережень, відносна невилучена систематична похибка Θ_θ не перевищує $5 \cdot 10^{-4}$, невизначеність вимірювання за типом А – $u_A = 3 \cdot 10^{-4}$, за типом В – $u_B = 2,5 \cdot 10^{-4}$, сумарна стандартна невизначеність – $u_C = 4 \cdot 10^{-4}$, розширена невизначеність – $U = 0,08 \%$ з коефіцієнтом охоплення $K = 2$, довірча ймовірність $P = 0,95$.

Державний первинний еталон застосовують для передавання розміру одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати й масової витрати гарячої води:

1) методом безпосереднього звірення:

- лічильникам, що входять до складу робочих еталонів 1-го розряду – проливних установок з лічильниками;

- витратомірам, що входять до складу робочих еталонів 1-го розряду – витратомірних установок з витратомірами;

- робочим засобам вимірювальної техніки;

2) методом звірення за допомогою компаратора:

- робочим еталонам 1-го розряду – проливним установкам з лічильниками;

- робочим еталонам 1-го розряду – витратомірним установкам з витратомірами;

- проливним установкам з вагами;

- витратомірним установкам з вагами.

Відносний середній квадратичний відхил результату вимірювань під час передавання розміру одиниці від первинного еталона до робочих еталонів $S_{\varepsilon\Sigma}$ не повинен перевищувати $1,0 \cdot 10^{-4}$.

Відносний середній квадратичний відхил результату вимірювань під час передавання розміру одиниці від первинного еталона до робочих еталонів $S_{\varepsilon\Sigma}$ не повинен перевищувати $3,0 \cdot 10^{-4}$.

Як компаратор застосовують комплект витратомірів-лічильників (від одного до п'яти) разом із засобами отримання та оброблення сигналу вимірювальної інформації з відносним середнім квадратичним відхилом результату вимірювання, що не перевищує $3,0 \cdot 10^{-4}$ за 10 незалежних спостережень.

Як робочі еталони, запозичені з інших повірочних схем, застосовують робочі еталони 2-го розряду – ртутні скляні термометри за ДСТУ 3742, робочі еталони 1-го розряду – пікнометри за ДСТУ ГОСТ 8.024, робочі еталони 3-го розряду – гирі за ДСТУ 3381, робочі еталони 1-го розряду – мірники за ДСТУ 3537, робочі еталони 2-го розряду – електронні цифрові частотоміри за ДСТУ 3538.

Робочі еталони, запозичені з інших повірочних схем, застосовують для повірки робочих еталонів 1-го розряду – проливних установок з вагами й витратомірних установок з вагами, та робочих еталонів 2-го розряду – проливних установок з вагами, проливних установок з мірниками, витратомірних установок з вагами, витратомірних установок з мірниками, методом опосередкованих вимірювань.

Як робочі еталони 1-го розряду застосовують:

- проливні установки з еталонними лічильниками для повірки лічильників води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$ до $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$;

- проливні установки з вагами для повірки лічильників води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$;

– витратомірні установки з витратомірами для перевірки витратомірів води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$ до $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$;

– витратомірні установки з вагами для перевірки витратомірів води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$.

Границі допустимих відносних похибок $\Delta_{\text{в}}$ робочих еталонів 1-го розряду становлять від 0,1 % до 0,3 %.

Робочі еталони 1-го розряду застосовують для передавання розміру одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати й масової витрати гарячої води:

1) методом безпосереднього звірення:

– еталонним лічильникам, що входять до складу робочих еталонів 2-го розряду – проливних установок з лічильниками;

– еталонним витратомірам, що входять до складу робочих еталонів 2-го розряду – витратомірних установок з витратомірами;

– робочим засобам вимірювальної техніки;

2) методом звірення за допомогою компаратора:

– робочим еталонам 2-го розряду – проливним установкам з лічильниками;

– проливним установкам з вагами;

– проливним установкам з мірниками;

– витратомірним установкам з витратомірами;

– витратомірним установкам з вагами;

– витратомірним установкам з мірниками.

Як компаратор застосовують комплект витратомірів-лічильників (від одного до п'яти) разом із засобами отримання та оброблення сигналу вимірювальної інформації з відносним середнім квадратичним відхилом результату вимірювання $S_{\text{в}}$, що не перевищує $6,0 \cdot 10^{-4}$ за 10 незалежних спостережень.

Як робочі еталони 2-го розряду застосовують:

- проливні установки з лічильниками для повірки лічильників води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $1,1 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$ до $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$;

- проливні установки з вагами для повірки лічильників води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$;

- проливні установки з мірниками для повірки лічильників води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$;

- витратомірні установки з витратомірами для повірки витратомірів води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $1,1 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$ до $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$;

- витратомірні установки з вагами для повірки витратомірів води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$;

- витратомірні установки з мірниками для повірки витратомірів води в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$.

Границі допустимих відносних похибок $\Delta_{\text{е}}$ робочих еталонів 2-го розряду становлять від 0,4 % до 1,25 %.

Робочі еталони 2-го розряду застосовують для передавання розміру одиниць об'єму, маси, об'ємної витрати та масової витрати гарячої води, робочим засобам вимірювальної техніки методом безпосереднього звірення.

Як робочі засоби вимірювальної техніки застосовують:

- лічильники об'єму і маси, а також витратоміри та перетворювачі об'ємної та масової витрати гарячої води, в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ до $1,1 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$ до $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$ із границями допустимих відносних похибок $\delta_{\text{е}}$ від 0,2 % до 0,4 %;

– лічильники об'єму і маси, а також витратоміри та перетворювачі об'ємної та масової витрати гарячої води, в діапазоні вимірювання об'ємної витрати від $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ до $28 \text{ м}^3/\text{с}$ та масової витрати від $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ до $2,8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$ із границями допустимих відносних похибок δ_e від 0,5 % до 5 %.

4.5 Міжнародні звірення еталона

Одним з важливих етапів підтвердження метрологічних характеристик еталона стала участь в міжнародних звіреннях, що проводилися в рамках проекту KOOMET № 452/SK/08 Coomet.M.FF.-S «Звірення калібрувальних лабораторій витратомірів холодної води в діапазоні витрат від 3 до 20 $\text{м}^3/\text{год}$ ».

Метою проекту було порівняння характеристик калібрувальних лабораторій витратомірів води. Для проведення порівнянь були застосовані два витратоміри води: KROHNE Optiflux 2010 C/D DN 40 та Meistream Plus 40. Параметри були досліджені в діапазоні від 3 до 20 $\text{м}^3/\text{год}$.

Результати роботи були розглянуті на 9-ій нараді ТК 1.4 «Витратометрія» KOOMET 22-26 жовтня 2012 р. в РТВ, м. Брауншвейг, Німеччина. Звіт про виконання теми № 452/SK/08 Coomet.M.FF.-S (Draft B) [82] був затверджений.

4.5.1 Учасники звірень

Витратоміри калібрувались у п'яти лабораторіях:

- СМУ, Словаччина, пілотна лабораторія;
- ІНІМЕТ, Куба;
- ЦЕНАМ, Мексика;
- ЛЕІ, Литва;
- ДП «Укрметртестстандарт», Україна.

4.5.2 Еталони порівняння

У якості еталонів порівняння були застосовані витратоміри KROHNE Optiflux 2010 C/D DN 40 та Meistream Plus 40. Власником витратомірів є СМУ. Витратомір під заводським номером A08 02103 був позначений як № 1, а

ввитратомір під заводським номером 080049508 – як № 2. Номінальний діаметр витратомірів – DN40. Витратоміри були зібрані у секцію (рис. 4.10). Розміри витратомірів та труб показані на рисунку 4.11.



Рис. 4.10. Електромагнітний витратомір KROHNE (1)
та витратомір Meistream Plus (2)

4.5.3 Процедура випробувань

4.5.3.1 Метод

Лабораторії-учасниці застосовували їх звичайну процедуру калібрування.

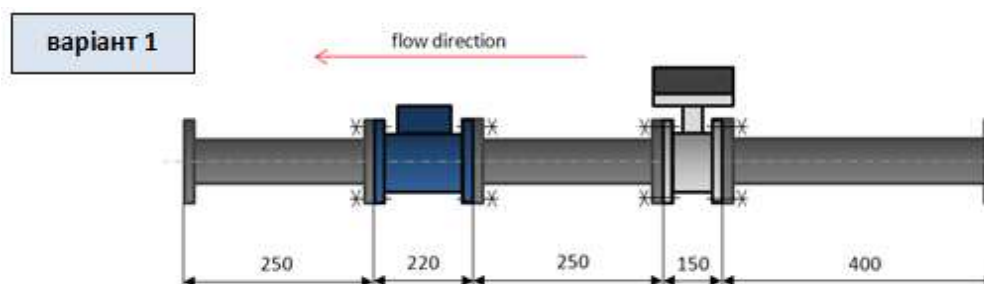
4.5.3.2 Нормальні умови

Робочою рідиною повинна бути вода з електричною провідністю не менше 20 мС/см.

Температура води: $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

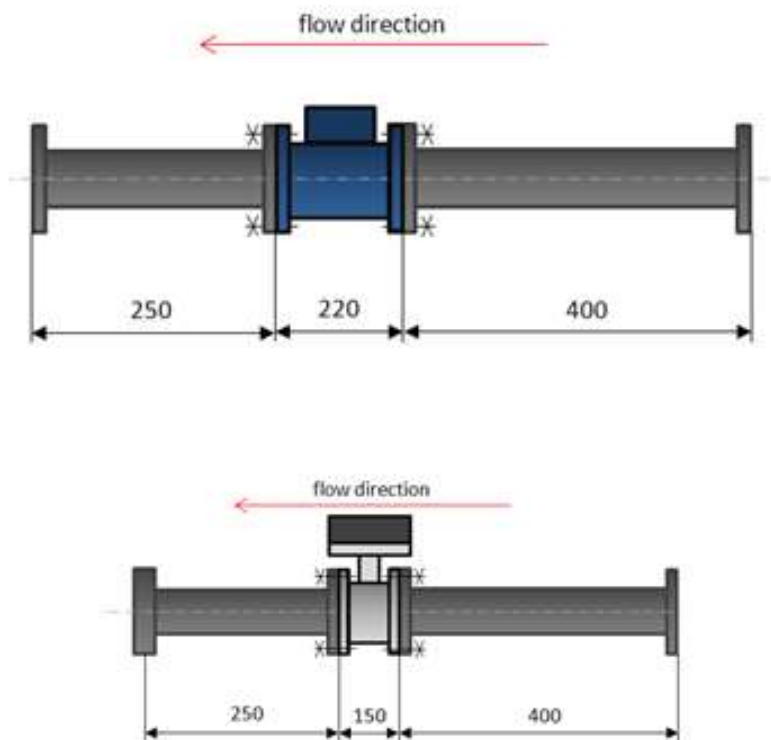
Тиск води після витратоміра: не регламентується.

Температура навколишнього повітря: від 15 до 25 °C.



а)

варіант 2



б)

Рисунок 4.11 Розміри витратомірів в міліметрах

а) варіант 1; б) варіант 2

Відносна вологість навколишнього повітря від 30 до 75 %.

Атмосферний тиск: від 86 кПа до 106 кПа.

4.5.4 Інструкції для вимірювань

Витратоміри можуть піддаватись випробуванням окремо у тих самих умовах.

Обидва витратоміри повинні піддаватись випробуванням при п'яти значеннях витрати Q : 3 м³/год; 5 м³/год; 10 м³/год; 15 м³/год; 20 м³/год.

Еталонні значення витрати повинні бути в інтервалі $\pm 3\%$ опорного значення для кожного одиночного вимірювання.

Випробування при одному значенні витрати повинні повторюватись не менше 10 разів.

Витратомір повинен бути встановлений у вимірювальну ділянку таким чином, щоб мінімізувати збурення профілю швидкості потоку у вимірювальній порожнині витратоміра через шорсткість труби.

Витратоміри повинні бути включеними протягом щонайменше 30 хв перед вимірюваннями.



Рис. 4.12. Інсталяція витратомірів на еталоні України

4.5.5 Експериментальні дослідження в рамках звірень

Автор брав безпосередню участь в експериментальних дослідженнях в рамках звірень, обробці результатів експериментальних досліджень і складанні звіту Draft A.

Результати експериментальних досліджень наведені в таблицях 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.3 – Результати калібрування витратоміра KROHNE

Q [m ³ /h]	N	Q_E [m ³ /h]	Q_{Emin} [m ³ /h]	Q_{Emax} [m ³ /h]	p [bar]	T [°C]	V_E [m ³]	E [%]	U [%]
3	10	3,0401	3,037	3,045	2,05	18,01	0,290138	-0,261	0,027
5	10	5,0718	5,058	5,079	1,80	20,50	0,290484	-0,1874	0,048
10	10	10,1381	10,132	10,142	2,96	24,53	2,000960	-0,1739	0,037
15	10	15,1947	15,188	15,203	3,36	20,81	2,900383	-0,1097	0,039
20	10	20,2194	20,209	20,229	2,94	21,55	2,899655	-0,1009	0,039

Таблиця 4.4 – Результати калібрування витратоміра Meistream Plus

Q [m ³ /h]	N	Q_E [m ³ /h]	Q_{Emin} [m ³ /h]	Q_{Emax} [m ³ /h]	p [bar]	T [°C]	V_E [m ³]	E [%]	U [%]
3	10	3,0405	3,038	3,043	2,91	21,08	0,292476	-0,2858	0,099
5	10	5,0585	5,054	5,065	2,11	21,75	0,293583	0,2375	0,083
10	10	10,1416	10,138	10,147	2,93	20,52	2,010906	0,4139	0,095
15	10	15,2059	15,195	15,214	3,20	21,45	2,911889	0,3046	0,093
20	10	20,1630	20,158	20,168	2,81	22,44	2,918576	-0,2818	0,074

Звіт було надано в пілотну лабораторію, яка обробила результати експериментальних досліджень лабораторій-учасниць склала заключний звіт.

4.5.6 Результати вимірювань

4.5.6.1 Середня відносна похибка та невизначеність

Окремі повторювані досліді вимірювання для певної еталонної витрати та певного витратоміра позначені індексом α . Індекс може приймати значення $\alpha = 1, \dots, n$, де n – число повторюваних дослідів.

Q_e – середнє значення еталонної витрати, тобто середнє $Q_{e\alpha}$.

$Q_{e\min}$ – мінімальне значення еталонної витрати, тобто мінімальне $Q_{e\alpha}$.

Q_{emax} – максимальне значення еталонної витрати, тобто максимальне $Q_{e\alpha}$.

e – середня відносна похибка витратоміра, тобто середнє e_α обчислене по формулі:

$$e_\alpha = \frac{V_{T\alpha} - V_{e\alpha}}{V_{e\alpha}} \cdot 100, \quad (4.13)$$

де $V_{T\alpha}$ – об'єм води за показами еталона порівняння;

$V_{e\alpha}$ – об'єм води за показами еталона.

Невизначеність обчислювалась по формулах [83]. Невизначеність типу А базується на статистичних методах результатів вимірювань і обчислювалась по формулі:

$$u_A^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\alpha=1}^n (e_{\alpha} - \bar{e})^2, \quad (4.14)$$

де n – номер повторюваного досліджу

Невизначеність типу В оцінювалась на базі нестатистичних методів і обчислювалась по формулі:

$$u_B = \frac{1}{V_e} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial V_e}{\partial x_i} \right)^2} \cdot u^2(x_i), \quad (4.15)$$

Стандартна невизначеність обчислювалась по формулі:

$$u_c = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}, \quad (4.15)$$

Розширена невизначеність обчислювалась по формулі:

$$U = k \cdot u_c, \quad (4.16)$$

Коефіцієнт охопту $k = 2$.

4.5.6.2 Відхилення від заданих параметрів

Відсутні значні відхилення реальних параметрів вимірювань від заданих в інструкції.

Відхилення від заданого значення витрати не має якого-небудь значного впливу на оцінку даних і не потребує ніякої спеціальної корекції.

Відхилення умов навколишнього середовища та електропровідність води не впливають на вимірювання.

У раз проведення вимірювань при послідовному встановленні витратомірів профіль швидкості буде різним у цих витратомірів. Але при окремих випробуваннях витратомірів цей чинник відсутній. Це необхідно враховувати при інтерпретації кореляції даних в двох витратомірів.

Корегувати дані звірень по тиску не має потреби оскільки різниця тиску між лабораторіями не перевищує 0,6 МПа.

Корегувати дані звірень по температурі не має потреби оскільки різниця температури між лабораторіями не перевищує 10 °С.

4.5.7 Оцінка

4.5.7.1 Визначення опорного значення звірень

Позначення x_i представляє вимірне значення в i -тій лабораторії, тобто $x_i = e$ для i -тої лабораторії для встановлених витрати та витратоміра. Індекс i може приймати значення $i = 1, \dots, n$, де n – номер лабораторії.

Опорне значення обчислюється як середня зважена похибка:

$$y = \frac{\frac{x_1}{u_{x1}^2} + \frac{x_2}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{x_n}{u_{xn}^2}}{\frac{1}{u_{x1}^2} + \frac{1}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{xn}^2}}, \quad (4.17)$$

де $u_{x1}, u_{x2}, \dots, u_{xn}$ – стандартна невизначеність похибки в лабораторіях $i, \dots, n$ включаючи невизначеність стабільності витратоміра.

Ця невизначеність обчислюється по формулі:

$$u_{xi} = \sqrt{\left(\frac{U(x_i)}{2}\right)^2 + u_{st}^2}, \quad (4.18)$$

де $U(x_i)$ – розширена невизначеність ($k=2$) визначена лабораторією i і представлена в результаті лабораторії i ;

u_{st} – оцінена стандартна невизначеність викликана стабільністю (відтворюваність) витратоміра.

Значення u_{st} отримане з шести реалізацій в пілотному інституті. Розподіл даних був прийнятий рівномірним і невизначеність визначалась по формулі:

$$u_{st} = \frac{(e_{\max} - e_{\min})}{2\sqrt{3}}, \quad (4.19)$$

В загальному випадку ця невизначеність включає нестабільність вимірювальної ділянки і ефекти встановлення. Для того, щоб виділити нестабільність вимірювальної ділянки, яка не повинна включатись до u_{st} , було перевірено кореляцію даних від двох витратомірів. Якщо кореляція незначна,

приймається що невизначеність u_{st} відноситься тільки до нестабільності витратоміра та ефектів встановлення.

Стандартна невизначеність опорного значення u_y визначається по формулі:

$$\frac{1}{u_y^2} = \frac{1}{u_{x1}^2} + \frac{1}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{xn}^2}, \quad (4.20)$$

Розширена невизначеність опорного значення $U(y)$:

$$U(y) = 2 \cdot u_y, \quad (4.21)$$

Для перевірки послідовності застосовують критерій χ^2 , при цьому застосовується значення похибки витратоміра при кожній витраті. Значення критерію χ^2 розраховується по формулі:

$$\chi_{obs}^2 = \frac{(x_1 - y)^2}{u_{x1}^2} + \frac{(x_2 - y)^2}{u_{x2}^2} + \dots + \frac{(x_n - y)^2}{u_{xn}^2}, \quad (4.22)$$

Ступені свободи ν визначаються як $\nu = n - 1$. Послідовність помилкова, якщо:

$$\Pr \{ \chi_\nu^2 > \chi_{obs}^2 \} < 0,05, \quad (4.23)$$

Вклад невизначеності u_{st} через нестабільність витратоміра та ефекти встановлення розраховувалась по даних в таблицях 4.6 та 4.7.

В таблиці 4.4 наведено результати розрахунків.

Таблиця 4.4 – Вклад невизначеності через стабільність витратоміра

	Витратомір № A0802103					Витратомір № 858 80049508				
Q (м³/год)	3	5	10	15	20	3	5	10	15	20
u_{st} (%)	0,15	0,25	0,23	0,22	0,19	0,40	0,44	0,28	0,27	0,39

Похибки e (таблиця 4.5) всіх учасників можуть бути знайдені з їхніми невизначеностями $U(e)$, невизначеність збільшується за рахунок вкладу через нестабільність витратоміра та ефектів встановлення $U(e)_{st}$.

Результати наведено в таблиці 4.5 та на рисунках 4.13 та 4.14.

Таблиця 4.5 – Підсумкові дані та опорне значення звірень

	Krohne (Optiflux 2010 CD), №. A0802103						Meistream Plus 40 № 80049508				
	Q (м³/год)	3	5	10	15	20	3	5	10	15	20
SMU	$e(\%)$	-0,44	-0,43	-0,39	-0,34	-0,31	-0,16	0,16	0,49	0,29	-0,08
	$U(e) (\%)$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,13	0,12	0,12	0,12	0,16
	$U(e)_{st} (\%)$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
INIMET	$e (\%)$	-0,11	0,01	0,06	-0,04	-0,18	0,12	0,42	0,48	0,31	-0,15
	$U(e) (\%)$	0,15	0,15	0,12	0,12	0,12	0,15	0,15	0,12	0,12	0,12
	$U(e)_{st} (\%)$	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
LEI	$e (\%)$	-0,413	-0,298	-0,206	-0,188	-0,164	-0,036	0,169	0,634	0,54	0,123
	$U(e) (\%)$	0,13	0,12	0,093	0,088	0,085	0,13	0,14	0,1	0,092	0,088
	$U(e)_{st} (\%)$	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
UKR METR TEST STANDARD	$e (\%)$	-0,261	-0,187	-0,174	-0,1097	-0,101	-0,286	0,2375	0,4139	0,3046	-0,2818
	$U(e) (\%)$	0,027	0,048	0,037	0,039	0,039	0,099	0,083	0,095	0,093	0,074
	$U(e)_{st} (\%)$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
CENAM 1	$e (\%)$	0,00	-0,18	0,01	0,09	0,19	-0,49	-0,04	0,37	0,03	-0,66
	$U(e) (\%)$	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24
	$U(e)_{st} (\%)$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
CENAM 2	$e (\%)$	-	-0,27	-0,23	-0,18	-	-0,34	0,17	0,34	-0,04	-0,72
	$U(e) (\%)$	-	0,18	0,18	0,18	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
	$U(e)_{st} (\%)$	-	0,26	0,26	0,26	-	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
CRV*)	$y (\%)$	-0,25	-0,22	-0,14	-0,12	-0,12	-0,17	0,16	0,41	0,25	-0,21
	$U(y) (\%)$	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,4	0,37	0,37	0,37	0,40

*) Опорне значення звірень

Витратомір № A0802103

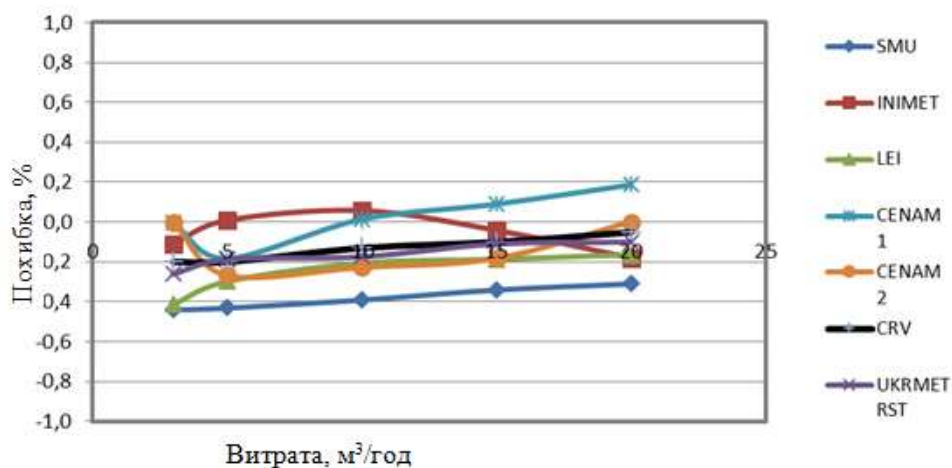


Рис. 4.13. Калібрувальна крива для різних лабораторій, витратомір № A0802103

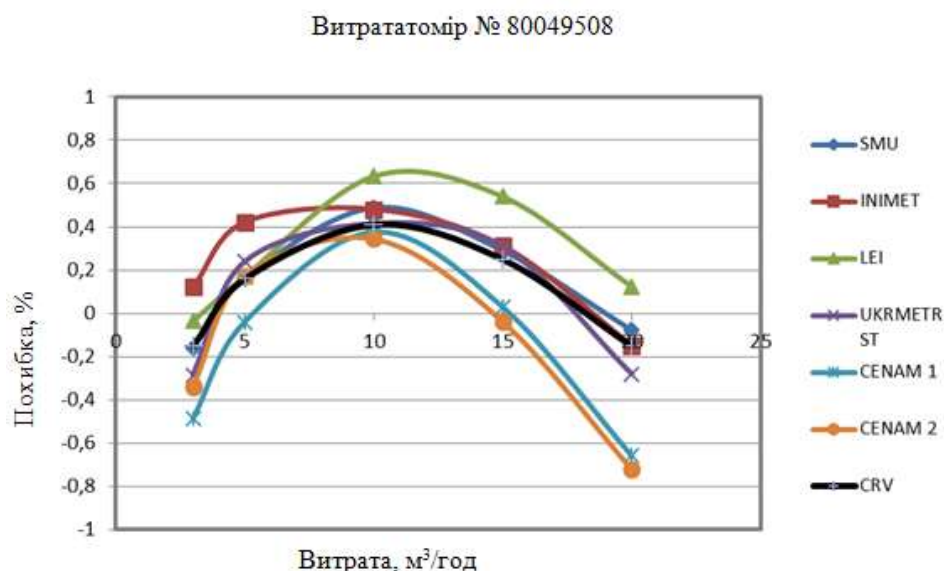


Рис. 4.14. Калібрувальна крива для різних лабораторій, витратомір № 80049508

4.5.8 Визначення різниці «Лабораторія до ОЗЗ» та «Лабораторія до лабораторії» і рівня еквівалентності

Після того, як ОЗЗ визначено, різниця між лабораторіями-учасницями ОЗЗ розраховується по формулах:

$$d_i = x_i - y, \quad (4.24)$$

$$d_{ij} = x_i - x_j. \quad (4.25)$$

У раз якщо ОЗЗ розраховано як зважене середнє похибок зменшеного набору лабораторій, ступінь еквівалентності розраховується по формулі:

$$E_i = \left| \frac{d_i}{2u(d_i)} \right|, \quad (4.26)$$

де

$$u(d_i)^2 = u_{x_i}^2 - u_y^2 \quad (4.27)$$

у разі, якщо i -та лабораторія є частиною зменшеного набору,

$$u(d_i)^2 = u_{x_i}^2 + u_y^2 \quad (4.28)$$

у разі, якщо i -та лабораторія виключена з набору для визначення опорного значення, та

$$u(d_{ij})^2 = u_{x_i}^2 + u_{x_j}^2. \quad (4.29)$$

Ступінь еквівалентності є мірою для еквівалентності результатів будь-якої лабораторії з ОЗЗ або з будь-якою лабораторією відповідно. Якщо $E_i \leq 1$, то лабораторія добре узгоджується.

Ступінь еквівалентності E_i наведено в таблиці 4.6.

4.5.9 Висновки

Значимі відхилення реальних параметрів від заданих в інструкції відсутні.

Стабільність витратоміра контролювалась декілька разів пілотною лабораторією.

Ступінь еквівалентності «Лабораторія до ОЗЗ» $E_i \leq 1$ для всіх лабораторій. Лабораторії добре узгоджуються з ОЗЗ.

Таблиця 4.6 – Підсумкові значення ступеню еквівалентності «Лабораторія до ОЗЗ»

Витратомір №	Витратомір № A0802103					Витратомір № 80049508				
Q (м ³ /год)	3	5	10	15	20	3	5	10	15	20
SMU	0,39	0,47	0,80	0,70	0,42	0,01	0,00	0,10	0,04	0,15
INIMET	0,28	0,50	0,12	0,13	0,14	0,36	0,31	0,09	0,07	0,07
LEI	0,34	0,17	0,43	0,38	0,10	0,16	0,01	0,28	0,35	0,41
UKRMETRST	0,03	0,07	0,37	0,23	0,04	0,15	0,09	0,01	0,07	0,10
CENAM 1	0,49	0,08	0,03	0,18	0,64	0,39	0,24	0,04	0,26	0,55
CENAM 2	-	0,10	0,45	0,35	-	0,20	0,01	0,07	0,34	0,60

Ступінь еквівалентності еталона ДП «Укрметртестстандарт» не перевищує 0,37, що свідчить про добру узгодженість еталона з опорним значенням звірень.

4.6 Висновки

1. Запропоновано метод передачі одиниці фізичної величини в області витратометрії від національного первинного еталона вторинним і робочим

еталонам за допомогою компаратора, що забезпечує динамічну простежуваність результатів вимірювань.

2. Проаналізовано джерела невизначеності вимірювань під час калібрування методом звірень за допомогою компаратора і наведено способи зниження цієї невизначеності, що підвищує точність калібрування витратомірних установок.

3. Запропоновано експериментально-розрахунковий метод дослідження компаратора, що дозволяє істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень при калібрування.

4. Створено державний первинний еталон одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води.

5. Розроблено та затверджено у якості національного стандарту Державну повірочну схему для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води.

6. Проведено міжнародні звірення створеного еталона, як підтвердили добру узгодженість еталона з опорним значенням звірень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання вдосконалення відтворення одиниць витрати плинних середовищ та забезпечення їх простежуваності шляхом розробки експериментально-конструктивних методів, які дозволяють мінімізувати похибки при проектуванні та створенні прецизійних еталонних ВУ, як основи для відтворення і передачі одиниць витрати цих середовищ відповідним ЗВТ. Основні результати й висновки дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. На підставі аналізу підходів та існуючих методів і конструктивних рішень вимірювання в ВУ показано, що для розробки високоточних ВУ доцільно використовувати гравіметричний метод вимірювання витрати, при цьому ВУ розглядається як комплекс засобів виміральної техніки та конструктивних елементів, в результаті чого встановлено узагальнену залежність вимірювання витрати середовища ВУ.

2. За результатами аналізу узагальненої залежності виявлені джерела невизначеності вимірювань витрати, за результатами експериментальних та теоретичних досліджень отримані кількісні оцінки вхідних невизначеностей і встановлено аналітичні залежності їх від параметрів середовища у витратомірній ділянці ВУ, що дало змогу провести обчислювальний експеримент, в результаті якого встановлено складові невизначеності, які суттєво впливають на невизначеність вимірювань витрати ВУ, що дозволило спростити процедуру оцінки невизначеності при калібруванні витратомірів.

3. На основі досліджень інтенсивності випаровування середовища в ємності для зважування розроблено методику виконання вимірювання витрати на ВУ, яка дозволила зменшити невизначеність вимірювання через випаровування середовища за час вимірювання (як одну із найсуттєвіших складових невизначеності вимірювань ВУ при застосуванні в якості середовища гарячої води), за якої перед проведенням вимірювань ємність для зважування заповнюється гарячою водою і витримується в такому стані певний

час для прогрівання та насичення повітря у ній вологою. Така методика та запропонований пристрій для видалення пари та конденсації у ВУ дозволили у десять разів зменшити складову невизначеності через випаровування.

4. Запропоновано методику досліджень, яка може застосовуватися при дослідженні пульсацій потоку середовища в вимірювальній ділянці ВУ при їх калібруванні та випробуваннях, що дозволило отримати математичну модель індексу пульсацій, яка дасть змогу розрахувати допустимі значення частоти управління насосом, при яких індекс пульсацій не перевищуватиме критичне значення та похибка від пульсацій становитиме не більше 0,1 %, що підтримуватиме допустимий рівень пульсацій потоку під час калібрування витратомірів.

5. Розроблено метод зменшення пульсацій потоку у витратомірній ділянці ВУ заснований на водообміні між потоком середовища у вимірювальній ділянці установки і накопичувальним резервуаром. Розроблено демпфер-деаератор, заснований на цьому методі, і проведені його експериментальні дослідження за запропонованою методикою дослідження пульсацій, які підтвердили ефективність розробленого демпфера-деаератора в гасінні пульсацій потоку середовища та видалення з нього повітря. Розроблена конструкція демпфера-деаератора лягла в основу патенту України на корисну модель та запроваджена у серійне виробництво в складі ВУ виробництва фірми «НПП «Центр енергообліку» (м. Київ).

6. Запропоновано метод оцінки внутрішнього рельєфу ЗВО з корекцією на відхил від горизонтальності, який дозволив на порядок підвищити точність обчислення інтервальних місткостей при його градуюванні, досягнувши розширеної невизначеності вимірювань середнього радіусу 0,0068 %, що дасть змогу на 0,15 % підвищити точність калібрування лічильників води і газу, резервуарів для нафтопродуктів, що в свою чергу веде до підвищення достовірності вимірювань в сфері обліку води, газу та енергоресурсів.

7. Запропоновано конструкцію установки для перевірки витратомірів-лічильників, в якій для динамічного вимірювання витрати середовища в вимірювальній ділянці застосований штатний ваговий пристрій з контролером, що дозволило виключити зі складу ВУ додатковий витратомір, спростити конструкцію і на 50 % зменшити вартість установки, не погіршуючи МХ ВУ із застосуванням динамічного вимірювання витрати рідини, що запроваджені у серійне виробництво на фірмі «НПП «Центр енергообліку» (м. Київ).

8. Запропоновано метод передачі одиниці фізичної величини в області витратометрії від національного первинного еталона вторинним і робочим еталонам за допомогою компарування, що забезпечує динамічну простежуваність результатів вимірювань, яка дозволяє врахувати всі параметри потоку рідини і особливості монтажу витратоміра у вимірювальну ділянку ВУ. Метод передачі компаруванням ліг в основу розробки національного стандарту ДСТУ 7476:2013 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, що дозволило забезпечити простежуваність.

9. Запропоновано експериментально-розрахунковий метод визначення метрологічних характеристик вимірювального засобу порівняння (компаратора), який на відміну від експериментального методу (за якого значний обсяг експериментальних досліджень обумовлений необхідністю їх проведення не тільки в діапазоні вимірювань різниці витрат, але і в діапазоні зміни порівнюваних витрат), дозволяє істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень при калібруванні.

10. Створено та введено в дію наказом Державного комітету України з питань технічного регулювання від 23.12.2010 № 575 державний первинний еталон одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води ДЕТУ 03-04-11, для підтвердження МХ якого проведено міжнародні звірення рамках теми KOOMET № 452/SK/08 Coomet.M.FF.-S «Звірення калібрувальних

лабораторій витратомірів холодної води в діапазоні витрат від 3 до 20 м³/год», які довели добру узгодженість еталона з опорним значенням звірень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузьменко Ю.В. Методы калибровки расходомеров воды, используемых в качестве компараторов / Ю.В. Кузьменко // Вестник НТТУ «КПИ». Серия Приборостроение. — 2011. — Выпуск 42. — 204 с. — С. 13-19.
2. Кузьменко Ю.В. Дослідження ефективності стабілізації потоку води у вимірювальній ділянці витратомірних установок за допомогою нового демпфера-деаератора / Ю.В. Кузьменко, М.В. Гаврилкін, В.С. Лабунський, О.О. Зайцева // Метрологія і прилади. — 2014. — №3 (47). — С. 21-27.
3. Кузьменко Ю.В. Аналіз невизначеності вимірювань витрати води у витратомірних установках / Ю.В. Кузьменко, О.О. Зайцева // Метрологія та прилади. — 2015. — № 3 (53). — С. 44-50.
4. Кузьменко Ю. Забезпечення єдності вимірювань у сфері обліку холодної та гарячої води / Ю. Кузьменко, О. Зайцева, М. Гаврилкін // Метрологія та прилади. — 2009. — №4 (18). — С. 39-42.
5. Кузьменко Ю.В. К вопросу о классификации поверочных проливных установок / Ю.В. Кузьменко // Український метрологічний журнал. — 2011. — №1. — С. 39-42.
6. Кузьменко Ю.В. К вопросу о прослеживаемости поверочных установок в области расходомерии до национального первичного эталона / Ю.В. Кузьменко, Е.А. Зайцева // Український метрологічний журнал. — 2012. — №3. — С. 50-54.
7. Кузьменко Ю.В. Градуировка колокола установок для поверки счётчиков текучей среды / Ю.В. Кузьменко, А.Н. Самойленко // Український метрологічний журнал. — 2015. — № 1 — С. 49-54.
8. Пат. 52954 Україна, МПК⁷ G01F 25/00. Проливна установка для повірки лічильників рідини / Гаврилкін М.В., Кузьменко Ю.В., Лабунський В.С.; заявник і патентовласник Гаврилкін М.В., Кузьменко Ю.В., Лабунський В.С. — № u201009203; заявл. 22.07.2010; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. — 3 с.: ил.

9. Пат. 647448 Україна, МПК⁷ G01F 25/00. Пролівна установка для повірки лічильників рідини / Гаврилкін М.В., Кузьменко Ю.В., Лабунський В.С.; заявник і патентовласник Гаврилкін М.В., Кузьменко Ю.В., Лабунський В.С. – № u2011102293; заявл. 28.08.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21. – 3 с.: ил.

10. ДСТУ 7476:2013 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води : прийнято та надано чинності наказом Мінекономрозвитку України від 11 грудня 2013 р. № 1470 / ДП «Укрметртестстандарт»; розробники: О. Зайцева, Ю. Кузьменко, С. Чередниченко, О. Ісхакова – К.: Мінекономрозвитку України. – 11 с., (Національний стандарт України).

11. Зайцева Е.А. Экспериментальные исследования эталона объема, массы, объемного и массового расхода горячей воды / Е.А. Зайцева, Ю.В. Кузьменко, В.И. Карташев // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2008) (14-16 жовтня 2008 р.), том 2. – Харків: ННЦ «Інститут метрології», с. 129-131.

12. Декуша Л.В. Экспериментальное определение массы испарившейся воды в рабочем цикле горячеводной проливной установки / Л.В. Декуша, Л.И. Воробьёв, А.Н. Бондар, Ю.В. Кузьменко, Е.А. Зайцева // Проблеми обліку теплоти та води в Україні: Матер. VII міжнар. Наук.-практ. Конф., 15-16 черв. [2010 р.]/ Уклад.: В.. Карташев, О.Б. Ісхакова. — К. ТОВ «АВЕГА», 2010. —160 с.:іл. —укр., рос. — Бібліограф. В кінці ст., с. 23-30.

13. Кузьменко Ю.В. Государственный первичный эталон Украины единиц объёма, массы, объемного и массового расхода горячей воды / Ю.В. Кузьменко // Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности: Матер. 3-й научн.-практ. конф., 29-31 мая [2012 г.] – Санкт-Петербург / Составит.: Е. Просяникова. – Санкт-Петербург: 2012. – 367 с.: ил. – рус. – С. 140-144.

14. Кузьменко Ю. Подходы к поверке средств измерений с использованием эталонов, подвергнутых калиброванию / Ю. Кузьменко,

С. Проненко // Метрологія и метрологічно осигуряване 2016: Матер. 26-го национального научн. симпоз., 7-11 септември [2016 г.] – Созополь, България / Составит.: проф. Х. Радев. – София: 2016. – 527 с.: ил. – рус., англ, болг. – С. 433-436.

15. ГОСТ 15528-86 Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения. – Введ. 1997-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1987. – 39 с.

16. Кремлёвский П.П. Расходомеры и счётчики количества: Справочник. / П.П. Кремлёвский – 4-е изд., перераб. И доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 701 с.: ил.

17. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>.

18. ДСТУ 2708:2006 Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: прийнято та надано чинності наказом Держспоживстандарту України від 3 лютого 2006 р. № 18 / Державне підприємство Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (Укрметртестстандарт); розробники: В. Білоус, С. Кіалдунозянц, О. Левбарг, М. Рожнов, І. Чижик – К.: Держспоживстандарт України, 2006.– 17 с., (Національний стандарт України).

19. Поздняков А.Д. Курс лекцій по дисципліне «Метрологія и радиоизмерения». В 2 ч. Ч. 1 / А.Д. Поздняков – Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 164 с.

20. ДСТУ ГОСТ 8.061:2014 Метрологія. Повірочні схеми. Зміст і побудова (ГОСТ 8.061-2007, IDT): прийнято та надано чинності наказом Мінекономрозвитку України від 28 липня 2014 р. № 886 / Державне підприємство «Український науково-дослідний та навчальний центр» (УкрНДНЦ) – К.: Мінекономрозвитку України, 2014.– 30 с., (Національний стандарт України).

21. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация / Ю.В. Димов – 2-е изд. – СПб, 2005. – 432 с.
22. Бирюков Б.В. Испытательные расходомерные установки / Б.В. Бирюков, М.А. Данилов, С.С. Кивилис – М. : Энергия, 1976. - 145 с.
23. Проливные установки ВПУ-Энерго [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://xn----7sbbagdr8bwdecfesurq6e0i.xn--p1ai/variant-ispolnenija/>.
24. ДСТУ OIML D 7:2008 Метрологія. Оцінювання еталонів витрати та установок для повірки лічильників води (OIML D 7:1984, IDT) : затверджено і надано чинності наказом Держспоживстандарту України № 250 від 29 липня 2008 р. / ДП «Укргростандартсертифікація», ДП «Укрметртестстандарт»; переклад та науково-технічне редагування: О.О. Зайцева, Ю.В. Кузьменко, А.І. Ніколенко, Г.А. Примакова – К.: Держспоживстандарт України. – 50 с., (Національний стандарт України).
25. Gudrun Wendt Practical experiences based on LDA flow profile measurements to verify ideal liquid flow conditions [Електронний ресурс]. — Режим доступа: <http://workgroups.oiml.org/tcsc/tc-08/tc-08-sc-05/meetings-of-iso-tc-30-sc-7-oiml-tc-8-sc-5-cen-tc-92-and-the-joint-iso-oiml-working-group/Practical%20experiences....pdf>.
26. Good practice guide. The calibration of flow meters (Керівництво з усталеної практики) [Електронний ресурс]. — Режим доступа: [http://www.tuvnel.com/x90lbm/The Calibration of Flow Meters.pdf](http://www.tuvnel.com/x90lbm/The%20Calibration%20of%20Flow%20Meters.pdf).
27. Каргапольцев П.В. Требования к проливным установкам для расходомеров-счётчиков воды и технологических жидкостей [Електронний ресурс]. — Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=325.
28. Тракало Б.Й. Проливные установки УВЛ: пути автоматизации процесса поверки счетчиков / Б.Й. Тракало, Г.А. Шумский // Проблемы обліку теплоти та води в Україні: Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф., 16-19 черв. [2008 р.] / Уклад: В.І. Карташев, О.Б. Ісхакова. – К.: ТОВ “АВЕГА”, 2008.-224 с., с. 125-146.

29. Paton Richard Calibration and standards in flow measurement (Калібрування та еталони у витратометрії) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://eu.wiley.com/legacy/wileychi/hbmsd/pdfs/mm269.pdf>.

30. Каргапольцев В.П. Автоматизированные проливные установки: общие требования и практическая реализация / В.П. Каргапольцев, А.А. Мицкевич // Український метрологічний журнал. — 2012. — № 3. — С. 55-58.

31. Liquid Test Facilities (Випробувальне обладнання) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-15/ag-152.html>.

32. Národný etalón prietoku a pretečeného množstva vody (Національний еталон витрати та об'єму води) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://230.smu.sk/article/16/>.

33. Государственный первичный эталон единиц массового и объемного расходов жидкости ГЭТ 63-2013 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://vniir.org/cgi-bin/go.pl?i=77>.

34. Исходный эталон единиц массового и объемного расхода воды Белоруссии [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.belgim.by/edunitsyi_massovogo_i_obyemnogo_rashoda_vodyi/.

35. ISO 4185-1980 Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method (Вимірювання витрати рідини в закритих трубопроводах – Метод зважування).

36. ДСТУ OIML D28:2008 Умовне значення результату зважування у повітрі (OIML D 28:2004, IDT).

37. ДСТУ OIML R111-1:2008 “Гирі класів E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 та M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробувань (OIML R111-1:2004, IDT).

38. ГСССД 2-77 «Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С».

39. EURAMET/cg-18/v.02. Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments (EURAMET/cg-18/v.02. Настанова з калібрування неавтоматичних зважувальних приладів)/ Електронний ресурс. Режим доступу:

http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/previous_versions/EU-RAMET-cg-18-02_Non-Automatic_Weighing_Instruments.pdf.

40. МКУ 040-24/06-2011 Измерители температуры с цифровой индикацией. Методика калибровки. – Киев: ГП «Укрметртестстандарт», 2011. – 15 с (р).

41. МКУ 101/26-02-11 Измеритель интервала времени. Методика калибровки. – Киев: ГП «Укрметртестстандарт», 2011. – 11 с (р).

42. ПМА 081/24.411-09 Метрологія. Державний первинний еталон одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води. Методика аттестации – Київ: ДП «Укрметртестстандарт», 2009. – 25 с.

43. МКУ 066-39/04-2011 Измерители атмосферного давления. Методика калибровки. – Киев: ГП «Укрметртестстандарт», 2011. – 12 с.

44. МКУ 047-36/05-011 Метрологія. Рекомендации. Гигрометр. Методика калибровки. – Киев: ГП «Укрметртестстандарт», 2011. – 14 с.

45. Проведення досліджень інтенсивності випаровування гарячої води в накопичувальній ємності еталона: звіт про НДР / Декуша Л.В. — Київ: Інститут технічної теплофізики, 2009. — 51 с.

46. Испарение, конденсация, кипение. Насыщенные и ненасыщенные пары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physics.ru/courses/op25part1/content/chapter3/section/paragraph4/theory.html#.V5dkFKTtlHw>.

47. Цейтлин В.Г. Расходоизмерительная техника / В.Г. Цейтлин. – М.: Изд-во стандартов, 1997, 240 с.

48. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – М.: Машиностроение, 1976. – 504 с.

49. Кавлев А.К. Экспериментальное исследование влияния случайных пульсаций расхода на точность измерения / А.К. Кавлев, Ц.И. Аксенов, В.Н. Ястребов // Метрологія. – 1980. – № 8. – С. 46-50.

50. Laurantz F. Time-resolved measurements with a vortex flowmeter in a pulsating turbulent flow using wavelet analysis / F. Laurantz, R. Örlü, A. Segalini,

Р.Н. Alfredsson (Ф. Лаурantzон, Р. Орлю, А. Сегаліні, П.Х. Андерссон Вимірювання з часовим відліком за допомогою вихрового витратоміра в пульсуючому потоці, застосовуючи імпульсний аналіз) [Електронний ресурс].

– Режим доступу: <http://iopscience.iop.org/0957-0233/21/12/123001/fulltext/>.

51. ДСТУ EN ISO 4064-2:2014 «Лічильники холодної питної води та гарячої води. Частина 2. Методи випробувань» (EN ISO 4064-2:2014, IDT).

52. ДСТУ-П ISO/TR 3313:2009 Вимірювання витрати води в закритих трубопроводах. Вплив пульсацій потоку на прилади вимірювання витрати (ISO/TR 3313:1998, IDT).

53. Miller R. Flow measurement engineering handbook . – 3rd ed. / R. Miller – McGraw Hill professional, New York, NY, USA. – 1996 (Р. Міллер Довідник з витратомірної техніки. – 3-є вид. – Нью Йорк.: McGraw Hill professional, 1996).

54. Устьянцева О.Н. Погрешности измерения расходов воды [Электронный ресурс] / О.Н. Устьянцева // Мир измерений. – 2008. – № 9. – Режим доступу: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=11536>.

55. Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. / В.П. Шорин. – М.: Машиностроение, 1980. – 155 с.

56. Renheng Deng Experiment and simulation on a pulse dampener system for stabilizing liquid flow / Renheng Deng, Yongpan Cheng, Chi-Hwa Wang // Chemical Engineering Journal. – 2012. – № 210. – С. 136-142 (Експериментальні дослідження та моделювання систем гасіння пульсацій для стабілізації потоку рідини).

57. Деаэраторы DISCAL. Серия 551 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.termosystems.ru/File/discal/caleffi_551.pdf (Deaerators DISCAL. Series 551).

58. Деаэрация питательной и подпиточной вод в котельной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Projects/Boiler/Deaeration_water.htm.

59. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1976. – 277 с.

60. ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Основные положения.

61. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.Н.Львовский– М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.: ил.

62. Тракало Б.И. Пропливні установки УВЛ: пути автоматизації процесу поверки счётчиков / Б.И. Тракало, Г.А. Шумский // Проблеми обліку теплоти та води в Україні: Матер. VI міжнар. наук.-практ. конф., 16-19 черв. [2008 р.]/ Уклад.: В.І. Карташев, О.Б. Ісхакова.–К.: ТОВ «АВЕГА», 2008.–224 с., С. 125-146.

63. Бродін Ю.І. Оцінка точності дзвонових витратовимірювальних установок / Ю.І. Бродін // Український метрологічний журнал. — 1998. — № 3 — С. 48-51.

64. ДСТУ 4147-2003 (ГОСТ 8.570-2000, MOD). Метрологія. Резервуари сталеві вертикальні циліндричні. Методика повірки: Чинний з 01.01.2003. — К.: Держспоживстандарт України, 2002. — 65 с.

65. ДСТУ 4218:2003 (ГОСТ 8.346-2000, MOD). Метрологія. Резервуари сталеві горизонтальні циліндричні. Методика повірки: Чинний з 01.01.2004. — К.: Держспоживстандарт України, 2003. — 52 с.

66. Автоматизированная КИМ. Координатно-измерительная машина TESA MH3D 454 Recorder [Електронний ресурс] — Режим доступу к ресурсу — <http://galika.ru/wp-content/uploads/2013/1и1/TESA-MH3D-454-Recorder.pdf>.

67. Второв А.Ю. Определение вместимости вертикальных стальных резервуаров методом горизонтальных сечений / А.Ю. Второв, А.П. Пигин, Д.В. Чадович, Н.Н. Варванович [Електронний ресурс] — Режим доступу — <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/3df1f4e6-b71f-43a0-8045-9b5fef4d2298/Opredelenie-vmestimosti.aspx>.

68. FARO® Laser Tracker Vantage Возможности, преимущества и технические характеристики [Електронний ресурс] — Режим доступа к ресурсу — <http://faro.by/katalog/lazernye-trekery-faro>.

69. RTCM Standard 10403.1 Amendment 2 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3 with Amendments 1 and 2 (February 1, 2013), November 7, 2013 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.rtcn.org/descriptions/10403.2.pdf>.

70. ДСТУ EN ISO 4064–2:2014 Лічильники питної холодної води та гарячої води. Частина 2. Методи випробувань (EN ISO 4064-2:2014, IDT).

71. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>.

72. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. Изд. 2-е, испр. — СПб.: НПО "Профессионал", 2010. — 82 с.

73. ДСТУ OIML D 7:2008 Метрологія. Оцінювання еталонів витрати та установок для повірки лічильників води (OIML D 7:1984, IDT) : затверджено і надано чинності наказом Держспоживстандарту України № 250 від 29 липня 2008 р. / ДП «Укргростандартсертифікація», ДП «Укрметртестстандарт»; переклад та науково-технічне редагування: О.О. Зайцева, Ю.В. Кузьменко, А.І. Ніколенко, Г.А. Примакова – К.: Держспоживстандарт України. – 50 с., (Національний стандарт України).

74. ГОСТ 8.061-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. — Введ. 1981-01-01. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1980. — 16 с.

75. РМГ 29–99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

76. Дорожовець М. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника. — Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. — Т. 2. Вимірювальна техніка. — 656 с.

77. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями.

Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. — Введ. 1997-01-01. — М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1976. — 7 с.

78. МКУ 091-24/0-2013 Рекомендация. Метрология. Пропливні установки – робочі еталони для поверки і калібровки счётчиков объёма воды. Методика калібровки с помощью компаратора: прийнято та надано чинності наказом ДП «Укрметртестстандарт» № 176 від 13.05.2013 р. / розробники Ю.В. Кузьменко, М.В. Гаврилкін, О.О. Зайцева. – К.: ДП «Укрметртестстандарт», 2013.– 14 с.

79. Вайсбанд М.Д. Техника выполнения метрологических работ / М.Д. Вайсбанд, В.И. Проненко – К.: Техника, 1986. – 168 с.

80. EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.fc.ul.pt/sites/default/files/fcul/dep/dqb/doc/EA-4_02.pdf.

81. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.Н. Львовский– М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.: ил.

82. Benková M. Coomet.M.FF-S Comparison of cold water flow calibration laboratories in a range of flow rates (3 - 20) m³/h, Final report / M. Benková, Š. Makovník – COOMET, Bratislava, Slovakia, 2013. (Звірення лабораторій по калібруванню витратомірів холодної води у діапазоні витрати (3 – 20) м³/год, Заключний звіт, KOOMET, Братислава, Словаччина).

83. Evaluation of measurement data — Guide to Expression of Uncertainty in Measurement (ISO, Geneva, 1995)) (Оцінка даних вимірювань - Керівництво по вираженню невизначеності вимірювань) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf.

ДОДАТОК А

Документи, що впроваджують результати роботи



2016

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Кузьменка Юрія Володимировича

«Експериментально-конструктивні методи удосконалення відтворення одиниць витрати паливних середовищ та забезпечення їх простежуваності»

Цим засвідчуємо, що на підприємстві ТОВ «НПП «Центр енергообліку» у виробничій діяльності при випуску Установок пропливних АС..., тип яких зареєстрований до Державного реєстру засобів виміральної техніки України під номером У2917-13, були використані наступні матеріали дисертації Кузьменка Ю.В.:

1. Метод зменшення пульсацій потоку у витратомірній ділянці установки застосований на водообмінні між потоком води у вимірну ділянці установки і накопичувальним резервуаром та демпфер-деаератор, що його реалізує. Застосування демпфера-деаератора дозволить підтримувати допустимий рівень пульсацій потоку у витратомірній ділянці установки під час калібрування витратомірів.

2. Конструкція установки для перевірки витратомірів-лічильників, в якій для динамічного вимірювання витрати рідини в вимірну ділянці застосовується штатний ваговий пристрій з контролером, що дозволяє виключити зі складу установки додатковий витратомір, спростити конструкцію і зменшити вартість установки.

Цей акт не є підставою для проведення фінансових розрахунків та виникнення фінансових зобов'язань жодної зі сторін.

Заступник директора

ТОВ «НПП «Центр енергообліку»

В.О. Шаметулський



про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Кузьменка Юрія Володимировича

**«ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ
ВІДТВОРЕННЯ ОДИНИЦЬ ВИТРАТИ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ ТА
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ПРОСТЕЖУВАНOSTЬ»**

За результатами виконання дисертаційної роботи Кузьменка Ю.В. «Експериментально-конструктивні методи удосконалення відтворення одиниць витрати плинних середовищ та забезпечення їх простежуваності» одержано такі наукові результати:

- отримано модель вимірювання витрати рідини, яка враховує характеристики точності та конструктивні властивості складових частин витратомірної установки та їх взаємозв'язок;
- вперше проведено дослідження та встановлено залежність точності вимірювань витрати від пульсацій потоку рідини в вимірювальній ділянці установки, запропоновано конструктивний метод демпфування пульсацій витрати рідини;
- вперше в галузі витратометрії запропоновано і застосовано метод компарування, який дозволив підвищити точність калібрування витратомірних установок;
- розроблено спосіб калібрування дзвонового мірника заснований на алгоритмі обчислень поправок до інтервальної місткості дзвону за відхилення реальної форми поверхонь від апроксимуючого циліндру (рельєф);

— вперше розроблено експериментально-розрахунковий підхід до оцінки невизначеності інтегральних місткостей в витратомірних установках з еталонними засобами місткості;

— вперше розроблено метод калібрування компаратора.

Результати дисертаційної роботи використано під час:

1) розробки методик калібрування на державному еталоні з оцінкою невизначеності, а саме:

— МКУ 79-24/03-2011 Метрологія. Счётчики объёма жидкости. Методика калибровки на Государственном эталоне ДЕТУ 03-05-11. Затверджено наказом Генерального директора ДП «Укрметртестстандарт» від 29.12.2011 № 880, введено в дію 29.12.2011;

— МКУ 81-24/03-2011 Метрологія. Объёмные расходомеры жидкости. Методика калибровки на Государственном эталоне ДЕТУ 03-05-11. Затверджено наказом Генерального директора ДП «Укрметртестстандарт» від 29.12.2011 № 880, введено в дію 29.12.2011;

— МКУ 80-24/03-2011 Метрологія. Счётчики массы жидкости. Методика калибровки на Государственном эталоне ДЕТУ 03-05-11. Затверджено наказом Генерального директора ДП «Укрметртестстандарт» від 29.12.2011 № 880, введено в дію 29.12.2011;

— МКУ 82-24/03-2011 Метрологія. Массовые расходомеры жидкости. Методика калибровки на Государственном эталоне ДЕТУ 03-05-11. Затверджено наказом Генерального директора ДП «Укрметртестстандарт» від 29.12.2011 № 880, введено в дію 29.12.2011;

2) незалежних оцінок (Peer Review) системи управління якістю ДП «Укрметртестстандарт» комісією міжнародної регіональної метрологічної організації KOOMET у 2011 та 2016 роках, під час яких ДП «Укрметртестстандарт» підтвердив свої вимірювальні можливості;

3) виконання науково-дослідних робіт за державним замовленням, а саме:

— НДР «Створення Державного первинного еталона одиниці об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води», реєстраційний номер 0107U00493;

— НДР «Забезпечення відтворення та зберігання одиниць вимірювань державними еталонами, що знаходяться у ДП «Укрметртестстандарт», реєстраційний номер 0111U000572;

— НДР «Забезпечення відтворення та зберігання одиниць вимірювань державними еталонами, що знаходяться у ДП «Укрметртестстандарт», реєстраційний номер 0113U002970;

4) участі у міжнародних звіреннях за темою Coomet.M.FF-S (452/SK/08) «Звірення калібрувальних лабораторій витратомірів холодної води в діапазоні витрати від 3 до 20 м³/год»;

5) при розробці державного стандарту України ДСТУ 7476:2013 Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води.

Начальник науково-виробничого відділу
вимірювань температури, кількості теп-
лоти та витрати рідин

ДП «Укрметртестстандарт»



С.В. Череди́нченко

ДОДАТОК Б

Наказ про затвердження державного первинного еталона

ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОЖИВЧОЇ ПОЛІТИКИ

НАКАЗ

23 червня 2010 р.

м. Київ

№ *545*

Про реалізацію рішень
засідання Колегії Держспоживстандарту
України від 30.11.2010 р.

Відповідно до Положення про Колегію Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики, затвердженого наказом Держспоживстандарту від 22 червня 2010 р. № 247, з метою забезпечення належного та своєчасного виконання прийнятих Колегією рішень

НАКАЗУЮ:

1. Доповідь заступника Голови Держспоживстандарту України Віткіна Л.М. взяти до відома.
2. Схвалити у цілому План діяльності Держспоживстандарту України на 2011 рік (далі - План). Доопрацювати зазначений План з урахуванням висловлених зауважень і пропозицій та подати на затвердження Голові Держспоживстандарту України.
3. Першим заступникам Голови, заступникам Голови, керівникам структурних підрозділів забезпечити супровід у Кабінеті Міністрів України та Верховній Раді України проектів нормативно-правових актів, розробником яких є Держспоживстандарт України.

Термін: протягом 2011 року

4. Першому заступнику Голови Хижняк В.О., заступнику Голови Гончаренку В.В., директору Департаменту споживчої політики

35. ННЦ „Інститут метрології” (Сидоренко Г.С.) та ДП „УкрНДНЦ” (Захожай В.Б.) підготувати до затвердження проект ДСТУ „Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0,1 м/с до 1,0 м/с”.

Термін: IV квартал 2010 року

36. ДП „УкрНДНЦ” (Захожай В.Б.) забезпечити опублікування в інформаційному покажчику „Стандарти” повідомлення про затвердження державного первинного еталона одиниці швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0,1 м/с до 1,0 м/с.

Термін: IV квартал 2010 року

37. Доповідь заступника генерального директора з метрології та наукової діяльності ДП „Укрметртестстандарт” Кузьменка Ю.В. взяти до відома.

38. Затвердити еталон одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води як державний первинний еталон.

39. Встановити місцем зберігання державного первинного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води ДП „Укрметртестстандарт”.

40. Призначити вченим зберігачем державного первинного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води Кузьменка Юрія Володимировича, заступника генерального директора з метрології та наукової діяльності ДП „Укрметртестстандарт”, наукового керівника розробки та створення еталона.

41. ННЦ «Інститут метрології» (Сидоренко Г.С.) забезпечити занесення державного первинного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води до Реєстру державних, первинних і вторинних еталонів одиниць вимірювань.

42. ННЦ „Інститут метрології” (Сидоренко Г.С.) та ДП „УкрНДНЦ” (Захожай В.Б.) підготувати до затвердження проект ДСТУ „Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води”.

Термін: IV квартал 2010 року

43. ДП „УкрНДНЦ” (Захожай В.Б.) забезпечити опублікування в

ДОДАТОК В

Звіт з міжнародних звірень



Coomet project No. 452/SK/08

Inter-comparison of water flow calibration laboratories No.

Coomet.M.FF-S

Report

Participant:

SE "Ukrmetrteststandard"

Yuriy Kuzmenko

Pilot Laboratory:

Slovak Institute of Metrology

Kiev, April 2010

1. Introduction

All stages from receiving to sending back to SMU depicted in Fig. 1 – Fig. 4

Fig.1 – Before unpacking



Fig.3 – Meistream Plus 40

Fig.2 – KROHNE (Optiflux 2010 C/D)



Fig.4 – Ready to sending



2. Test procedure

Method

Calibration procedure is based on gravimetric measurement (Mettler-Toledo weighing scales). Buoyancy correction factor calculates in accordance to OIML D28 and OIML R 111-1 in respect to measurement of relative humidity, temperature and pressure of air. Density calculates in accordance to normalized formula (in Ukraine) of Governmental System of Standardized Reference Data in respect of water temperature measurements.

Reference conditions

- The calibration medium is water with el. conductivity $\geq 200 \mu\text{S/cm}$
- Water temperature: $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$
- Water pressure downstream of the meter: optional
- Ambient temperature range: 15°C to 25°C
- Ambient relative humidity range: 30 % to 75 %
- Ambient atmospheric pressure range: 86 kPa to 106 kPa (0.86 bar to 1.06 bar)

3. Reporting results

Meter No. 1

Method: flying start-stop, gravimetric

At the beginning of measurement		
Ambient temperature, [°C]		19,10
relative humidity, [%]		33,73
atmospheric pressure, [bar]		0,98389

Q [m ³ /h]	N	Q_E [m ³ /h]	Q_{Emin} [m ³ /h]	Q_{Emax} [m ³ /h]	p [bar]	T [°C]	V_E [m ³]	E [%]	U [%]
3	10	3,0401	3,037	3,045	2,05	18,01	0,290138	-0,261	0,027
5	10	5,0718	5,058	5,079	1,80	20,50	0,290484	-0,1874	0,048
10	10	10,1381	10,132	10,142	2,96	24,53	2,000960	-0,1739	0,037
15	10	15,1947	15,188	15,203	3,36	20,81	2,900383	-0,1097	0,039
20	10	20,2194	20,209	20,229	2,94	21,55	2,899655	-0,1009	0,039

At the end of measurement	
Ambient temperature, [°C]	21,21
relative humidity, [%]	34,49
atmospheric pressure, [bar]	0,99891

Lengths of the straight inlet pipes – 1700 mm

Lengths of the straight outlet pipes – 950 mm

Inside diameter of pipes – 39,7 mm

No additional flow straightener.

Meter No. 2

Method: standing start-stop, gravimetric

At the beginning of measurement	
Ambient temperature, [°C]	21,15
relative humidity, [%]	34,19
atmospheric pressure, [bar]	1,002140

Q [m ³ /h]	N	Q_E [m ³ /h]	Q_{Emin} [m ³ /h]	Q_{Emax} [m ³ /h]	p [bar]	T [°C]	V_E [m ³]	E [%]	U [%]
3	10	3,0405	3,038	3,043	2,91	21,08	0,292476	-0,2858	0,099
5	10	5,0585	5,054	5,065	2,11	21,75	0,293583	0,2375	0,083
10	10	10,1416	10,138	10,147	2,93	20,52	2,010906	0,4139	0,095
15	10	15,2059	15,195	15,214	3,20	21,45	2,911889	0,3046	0,093
20	10	20,1630	20,158	20,168	2,81	22,44	2,918576	-0,2818	0,074

At the end of measurement	
Ambient temperature, [°C]	20,54
relative humidity, [%]	40,72
atmospheric pressure, [bar]	0,99013

Lengths of the straight inlet pipes – 1700 mm

Lengths of the straight outlet pipes – 950 mm

Inside diameter of pipes – 39,7 mm

No additional flow straightener.

ДОДАТОК Г

Методика атестації державного первинного еталона

ДОДАТОК Б
(Довідковий)

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий
центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів»
(ДП «Укрметртестстандарт»)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ДП «Укрметртестстандарт»
М.Я. Мухаровський
" " 2009 р.

Метрологія

ДЕРЖАВНИЙ ПЕРВИННИЙ ЕТАЛОН
ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ, МАСИ, ОБ'ЄМНОЇ ТА МАСОВОЇ ВИТРАТИ
ГАРЯЧОЇ ВОДИ

Методика атестації

ПМА 081 /24.411-09

Київ
ДП «Укрметртестстандарт»
2009

ПЕРЕДМОВА

РОЗРОБЛЕНО: Державним підприємством Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів Держспоживстандарту України (ДП «Укрметртестстандарт»)

РОЗРОБНИКИ: О. Зайцева , к.т.н., Ю. Кузьменко (керівник розробки)

Ця методика атестації (далі за текстом – методика) поширюється на державний первинний еталон одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води (води із температурою від 30 °C до 90 °C), що протікає по трубопроводу, (далі за текстом – первинний еталон) і встановлює обсяг та методику його атестації.

1 ПЕРЕЛІК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ЯКІ ПІДЛЯГАЮТЬ ВИЗНАЧЕННЮ

1.1 Під час атестації первинного еталона необхідно визначити такі його метрологічні характеристики:

- діапазон значень об'єму рідини, що відтворюється первинним еталоном;
- діапазон значень маси, що відтворюється первинним еталоном;
- діапазон значень об'ємної витрати, що відтворюється первинним еталоном;
- діапазон значень масової витрати, що відтворюється первинним еталоном;
- середній квадратичний відхил результату вимірювань об'єму та невилучена систематична похибка, невизначеність вимірювань об'єму за типами А та В, сумарна невизначеність вимірювань об'єму, розширена невизначеність вимірювань об'єму, похибка передачі розміру одиниці об'єму;
- середній квадратичний відхил результату вимірювань маси та невилучена систематична похибка, невизначеність вимірювань маси за типами А та В, сумарна невизначеність вимірювань маси, розширена невизначеність вимірювань маси, похибка передачі розміру одиниці маси;
- середній квадратичний відхил результату вимірювань об'ємної витрати та невилучена систематична похибка, невизначеність вимірювань об'ємної витрати за типами А та В, сумарна невизначеність вимірювань об'ємної витрати, розширена невизначеність вимірювань об'ємної витрати, похибка передачі розміру одиниці об'ємної витрати;

– середній квадратичний відхил результату вимірювань масової витрати та невилучена систематична похибка, невизначеність вимірювань масової витрати за типами А та В, сумарна невизначеність вимірювань масової витрати, розширена невизначеність вимірювань масової витрати, похибка передачі розміру одиниці масової витрати.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цій методиці є посилання на такі нормативні документи:

ДСТУ 3381:2009 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання маси

ДСТУ 3538:2009 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання часу і частоти (на розгляді)

ДСТУ 3742-98 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Контактні засоби вимірювань температури

ДСТУ ГОСТ 8.024:2004 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання густини (ГОСТ 8.024-2002, IDT)

ДСТУ OIML R111-1:2008 Гирі класів E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 та M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробувань (OIML R111-1:2004, IDT)

ГСССД 2-77 «Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С»

Санитарные правила организации технологических процессов и гигиенических требований к производственному оборудованию № 1042-73

СНиП II-4-79 Строительные нормы и правила. Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования

3 ОПЕРАЦІЇ АТЕСТАЦІЇ

3.1 Під час проведення експериментальних досліджень первинного еталона повинні виконуватись операції, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Назва операції	Методика проведення досліджень (номер пункту програми)
1 Перевірка комплектності, маркування, зовнішнього вигляду первинного еталона	4.3.1
2 Перевірка електричного опору між затискачем захисного заземлення та корпусом первинного еталона	4.3.2
3 Перевірка електричного опору ізоляції силових електричних кіл первинного еталона	4.3.3
4 Перевірка герметичності гідравлічної системи первинного еталона	4.3.4
5 Перевірка працездатності первинного еталона	4.3.5
6 Визначення систематичної складової та СКВ випадкової складової похибки вимірювачів температури, стандартної невизначеності вимірювання температури за типами А та В	4.3.6
7 Визначення систематичної складової та СКВ випадкової складової похибки ваг, стандартної невизначеності вимірювання маси за типами А та В	4.3.7
8 Визначення абсолютної похибки від дискретності показів ваг, стандартної невизначеності вимірювання від дискретності ваг та типом В	4.3.8
9 Визначення похибки обчислення густини води та відповідної стандартної невизначеності за типом В	4.3.9
10 Визначення систематичної складової та СКВ випадкової складової похибки таймера, стандартної невизначеності вимірювання часу за типами А та В	4.3.10

Назва операції	Методика проведення досліджень (номер пункту програми)
11 Визначення значення різниці часу переключення дивертера, а також середнього значення та СКВ різниці часу, стандартної невизначеності викликану різницею часу переключення дивертера за типами А та В	4.3.11
12 Визначення зміни коефіцієнта виштовхувальної сили при зміні температури, вологості та атмосферного тиску навколишнього повітря від нормальних умов, стандартної невизначеності вимірювання температури, атмосферного тиску та вологості навколишнього повітря за типом В	4.3.12
13 Визначення значення різниці тиску у місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, і на виході з труби, яка призводить до зміни густини води, стандартної невизначеності, викликані різницею тиску у місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, і на виході з труби, за типом В	4.3.13
14 Визначення значення інтенсивності випаровування води у резервуарі за час вимірювань, стандартної невизначеності, викликану випаровуванням, за типом В	4.3.14
15 Визначення значення зміни різниці об'єму труби і об'єму води від місця встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, до виходу із труби через температурне розширення трубопроводу еталона та води при різниці температур на ділянці від місця встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, до виходу із труби, стандартної невизначеності, викликану зміною різниці об'єму труби і об'єму води, за типом В	4.3.15

Назва операції	Методика проведення досліджень (номер пункту програми)
16 Визначення відносної похибки електромагнітних витратомірів-лічильників, що входять до системи встановлення та регулювання витрати води	4.3.16
17 Визначення діапазонів вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати води	4.3.17
18 Визначення відносного відхилення об'ємної витрати від середнього значення	4.3.18
19 Визначення НСП первинного еталона при відтворенні одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, невизначеності вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води за типом В	4.3.19
20 Визначення СКВ первинного еталона при відтворенні одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, невизначеності вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води за типом А	4.3.20
21 Визначення сумарної невизначеності вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води	4.3.21
22 Визначення розширеної невизначеності вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води	4.3.22
23 Визначення похибки передавання одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води	4.3.23

3.2.Засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання

3.2.1 При проведенні атестації повинні застосовуватись такі засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання:

- еталонні гирі 3-го розряду за ДСТУ3381
- еталонні міри часу та частоти 2-го розряду за ДСТУ 3538;
- еталонні термометри 2-го розряду за ДСТУ 3742;
- термостат ТВП-6 – градієнт температури 0,02 °С;
- вимірювальна станція МРТН 1, діапазон вимірювань відносної вологості від 0 до 100 % із абсолютною похибкою ± 5 %, діапазон вимірювань температури повітря від 0 до 40 °С із абсолютною похибкою $\pm 0,1$ °С, діапазон вимірювань атмосферного тиску від 84 кПа до 106 кПа із абсолютною похибкою ± 30 Па;
- пікнометр 1-го розряду за ДСТУ ГОСТ 8.024;
- частотомір ЧЗ-63, діапазон вимірюваних періодів імпульсного сигнал від 0,1 мкс до 10^4 с, відносна похибка за частотою кварцового генератор $\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$ с за 30 діб.
- мегаомметр М 1101М, напруга 500 В, похибка за робочою частиною шкали ± 1 % від довжини шкали, довжини шкали – 80 мм;
- вимірювач опору заземлення Ф 4103-М1, границі допустимої основної зведеної похибки ± 4 % у діапазоні вимірювань опору від 0 до 0,3 Ом.

3.2.2 Дозволяється використовувати інші засоби вимірювальної техніки, що мають не гірші метрологічні характеристики.

3.2.3 Всі засоби вимірювальної техніки, що застосовуються при метрологічній атестації, повинні бути повіреними або атестованими в установленому порядку

4 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Умови проведення атестації та підготовка до неї

4.1.1 Атестація первинного еталона повинна здійснюватись на місці його експлуатації.

Під час проведення досліджень повинні дотримуватись такі умови:

- температура навколишнього повітря від 18 °С до 22 °С;
- відносна вологість повітря від 30 % до 80 %;
- атмосферний тиск від 86 кПа до 106,7 кПа;
- напруга мереж живлення від 187 В до 242 В та від 323 В до 418 В;
- частота мережі живлення від 49 Гц до 51 Гц;
- температура води від 30 °С до 90 °С.

4.2 Вимоги безпеки

4.2.1 При проведенні атестації необхідно виконувати загальні правила техніки безпеки у відповідності до вимог, що викладені в інструкції по техніці безпеки на робочому місці, яку затверджено в установленому порядку.

Під час проведення перевірки працездатності та експериментальних досліджень еталон повинен бути заземлений.

4.2.2 Основні вимоги та необхідні заходи для забезпечення безпеки під час проведення експериментальних досліджень:

– умови експериментальних досліджень повинні відповідати вимогам, встановленим у стандартах безпеки праці: “Правила устройства электроустановок- потребителей”, “Правила технической эксплуатации электроустановок-потребителей”, “Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок-потребителей”, “Санитарные правила организации технологических процессов и гигиенических требований к производственному оборудованию № 1042-73”;

– на робочому місці повинна бути забезпечена освітленість згідно з нормами СНиП II-4-79.

– особи, що проводять експериментальні дослідження, повинні знати принцип дії первинного еталона, його конструкцію, та пройти інструктаж з техніки безпеки (ввідний та на робочому місці) у встановленому на підприємстві порядку.

4.3 Проведення атестації

4.3.1 Перевірка комплектності, маркування, зовнішнього вигляду первинного еталона

Перевірку комплектності первинного еталона здійснювати порівнянням його складових частин з зазначеними у паспорті на еталон. Комплектність первинного еталона повинна відповідати зазначеному у паспорті.

Перевірку маркування первинного еталона здійснювати порівнянням з зазначеним у документації на первинного еталон. Маркування первинного еталона повинно відповідати документації, всі написи на частинах первинного еталона повинні бути чіткими. При зовнішньому огляді повинно бути встановлено:

- відсутність зовнішніх пошкоджень первинного еталона;
- наявність заземлення корпусу первинного еталона і електродвигунів насосів;
- відсутність сторонніх предметів та бруду у внутрішніх порожнинах накопичувальних резервуарів та резервуарі оборотного водопостачання;
- наявність опломбування всіх вузлів, опломбування яких передбачено експлуатаційними документами;
- відсутність дефектів, що можуть впливати на зчитування показів з показувальних пристроїв та з дисплеїв вторинних приладів первинного еталона.

4.3.2 Перевірка електричного опору між затискачем захисного заземлення та корпусом первинного еталона

Перевірку електричного опору між затискачем захисного заземлення та корпусом первинного еталона проводити з допомогою вимірювача опору заземлення. Вимірювач опору заземлення підімкнути до затискача захисного заземлення та до металевих частин первинного еталона. Результат перевірки вважається позитивним, якщо виміряне значення електричного опору не перевищує 0,1 Ом.

4.3.3 Перевірка електричного опору ізоляції силових електричних кіл первинного еталона

Перевірку електричного опору ізоляції силових електричних кіл первинного еталона здійснювати за допомогою мегомметра. Вимірювальну напругу значенням (500 ± 50) В прикласти між кожним кабелем мережевого живлення і корпусом первинного еталона. Покази мегомметра фіксувати через 1 хвилину після прикладення напруги. Результат перевірки вважається позитивним, якщо електричний опір силових електричних кіл первинного еталона більше або дорівнює 20 МОм.

4.3.4 Перевірка герметичності гідравлічної системи первинного еталона

Перевірку здійснювати за температури води 30 ± 5 °С.

Закрити зливний клапан накопичувального резервуара. Заповнити накопичувальний резервуар до номінальної місткості. Зафіксувати вимірне значення маси. Через 24 год повторно зафіксувати значення маси. Результати перевірки вважаються позитивними, якщо зміна показів не перевищує величину одиниці молодшого розряду ваг.

Операцію повторити для кожного зливного клапану накопичувальних резервуарів еталона

Для перевірки герметичності робочої ділянки трубопроводу встановити змінні вставки (прямі короткі ділянки трубопроводу) відповідного номінального діаметру, подати насосом по робочій ділянці воду і на короткий час закрити вихідний кран робочої ділянки трубопроводу при роботі насосу – створити в трубопроводі надлишковий тиск води від 0,8 МПа до 0,1 МПа. Тиск контролювати по каналу вимірювань тиску на виході робочої ділянки трубопроводу еталона.

Результати перевірки вважаються позитивними, якщо протягом 2 хв після перекриття вихідного крану трубопроводу не спостерігалось течі через з'єднання або утворення крапель води на зовнішніх поверхнях трубопроводів та їх ущільненнях.

Якщо теча або утворення крапель води мають місце, подальші операції припиняють до усунення причин негерметичності.

4.3.5 Перевірка працездатності первинного еталона

Перевірку працездатності первинного еталона проводити шляхом виконання на ньому операцій повірки витратоміра-лічильника води згідно з вказівкам експлуатаційних документів на нього та на первинного еталон.

Результати перевірки вважаються позитивними, якщо первинний еталон дозволяє провести повірку витратоміра-лічильника води згідно з вказівкам експлуатаційних документів на нього та на первинний еталон.

4.3.6 Визначення систематичної складової та СКВ випадкової складової похибки вимірювачів температури, стандартної невизначеності вимірювання температури за типами А та В

Визначення похибки вимірювачів температури здійснювати за допомогою термостата.

Похибку вимірювача температури визначити при чотирьох значеннях температури, рівномірно розподілених по діапазону температури води первинного еталона (30 °C, 50 °C, 70 °C, 85 °C).

Первинний перетворювач вимірювача температури помістити в термостат разом із еталонним термоперетворювачем. З інтервалом 30 с зняти 10 показів температури з показувального пристрою вимірювача температури.

Для кожного значення температури i -ту реалізацію абсолютної похибки вимірювача температури Δt_i , в градусах Цельсія, визначити за формулою:

$$\Delta t_i = t_{ei} - t_{ei}, \quad (1)$$

де t_{ei} – значення температури за показами вимірювача температури первинного еталона, °C;

t_{ei} – значення температури за показами еталонного термоперетворювача, °C.

Систематичну складову похибки вимірювача температури при певній температурі $\Delta_c t$, в градусах Цельсія, визначити за формулою:

$$\Delta_c t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (2)$$

де $n=10$ – число спостережень.

СКВ випадкової складової похибки вимірювача температури S_t , в градусах Цельсія, визначити за формулою:

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \Delta_c t)^2}{(n-1)}}. \quad (3)$$

Стандартну невизначеність вимірювання температури за типом А, в градусах Цельсія, визначити за формулою:

$$u_{At} = S_t. \quad (4)$$

Стандартну невизначеність вимірювання температури за типом В, в градусах Цельсія, визначити за формулою:

$$u_{Bt} = \frac{\Delta_c t}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

4.3.7 Визначення систематичної складової та СКВ випадкової складової похибки ваг, стандартної невизначеності вимірювання маси за типами А та В

Похибку ваг визначити у точках, які відповідають 5, 20, 50, 65 та 95 % діапазону вимірювань.

Установити на вантажоприймальну платформу ваги гирі та зняти покази відлікового пристрою ваги. Виконати цю операцію 10 разів.

Для кожного значення маси i -ту реалізацію абсолютної похибки ваг Δm_i , в кілограмах, визначити за формулою:

$$\Delta m_i = m_{gi} - m_{ei}, \quad (6)$$

де m_{gi} – значення маси за показами ваг первинного еталона, кг;

m_{ei} – значення маси гир, кг.

Систематичну складову похибки ваг при певній масі гир $\Delta_c m$, в кілограмах, визначити за формулою:

$$\Delta_c m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_i, \quad (7)$$

де $n=10$ – число спостережень.

СКВ випадкової складової похибки ваг S_m , в кілограмах, визначити за формулою:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta m_i - \Delta_c m)^2}{(n-1)}}. \quad (8)$$

Стандартну невизначеність вимірювання маси за типом А, в кілограмах, визначити за формулою:

$$u_{Am} = S_m. \quad (9)$$

Стандартну невизначеність вимірювання маси за типом В, в кілограмах, визначити за формулою:

$$u_{Bm} = \frac{\Delta_c m}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

4.3.8 Визначення абсолютної похибки від дискретності показів ваг, стандартної невизначеності вимірювання від дискретності ваг та типом В

Абсолютна похибка від дискретності показів ваг дорівнює ціні найменшого розряду показу вального пристрою ваги на початку d_n та в кінці вимірювання d_k .

Стандартну невизначеність вимірювання від дискретності ваг за типом В, в кілограмах, визначити за формулою:

$$u_{Bd} = \frac{d}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

4.3.9 Визначення похибки обчислення густини води та відповідної стандартної невизначеності за типом В

Похибку визначення густини води $\Delta\rho$ визначити відповідно до ГСССД 2-77 „Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С”.

Стандартну невизначеність вимірювання від визначення густини та типом В в кілограмах на метр кубічний, визначити за формулою:

$$u_{B\rho} = \frac{\Delta\rho}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

4.3.10 Визначення систематичної складової та СКВ випадкової складової похибки таймера, стандартної невизначеності вимірювання часу за типами А та В

4.3.10.1 Підключити частотомір до контактів «Старт-Стоп» блоку знімання первинного еталона. Перевести частотомір в режим вимірювання інтервалу часу.

За витрати, що відповідає часу заповнення накопичувального резервуара 60 с, виконати перевірку лічильника води методом «Старт з ходу». При цьому зафіксувати тривалість сигналу «Старт-Стоп», визначену за показами частотоміра ЧЗ-63 та за показами екрана монітора первинного еталона. Виконати 10 таких вимірювань на цій витраті.

4.3.10.2 Виконати операції по 3.3.11.1 при значенні витрати, що відповідає 60 с, 120 с, 180 с, 300 с, 480 с, 600 с, 3600 с.

4.3.10.3 Для кожного значення витрати i -ту реалізацію абсолютної похибки таймера ΔT_i , в секундах, визначити за формулою:

$$\Delta T_i = T_{ei} - T_{ei}, \quad (13)$$

де T_{ei} – значення інтервалу часу за показами таймера, с

T_{ei} – значення інтервалу часу за показами частотоміра, с.

Систематичну складову похибки таймера при певному інтервалі часу $\Delta_c T$, в секундах, визначити за формулою:

$$\Delta_c T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i, \quad (14)$$

де $n=10$ – число спостережень.

СКВ випадкової складової похибки таймера S_T , в секундах, визначити за формулою:

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta_c T)^2}{(n-1)}}. \quad (15)$$

Стандартну невизначеність вимірювання часу за типом А, в секундах, визначити за формулою:

$$u_{AT} = S_T. \quad (16)$$

Стандартну невизначеність вимірювання часу за типом В, в секундах, визначити за формулою:

$$u_{BT} = \frac{\Delta_c T}{\sqrt{3}}. \quad (17)$$

4.3.11 Визначення значення різниці часу переключення дивертера, а також середнього значення та СКВ різниці часу, стандартної невизначеності викликану різницею часу переключення дивертера за типами А та В

Значення різниці часу переключення дивертера визначити за максимальної та мінімальної витрати для кожного дивертера.

Встановити кінцеві давачі на привід дивертера.

Підключити кінцеві давачі до частотоміру, що працює у режимі вимірювання інтервалу часу.

Виконати перекидання потоку води з одного напрямку на інший (з напрямку «в бак оборотного водопостачання» – у відповідну робочу місткість). Після кожного перенаправлення потоку за допомогою частотоміра фіксувати час відпрацювання дивертера в одному напрямку T_{1i} . Через деякий час виконати перекидання потоку води з напрямку від відповідної робочої місткості на напрямок «в бак оборотного водопостачання». Після кожного перенаправлення

потоків за допомогою частотоміра фіксувати час відпрацювання дивертера T_{2i} в іншому напрямку.

Для кожного значення витрати i -ту реалізацію різниці часу переключення дивертера $difT_i$, в секундах, визначити за формулою:

$$difT_i = T_{1i} - T_{2i} \quad (18)$$

де T_{1i} – час відпрацювання дивертера в одному напрямку, с;

T_{2i} – час відпрацювання дивертера в іншому напрямку, с.

Середнє значення різниці часу переключення дивертера $dif_c T$, в секундах, визначити за формулою:

$$dif_c T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n difT_i, \quad (19)$$

де $n=10$ – число спостережень.

СКВ різниці часу S_{difT} , в секундах, визначити за формулою:

$$S_{difT} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (difT_i - dif_c T)^2}{(n-1)}}. \quad (20)$$

Стандартну невизначеність викликану різницею часу переключення дивертера за типом А, в секундах, визначити за формулою:

$$u_{AdifT} = S_{difT}. \quad (21)$$

Стандартну невизначеність викликану різницею часу переключення дивертера за типом В, в секундах, визначити за формулою:

$$u_{BdifT} = \frac{dif_c T}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

4.3.12 Визначення зміни коефіцієнта виштовхувальної сили при зміні температури, вологості та атмосферного тиску навколишнього повітря від нормальних умов, стандартної невизначеності вимірювання температури, атмосферного тиску та вологості навколишнього повітря за типом В

Коефіцієнт виштовхувальної сили c_V розраховувати за формулою:

$$c_V = \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_e}}, \quad (23)$$

де ρ_a – густина повітря, кг/м³;

ρ_e – густина води, кг/м³;

ρ_p – 8000 кг/м³ – густина матеріалу гир (умовно прийняте значення за Рекомендацією МОЗМ № 33).

Значення густини повітря за умов вимірювань визначаються шляхом вимірювання температури t_a , атмосферного тиску p_a , відносної вологості h навколишнього повітря та розрахунком ρ_a згідно із Додатком Е ДСТУ OIML R111-1.

Визначити похибки каналів вимірювання температури t_a , атмосферного тиску p_a , відносної вологості h_e навколишнього повітря – Δt_a , Δp_a та Δh відповідно до програм державної метрологічної атестації на певний канал вимірювання.

Значення густини води визначаються за формулою ГСССД 2-77 «Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С».

Стандартну невизначеність вимірювання температури навколишнього повітря за типом В, в градусах Цельсія, розрахувати за формулою:

$$u_{Bta} = \frac{\Delta t_a}{\sqrt{3}}. \quad (24)$$

Стандартну невизначеність вимірювання атмосферного тиску за типом В, в мегапаскалях, розрахувати за формулою:

$$u_{Bpa} = \frac{\Delta p_a}{\sqrt{3}}. \quad (25)$$

Стандартну невизначеність вимірювання вологості навколишнього повітря за типом В, у відсотках, розрахувати за формулою:

$$u_{Bh} = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}}. \quad (26)$$

4.3.13 Визначення значення різниці тиску у місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, і на виході з труби, яка призводить до зміни густини води, стандартної невизначеності, викликані різницею тиску у місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, і на виході з труби, за типом В

Граничне значення різниці тиску у місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, і на виході з труби *difp* дорівнює найбільшому із значень різниці тиску на вході у випробувальну ділянку та тиску на виході з труби, які отримали при різних значеннях витрати для кожної вимірювальної ділянки.

Стандартну невизначеність, викликану різницею тиску у місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, і на виході з труби, за типом В, в мегапаскалях, розрахувати за формулою:

$$u_{Bdifp} = \frac{difp}{\sqrt{3}}. \quad (27)$$

4.3.14 Визначення значення інтенсивності випаровування води у резервуарі за час вимірювань, стандартної невизначеності, викликану випаровуванням, за типом В

Визначити інтенсивність випаровування гарячої води за час вимірювання *o*, в кілограмах за секунду, згідно з методикою "Проведення досліджень інтенсивності випаровувань гарячої води в накопичувальній ємності еталона", затвердженою інститутом технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України в установленому порядку.

Стандартну невизначеність, викликану випаровуванням, за типом В, в кілограмах за секунду, розрахувати за формулою:

$$u_{Bo} = \frac{o}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

4.3.15 Визначення значення зміни різниці об'єму труби і об'єму води від місця встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, до виходу із труби через температурне розширення трубопроводу установки та води при різниці температур на ділянці від місця встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, до виходу із труби, стандартної невизначеності, викликану зміною різниці об'єму труби і об'єму води, за типом В

Визначити зміну V_{mp} об'єму труби між місцем встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, та виходом із труби $V_{зм}$, в кубічних метрах.

$$V_{зм} = V_{mp} (3\alpha - \beta), \quad (29)$$

де V_{mp} – об'єм труби між місцем встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, та виходом із труби, м³;

α – коефіцієнт температурного розширення матеріалу трубопроводу, °C⁻¹;

β – коефіцієнт температурного розширення води, °C⁻¹.

Визначити Δt_2 різницю температури в місці встановлення ЗВТ, якому передається одиниця, та температури на виході з труби середню за час вимірювання $dift_2$, в градусах Цельсія, за формулами:

$$dift_2 = \frac{t - t_{III}}{2}, \quad (30)$$

$$t_{III} = \frac{t_{III_{поч}} + t_{III_{кін}}}{2}, \quad (31)$$

де t – температура в місці встановлення ЗВТ, °C;

t_{III} – температура води на виході з труби середня за час вимірювання, °C;

$t_{III_{поч}}$ – температура води на виході з труби на початку вимірювань, °C;

$t_{III_{кін}}$ – температура води на виході з труби в кінці вимірювань, °C.

Стандартну невизначеність, викликану зміною різниці об'єму труби і об'єму води, за типом В, в градусах Цельсія, розрахувати за формулою:

$$u_{Bdift_2} = \frac{dift_2}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

4.3.16 Визначення відносної похибки електромагнітних витратомірів-лічильників, що входять до системи встановлення та регулювання витрати води

Визначати для кожного з витратомірів-лічильників відносну похибку при вимірюванні об'єму та об'ємної витрати при значеннях об'ємної витрати $q_{\min}$; $0,5q_{\max}$; $q_{\max}$.

Для кожного значення витрати відносну похибку витратоміра-лічильника при вимірюванні об'єму при i -тій реалізації δV_i , в процентах, визначають за формулою:

$$\delta V_i = \frac{V_{ei} - V_{ei}}{V_{ei}} \cdot 100, \quad (33)$$

де V_{ei} – об'єм за показами витратоміра-лічильника, м³;

V_{ei} – значення об'єму за показами первинного еталона, м³.

За границі допустимої відносної похибки витратоміра-лічильника при вимірюванні об'єму приймати найбільше з отриманих значень похибки.

Для кожного значення витрати відносну похибку витратоміра-лічильника при вимірюванні об'ємної витрати при i -тій реалізації δq_i , в процентах, визначають за формулою:

$$\delta q_i = \frac{q_{ei} - q_{ei}}{q_{ei}} \cdot 100, \quad (34)$$

де q_{ei} – об'ємна витрата за показами витратоміра-лічильника, м³/год;

q_{ei} – значення об'ємної витрати за показами первинного еталона, м³/год.

За границі допустимої відносної похибки витратоміра-лічильника при вимірюванні об'ємної витрати приймати найбільше з отриманих значень похибки.

4.3.17 Визначення діапазонів вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати рідини

Діапазон вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати рідини первинного еталона визначається під час його створення виходячи з вимог до точності первинного еталона.

Контроль діапазону вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати рідини первинного еталона проводити шляхом здійснення перевірки витратомірів-лічильників відповідного номінального діаметра за мінімальної та максимальної витрати, нормованих для первинного еталона.

4.3.18 Визначення відносного відхилу об'ємної витрати від середнього значення

Визначення відносного відхилу виконується за допомогою електромагнітних витратомірів-лічильників, що входять до системи встановлення та регулювання витрати води первинного еталона.

Пролити воду за п'яти рівномірно розподілених по діапазону відтворення точках витрати. Під час проливу зняти з витратомірів-лічильників не менше 10 значень витрати q_i .

Визначити середнє значення вимірюваної об'ємної витрати Q_c , в кубічних метрах за годину, за формулою:

$$q_c = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}, \quad (35)$$

де $n=10$ – кількість зареєстрованих значень.

Визначити відносний середній квадратичний відхил результатів спостережень S_ϵ за формулою:

$$S_\epsilon = \frac{1}{q_c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_c)^2}{n(n-1)}}. \quad (36)$$

Знайти границі відносного відхилу об'ємної витрати від середнього

значення δ_{eid} за формулою:

$$\delta_{eid} = tS_e, \quad (37)$$

де t – коефіцієнт Ст'юдента, визначений залежно від числа вимірювань для довірчої ймовірності $P = 0,99$.

Отримане значення округлюють до однієї значущої цифри.

4.3.19 Визначення НСП первинного еталона при відтворенні одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, невизначеності вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води за типом В

4.3.19.1 Еталонний об'єм води V_e , в кубічних метрах, визначається за формулою:

$$V_e = c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_B}, \quad (38)$$

де ρ_B – густина води за певної температури t , кг/м³;

ρ_{p20} , ρ_{d20} – густина реальної та дистильованої води за температури 20 °С відповідно, кг/м³;

c_V – коригувальний коефіцієнт (коефіцієнт виштовхувальної сили).

Густина води ρ_{d20} визначається за формулою ГСССД 2-77.

Густина води ρ_{p20} вимірюється за допомогою робочих еталонів 1-го розряду – пікнометрів за ДСТУ ГОСТ 8.024.

4.3.19.2 НСП первинного еталона при відтворенні одиниці об'єму гарячої води визначити за формулою:

$$\Theta_{BV_e} = \pm 1,4 \frac{1}{V_e} \cdot$$

$$\begin{aligned} & \left[-c_V \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(\Delta_c m_n)^2 + (\Delta_c m_k)^2 + d_n^2 + d_k^2] + \\ & + \left[-c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \right]^2 \cdot \Delta \rho^2 + \left[-c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot \Delta_c t^2 + \\ & + \left[c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot T} \right]^2 \cdot difT^2 + \left[c_V \frac{T}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B} \right]^2 \cdot o^2 + \\ & + [V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)]^2 \cdot dift_2^2 + \left[-c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial p} \right]^2 \cdot difp^2 + \\ & + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot \Delta h^2 + \\ & + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot \Delta t_a^2 \end{aligned} \quad (39)$$

4.3.19.3 Невизначеність вимірювань об'єму гарячої води за типом В визначити за формулою:

$$u_{BV_e} = \frac{1}{V_e} \cdot$$

$$\begin{aligned} & \left[-c_V \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(u_{Bm_n})^2 + (u_{Bm_k})^2 + (u_{Bdn})^2 + (u_{Bdk})^2] + \\ & + \left[-c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \right]^2 \cdot (u_{Bp})^2 + \left[-c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot (u_{Bt})^2 + \\ & + \left[c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot T} \right]^2 \cdot (u_{BdifT})^2 + \left[c_V \frac{T}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B} \right]^2 \cdot (u_{Bo})^2 + \quad (40) \\ & + [V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)]^2 \cdot (u_{Bdif2})^2 + \left[-c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial p} \right]^2 \cdot (u_{Bdifp})^2 + \\ & + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot (u_{Bpa})^2 + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot (u_{Bh})^2 + \\ & + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot (u_{Bta})^2 \end{aligned}$$

4.3.19.4 Еталонну масу води, що протікає по трубопроводу, m_e , в кілограмах, розраховують за формулою:

$$m_e = c_V(m_k - m_n), \quad (41)$$

де m_n — покази ваг за незаповненого водою бака для зважування, кг;

m_k — покази ваг за заповненого водою бака для зважування, кг.

4.3.19.5 НСП первинного еталона при відтворенні одиниці маси гарячої води визначити за формулою:

$$\Theta_{Bme} = \pm 1,4 \frac{1}{m_e} \cdot$$

$$\sqrt{c_V^2 \cdot [(\Delta_c m_n)^2 + (\Delta_c m_k)^2 + d_n^2 + d_k^2] + \left(c_V \frac{m_k - m_n}{T}\right)^2 \cdot difT_{div}^2 + (c_V \cdot T)^2 \cdot o^2 +$$

$$\cdot \left[V_{mp} \cdot (\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)\right]^2 \cdot dift_2^2 +$$

$$\cdot \left[\left(m_k - m_n\right) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a}\right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \left[\left(m_k - m_n\right) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h}\right]^2 \cdot \Delta h^2 + \left[\left(m_k - m_n\right) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a}\right]^2 \cdot \Delta t_a^2$$

$$(42)$$

4.3.19.6 Невизначеність вимірювань маси гарячої води за типом В визначити за формулою:

$$u_{Bme} = \frac{1}{m_e} \cdot$$

$$\sqrt{c_V^2 \cdot [(u_{Bm_n})^2 + (u_{Bm_k})^2 + (u_{Bdn})^2 + (u_{Bdk})^2] + \left(c_V \frac{m_k - m_n}{T}\right)^2 \cdot (u_{BdifT})^2 +$$

$$+ (c_V \cdot T)^2 \cdot (u_{Bo})^2 + \left[V_{mp} \cdot (\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)\right]^2 \cdot (u_{Bdift_2})^2 +$$

$$\cdot \left[\left(m_k - m_n\right) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a}\right]^2 \cdot (u_{Bpa})^2 + \left[\left(m_k - m_n\right) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h}\right]^2 \cdot (u_{Bh})^2 +$$

$$\cdot \left[\left(m_k - m_n\right) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a}\right]^2 \cdot (u_{Bta})^2$$

$$(43)$$

4.3.19.7 Еталонна об'ємна витрата води q_{Ve} , в кубічних метрах за секунду, визначається за формулою:

$$q_{Ve} = \frac{c_V}{T} \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B}, \quad (44)$$

де T – тривалість заповнення водою бака для зважування, с.

4.3.19.8 НСП первинного еталона при відтворенні одиниці об'ємної витрати гарячої води визначити за формулою:

$$\Theta_{Bq_{Ve}} = \pm 1,4 \frac{1}{q_{Ve}} \sqrt{\begin{aligned} & \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(\Delta_c m_n)^2 + (\Delta_c m_k)^2 + d_n^2 + d_k^2] + \\ & \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \right]^2 \cdot \Delta \rho^2 + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot \Delta_c t^2 + \\ & + \left[-c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot \Delta_c T^2 + \\ & + \left[c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot dif T^2 + \left[\frac{c_V}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot o^2 + \\ & + \left[\frac{1}{T} \cdot V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta) \right]^2 \cdot dif t_2^2 + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial p} \right]^2 \cdot dif p^2 + \\ & + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot \Delta h^2 \\ & + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot \Delta t_a^2 \end{aligned}} \quad (45)$$

4.3.19.9 Невизначеність вимірювань об'ємної витрати гарячої води за типом В визначити за формулою:

$$u_{Bq_{Ve}} = \frac{1}{q_{Ve}} \cdot$$

$$\begin{aligned} & \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(u_{Bm_n})^2 + (u_{Bm_\kappa})^2 + (u_{Bdn})^2 + (u_{Bd\kappa})^2] + \\ & + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \right]^2 \cdot (u_{Bp})^2 + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot \\ & \cdot (u_{Bt})^2 + \left[-c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot (u_{BT})^2 + \\ & + \left[c_V \frac{1}{T^2} \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B} \right]^2 \cdot (u_{BdifT})^2 + \left[\frac{c_V}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B} \right]^2 \cdot (u_{Bo})^2 + \\ & \cdot \left[\frac{1}{T} \cdot V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta) \right]^2 \cdot (u_{Bdif_2})^2 + \\ & + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial p} \right]^2 \cdot (u_{Bdifp})^2 + \\ & + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot (u_{Bpa})^2 + \\ & + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot (u_{Bh})^2 + \\ & + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot (u_{Bt_a})^2 \end{aligned} \quad (46)$$

4.3.19.10 Еталонна масова витрата води q_{me} , в кілограмах за секунду, визначається за формулою:

$$q_{me} = c_V \frac{m_\kappa - m_n}{T}, \quad (47)$$

4.3.19.11 НСП первинного еталона при відтворенні одиниці масової витрати гарячої води визначити за формулою:

$$\Theta_{Bq_{me}} = \pm 1,4 \frac{1}{q_{me}} \cdot \sqrt{\left(-c_V \cdot \frac{1}{T}\right)^2 \cdot [(\Delta_c m_n)^2 + (\Delta_c m_k)^2 + d_n^2 + d_k^2] + \left[-\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (\Delta_c T)^2 + \left[\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot difT_{div}^2 + (c_V \cdot o)^2 + \left[\frac{1}{T} V_{mp} \cdot (\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)\right]^2 \cdot dift_2^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a}\right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h}\right]^2 \cdot \Delta h^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a}\right]^2 \cdot \Delta t_a^2} \quad (48)$$

4.3.19.12 Невизначеність вимірювань масової витрати гарячої води за типом В визначити за формулою:

$$u_{Bq_{me}} = \frac{1}{q_{me}} \cdot \sqrt{\left(-c_V \cdot \frac{1}{T}\right)^2 \cdot [(u_{Bm_n})^2 + (u_{Bm_k})^2 + (u_{Bdn})^2 + (u_{Bdk})^2] + \left[-\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (u_{BT})^2 + \left[\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (u_{BdifT})^2 + (c_V \cdot u_{Bo})^2 + \left[\frac{1}{T} V_{mp} \cdot (\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)\right]^2 \cdot (u_{Bdift_2})^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a}\right]^2 \cdot (u_{Bpa})^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h}\right]^2 \cdot (u_{Bh})^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a}\right]^2 \cdot (u_{Bta})^2} \quad (49)$$

4.3.20 Визначення СКВ первинного еталона при відтворенні одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води

4.3.20.1 СКВ первинного еталона при відтворенні одиниці об'єму гарячої води визначити за формулою:

$$S_{BV_e} = \frac{1}{V_e} \sqrt{\left[-c_V \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(Sm_n)^2 + (Sm_k)^2] + \left[-c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot (St)^2 + \left[c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot T} \right]^2 \cdot [SdifT_{div}]^2} \quad (50)$$

4.3.20.2 Невизначеність вимірювань об'єму гарячої води за типом А визначити за формулою:

$$u_{AV_e} = \frac{1}{V_e} \sqrt{\left[-c_V \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(u_{Am_n})^2 + (u_{Am_k})^2] + \left[-c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot (u_{At})^2 + \left[c_V \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot T} \right]^2 \cdot [u_{AdifT}]^2} \quad (51)$$

4.3.20.3 СКВ первинного еталона при відтворенні одиниці маси гарячої води визначити за формулою:

$$S_{Bm_e} = \frac{1}{m_e} \sqrt{c_V^2 \cdot [(Sm_n)^2 + (Sm_k)^2] + \left(c_V \frac{m_k - m_n}{T} \right)^2 \cdot (SdifT)^2} \quad (52)$$

4.3.20.4 Невизначеність вимірювань маси гарячої води за типом А визначити за формулою:

$$u_{Am_e} = \frac{1}{m_e} \sqrt{c_V^2 \cdot [(u_{Am_n})^2 + (u_{Am_k})^2] + \left(c_V \frac{m_k - m_n}{T}\right)^2 \cdot (u_{AdifT})^2} \quad (53)$$

4.3.20.5 СКВ первинного еталона при відтворенні одиниць об'ємної витрати гарячої води визначити за формулою:

$$S_{Bq_{Ve}} = \frac{1}{q_{Ve}} \sqrt{\left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(Sm_n)^2 + (Sm_k)^2] + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot (St)^2 + \left[-c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot (ST)^2 + \left[c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B} \right]^2 \cdot (SdifT)^2} \quad (54)$$

4.3.20.6 Невизначеність вимірювань об'ємної витрати гарячої води за типом А визначити за формулою:

$$u_{Aq_{Ve}} = \frac{1}{q_{Ve}} \sqrt{\left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot [(u_{Am_n})^2 + (u_{Am_k})^2] + \left[-c_V \frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right]^2 \cdot (u_{At})^2 + \left[-c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \right]^2 \cdot (u_{AT})^2 + \left[c_V \frac{1}{T^2} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B} \right]^2 \cdot (u_{AdifT})^2} \quad (55)$$

4.3.20.7 СКВ первинного еталона при відтворенні одиниць масової витрати гарячої води визначити за формулою:

$$S_{Bq_{me}} = \frac{1}{q_{me}} \sqrt{\left(-c_V \frac{1}{T}\right)^2 \cdot [(Sm_n)^2 + (Sm_k)^2] + \left[-\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (ST)^2 + \left[\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (SdifT_{div})^2} \quad (56)$$

4.3.20.8 Невизначеність вимірювань масової витрати гарячої води за типом А визначити за формулою:

$$u_{Aq_{me}} = \frac{1}{q_{me}} \sqrt{\left(-c_V \frac{1}{T}\right)^2 \cdot [(u_{Am_n})^2 + (u_{Am_k})^2] + \left[-\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (u_{AT})^2 + \left[\frac{1}{T^2} \cdot c_V (m_k - m_n)\right]^2 \cdot (u_{AdifT})^2} \quad (57)$$

4.3.21 Визначення сумарної невизначеності вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води

4.3.21.1 Сумарна невизначеність вимірювань об'єму гарячої води визначити за формулою:

$$u_{CVe} = \sqrt{(u_{AVe})^2 + (u_{BVe})^2} \quad (58)$$

4.3.21.2 Сумарна невизначеність вимірювань маси гарячої води визначити за формулою:

$$u_{Cme} = \sqrt{(u_{Ame})^2 + (u_{Bme})^2} \quad (59)$$

4.3.21.3 Сумарна невизначеність вимірювань об'ємної витрати гарячої води визначити за формулою:

$$u_{CqVe} = \sqrt{(u_{AqVe})^2 + (u_{BqVe})^2} \quad (60)$$

4.3.21.4 Сумарна невизначеність вимірювань масової витрати гарячої води визначити за формулою:

$$u_{Cqme} = \sqrt{(u_{Aqme})^2 + (u_{Bqme})^2} \quad (61)$$

4.3.22 Визначення розширеної невизначеності вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води

4.3.22.1 Розширена невизначеність вимірювань об'єму гарячої води (за коефіцієнта охоплення $k = 2$, довірна ймовірність $P = 0,95$) визначити за формулою:

$$U_{V_e} = k \cdot u_{CV_e} \quad (62)$$

4.3.22.2 Розширена невизначеність вимірювань маси гарячої води (за коефіцієнта охоплення $k=2$, довірна ймовірність $P=0,95$) визначити за формулою:

$$U_{m_e} = k \cdot u_{Cme} \quad (63)$$

4.3.22.3 Розширена невизначеність вимірювань об'ємної витрати гарячої води (за коефіцієнта охоплення $k=2$, довірна ймовірність $P=0,95$) визначити за формулою:

$$U_{qV_e} = k \cdot u_{CqV_e} \quad (64)$$

4.3.22.4 Розширена невизначеність вимірювань масової витрати гарячої води (за коефіцієнта охоплення $k=2$, довірна ймовірність $P=0,95$) визначити за формулою:

$$U_{qm_e} = k \cdot u_{Cqme} \quad (65)$$

4.3.23 Визначення похибки передавання одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води

4.3.23.1 Похибку передавання розміру одиниць характеризують сумарними відносними середніми квадратичними відхилами передавання розміру одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води $S_{\Sigma BV}$, $S_{\Sigma Bm}$, $S_{\Sigma BqV}$, $S_{\Sigma Bqm}$, які визначаються за формулами:

$$S_{\Sigma V} = \sqrt{S_{BV}^2 + \frac{1}{3 \cdot V_e} \cdot \left\{ [V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta)]^2 \cdot dift_2^2 + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot \Delta h^2 + \left[\frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot \Delta t_a^2 \right\}}$$

$$S_{\varepsilon\Sigma m} = \sqrt{S_{Bm}^2 + \frac{1}{3 \cdot m_e} \left\{ \left[V_{mp} \cdot (\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot (3 \cdot \alpha - \beta) \right]^2 \cdot dift_2^2 + \right. \\ \left. + \left[(m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \left[(m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot \Delta h^2 + \right. \\ \left. + \left[(m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot \Delta t_a^2 \right\}}$$

$$S_{\varepsilon\Sigma q_V} = \sqrt{S_{Bq_V}^2 + \frac{1}{3 \cdot q_{Ve}} \left\{ \left[\frac{1}{T} \cdot V_{mp} \cdot (3 \cdot \alpha - \beta) \right]^2 \cdot dift_2^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot \right. \\ \left. \cdot \Delta p_a^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot \Delta h^2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{1}{T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \rho_B} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot \Delta t_a^2 \right\}}$$

$$S_{\varepsilon\Sigma q_m} = \sqrt{S_{Bq_m}^2 + \frac{1}{3 \cdot q_{me}} \left\{ \left[\frac{1}{T} V_{mp} \cdot (\rho_{p20} / \rho_{\partial 20}) \cdot \rho_B \cdot (3 \cdot \alpha - \beta) \right]^2 \cdot dift_2^2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p_a} \right]^2 \cdot \Delta p_a^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial h} \right]^2 \cdot \right. \\ \left. \cdot \Delta h^2 + \left[\frac{1}{T} \cdot (m_k - m_n) \cdot \frac{\partial c_V}{\partial t_a} \right]^2 \cdot \Delta t_a^2 \right\}}$$

5 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Результати атестації первинного еталона оформлюються протоколом та заносяться до паспорту еталона.

Свідоцтво про калібрування проливної установки – робочого еталона

Державне підприємство
"Всеукраїнський державний науково-виробничий
центр стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів"
(ДП «Укрметрестандарт»)
State Enterprise
"All-Ukrainian State Research and Production Center for Standardization,
Metrology, Certification and Consumers' Rights Protection"
(SE "Ukrmetrestandard")

СВІДОЦТВО ПРО КАЛІБРУВАННЯ
Calibration Certificate

Регістраційний №:
Reference number: UA 02 62 241.0060

Дата калібрування:
Date of calibration: 30.05.2016

Об'єкт калібрування:
Object: Установка проливна

Виробник:
Manufacturer: ТОВ "НВП "Центр енергофізики", м. Київ

Тип:
Type: АС-50-В/0,03...15,0-С/0,03...45,0

Заводський/серійний номер:
Serial number: 039

Місце калібрування:
Place of calibration: ТОВ ФІРМА «СЕМПАЛ КО.ЛТД», м. Київ

Кількість сторінок свідоцтва:
Number of pages of the certificate: 2

Директор Інституту №2
Director of SPI

М.П.
Official stamp

Начальник відділу №24
Head of department

підпис/signature

А.Б. Гасбон
Initials, print name/surname

підпис/signature

С.В. Червоний
Initials, print name/surname

Всі надруковані дані мають відповідати дійсності. Підписаний свідомо і відповідно до національних стандартів ДП.
All data printed on this certificate shall be true and correct. The undersigned certifies that the data printed on this certificate are true and correct in accordance with the national standards of DPU.

Цей свідоцтво не може бути використано для будь-яких цілей, крім як для калібрування. Будь-яке використання цього свідоцтва в інших цілях є порушенням законодавства.
This certificate shall not be reproduced except in full. Any publication or use of this certificate for any other purpose is a violation of the law.

Ці вимоги є обов'язковими для всіх, хто використовує національні стандарти ДП.
These requirements are mandatory for all who use the national standards of DPU.

Адреса ДП "Укрметрестандарт": 4, м.с. Метрологічна, Київ, 01141, Україна
Address of DPU "Ukrmetrestandard": 4, Metrologichna st., Kyiv, 01141, Ukraine

Телефон/Факс: +38 (044) 526-52-28, факс/факс: +38 (044) 526-42-00, e-mail: info@ukrmetrestandard.gov.ua, web: ukrmetrestandard.gov.ua
Telephone/Fax: +38 (044) 526-52-28, fax/fax: +38 (044) 526-42-00, e-mail: info@ukrmetrestandard.gov.ua, web: ukrmetrestandard.gov.ua

Свідоцтво про утворення ПК 061-2014 від 24.02.2014 р. Свідоцтво про акредитацію КОМЕТ-QSF-R42 від 10.05.2016 р.
Accreditation certificate PK 061-2014 from 24.02.2014. Certificate of accreditation KOMET-QSF-R42 from 10.05.2016

Національний стандарт Державної повірочної схеми



ДСТУ 7476:2013

ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНО: Державне підприємство Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів Державного комітету України з питань технічного регулювання та захисту прав споживачів (ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ)

РОЗРОБНИКИ: О. Зайцева, канд. техн. наук; Ю. Кузьменко (науковий керівник); С. Чередниченко; О. Ісхакова

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Мінекономрозвитку України від 11 грудня 2013 р. № 1470

3 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

Право власності на цей документ належить державі.
Відтворювати, тиражувати та розповсюджувати його повністю чи частково
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.
Стосовно врегулювання прав власності треба звертатися до Мінекономрозвитку України

Мінекономрозвитку України, 2014