

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Дослідження методів калібрування кліматичних камер
(тема)

Виконав:
здобувач другого року навчання,
групи ЗЯм-24-1

Масалов А.А.

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 175 – Інформаційно-
вимірювальні технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Забезпечення якості
(повна назва освітньої програми)

Керівник асистент кафедри ІВТ Семеніхін В.С.

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ІВТ

(підпис)

Захаров І.П.

(власне ім'я, прізвище)

2025р.

Харківський національний університет радіоелектроніки
 Факультет інфокомунікацій
 (повна назва)
 Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
 (повна назва)
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 175 – Інформаційно-вимірювальні технології
 (код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
 (освітньо-професійна або освітньо-наукова)
 Освітня програма «Забезпечення якості»
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
 (підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Масалову Антону Андрійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів калібрування кліматичних камер

затверджена наказом по університету від «07» 11 2025 р. № 1011Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20 12 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій, стандартизовані методики калібрування кліматичних камер.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1. Вимоги нормативної документації до калібрування кліматичних камер. 2. Теоретичні засади стосовно кліматичних камер. 3. Аналіз методів калібрування кліматичних камер. 4. Аналіз методики розрахунку невизначеності. 5. Розробка електронного протоколу обрахунку невизначеності і представлення результатів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Тема роботи, цілі та завдання роботи. Вимоги нормативної документації. Класифікація кліматичних камер. Аналіз методів калібрування кліматичних камер. Розробка методики розрахунку невизначеності під час калібрування. Розробка електронного бюджету невизначеності, протоколу та сертифікату калібрування.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз вимог нормативної документації	09.11.2025	
2	Аналіз типів кліматичних камер	03.12.2025	
3	Аналіз методів калібрування кліматичних камер	08.12.2025	
4	Аналіз методики розрахунку невизначеності під час калібрування.	12.12.2025	
5	Розробка електронного протоколу та бюджету невизначеності	15.12.2025	
6	Розробка форми сертифіката калібрування	16.12.2025	
7	Практична перевірка розробленої методики калібрування	20.12.2025	

Дата видачі завдання 07 11 2025 р.

Здобувач _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

ас. каф. ІВТ Семеніхін В.С. _____

(посада, прізвище, ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КАЛІБРУВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ КАМЕР	9
1.1 Призначення та типи кліматичних камер.....	9
1.2 Типова конструкція та основні компоненти кліматичних камер.....	21
1.3 Нормативно-правова база та стандартизація у сфері калібрування кліматичних камер.....	23
2. МЕТОДИ КАЛІБРУВАНЬ КЛІМАТИЧНИХ КАМЕР.....	26
2.1 Методи калібрування.....	26
2.2 Розташування точок вимірювання.....	28
2.2.1 Калібрування для корисних об'ємів за методом (А) або (В)	28
2.2.2 Калібрування точок вимірювання за методом (С).....	29
2.2.3 Калібрування корисного об'єму методом (D).....	30
2.3 Процедури калібрування.....	30
2.3.1 Розташування точок вимірювання.....	30
2.3.2 Калібрування для точок вимірювання за методом (С).....	31
2.4 Визначення просторової неоднорідності.....	32
2.4.1 Температурна неоднорідність.....	32
2.4.2 Неоднорідність вологості.....	33
2.5 Визначення часової нестабільності.....	33
2.6 Визначення ефекту випромінювання (радіаційного ефекту).....	34
2.7 Калібрування вологості.....	36
3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....	38
3.1 Внески в невизначеність.....	38
3.2 Просторова неоднорідність.....	39
3.3 Часова нестабільність.....	39
3.4 Вплив випромінювання (радіаційний ефект)	40
3.5 Вплив умов навколишнього середовища і роздільна здатність індикаторів	40
3.6 Обробка результатів вимірювань і розрахунок невизначеності вимірювань під час калібрування.....	41
3.6.1 Вимірювання температури в повітряному термостаті	41
3.7 Вимірювання вологості.....	46

3.8 Вимірювання температури в рідинному термостаті.....	51
3.9 Розширена невизначеність вимірювання.....	55
Додаток А.....	60
Додаток Б	62

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 64 с., 7 рис., 2 табл., 16 джерел, 2 додатки.

Об'єкт дослідження – кліматична камера Binder FD 56.

Мета роботи – дослідження методів калібрування кліматичних камер.

Проведено аналіз основних сучасних нормативних документів для неавтоматичних зважувальних приладів, серед яких вимоги Закону України "Про метрологію та метрологічну діяльність", розглянуто нормативно-правову базу, зокрема стандарти серії ІЕС 60068 та настанову DKD-R 5-7, що регламентують процедури підтвердження метрологічних характеристик.

Проаналізовано чотири основні методи калібрування (А, В, С, D) залежно від завантаження камери та розташування датчиків. Розроблено детальну методику розрахунку розширеної невизначеності, яка враховує внески від еталона, роздільної здатності, просторової неоднорідності (градієнта), часової нестабільності та радіаційного ефекту.

Практичним результатом роботи є розробка уніфікованої форми електронного протоколу (на базі MS Excel) для автоматизації обчислень бюджету невизначеності та генерації сертифіката калібрування, що було апробовано на обладнанні Binder FD 56.

**КЛІМАТИЧНА КАМЕРА, КАЛІБРУВАННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ
ВИМІРЮВАНЬ, ПРОСТОРОВА НЕОДНОРІДНІСТЬ, ЕЛЕКТРОННИЙ
ПРОТОКОЛ, DKD-R 5-7.**

ABSTRACT

Explanatory note: 64 pages, 7 figures, 2 tables, 16 sources, 2 appendices.

Research object – climatic chamber Binder FD 56.

Purpose of the work – investigation of climatic chamber calibration methods.

An analysis of the main modern regulatory documents was conducted, including the requirements of the Law of Ukraine "On Metrology and Metrological Activity". The regulatory framework was examined, particularly the IEC 60068 series standards and the DKD-R 5-7 guideline, which regulate procedures for confirming metrological characteristics.

Four main calibration methods (A, B, C, D) were analyzed depending on the chamber loading and sensor placement. A detailed methodology for calculating expanded uncertainty was developed, which takes into account contributions from the reference standard, resolution, spatial inhomogeneity (gradient), temporal instability, and radiation effect.

The practical result of the work is the development of a unified electronic protocol form (based on MS Excel) for automating uncertainty budget calculations and generating a calibration certificate, which was tested on the Binder FD 56 equipment.

CLIMATIC CHAMBER, CALIBRATION, MEASUREMENT
UNCERTAINTY, SPATIAL INHOMOGENEITY, ELECTRONIC PROTOCOL,
DKD-R 5-7.

ВСТУП

В умовах посилення конкуренції та глобалізації, сучасні технологічні процеси у промисловості (зокрема в електроніці, фармацевтиці), наукових дослідженнях та інших галузях висувають жорсткі вимоги до якості, надійності продукції та суворого контролю параметрів навколишнього середовища. Кліматичні камери є критично важливим обладнанням, що використовується для моделювання впливу умов (температури, вологості, тиску) на вироби та для забезпечення стабільних умов випробувань.

Точність та стабільність відтворення параметрів у кліматичній камері безпосередньо впливають на достовірність результатів випробувань та якість продукції. Некоректні дані можуть призвести до помилкових висновків, спричиняючи фінансові збитки, репутаційні ризики або загрози безпеці. Єдиним способом гарантування відповідності заявлених та реальних параметрів є регулярне калібрування. У зв'язку з цим, дослідження, систематизація та вдосконалення методів калібрування кліматичних камер є актуальною науково-технічною задачею.

Однак, незважаючи на це, на практиці залишається низка невирішених проблем. Існують розбіжності між теоретичними методами та реальними умовами калібрування, що зумовлено нерівномірністю (неоднорідністю) розподілу температури та вологості в робочому об'ємі, похибками вимірювальних засобів та конструктивними особливостями камер. Залишається недостатньо вирішеною проблема вибору оптимального методу калібрування залежно від типу камери та вимог до точності. Існуючі підходи часто не враховують повний спектр факторів, що впливають на невизначеність, або є надто часо- та ресурсозатратними.

Відсутність комплексного порівняльного аналізу сучасних методів ускладнює їх раціональний вибір. Це зумовлює необхідність подальшої систематизації, поглибленого дослідження та пошуку шляхів підвищення точності й повторюваності результатів калібрування.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КАЛІБРУВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ КАМЕР

1.1 Призначення та типи кліматичних камер

Кліматичні камери є високотехнологічним обладнанням, призначеним для штучного відтворення специфічних умов середовища. Вони дають можливість точно контролювати ключові параметри (температуру, вологість, освітлення, тиск), що робить їх затребуваними у багатьох галузях, від агросектору до промисловості. Основна мета їх використання – створення контрольованих реальних або екстремальних умов для випробування реакції, стабільності та витривалості різноманітних матеріалів і продуктів.

Використання цих приладів дозволяє не лише підвищити якість продукції, а й зменшити ризики, пов'язані з її виходом з ладу у складних умовах. Це також сприяє:

- покращенню наукових досліджень;
- дотриманню міжнародних стандартів якості;
- зниженню виробничих втрат;
- збільшенню довговічності продукції. [1]

Існує досить широка гама типів кліматичних камер, що імітують різні кліматичні умови, але найбільш розповсюджені їх розділяють на:

- тепла;
- тепла-холоду;
- тепла-холоду-вологи;
- тепла-вологи;
- шокового замороження;
- барокамери;
- камери сонячної радіації;
- термічна ударна;
- термічна вібраційна;
- камера для старіння (корозії);

- сушильні камери;
- теплові вакуумні.

Також камери бувають різні за розмірами, вони залежать від типів досліджень для яких вони зроблені і можуть бути від 40 до 12000 літрів. Більшість камер є стаціонарними, особливо ті які великі за обсягом. Кліматичні камери мають різні температурні коливання, яке можливо в межах від -100 до +300°C.

Кліматичні камери типу "Температура та Вологість" (також відомі як камери стабільності або термостатичні камери) – це обладнання, призначене для проведення контрольованих випробувань матеріалів та виробів. Вони дозволяють штучно відтворювати та підтримувати задані кліматичні умови, зокрема температуру (високу та низьку) та відносну вологість.

Основне завдання камер полягає у симуляції агресивних або специфічних умов навколишнього середовища, яким виріб може піддаватися протягом свого життєвого циклу (експлуатація, транспортування, зберігання).

Випробування у кліматичних камерах проводяться для досягнення наступних цілей:

- оцінка надійності та якості – перевірка здатності продукції зберігати свої функціональні та експлуатаційні характеристики під впливом екстремальних температур (тепло- та холодостійкість) та вологості (вологостійкість);
- сертифікація продукції – отримання об'єктивних даних, необхідних для підтвердження відповідності виробів вимогам нормативних документів та стандартів, що є умовою для їх подальшої реалізації;
- прогнозування терміну служби (прискорені випробування) – моделювання довготривалих процесів старіння в стислі терміни.

Ключовою функцією кліматичних камер є можливість проведення прискорених випробувань на довговічність.

Цей метод базується на припущенні, що інтенсивний, циклічний вплив кліматичних факторів (що перевищує середні експлуатаційні) дозволяє спрогнозувати деградацію властивостей матеріалу за тривалий період.

Наприклад, для оцінки довговічності будівельних матеріалів, призначених для експлуатації протягом десятків років, камера дозволяє провести серію інтенсивних циклів. Такий цикл може включати:

- швидке заморожування (імітація зимових умов);
- відтавання;
- інтенсивне нагрівання (імітація літнього сонця);
- дощування (симуляція опадів);
- вплив ультрафіолетового випромінювання (якщо камера оснащена відповідною опцією).

Проведення таких циклів протягом декількох днів або місяців дає змогу отримати дані для прогнозування експлуатаційної стабільності та технічних характеристик виробу на період від 5 до 50 років. На основі отриманих результатів (наявність тріщин, зміна кольору, втрата механічної міцності) робиться висновок про придатність матеріалу до запланованого терміну служби [2].

Камера термічного удару (Рис.1.1.) – це спеціалізоване кліматичне обладнання, призначене для перевірки матеріалів та виробів шляхом їхнього надзвичайно швидкого переміщення між екстремально високими та низькими температурами. Основна мета – не просто тестування на спеку чи холод, а саме аналіз реакції на різкий температурний стрес (шок).



Рис. 1.1. Камера термічного удару.

Головне завдання камери – виявити приховані дефекти конструкції, матеріалів або виробничих процесів, які можуть призвести до відмови продукту під час експлуатації. Це особливо критично для електроніки (де різні матеріали мають різні коефіцієнти теплового розширення), а також в аерокосмічній та автомобільній галузях.

Стандартний механізм роботи полягає у фізичному переміщенні тестових зразків. Зразки розміщуються у мобільному кошику. Цей кошик автоматично переміщується між двома (або трьома) окремими зонами: гарячою та холодною. Цей перехід між зонами зазвичай займає менше 10 секунд, що і створює ефект термічного удару. Такий шок викликає механічне напруження в матеріалах, що

дозволяє виявити слабкі місця – наприклад, дефекти паяння, розшарування композитів або мікротріщини.

На рисунку 1.2. показано як температура об'єкта випробування різко змінюється з часом у рамках тесту на термічний удар.

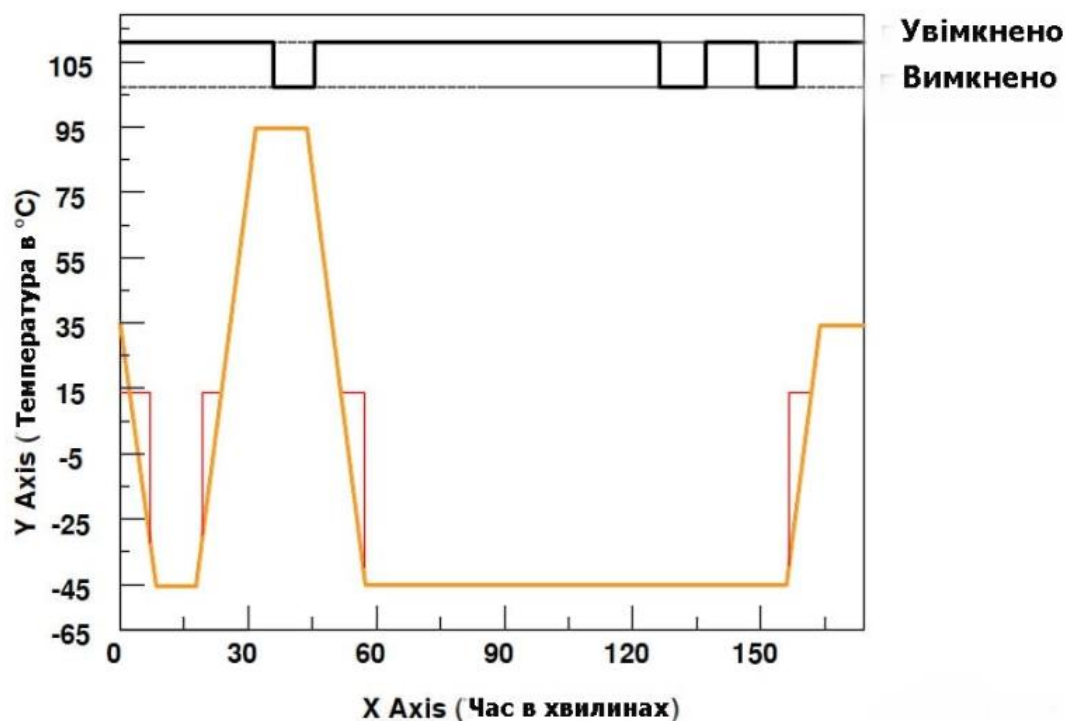


Рис.1.2. – Номінальне випробування на термічний удар.

Цей графік ілюструє цикл випробування на термічний удар, під час якого продукт або компонент піддається екстремальним і швидким перепадам температур (від -45°C до $+95^{\circ}\text{C}$), щоб перевірити його надійність і стійкість до таких умов. На графіку також показано, що обладнання періодично вмикалося та вимикалося під час тесту.

Технічні характеристики включають:

- об'єм випробувальної зони – варіюється від 60 л до 120 л, вимірюється в літрах;
- кількість зон – до двох зон у трьох типах камер термічного шоку, які можуть бути змінними (конвертованими) або фіксованими;

- температурний діапазон гарячої зони – зазвичай від 50°С до 220°С, хоча може відрізнятися;
- температурний діапазон холодної зони – зазвичай становить від -80°С до -40°С з відхиленнями;
- розміри випробувальної зони – залежно від моделі та типу, найменший розмір становить від 3,8 м до 6 м;
- максимальна вантажопідйомність – залежно від моделі та типу, становить від 20 кг до 100 кг;
- холодильний агрегат – може бути з повітряним або водяним охолодженням;
- номінальна потужність – залежно від моделі, становить від 8 кВт до 14 кВт або більше.

Термічні камери поділяють на 3 типи: вертикальні, горизонтальні та трьохзонні.

Найпоширенішим типом камер є вертикальні (рис.1.3.). Вони мають дві зони (гарячу і холодну), розташовані одна над одною. Кошик зі зразками рухається між ними вертикально.

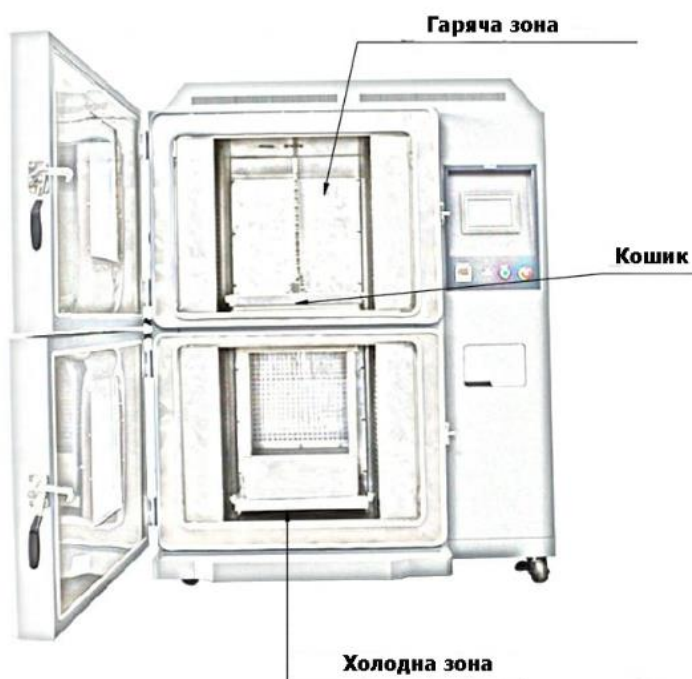


Рис.1.3. Будова вертикальної термічної камери

Горизонтальні камери (рис.1.4.) працюють за тим же принципом, але зони розташовані пліч-о-пліч. Цей тип часто використовують для тестування великих вузлів, таких як автомобільні модулі або акумуляторні системи.

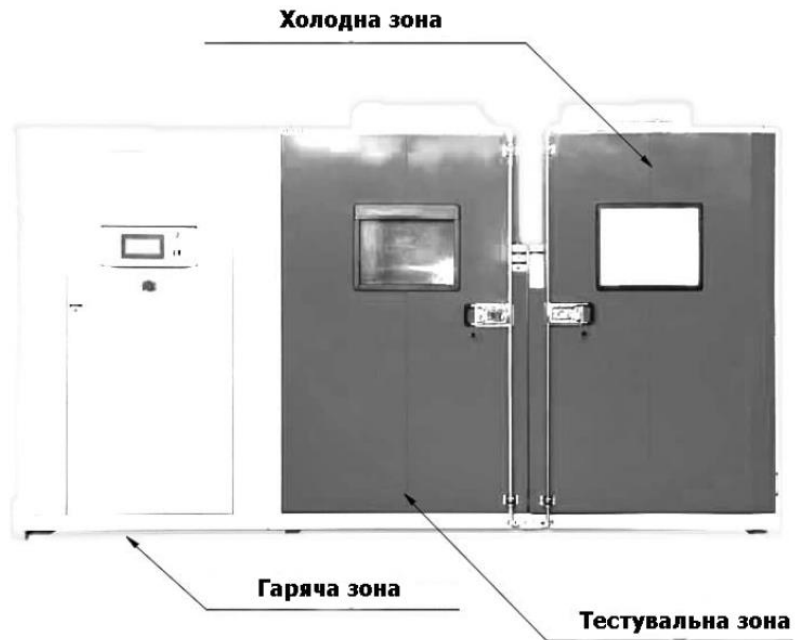


Рис.1.4. Будова горизонтальної термічної камери

Трьохзонні камери (рис.1.5.) мають три окремі відсіки: гарячий, холодний та тестову зону зі стабільною (кімнатною) температурою. У цій конструкції зразок залишається нерухомим, а на нього по черзі подається гаряче або холодне повітря. Це ідеально для крихких електронних компонентів, які не можна піддавати механічному руху.

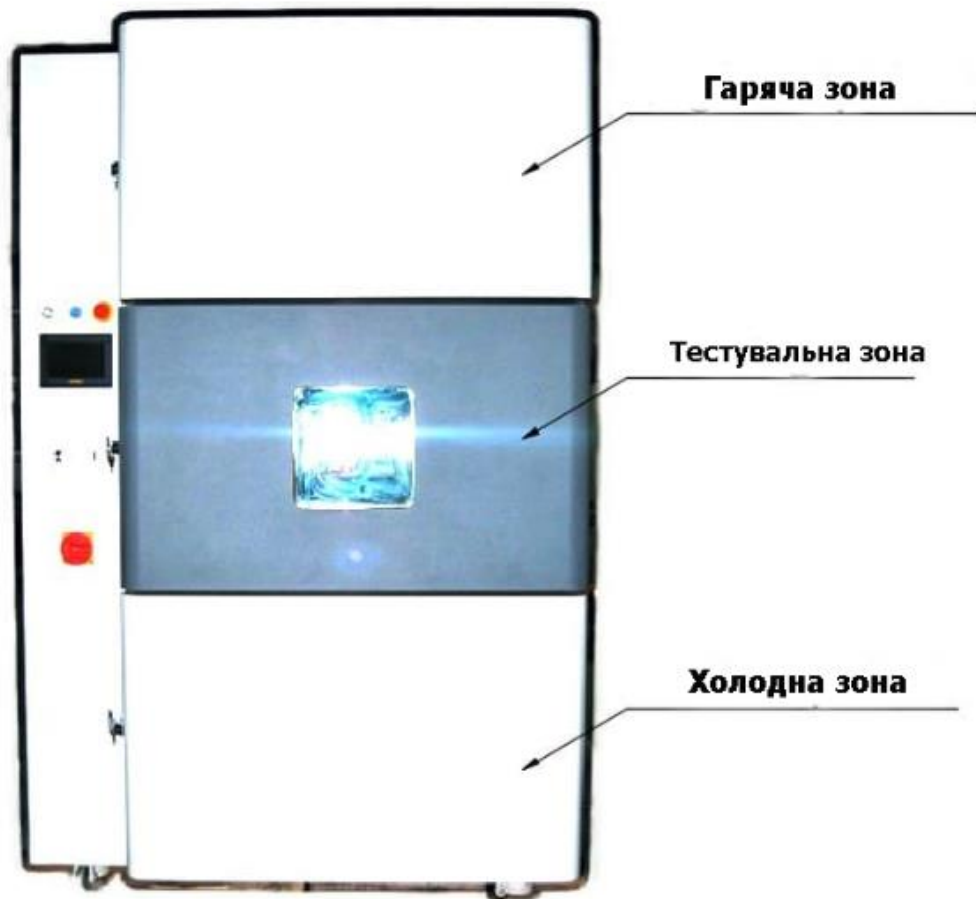


Рис.1.5. Будова трьохзонної термічної камери

Для забезпечення екстремальних умов та довговічності камери виготовляють із специфічних матеріалів:

- Зовнішній корпус – зазвичай з оцинкованої сталі для запобігання корозії.
- Внутрішні зони – виготовлені з нержавіючої сталі марки 304, оскільки вона надзвичайно стійка як до високих (+150°C до +200°C), так і до низьких (до -70°C) температур.
- Ізоляція – використовується комбінація пінополіуретану та скловати для максимальної теплоефективності [3].

Ще один тип термічних камер – камери сольового удару. Випробування у сольовому тумані – це стандартизований метод прискорених корозійних випробувань, який використовується для оцінки корозійної стійкості матеріалів

та захисних покриттів. Цей метод є одним з найстаріших і найпоширеніших у промисловості для контролю якості.

Основна мета тесту – перевірити придатність захисного покриття (наприклад, гальванічного, лакофарбового, фосфатного) протистояти корозії. Він створює високо корозійне середовище в контрольованих лабораторних умовах.

Хоча існує багато національних стандартів, два є найбільш визнаними у світі:

- ASTM B117 – найпоширеніший стандарт у Північній Америці, що описує процедуру проведення випробувань у нейтральному сольовому тумані (NSS).
- ISO 9227 – глобальний міжнародний стандарт, який також описує NSS, а також кислотні (ASS) та мідно-прискорені кислотні (CASS) випробування.

Для проведення тесту використовується спеціалізована камера сольового туману (рис1.6.). Зразки розміщуються всередині, де вони піддаються безперервному впливу дрібнодисперсного туману.



Рис.1.6. Обладнання для випробування сольового туману

Ключові параметри, що суворо контролюються:

- Використовується 5% розчин хлориду натрію (NaCl) (за масою) у деіонізованій або дистильованій воді;

- камера повинна підтримувати стабільну внутрішню температуру $+35^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1.1-1.7^{\circ}\text{C}$);
- для нейтрального туману Ph розчину перед розпиленням має бути в діапазоні 6.5 – 7.2;
- швидкість осадження (збору) туману – це критичний параметр, що визначає щільність туману. він вимірюється за допомогою колекторів (воронок площею 80 см^2), розміщених у камері. швидкість збору має становити 1.0 – 2.0 мл/год на кожні 80 см^2 горизонтальної площі;
- зразки, як правило, розміщують під кутом 15-30 градусів від вертикалі. це запобігає накопиченню крапель на поверхні та стіканню розчину з одного зразка на інший.

Окрім стандартного нейтрального сольового туману (NSS), стандарт ISO 9227 також описує більш агресивні методи:

- ASS (Acetic Acid Salt Spray): До 5% розчину NaCl додається льодовикова оцтова кислота для зниження рН до 3.1 – 3.3. Використовується для тестування декоративних покриттів (мідь-нікель-хром).
- CASS (Copper-accelerated Acetic Acid Salt Spray): На додаток до оцтової кислоти, в розчин додають хлорид міді(II). Це ще більш агресивний тест, який часто застосовують для тестування анодованого алюмінію та хромованих покриттів на алюмінії чи цинкових сплавах.

Результати найчастіше оцінюються візуально через визначений час (наприклад, 24, 48, 96, 720 годин). Оцінюється поява продуктів корозії (іржа, білий наліт), здуття покриття, або "розповзання" корозії від штучно нанесеної подряпини (тест на адгезію).

Результати тесту SST погано корелюють з реальною довговічністю покриття в природних умовах. Тест моделює лише один тип впливу (постійна висока вологість, солоний туман) і не враховує ключові фактори реального світу, такі як:

- цикли висихання та зволоження;

- вплив ультрафіолетового випромінювання (сонячне світло);
- перепади температур (заморожування-відтавання);
- вплив дощу (змивання солей).

Гіпобарична або висотна камера(рис.1.7.) – це тип кліматичної камери, призначений для моделювання умов низького атмосферного тиску, що відповідають різним висотам над рівнем моря. Це обладнання є критично важливим для тестування компонентів, що експлуатуються, зберігаються або транспортуються в авіаційній, космічній та оборонній галузях.

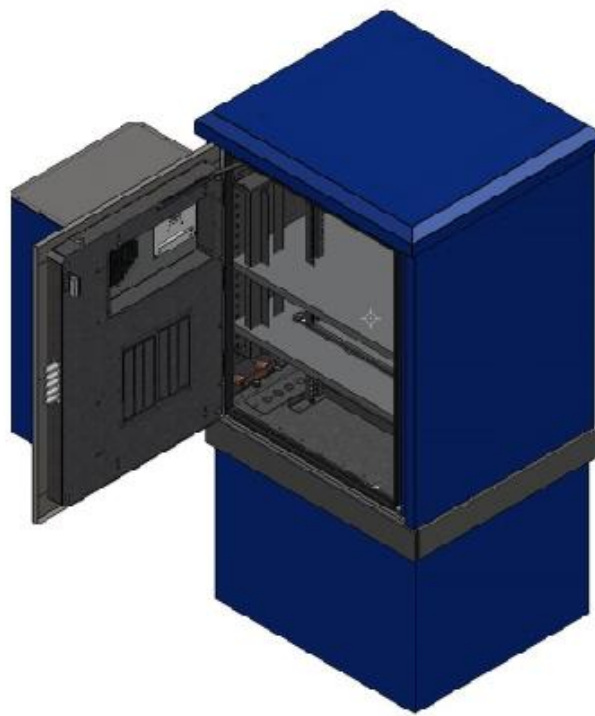


Рис.1.7. Вигляд барокамери

Основне завдання камери – не просто створити вакуум, а точно відтворити та підтримувати певний рівень тиску, що імітує конкретну висоту. Вони використовуються для оцінки трьох основних видів впливу низького тиску на тестований об'єкт: фізичний, електричний і тепловий.

Фізичні ефекти:

- механічне розширення. Згідно із законом Бойля, будь-яке повітря або газ, що "заблоковані" всередині герметичного виробу (наприклад, в електролітному конденсаторі, пакеті з їжею або герметичному корпусі), будуть розширюватися

при зниженні зовнішнього тиску. Це дозволяє тестувати міцність ущільнень та ризик "здуття" або розгерметизації упаковки.

- випаровування та дегазація. При низькому тиску рідини закипають при нижчих температурах, а деякі тверді матеріали можуть почати виділяти леткі сполуки (дегазація).

Електричні ефекти:

- зниження діелектричної міцності. Повітря є природним ізолятором. При зниженні тиску (і, відповідно, щільності повітря) його ізоляційні властивості значно погіршуються. Це різко збільшує ризик електричного пробою (дуги або коронного розряду) між провідниками, які в умовах нормального тиску працювали б стабільно. Перевірка надійності високовольтних компонентів авіоніки є однією з головних функцій цих камер.

Теплові ефекти:

- зниження ефективності конвекції. Більшість електронних систем покладаються на повітря для конвективного охолодження (передачі тепла). У розрідженій атмосфері на висоті цей механізм тепловідведення стає набагато менш ефективним, що може призвести до перегріву компонентів.

Принцип роботи полягає барометрів у відкачуванні повітря з герметичної робочої камери за допомогою вакуумного насоса. Спеціалізовані датчики та контролер регулюють роботу насоса для досягнення та підтримки заданого рівня тиску, який зазвичай вимірюється в Паскалях, мілібарах або футах/метрах над рівнем моря.

Камери поділяються на два основні типи:

- стандартні висотні камери – моделюють лише низький тиск, іноді в поєднанні з кімнатною температурою.

- комбіновані камери – це більш поширений та функціональний тип, який дозволяє одночасно контролювати тиск і температуру. Це дозволяє відтворювати реалістичні сценарії, наприклад, умови на висоті 12 000 метрів

(де тиск низький, а температура може сягати -55°C). Існують також камери, що додатково контролюють вологість.

Хоча гіпобаричні камери також використовуються для фізіологічних тренувань людей (пілотів, альпіністів) для адаптації до умов гіпоксії (низького вмісту кисню), у промисловості та інженерії їх основні сфери застосування такі:

- аерокосмічна та оборонна промисловість – випробування авіоніки, датчиків, супутникових компонентів та військової електроніки на стійкість до перегріву та електричного пробую на робочих висотах.

- автомобільна промисловість – тестування датчиків та електронних блоків керування (ECU), які мають коректно працювати не лише на рівні моря, але й у високогірних районах.

- Пакування – тестування герметичності медичної стерильної упаковки, пакетів для харчових продуктів та інших контейнерів, що транспортуються авіаційним транспортом, для запобігання їх розриву чи розгерметизації [6].

1.2 Типова конструкція та основні компоненти кліматичних камер

Кліматична камера, по суті, є замкненою системою, призначеною для точного відтворення та контролю специфічних умов навколишнього середовища, насамперед температури та відносної вологості, в обмеженому робочому об'ємі [7]. Незалежно від конкретного типу (наприклад, камера тепла/холоду, камера вологості чи камера термічного шоку), більшість сучасних кліматичних камер мають подібну базову конструкцію, що складається з кількох ключових функціональних вузлів.

Основними компонентами типової кліматичної камери є:

- робочий простір (тестовий об'єм). Це герметична внутрішня камера, виготовлена, як правило, з нержавіючої сталі для стійкості до корозії та екстремальних температур. Зовнішній корпус камери відділений від робочого простору шаром високоефективної теплоізоляції (наприклад, пінополіуретану або мінеральної вати) для мінімізації теплообміну з навколишнім середовищем.

– система циркуляції повітря: Критично важливий елемент для забезпечення однорідності та стабільності умов у робочому об'ємі. Зазвичай це потужний відцентровий вентилятор або система вентиляторів, розміщених у спеціальному технічному відсіку (пленумі). Вони створюють примусовий потік повітря, який проходить через нагрівачі, випарники та датчики, а потім рівномірно розподіляється по всьому тестовому об'єму [8].

– система нагріву: Найчастіше реалізується за допомогою електричних трубчастих нагрівачів (ТЕНів), розташованих у потоці циркуляційного повітря. Їхня потужність регулюється системою керування для точного досягнення та підтримки заданої температури.

– система охолодження: Основа більшості кліматичних камер. Це компресійна холодильна машина, що складається з компресора, конденсатора (з повітряним або водяним охолодженням), дроселюючого пристрою та випарника. Випарник є теплообмінником, який розміщується безпосередньо в каналі циркуляції повітря та "забирає" тепло з робочого об'єму. Для досягнення наднизьких температур (наприклад, -40°C до -80°C) часто використовуються каскадні холодильні системи з двома компресорами та різними типами холодоагентів [9].

– система зволоження: Відповідає за підвищення відносної вологості. Найпоширеніші методи включають:

– парогенератор: Нагріває демінералізовану воду до кипіння, і пара впорскується в потік повітря.

– ультразвуковий випарник: Створює дрібнодисперсний "холодний" туман.

– випарник "водяна баня": Повітря проганяється над поверхнею нагрітої води.

– система осушення: Зазвичай реалізується за рахунок основної системи охолодження. Повітря з робочого об'єму проганяється через холодний випарник, температура поверхні якого нижча за точку роси. Волога

конденсується (або намерзає) на випарнику, тим самим знижуючи абсолютний вміст вологи в повітрі [28].

– система керування та датчики: "мозок" камери, що координує роботу всіх перерахованих вище систем. Сучасні камери використовують програмовані логічні контролери (PLC) або мікропроцесорні регулятори. Вони безперервно отримують дані від високоточних датчиків температури (зазвичай платинових термометрів опору, наприклад, Pt100) та датчиків вологості (найчастіше ємнісного типу або психрометричних). Саме точність і стабільність цих датчиків є об'єктом калібрування [7, 9].

– допоміжні елементи: включають оглядове вікно (зазвичай багатошарове, з підігрівом проти запотівання), технологічні отвори (кабельні порти) для підключення випробовуваного обладнання, систему освітлення та механізми безпеки (захист від перегріву, реле тиску тощо).

Узгоджена робота цих компонентів під керуванням контролера дозволяє створювати стабільні кліматичні умови або виконувати складні циклічні профілі випробувань, що вимагаються міжнародними стандартами, такими як серія ІЕС 60068 [7].

1.3 Нормативно-правова база та стандартизація у сфері калібрування кліматичних камер

Забезпечення єдності вимірювань та достовірності результатів, отриманих за допомогою кліматичних камер, суворо регламентується. Нормативно-правова база в цій галузі є багаторівневою системою, що включає загальне законодавство у сфері метрології, міжнародні стандарти випробувань та спеціалізовані методичні настанови з калібрування.

Основоположним документом, що регулює всі аспекти метрологічної діяльності в країні, є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (№ 1314-VII) [10]. Цей закон встановлює правові, організаційні та наукові засади для забезпечення єдності вимірювань, визначає поняття калібрування та встановлює вимоги до калібрувальних лабораторій.

Діяльність цих лабораторій безпосередньо регламентується стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [11]. Цей стандарт є національною імплементацією міжнародного стандарту та є обов'язковим для лабораторій, що прагнуть отримати акредитацію та довести свою технічну компетентність і здатність генерувати достовірні результати калібрувань.

Загальні ж принципи та порядок проведення самого калібрування засобів вимірювальної техніки в Україні історично визначалися стандартом ДСТУ 3989-2000 «Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення...» [12].

Хоча стандарти на випробування не завжди описують як калібрувати камеру, вони встановлюють жорсткі вимоги до параметрів, які ця камера повинна підтримувати (наприклад, стабільність, однорідність температури). Саме для підтвердження цих параметрів і проводиться калібрування.

Ключовою міжнародною серією стандартів у цій галузі є ІЕС 60068 «Environmental testing» (Випробування на вплив зовнішніх чинників), яка гармонізована та впроваджена в Україні як серія ДСТУ EN 60068. Найважливіші частини включають:

- ДСТУ EN 60068-1:2022 – містить загальні положення та настанови [13].
- ДСТУ EN 60068-2-1 – Випробування А: Холод.
- ДСТУ EN 60068-2-2 – Випробування В: Сухе тепло.
- ДСТУ EN 60068-2-14 – Випробування N: Зміна температури (термічний удар).
- ДСТУ EN 60068-2-30 – Випробування Db: Волога спека (циклічний режим).
- ДСТУ EN 60068-2-38 – Випробування Z/AD: Комбіноване випробування температури/вологості (циклічне).

Ці стандарти визначають, які саме умови має відтворювати камера, і, відповідно, які характеристики підлягають перевірці під час її калібрування.

Через відсутність єдиного, глобально затвердженого стандарту ISO чи ІЕС, який би детально описував процедуру калібрування кліматичних камер, у світовій та українській практиці склався консенсус щодо використання кількох ключових методичних документів:

– ІЕС 60068-3-5:2018 «Supporting documentation and guidance - Confirmation of the performance of temperature chambers» – цей стандарт є фундаментальним, оскільки надає детальні методики для підтвердження характеристик камер (оцінка стабільності, градієнта, коливання температури), що є основою для калібрування [14].

– DKD-R 5-7:2018 «Calibration of Climatic Chambers» це настанова, розроблена Німецькою службою калібрування (DAkkS, раніше DKD). На сьогодні вона є де-факто міжнародним стандартом і найбільш поширеною методикою для калібрування кліматичних камер у Європі, включно з Україною. Вона детально описує процедури, необхідну кількість датчиків (зазвичай 9 або 15, залежно від об'єму камери), їх розміщення в робочому об'ємі та методику розрахунку невизначеності вимірювань [15].

– EURAMET Calibration Guide No. 20 «Guidelines on the Calibration of Temperature and/or Humidity Controlled Enclosures» – ця настанова від Європейської асоціації національних метрологічних інститутів (EURAMET) також є авторитетним джерелом, що узагальнює найкращі практики та узгоджується з підходами, викладеними в DKD-R 5-7 та ІЕС 60068-3-5 [16].

2 МЕТОДИ КАЛІБРУВАНЬ КЛІМАТИЧНИХ КАМЕР

2.1 Методи калібрування

Існує чотири суттєво різні методи, які можуть бути використані для калібрування кліматичної камери (вимірювання завжди відносяться до температури газу та відносної вологості):

Для першого методу калібрування виконується для корисного об'єму, охопленого точками вимірювання, у порожній камері (метод А).

Калібрування включає:

- визначення відхилення індикації (показу) від референтної точки вимірювання у розвантаженому стані;
- визначення просторової неоднорідності у порожньому корисному об'ємі;
- визначення часової нестабільності у порожньому корисному об'ємі;
- визначення впливу випромінювання для референтної точки вимірювання;
- за запитом клієнта – визначення впливу завантаження у референтній точці вимірювання шляхом порівняння завантаженого та порожнього корисного об'єму.

Для другого методу калібрування виконується для корисного об'єму, охопленого точками вимірювання, у завантаженій камері (метод В). Завантаження може бути реалізоване відповідно до типового застосування користувача або шляхом заповнення щонайменше 40% корисного об'єму тестовими зразками. Для окремих досліджень та складових невизначеності діють правила першого методу. Вплив самого завантаження визначається додатковим вимірюванням у центральній точці вимірювання у розвантаженому стані.

Калібрування включає :

- визначення відхилення індикації від референтної точки вимірювання, кожне у завантаженому стані;
- визначення просторової неоднорідності у завантаженому корисному об'ємі;

- визначення часової нестабільності у завантаженому корисному об'ємі;
- визначення впливу випромінювання у референтній точці вимірювання;
- визначення впливу завантаження у референтній точці вимірювання шляхом порівняння завантаженого та порожнього корисного об'єму у всіх точках калібрування.

Для третього методу калібрування виконується для окремих точок вимірювання у кліматичній камері, які не утворюють корисний об'єм (метод С).

Калібрування включає :

- визначення відхилення індикації між вимірюванням у точці вимірювання та індикацією як у завантаженому, так і в розвантаженому стані;
- визначення локальної просторової неоднорідності у точці вимірювання;
- визначення часової нестабільності у точці вимірювання;
- визначення впливу випромінювання у точці вимірювання;
- за запитом клієнта — визначення впливу завантаження у точці вимірювання шляхом порівняння завантаженого та порожнього корисного об'єму.

Четвертий метод калібрування виконується для корисного об'єму дуже малих порожніх кліматичних камер (внутрішній об'єм до 70 л) шляхом діагонального розташування трьох датчиків температури (метод D). Просторовий центр утворює референсну точку вимірювання.

Калібрування включає :

- визначення відхилення індикації між індикацією та референсною точкою вимірювання у розвантаженому стані;
- визначення просторової неоднорідності у порожньому корисному об'ємі;
- визначення часової нестабільності у порожньому корисному об'ємі;
- визначення впливу випромінювання для референсної точки вимірювання;
- за запитом клієнта – визначення впливу завантаження для референсної точки вимірювання шляхом порівняння завантаженого та порожнього корисного об'єму.

2.2 Розташування точок вимірювання

2.2.1 Калібрування для корисних об'ємів за методом (А) або (В)

Для калібрувань за методами (А) та (В) вимірювання повинні проводитися у кількох місцях корисного об'єму. Для корисного об'єму до 2000 літрів специфікації щодо кількості та просторового положення точок вимірювання повинні бути встановлені відповідно до DIN EN 60068, Частина 3-5, тобто точки вимірювання утворюють кутові точки та просторовий центр паралелепіпеда, який охоплює корисний об'єм (9 точок вимірювання). Для корисних об'ємів > 2000 л простір корисного об'єму повинен бути додатково охоплений віртуальною вимірювальною решіткою, тобто точки вимірювання мають бути розташовані у корисному об'ємі у формі кубічної решітки з максимальною відстанню 1 м між точками вимірювання.

За запитом клієнта можливі інші позиції. Однак має бути забезпечено, що корисний об'єм охоплений об'ємом, утвореним точками вимірювання, що максимальна відстань між сусідніми точками вимірювання не перевищує 1 м і що визначаються просторові екстремальні значення кліматологічних величин для корисного об'єму (всі умови повинні виконуватися одночасно). Вибір альтернативних точок вимірювання, можливий, якщо вони описані в сертифікаті калібрування і дотримані зазначені умови як мінімальні вимоги.

Результат калібрування дійсний тільки для об'єму, охопленого точками вимірювання. Просторова інтерполяція виміряних значень дозволяється лише для корисного об'єму, обмеженого точками вимірювання. Зазначена невизначеність вимірювання, по відношенню до референсної точки вимірювання, застосовується до всього корисного об'єму. Інтерполяція складових невизначеності не допускається. Екстраполяція результатів вимірювання за межі об'єму, охопленого точками вимірювання, не допускається. Розміри внутрішнього об'єму кліматичної камери та обране

положення точок вимірювання повинні бути наведені в сертифікаті калібрування у вигляді ескізу.

2.2.2 Калібрування точок вимірювання за методом (С)

Калібрування, обмежені окремими місцями в межах корисного об'єму (метод С), допустимі лише за особливим запитом клієнта. У цьому випадку результат калібрування дійсний тільки для досліджених точок вимірювання. Це має бути зазначено в сертифікаті калібрування. Як об'єкт калібрування в сертифікаті слід вказати "точка(и) вимірювання в кліматичній камері" .

Внесок локальної просторової неоднорідності в точках вимірювання повинен визначатися для кожної точки вимірювання з використанням двох термометрів, розташованих на відстані приблизно від 2 см. до 5 см. Необхідно дотримуватися мінімальної відстані, що відповідає активній довжині сенсора . Один з цих термометрів розташовується в позиції, визначеній для заявлення результату калібрування (точка вимірювання), а інший – на необхідній відстані. Результат вимірювання цього термометра використовується лише для визначення локальної просторової неоднорідності і не входить явно до результату калібрування. Якщо коефіцієнт випромінювання двох термометрів суттєво відрізняється, це вимірювання також може слугувати для визначення впливу випромінювання. Однак визначена різниця між двома термометрами повністю використовується для локальної неоднорідності. Цей внесок, таким чином, містить додаткові впливи випромінювання .

Для усунення впливу випромінювання на визначення локальної неоднорідності в точці вимірювання необхідно було б використати два ідентичні термометри з низьким коефіцієнтом випромінювання, розташовані на відстані 2–5 см. один від одного, і третій термометр з високим коефіцієнтом випромінювання в точці вимірювання. При калібруванні більше ніж однієї точки вимірювання за методом (С) (без охоплення корисного об'єму) використання двох термометрів в одній точці вимірювання можна уникнути, якщо внесок невизначеності через локальну неоднорідність та точність

позиціонування можна адекватно оцінити з різниці термометрів для окремих точок вимірювання. Процедура має бути описана в сертифікаті калібрування. Розміри внутрішнього об'єму та обране положення точок повинні бути вказані в сертифікаті у вигляді ескізу.

2.2.3 Калібрування корисного об'єму методом (D)

Як правило, калібрування корисного об'єму виконуються за методом (A) або (B). У випадку дуже малих внутрішніх об'ємів (до 70 л.), залежно від розмірів використовуваних еталонів, може виникнути завантажений стан. Це означає, що калібрування за методом (A) і, отже, твердження про розвантажений стан об'єкта калібрування було б неможливим. У цьому випадку метод (D) є допустимим як альтернатива методу (A). Для внутрішніх об'ємів > 70 л метод (D) виключений.

При використанні методу (D) обирається щонайменше 3 точки вимірювання. Вони повинні бути розташовані просторово по діагоналі (просторова діагональ) у корисному об'ємі. Необхідно вибрати щонайменше дві кутові точки та точку перетину просторової діагоналі. Додаткові точки на просторовій діагоналі можуть бути обрані опціонально.

Корисний об'єм для методу (D) отримується шляхом паралельного зміщення внутрішніх поверхонь кліматичної камери через кутові точки просторової діагоналі. Просторовий центр утворює референсну точку вимірювання. Крім того, в референсній точці вимірювання повинен бути розташований датчик для визначення впливу випромінювання. На відміну від методу (C), калібрування за методом (D) дійсне для всього корисного об'єму.

2.3 Процедури калібрування

2.3.1 Розташування точок вимірювання

Як правило, калібрування проводиться шляхом вимірювань у кількох точках корисного об'єму (методи (A) та (B)). Для камер з об'ємом до 2000 л вимоги до кількості та просторового розташування точок вимірювання повинні бути встановлені за аналогією з DIN EN 60068 частина 3-5, тобто точки

вимірювання формують кутові точки та просторовий центр паралелепіпеда, що охоплює корисний об'єм.

Для більших корисних об'ємів точки вимірювання повинні бути розташовані в корисному об'ємі у вигляді кубічної решітки з максимальною сталою решітки 1 м (тобто максимальна відстань між сусідніми точками вимірювання становить 1 м).

За запитом замовника можливі інші позиції, але необхідно забезпечити, щоб корисний об'єм був охоплений об'ємом, утвореним точками вимірювання, щоб максимальна відстань між сусідніми точками не перевищувала 1 м, і щоб були визначені просторові екстремальні значення кліматологічних величин для корисного об'єму. Вибір альтернативних точок вимірювання, наприклад, за аналогією з DIN 12880 частина 2, можливий, якщо вони описані в сертифікаті калібрування, і зазначені умови дотримані як мінімальні вимоги.

Результат калібрування дійсний лише для об'єму, охопленого точками вимірювання. Просторова інтерполяція значень вимірювання допустима лише для корисного об'єму, обмеженого точками вимірювання. Зазначена невизначеність вимірювання складається з максимальних значень окремих внесків. Вона дійсна для всього корисного об'єму. Інтерполяція внесків невизначеності не допускається. Екстраполяція результатів вимірювання за межі об'єму, охопленого точками вимірювання, не допускається.

Розміри загального об'єму камери та обране положення точок вимірювання повинні бути наведені в сертифікаті калібрування у вигляді ескізу.

2.3.2 Калібрування для точок вимірювання за методом (С)

Калібрування лише в окремих точках корисного об'єму (метод (С)) допустиме тільки за особливим запитом замовника. У цьому випадку результат калібрування дійсний лише для досліджених точок вимірювання, і це має бути зазначено в сертифікаті калібрування. Об'єктом калібрування зазначається «точка(и) вимірювання в кліматичній камері».

Внесок локальної просторової неоднорідності в точках вимірювання повинен бути визначений для кожної точки за допомогою двох термометрів, розташованих на відстані прибіл. 2–5 см (має бути обрана відстань, що відповідає принаймні активній довжині сенсора). Один із цих термометрів розташовується в позиції, визначеній для заявлення результату калібрування (точка вимірювання), а інший – на необхідній відстані (результат вимірювання цього термометра служить лише для визначення локальної просторової неоднорідності та не входить явно до результату калібрування).

Якщо коефіцієнт випромінювання (emissivity) двох термометрів суттєво відрізняється, це вимірювання може також служити для визначення ефекту випромінювання. Різниця, визначена між температурами двох термометрів, однак, повністю використовується для локальної неоднорідності, тому додаткові ефекти випромінювання вже містяться в цьому внеску. Щоб усунути вплив випромінювання на визначення локальної неоднорідності, слід було б використовувати два ідентичні термометри з низьким коефіцієнтом випромінювання, розташовані на відстані 2–5 см один від одного, а також третій термометр з високим коефіцієнтом випромінювання.

При калібруванні для більш ніж однієї точки вимірювання згідно з методом (C) (без охоплення корисного об'єму), використання двох термометрів в одній точці вимірювання можна опустити, якщо внесок невизначеності через локальну неоднорідність і точність позиціонування адекватно оцінено з різниці термометрів для окремих точок вимірювання. Процедура має бути описана в сертифікаті калібрування. Розміри загального об'єму камери та обране положення точок вимірювання повинні бути наведені в сертифікаті калібрування у вигляді ескізу.

2.4 Визначення просторової неоднорідності

2.4.1 Температурна неоднорідність

Просторова неоднорідність визначається як максимальне відхилення температури кутової або пристінної точки вимірювання (згідно з DIN EN

60068-3-5 або DIN 50011-12 відповідно) від контрольної точки (у більшості випадків – у центрі корисного об'єму). Вона визначається для всіх температур калібрування. Просторова неоднорідність досліджується лише при калібруванні для корисного об'єму за методами (А) або (В) (див. пункт 3.1.1). При калібруванні за методом (С) визначається лише локальна неоднорідність для оцінки внеску невизначеності через неоднорідність.

2.4.2 Неоднорідність вологості

Просторова неоднорідність визначається як максимальне відхилення відносної вологості кутової або пристінної точки вимірювання (згідно з DIN EN 60068-3-5 або DIN 50011-12 відповідно) від відносної вологості контрольної точки (у більшості випадків – у центрі корисного об'єму). Вона визначається для всіх вологостей калібрування. Для порожніх кліматичних камер, завдяки сильній циркуляції повітря, абсолютну вологість у корисному об'ємі можна вважати однорідною.

Просторову неоднорідність відносної вологості можна тоді розрахувати з неоднорідності температури повітря. Це не застосовується, якщо в корисному об'ємі є джерела або поглиначі водяної пари, якщо не забезпечено ефективне перемішування корисного об'єму, або якщо витоки призводять до повітрообміну з навколишнім середовищем. Просторова неоднорідність досліджується лише при калібруванні для корисного об'єму за методами (А) або (В).

2.5 Визначення часової нестабільності

Часова нестабільність для температури та вологості повітря визначається шляхом реєстрації часової зміни температури або відносної вологості відповідно, протягом періоду часу щонайменше 30 хвилин після досягнення умов сталого стану. Умови сталого стану вважаються досягнутими, коли більше не вимірюються систематичні зміни температури або відносної вологості.

Для кліматичних камер без циркуляції повітря вимірювання можуть проводитися лише через 30 хвилин після досягнення стабільності. Для вимірювання часової нестабільності необхідно записати щонайменше 30 значень вимірювання за 30 хвилин через більш-менш постійні проміжки часу. Вимірювання має бути виконано принаймні для центру корисного об'єму або для контрольної точки вимірювання відповідно, і для кожної температури та вологості калібрування. Часова нестабільність повинна бути досліджена для всіх методів калібрування.

2.6 Визначення ефекту випромінювання (радіаційного ефекту)

При температурах повітря в кліматичній камері, що відрізняються від температури навколишнього середовища, внутрішня стінка камери завжди має температуру, що відхиляється від температури повітря. За цих умов тіла в корисному об'ємі не досягають температури повітря через теплообмін випромінюванням. Це стосується як завантаження користувача, так і термометрів, що використовуються для калібрування.

Різниця між температурою повітря, яку потрібно визначити, і температурою термометра залежить від коефіцієнта випромінювання поверхні термометра, розмірів (діаметр ≥ 4 мм) і положення сенсора, швидкості повітря біля сенсора та різниці між температурою повітря та стінки. Ефект випромінювання зростає зі збільшенням різниці. Крім того, цей вплив зростає більш ніж пропорційно абсолютній температурі.

За запитом замовника вплив випромінювання на відхилення температури тіла від температури повітря також може бути визначений за допомогою тестового тіла, типового для замовника; при цьому використовується термометр з низьким коефіцієнтом випромінювання або з радіаційним екраном для вимірювання температури повітря, а термометр, введений у тестове тіло, служить для вимірювання температури тіла. Цей метод замінює визначення ефекту випромінювання. Він повинен бути описаний у сертифікаті та обмежує

результат цими типовими умовами. Це також найбільш підходить для замовників, які завжди зберігають подібні тіла в корисному об'ємі.

Випромінювання можна оцінити за однією з чотирьох наступних процедур:

1. Визначення ефекту випромінювання може відбуватися шляхом вимірювання температури в центрі корисного об'єму за допомогою термометра з якомога вищим коефіцієнтом випромінювання (тобто $\varepsilon > 0,6$) і термометра з якомога нижчим коефіцієнтом випромінювання (тобто $\varepsilon < 0,15$). Рекомендованим розташуванням є використання термометра з полірованою нікелевою поверхнею (низький ε) та термометра з тефлоновою поверхнею (високий ε). Можливі інші реалізації пар термометрів із суттєво різним коефіцієнтом випромінювання (наприклад, покриття золотом або чорніння). Коефіцієнт випромінювання обох поверхонь повинен бути відомий з достатньою точністю. Особливо для реалізації низького коефіцієнта випромінювання слід уникати окислення або шорсткості поверхні. Термометр з низьким коефіцієнтом випромінювання показує приблизну температуру повітря в камері. Температура повітря отримується екстраполяцією до $\varepsilon = 0$. Встановлена різниця між двома термометрами є мірою ефекту випромінювання, якщо температура стінки та температура повітря не ідентичні.

2. Температуру повітря також можна виміряти термометром, захищеним від впливу стінок радіаційним екраном. Цей екран повинен вентилюватися або за своєю конструкцією дозволяти термометру адекватно обдуватися циркулюючим повітрям. Зі встановленим екраном термометр вимірює приблизну температуру повітря, а після зняття екрана — «радіаційну температуру», тобто температуру під впливом випромінювання. Встановлена різниця між двома вимірюваннями є мірою ефекту випромінювання, якщо температура стінки відхиляється від температури повітря.

3. Вимірювання температури стінки та приблизне вимірювання температури повітря за допомогою термометра з низьким коефіцієнтом випромінювання або

термометра з радіаційним екраном дозволяє оцінити максимальний ефект випромінювання.

4. Для температур від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ефект випромінювання не потребує метрологічного визначення і можна припустити, що він вносить максимальний внесок $0,3\text{ K}$ у невизначеність вимірювання. Якщо різниця між температурою навколишнього середовища та температурою повітря (в кліматичній камері) під час калібрування перевищує 30 K .

Процедури 1 та 2 спрямовані на якомога надійніше вимірювання реальної температури повітря. Вони не служать для оцінки впливу випромінювання на температуру тіла в корисному об'ємі. Процедура 3, однак, дозволяє, крім визначення температури повітря, зробити оцінку найгіршого випадку відхилення температури тіла в корисному об'ємі від температури повітря⁸³. Фактична температура тестового завантаження, розміщеного в корисному об'ємі, може бути визначена з якомога меншою невизначеністю лише за допомогою відкаліброваного термометра в самому завантаженні.

За зазначених умов процедура 4 надає оцінку впливу випромінювання на невизначеність вимірювання. У методах калібрування (A)–(C) ефект випромінювання повинен бути врахований. Результатом зазначаються вимірювання з найменшим коефіцієнтом випромінювання ($\varepsilon < 0,15$). Корекція результатів вимірювання на ефект випромінювання до $\varepsilon = 0$ не проводиться, але можлива за запитом замовника (зазначається в сертифікаті калібрування).

2.7 Калібрування вологості

Для калібрування відносної вологості в кліматичній камері з циркуляцією повітря можна визначити абсолютну вологість або точку роси T_d чи точку і нею T_f відповідно в центрі корисного об'єму і розрахувати просторовий розподіл відносної вологості на основі розподілу, виміряного для температури повітря.

Ця процедура повинна бути задокументована в сертифікаті калібрування, а отримані внески до невизначеності повинні бути розраховані (для просторової температурної неоднорідності необхідно врахувати невизначеність

вимірювання температури). Однак ця процедура може застосовуватися лише за умови виконання передумов згідно з пунктом 3.2.2.

Як альтернатива, розподіл вологості в корисному об'ємі також може бути визначений вимірюваннями відносної вологості в точках вимірювання за аналогією з визначенням розподілу температури. Часова стабільність повинна визначатися для відносної вологості в контрольній точці вимірювання.

3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

3.1 Внески в невизначеність

Невизначеність, яку необхідно вказати, складається з невизначеності вимірювання температури та/або відносної вологості з використанням еталонних вимірювальних приладів, невизначеностей, що виникають через індикатори кліматичної камери, внесків часового та просторового розподілів у корисному об'ємі, а також ефектів завантаження.

Оскільки кліматичні камери служать для реалізації визначених температур і вологості повітря, у сертифікаті калібрування слід вказувати невизначеність, приписану до генерованих температур і вологості повітря. Температура випробувальних зразків у корисному об'ємі може суттєво відрізнятися від температури повітря.

У разі використання кліматичної камери замовник у більшості випадків може визначити температуру випробувальних зразків з меншою невизначеністю, використовуючи калібрований термометр.

Температура визначених випробувальних тіл та приписана їм невизначеність можуть бути вказані за запитом замовника з точним зазначенням умов вимірювання та самих тіл.

Якщо неможливо визначити окремі впливи на результат калібрування та їхню невизначеність, необхідно оцінити та врахувати їхній максимально можливий внесок у невизначеність вимірювання. У сертифікаті калібрування слід зазначити, що відповідний вплив було лише оцінено у заявленій невизначеності, а також вказати джерело цієї оцінки.

Просторова інтерполяція внесків у невизначеність не допускається. Слід зазначити, що невизначеності залежать від умов використання, тому умови вимірювання під час калібрування повинні бути описані якомога повніше. Умови калібрування повинні бути узгоджені до початку робіт, щоб бути якомога ближчими до умов використання у замовника.

3.2 Просторова неоднорідність

Просторова неоднорідність визначається як максимальне відхилення відносної вологості або температури в кутовій або пристінній точці вимірювання (згідно з DIN EN 60068-3-5 або DIN 50011-12) від опорної точки вимірювання (як правило, у центрі корисного об'єму). Вона еквівалентна напівширині внеску з прямокутним розподілом і математичним сподіванням 0.

Для пов'язаних стандартних невизначеностей отримано наступні рівняння:

$$u(\delta_{T_{inhom}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|T_{ref} - T_i|,$$

$$u(\delta_{h_{inhom}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|h_{ref} - h_i|$$

Просторову неоднорідність слід враховувати в методах калібрування (А)–(С) для всіх температур і вологості калібрування. У методах (А) та (В) це дійсно для кожної точки всього корисного об'єму, а в методі (С) – лише для відповідних точок вимірювання.

3.3 Часова нестабільність

Часова нестабільність визначається на основі зареєстрованої часової зміни температури або відносної вологості протягом періоду не менше 30 хвилин після досягнення сталого режиму. Максимальне відхилення протягом 30 хвилин від середнього значення за часом формулюється як напівширина внеску з прямокутним розподілом і математичним сподіванням 0.

Отримано наступні значення для стандартних невизначеностей:

$$u(\delta_{T_{instab}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|\bar{T} - T_i|,$$

$$u(\delta_{h_{instab}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|\bar{h} - h_i|$$

Часова нестабільність має враховуватися в методах (А)–(С) при всіх температурах і вологості калібрування

3.4 Вплив випромінювання (радіаційний ефект)

Для оцінки внеску радіаційного ефекту в невизначеність вимірювання допустимі чотири процедури (див. пункт 3.4).

Процедура 1: 20% від визначеної різниці враховується як напівширина прямокутного розподілу:

$$u(\delta_{T_{\text{radiation}}}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|T_{lc} - T_{hc}|$$

Процедура 2: 100% від визначеної різниці враховується як напівширина прямокутного розподілу:

$$u(\delta_{T_{\text{radiation}}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|T_{lc} - T_{hc}|$$

Процедура 3: 10% від визначеної різниці враховується як напівширина прямокутного розподілу:

$$u(\delta_{T_{\text{radiation}}}) = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Max}|T_{lc} - T_{hc}|$$

Якщо вимоги до коефіцієнтів випромінювання термометрів не дотримані, внески в невизначеність повинні бути збільшені.

Процедура 4: Як напівширина прямокутного розподілу враховується значення 0,3 К:

$$u(\delta_{T_{\text{radiation}}}) = \frac{0,3K}{\sqrt{3}}$$

Радіаційний ефект слід враховувати у всіх методах калібрування (А)–(С) для всіх температур. У сертифікаті калібрування вказуються максимальні різниці, визначені відповідною процедурою (без вагових коефіцієнтів 0,1 або 0,2).

3.5 Вплив умов навколишнього середовища і роздільна здатність індикаторів

Умови навколишнього середовища під час калібрування зазначаються в сертифікаті. Вплив умов, що відрізняються від умов калібрування, повинен

бути оцінений, якщо це важливо для використання камери. За необхідності слід вказати додаткові внески невизначеності для таких відмінних умов.

Роздільна здатність індикаторів температури та вологості входить як внесок невизначеності з прямокутним розподілом. Найменша роздільна здатність становить 0,5 розряду, що є напівшириною розподілу

3.6 Обробка результатів вимірювань і розрахунків невизначеності вимірювань під час калібрування

3.6.1 Вимірювання температури в повітряному термостаті

Під час калібрування оцінюється відхилення температури в робочому об'ємі ПТ в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$), тоді модельне рівняння вимірювання визначається наступною формулою (1):

$\Delta T_{\text{ПТ}}$ – визначають як різницю між загальним середнім значенням температури по всіх позиціях вимірювання робочим еталонним термометром і середнім значенням, знятих з дисплея ПТ при номінальному значенні температури;

$\overline{T}_{\text{std}}$ – обчислюється за формулою (1.1)

$$\overline{T}_{\text{std}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overline{T}_{j\text{std}} \quad (1.1)$$

де: $\overline{T}_{\text{pstd}}$ – середнє значення температури в $^{\circ}\text{C}$ в кожній j позиції ($j = 1 \dots 9$), визначається за формулою (1.1.1);

k – число позицій еталонного робочого термометра розташованого в робочому об'ємі ПТ.

$$\overline{T}_{j\text{std}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ij\text{std}} \quad (1.1.1)$$

де $T_{ij\text{std}}$ – температура в $^{\circ}\text{C}$ при i -му вимірюванні ($i = 1 \dots n$) в кожній позиції робочого еталонного термометра,

n – число вимірювань,

j – порядковий номер позиції еталонного робочого термометра ($j = 1 \dots 9$) розташованого в робочому об'ємі ПТ,

i – порядковий номер вимірювання для кожної позиції робочого еталонного термометру.

$\overline{T_{mi1}}$ - обчислюють по формулі (1.2)

$$\overline{T_{und}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{iind} \quad (1.2)$$

де T_{iind} – температура в °С при i -му вимірюванні ($i = 1 \dots n$) на дисплеї ПТ;

n – число вимірювань;

i – номер вимірювання на дисплеї ПТ.

Стандартна невизначеність температурного відхилення ПТ в °С обчислюється за формулою (2):

$$u_c(\Delta T_{ПТ}) = \sqrt{u(\delta_{Trstd})^2 + u(\delta_{Tstd})^2 + u(\delta_{ind})^2 + u(\delta_{Tinstar})^2 + u(\delta_{Tinhount})^2 + u(\delta_{Tradi})^2 + u(\delta_{Tloadi})^2 + u(\delta_{Trex.III})^2} \quad (2)$$

$u(\delta_{Trstd})$ – стандартну невизначеність вимірювання температури робочим еталонним термометром (випадкова складова) в °С, яка оцінена за типом А, обчислюють за формулою (2.1).

$$u(\delta_{Trstd}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{T}_{1std} - \bar{T}_{3td})^2}{n(n-1)}}, \quad (2.1)$$

де n - число позицій робочого еталонного термометра розташованого в робочому об'ємі ПТ.

$u(\delta_{Tstd})$ – стандартну невизначеність обумовлену робочим еталонним термометром, оцінену за типом В, обчислюють за формулою (2.2).

$$u(\delta_{Tstd}) = \frac{U_{Tstd}}{2} \quad (2.2)$$

де U_{Tstd} – розширена невизначеність робочого еталонного термометру із сертифікату калібрування, °С.

$u(\delta_{ind})$ – стандартну невизначеність вимірювання температури в °С за показами дисплея (індикації) ПТ, (випадкова складова) оцінена за типом А, обчислюється за формулою (2.3).

$$u(\delta_{T_{ind}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{iind} - T_{ind})^2}{n(n-1)}}. \quad (2.3)$$

$u(\delta_{T_{inhom}})$ – стандартну невизначеність обумовлену негомогенністю ПТ в °С, оціненою за типом В, обчислюється за формулою (2.4)

$$u(\delta_{T_{inhom}}) = \frac{\delta T_{inhom}}{\sqrt{3}}, \quad (2.4)$$

де поправку температурної негомогенності δT_{inhom} визначають за формулою (2.4.1) як максимальну різницю між середнім значенням температури у референтній позиції та середнім у кожній позиції вимірювання Референтною вважають позицію у центрі робочого об'єму.

$$\delta T_{inhom} = \max | (\overline{T_{ref}} - \overline{T_{jstd}}) |, \quad (2.4.1)$$

де $\overline{T_{ref}}$ – середнє значення температури у референтній (центральної) позиції робочого об'єму ПТ, °С.

$u(\delta_{T_{instab}})$ – стандартну невизначеність обумовлену температурною нестабільністю у часі в °С, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (2.5)

$$u(\delta_{T_{instab}}) = \frac{\delta T_{instab}}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

Поправку температурної нестабільності у часі $\delta_{T_{instab}}$ обчислюють як максимальну різницю між загальним середнім значенням по всім позиціям вимірювання $\overline{T_{std}}$ і середнім в кожній позиції T_{jstd} (2.5.1):

$u(\delta_{T_{rad}})$ - стандартну невизначеність обумовлена радіаційним ефектом ПТ в °С, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (2.6):

$$u(\delta_{T_{rad}}) = \frac{\delta T_{rad}}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

Для визначення поправки ефекту радіації δT_{rad} визначають температуру стінки за формулою (2.6.1) як різницю між значенням температури у позиції з найменшим коефіцієнтом випромінювання (референтна позиція в центрі

робочого об'єму) та температурою внутрішньої стінки ПТ з найбільшим коефіцієнтом випромінення:

$$\delta T_{\text{rad}} = 0,1 \times \max |T_{\text{ref}} - T_{\text{wall}}|, \quad (2.6.1)$$

де T_{ref} – температура в центрі об'єму камери, °С; T_{wall} – температура внутрішньої стінки, °С.

Для ПТ з діапазоном температури від 0 °С до 50 °С ефект радіації становить 30% від K і дорівнює (2.6.2):

$$\delta T_{\text{rad}} = 0,3 K \quad (2.6.2)$$

де K – Кельвин.

$u(\delta T_{\text{load}})$ стандартна невизначеність обумовлена ефектом завантаженості ПТ в °С, оціненою за типом В, обчислюється за формулою (2.7)

$$u(\delta T_{\text{load}}) = \frac{\delta T_{\text{load}}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

Поправку ефекту завантаження δT_{load} визначають за формулою (2.7.1) як максимальну різницю між $n \geq 5$ значеннями температури у референтній позиції порожнього і $n \geq 5$ значеннями температури завантаженого ПТ. Ефект завантаження становить 20% від цього максимуму:

$$\delta T_{\text{load}} = 0,2 \cdot \max |T_{\text{ref}} - T_{\text{refload}}| \quad (2.7.1)$$

де T_{refload} - значення температури у референтній позиції при завантаженні, °С.

Поправку ефекту завантаження визначають на вимогу замовника при типовому завантаженні замовника або при завантаженні не менше 40% об'єму камери.

Стандартну невизначеність обумовлена роздільною здатністю ПТ, оціненою за типом В, визначають за формулою (2.7):

$$u(\delta T_{\text{res}} \parallel \text{IT}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

де d – роздільна здатність індикатора (дисплея) температурного блоку ПТ.

Таблиця 1. Бюджет невизначеності температурного відхилення ПТ:

Величина	Джерела невизначеності	Стандартна невизначеність	Закон розподілу	Вклад в сумарну невизначеність
$\delta_{T_{std}}$	Випадкова складова температури під час вимірювання робочим еталонним термометром	$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\overline{T}_{std} - T_{std})^2}{n(n-1)}}$	Нормальний	$u(\delta_{T_{std}})$
$\delta_{T_{std}}$	Невизначеність робочого еталонного термометра	$\frac{U_{T_{std}}}{2}$	Нормальний	$u(\delta_{T_{std}})$
δ_{ind}	Випадкова складова температури, визначеної за показами дисплея (індикації) ПТ	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{i\max} - \overline{T_{min}})^2}{n(n-1)}}$	Нормальний	$u(\delta_{ind})$
$\delta_{T_{inhom}}$	Температурна негомогенність ПТ	$\frac{\delta T_{inhom}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta_{T_{inhom}})$
$\delta_{T_{instab}}$	Температурна нестабільність у часі ПТ	$\frac{\delta T_{instab}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta_{T_{instab}})$
$\delta_{T_{rad}}$	Ефект радіації ПТ	$\frac{\delta T_{rad}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta_{T_{rad}})$

$\delta_{T_{\text{нади}}}$	Ефект завантаження ПТ	$\frac{\delta T_{\text{load}}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta T_{\text{load}})$
$\delta_{T_{\text{res}} \text{ ПТ}}$	Роздільна здатність індикатора ПТ	$\frac{\delta T_{\text{res, мГ}}}{2\sqrt{3}}$	Прямокутний	$u(\delta_{T_{\text{res}} \parallel \text{Tr}})$

3.7 Вимірювання вологості

Під час калібрування оцінюється відхилення значення вологості в робочому об'ємі ПТ у %, тоді модельне рівняння вимірювання визначається наступною формулою (3):

$$\Delta h_{\text{ПТ}} = \overline{h_{\text{std}}} - \overline{h_{\text{ind}}} + \delta \overline{h_{\text{rstd}}} + \delta h_{\text{std}} + \delta h_{\text{ind}} + \delta h_{\text{inhom}} + \delta h_{\text{instab}} + \delta h_{\text{load}} + \delta h_{\text{res, ПТ}}, \quad (3)$$

де:

$\Delta h_{\text{ПТ}}$ - відхилення індикації ПТ від показів робочого еталону, %;

$\overline{h_{\text{std}}}$ - загальне середнє значення вологості у % для j позицій ($j = 1 \dots 9$), виміряних робочим еталоном;

$\overline{h_{\text{tnd}}}$ - середнє значення вологості у %, визначене по дисплею (індикації) ПТ;

$\delta \overline{h_{\text{rstd}}}$ - поправка обумовлена випадковою складовою воогості при вимірюванні робочим еталоном, %;

δh_{std} - поправка обумовлена робочим еталоном, %;

δh_{ind} - поправка обумовлена випадковою складовою вологості, визначеною за показами дисплея (індикації) ПТ, %;

δh_{inhom} - поправка обумовлена негомогенністю ПТ, %;

δh_{instab} - поправка обумовлена нестабільністю у часі ПТ, %;

δh_{load} - поправка обумовлена ефектом завантаженості ПТ, %;

$\delta h_{\text{res}} \text{ ПТ}$ - поравка обумовлена роздільною здатністю ПТ, %.

$\Delta h_{\text{ПТ}}$ - визначають як різницю між загальним середнім значенням вологості по всім позиціям вимірювання робочим еталоном і середнім значенням, знятих з дисплея ПТ при номінальному значенні вологості;

$\overline{h_{std}}$ – обчислюється за формулою (3.1)

$$\overline{h_{std}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overline{h_{jstd}} \quad (3.1)$$

де $\overline{h_{jstd}}$ – середнє значення вологості у % в кожній j позиції ($j = 1 \dots 9$), визначається за формулою (3.1.1);

k – число позицій еталонного робочого гігрометра розташованого в робочому об'ємі ПТ.

$$\overline{h_{jstd}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{ijstd}, \quad (3.1.1)$$

де h_{ijstd} – вологість у % при i -му вимірюванні ($i = 1 \dots n$) в кожній позиції робочого еталонного гігрометра, n – число вимірювань, j – порядковий номер позиції еталонного робочого гігрометра ($j = 1 \dots 9$) розташованого в робочому об'ємі ПТ, i – порядковий номер вимірювання для кожної позиції робочого еталонного гігрометра.

$\overline{h_{ind}}$ – обчислюють по формулі (3.2)

$$\overline{h_{ind}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{iind} \quad (3.2)$$

де T_{iind} – вологість у % при i -му вимірюванні ($i = 1 \dots n$) на дисплеї ПТ; n – число вимірювань; i – номер вимірювання на дисплеї ПТ.

Стандартна невизначеність відхилення вологості ПТ у % обчислюється за формулою (4):

$$u_c(\Delta h_{ПТ}) = \sqrt{u(\delta_{hrstd})^2 + u(\delta_{h_{std}})^2 + u(\delta_{h_{ind}})^2 + u(\delta_{h_{instanb}})^2 + u(\delta_{h_{inhoun}})^2 + u(\delta_{h_{iond}})^2 + u(\delta_{h_{rex III}})^2} \quad (4)$$

$u(\delta_{hrstd})$ – стандартну невизначеність вимірювання вологості робочим еталонним гігрометром (випадкова складова) у %, яка оцінена за типом А, обчислюють за формулою (4.1).

$$u(\delta_{hrstd}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{h}_{jstd} - \bar{h}_{std})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.1)$$

де n – число позицій робочого еталонного гігрометра розташованого в робочому об'ємі ПТ.

$u(\delta_{h_{std}})$ – стандартну невизначеність обумовлену робочим еталонним гігрометром, оцінену за типом В, обчислюють за формулою (4.2).

$$u(\delta_{h_{std}}) = \frac{U_{h_{std}}}{2} \quad (4.2)$$

де $U_{h_{std}}$ – розширена невизначеність робочого еталонного гігрометра із сертифіката калібрування, %.

$u(\delta_{h_{ind}})$ – стандартну невизначеність вимірювання вологості у % за показами дисплея (індикації) ПТ, (випадкова складова) оцінена за типом А, обчислюється за формулою (4.3).

$$u(\delta_{h_{ind}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{iind} - \bar{h}_{ind})^2}{n(n-1)}}. \quad (4.3)$$

$u(\delta_{h_{inhom}})$ – стандартну невизначеність обумовлену негомогенністю ПТ у %, оціненою за типом В, обчислюється за формулою (2.4)

$$u(\delta_{h_{inhom}}) = \frac{\delta h_{inhom}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

де поправку негомогенності δh_{inhom} визначають за формулою (4.4.1) як максимальну різницю між середнім значенням вологості у референтній позиції та середнім у кожній позиції вимірювання. Референтною вважають позицію у центрі робочого об'єму.

$$\delta h_{inhom} = \max |(\bar{h}_{ref} - \bar{h}_{jstd})|, \quad (4.4.1)$$

де \bar{h}_{ref} – середнє значення вологості у референтній позиції робочого об'єму ПТ, %.

$u(\delta h_{instab})$ - стандартну невизначеність обумовлену нестабільністю вимірювання вологості у часі у %, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (4.5)

$$u(\delta h_{instab}) = \frac{\delta h_{instab}}{\sqrt{3}} \quad (4.5)$$

Поправку нестабільності у часі δh_{instab} обчислюють як максимальну різницю між загальним середнім значенням по всіх позиціям вимірювання $\overline{h_{std}}$ і середнім в кожній позиції h_{jstd} (4.5.1):

$$\delta h_{instab} = \max|\overline{h_{std}} - \overline{h_{jstd}}| \quad (4.5.1)$$

$u(\delta h_{load})$ - стандартна невизначеність обумовлена ефектом завантаженості ПТ у %, оцінена за типом В, обчислюється за формулою (4.6)

$$u(\delta h_{load}) = \frac{\delta h_{load}}{\sqrt{3}}, \quad (4.6)$$

Поправку ефекту завантаження δh_{load} визначають за формулою (4.6.1) як максимальну різницю між $n \geq 5$ значеннями вологості у референтній позиції порожнього і $n \geq 5$ значеннями вологості завантаженого ПТ. Ефект завантаження становить 20% від цього максимуму:

$$\delta h_{load} = 0,2 \times \max|h_{ref} - h_{refload}| \quad (4.6.1)$$

де $h_{refload}$ - значення температури у референтній позиції при завантаженні, °С.

Стандартну невизначеність обумовлена роздільною здатністю ПТ, оціненою за типом В, визначають за формулою (4.7):

$$u(\delta h_{res,IT}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

d - роздільна здатність індикатора (дисплея) температурного блоку ПТ.

Таблиця 2. Бюджет невизначеності вимірювання вологості ПТ

Величина	Джерела невизначеності	Стандартна невизначеність	Закон розподілу	Вклад в сумарну невизначеність

$\delta_{h_{\text{stril}}}$	Випадкова складова вологості під час вимірювання робочим еталонним гігрометром	$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\overline{h_{\text{std}}} - \overline{h_{\text{std}}})^2}{n(n-1)}}$	Нормальний	$u(\delta_{h_{\text{std}}})$
$\delta_{h_{k+d}}$	Невизначеність робочого еталонного гігрометра	$\frac{U_{h_{\text{std}}}}{2}$	Нормальний	$u(\delta_{k+1})$
$\delta_{h_{\text{ind}}}$	Випадкова складова вологості, визначеної за показами дисплея (індикації) ПТ	$\sqrt{\frac{\sum_{i=A}^n (h_{\text{im and}} - \overline{h_{\text{imal}}})^2}{n(n-1)}}$	Нормальний	$u(\delta_{h_{\text{indi}}})$
$\delta_{h_{\text{inhom}}}$	Негомогенність ПТ	$\frac{\delta h_{\text{inhom}}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta_{h_{\text{rink nm}}})$
$\delta_{h_{\text{instab}}}$	Нестабільність у часі ПТ	$\frac{\delta h_{\text{instab}}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta_{h_{\text{inctrab}}})$
$\delta_{h_{\text{marit}}}$	Ефект завантаження ПТ	$\frac{\delta h_{\text{load}}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний (асиметричний)	$u(\delta h_{\text{load}})$
$\delta_{h_{\text{res ПТ}}}$	Роздільна здатність індикатора ПТ	$\frac{\delta h_{\text{res, МГ}}}{2\sqrt{3}}$	Прямокутний	$u(\delta_{h_{\text{res ПТ}}})$

3.8 Вимірювання температури в рідинному термостаті

Під час калібрування оцінюють відхилення температури в робочому об'ємі РТ. Модельне рівняння вимірювання в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) визначається за формулою (5):

$$\Delta T_{PT} = \overline{T_{std}} - \overline{T_{ind}} + \delta_{\overline{T_{rstd}}} + \delta T_{std} + \delta T_{ind} + \delta T_{inhom} + \delta T_{instab} + \delta T_{axial} + \delta T_{res,PT} \quad (5)$$

де: ΔT_{PT} – відхилення індикації РТ від показів робочого еталонного термометра;

$\overline{T_{std}}$ – загальне середнє значення температури в $^{\circ}\text{C}$ для j позицій ($j = 1 \dots 5$) робочого еталонного термометру;

$\overline{T_{ind}}$ – середнє значення температури в $^{\circ}\text{C}$, визначене по дисплею (індикації) РТ ($i = 1 \dots n, n \geq 10$);

$\delta_{\overline{T_{rstd}}}$ – поправка обумовлена випадковою складовою температури при вимірюванні робочим еталонним термометром, $^{\circ}\text{C}$;

δT_{ind} – поправка обумовлена випадковою складовою температури визначеною за показами дисплею (індикації) РТ, $^{\circ}\text{C}$;

δT_{std} – поправка обумовлена робочим еталонним термометром, $^{\circ}\text{C}$;

δT_{inhom} – поправка обумовлена негомogeneousстю РТ, $^{\circ}\text{C}$;

δT_{instab} – поправка обумовлена нестабільністю у часі РТ, $^{\circ}\text{C}$;

δT_{axial} – поправка обумовлена осьовою негомogeneousстю РТ, $^{\circ}\text{C}$;

$\delta T_{res,PT}$ – поправка обумовлена роздільною здатністю РТ, $^{\circ}\text{C}$.

ΔT_{PT} – визначають як різницю між загальним середнім значенням температури по всім позиціях вимірювання робочим еталонним термометром і середнім значенням показників температури, знятих з дисплея РТ при номінальній температурі.

$\overline{T_{std}}$ - обчислюють за формулою (5.1)

$$\overline{T_{std}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overline{T_{jstd}} \quad (5.1)$$

де $\overline{T_{std}}$ – середнє значення температури в $^{\circ}\text{C}$ для кожної j позиції ($j = 1..5$) визначається за формулою (5.1.1)

k – число позицій еталонного робочого термометра розташованого в робочому об'ємі РТ.

$$\overline{T_{jstd}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ijstd}, \quad (5.1.1)$$

де T_{ijstd} – температура в $^{\circ}\text{C}$ при i -му вимірюванні ($i = 1..n$) в кожній j позиції робочого еталонного термометру, n – число вимірювань, j – порядковий номер позиції еталонного робочого термометра ($j = 1..5$) розташованого в робочому об'ємі РТ, i – порядковий номер вимірювання для кожного робочого еталонного термометру.

$\overline{T_{mil}}$ – обчислюють по формулі (5.2)

$$\overline{T_{ind}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{iind} \quad (5.2)$$

де T_{iind} – температура $^{\circ}\text{C}$ при i -му вимірюванні ($i = 1..n$) на дисплеї РТ, n – число вимірювань, i – номер вимірювання на дисплеї РТ.

Для визначення $u_c(\Delta T_{PT})$ обчислюється за формулою (6):

$$u_c(\Delta T_{PT}) = \sqrt{u(\delta_{T_{rstd}})^2 + u(\delta_{T_{std}})^2 + u(\delta_{T_{ind}})^2 + u(\delta_{T_{inhom}})^2 + u(\delta_{T_{instab}})^2 + u(\delta_{T_{axial}})^2 + u(\delta_{T_{res ind}})^2} \quad (6)$$

$u(\delta_{\overline{T_{rstd}}})$ – стандартну невизначеність вимірювання температури робочим еталонним термометром (випадкова складова) в $^{\circ}\text{C}$ оціненою за типом А, обчислюють за формулою (6.1).

$$u(\delta_{\overline{T_{rstd}}}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\overline{T}_{1std} - \overline{T}_{std})^2}{n(n-1)}}, \quad (6.1)$$

де n – число позицій робочого еталонного термометра розташованого в робочому об'ємі РТ.

$u(\delta_{T_{std}})$ – стандартну невизначеність обумовлену робочим еталонним термометром в $^{\circ}\text{C}$, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (6.2).

$$u(\delta_{T_{std}}) = \frac{U_{T_{std}}}{2} \quad (6.2)$$

де $U_{T_{std}}$ – розширена невизначеність робочого еталонного термометру із сертифікату калібрування, $^{\circ}\text{C}$.

$u(\delta_{ind})$ – стандартну невизначеність вимірювання температури в $^{\circ}\text{C}$ за показами дисплея (індикації) ПТ (випадкова складова) оціненою за типом А, обчислюють за формулою (6.3).

$$u(\delta_{T_{ind}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{iind} - T_{ind})^2}{n(n-1)}}. \quad (6.3)$$

$u(\delta_{T_{inhom}})$ – стандартну невизначеність обумовлену негомогенністю РТ в $^{\circ}\text{C}$, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (6.4).

$$u(\delta_{T_{inhom}}) = \frac{\delta_{T_{inhom}}}{\sqrt{3}} \quad (6.4)$$

Для визначення поправки температурної негомогенності $\delta_{T_{inhom}}$ в кожній позиції вимірювання температури обчислюють різницю між мінімальним і максимальним з $n \geq 5$ вимірних значень, порівнюють отримані різниці між собою. Найбільша з них є значенням температурної негомогенності формула (6.4.1):

$$\delta_{T_{inhom}} = \max |T_{jmax} - T_{jmin}|, \quad (6.4.1)$$

де T_{jmax} – максимальне значення температури при $n \geq 5$ значень у j позиції, виміряне робочим еталонним термометром, в $^{\circ}\text{C}$;
 T_{jmin} – мінімальне значення температури при $n \geq 5$ значень у тій самій j позиції, виміряне робочим еталонним термометром, в $^{\circ}\text{C}$.

$u(\delta_{T_{axial}})$ – стандартну невизначеність обумовлену осьовою негомогенністю РТ в $^{\circ}\text{C}$, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (6.5)

$$u(\delta_{T_{axial}}) = \frac{\delta_{T_{axial}}}{\sqrt{3}} \quad (6.5)$$

Для визначення осьової негомгенності температури $\delta_{T_{\text{плитт}}}$ РТ вимірюють 4 значення температури у центральній позиції вимірювання: коли робочий еталонний термометр торкається дна, на 20 мм вище, на 40 мм вище і знову на дні. Осьову негомгенність РТ обчислюють за формулою (6.5.1):

$$\delta_{T_{\text{axial}}} = \sqrt{\frac{1}{4(4-1)} \cdot ((T_{\text{end1}} - \bar{T}_{\text{axial}})^2 + (T_{20\text{mm}} - \bar{T}_{\text{axial}})^2 + (T_{40\text{mm}} - \bar{T}_{\text{axial}})^2 + (T_{\text{end2}} - \bar{T}_{\text{axial}})^2)} \quad (6.5.1)$$

$$\text{де } \bar{T}_{\text{axial}} = \frac{T_{\text{end1}} + T_{20\text{mm}} + T_{40\text{mm}} + T_{\text{end2}}}{4},$$

T_{end1} – температура у центральній позиції вимірювання на початку циклу, коли робочий еталонний термометр торкається дна РТ, °С;

$T_{20\text{mm}}$ – температура у центральній позиції вимірювання, коли робочий еталонний термометр розташований на відстані 20 мм від дна РТ, °С;

$T_{40\text{mm}}$ – температура у центральній позиції вимірювання, коли робочий еталонний термометр розташований на відстані 40 мм від дна РТ, °С;

T_{end2} – температура у центральній позиції вимірювання в кінці циклу, коли робочий еталонний термометр торкається дна РТ, °С.

$u(\delta_{T_{\text{instab}}})$ – стандартну невизначеність обумовлену нестабільністю у часі РТ в °С, оціненою за типом В, обчислюють за формулою (6.6)

$$u(\delta_{T_{\text{instab}}}) = \frac{\delta_{T_{\text{instab}}}}{\sqrt{3}} \quad (6.6)$$

Поправку температурної нестабільності у часі $\delta_{T_{\text{instab}}}$ обчислюють як максимальну різницю між загальним середнім значенням по всім позиціям вимірювання і середнім в кожній позиції (4.6.1):

$$\delta_{T_{\text{instab}}} = \max |\overline{T_{\text{std}}} - \overline{T_{j\text{std}}}| \quad (6.6.1)$$

Стандартну невизначеність обумовлену роздільною здатністю РТ в °С оціненою за типом В, визначають по формулі (6.7)

$$u(\delta_{T_{\text{res PTP}}}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (6.7)$$

d – роздільна здатність індикатора температурного блоку РТ.

Таблиця 3. Бюджет невизначеності вимірювань температурного відхилення РТ

Величина	Джерела невизначеності	Стандартна невизначеність	Закон розподілу	Вклад в сумарну невизначеність
$\delta_{T_{\text{rstd}}}$	Випадкова складова температури під час вимірювання робочим еталонним термометром	$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\overline{T}_{\text{std}} - T_{\text{std}})^2}{n(n-1)}}$	Нормальний	$u(\delta_{T_{\text{rstd}}})$
$\delta_{T_{\text{std}}}$	Невизначеність робочого еталонного термометра	$\frac{U_{T_{\text{std}}}}{2}$	Нормальний	$u(\delta_{T_{\text{std}}})$
δ_{ind}	Випадкова складова температури визначеної за показами дисплея (індикації) ПТ	$\sqrt{\frac{\sum_{h=1}^n (\overline{T}_{\text{mal}} - T_{\text{mal}})^2}{n(n-1)}}$	Нормальний	$u(\delta_{\text{ind}})$

3.9 Розширена невизначеність вимірювання

Розширена невизначеність вимірювання визначається за формулою (7):

$$U(h_{\text{ПТ}}) = k \cdot u_c(h_{\text{ПТ}}) \quad (7)$$

$$U(T_{\text{ПТ і РТ}}) = k \cdot u_c(T_{\text{ПТ і РТ}}),$$

де k – коефіцієнт охоплення, що для рівня довіри 0,95 зазвичай дорівнює 2.

З метою перевірки методики розрахунку невизначеності під час калібрування кліматичних камер було проведено калібрування сухожарової шафи Binder FD56. Отримані результати вимірювань і розрахунків наведені у

розроблених в електронному вигляді (таблиця MS Excel) протоколі вимірювань бюджет невизначеності (Додаток А) та сертифікаті калібрування (Додаток Б).

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження проблеми калібрування кліматичних камер. Основним результатом роботи стала розробка уніфікованої форми електронного протокола з бюджетом невизначеності та сертифіката калібрування, що базується на сучасних нормативних вимогах та практичних аспектах експлуатації кліматичних камер.

Серед ключових аспектів роботи можна виділити систематизацію вимог до калібрування згідно з чинними стандартами, аналіз конструктивних особливостей сучасних кліматичних камер, розробку алгоритмів оцінки похибок та невизначеності вимірювань та створення практичних рекомендацій щодо проведення калібрувальних процедур.

Основними пропозиціями щодо впровадження результатів дослідження для метрологічних служб підприємств та організацій може бути використання і впровадження стандартизованих електронних протоколів калібрування.

Серед перспектив подальших досліджень галузі калібрування кліматичних камер можна виділити розширення методики для спеціалізованих типів кліматичних камер, дослідження впливу матеріалів на стабільність показників та автоматизація процесів калібрування з використанням сучасних рішень, наприклад, штучного інтелекту.

Практична цінність роботи полягає у можливості її використання для забезпечення єдності вимірювань у різних галузях промисловості, торгівлі та медицини та зручності використання методики завдяки розробленим електронним протоколам та бюджетам невизначеності, що сприятиме покращенню якості результатів вимірювань.

Апробація матеріалів кваліфікаційної роботи була проведена на XXII International Scientific and Technical Seminar “Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects” UM-2025.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кліматична камера: що це за техніка та для чого використовується // BFB.org.ua. — URL: <https://bfb.org.ua/klimatychna-kamera-shho-cze-za-tehnika-ta-dlya-chogo-vykorystovuyetsya>. — Дата звернення: 11 жовтня 2025 р.
2. Temperature and Humidity Test Chamber // Torontech. — URL: <https://torontech.com/temperature-and-humidity-test-chamber>. — Дата звернення: 11 листопада 2025 р.
3. Thermal Shock Chambers // IQS Directory. — URL: <https://www.iqsdirectory.com/articles/environmental-chamber/thermal-shock-chambers.html>. — Дата звернення: 13 жовтня 2025 р.
4. Випробування у соляному тумані // Вікіпедія : вільна енциклопедія. — URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Випробування_у_соляному_тумані. — Дата звернення: 11 листопада 2025 р.
5. A Comprehensive Guide to Salt Spray Testing // HLC Metal Parts. — URL: <https://www.hlc-metalparts.com/news/a-comprehensive-guide-to-salt-spray-testing-71821821.html>. — Дата звернення: 13 жовтня 2025 р.
6. Altitude Chambers // IQS Directory. — URL: <https://www.iqsdirectory.com/articles/environmental-chamber/altitude-chambers.html>. — Дата звернення: 16 жовтня 2025 р.
7. Hypobaric chamber // Wikipedia : The Free Encyclopedia. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Нупобаріс_камера. — Дата звернення: 16 жовтня 2025 р.
8. ДСТУ EN 60068-1:2015. *Випробування на вплив зовнішніх чинників. Частина 1. Загальні положення та настанови (EN 60068-1:2014, IDT)*. — [Чинний від 2016-01-01]. — Дата звернення: 20 жовтня 2025 р.
9. Клименко, В. С. *Методи та засоби кліматичних випробувань*. — Харків : Основа, 2018. — 310 с. — Дата звернення: 20 жовтня 2025 р.
10. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII // Верховна Рада України. — URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>. — Дата звернення: 22 жовтня 2025 р.

11. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. *Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT)*. — [Чинний від 2020-01-01]. — Дата звернення: 25 жовтня 2025 р.
12. ДСТУ 3989-2000. *Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів*. — [Чинний від 2001-07-01]. — Дата звернення: 25 жовтня 2025 р.
13. ДСТУ EN 60068-1:2022. *Випробування на вплив зовнішніх чинників. Частина 1. Загальні положення та настанови (EN 60068-1:2014, IDT; IEC 60068-1:2013, IDT)*. — [Чинний від 2023-12-31]. — Дата звернення: 30 жовтня 2025 р.
14. IEC 60068-3-5:2018. *Environmental testing – Part 3-5: Supporting documentation and guidance – Confirmation of the performance of temperature chambers*. — 2018. — Дата звернення: 30 жовтня 2025 р.
15. DAkkS-DKD-R 5-7:2018. *Calibration of Climatic Chambers // Deutscher Kalibrierdienst (German Calibration Service)*. — 2018. — Дата звернення: 5 листопада 2025 р.
16. EURAMET Calibration Guide No. 20. *Guidelines on the Calibration of Temperature and/or Humidity Controlled Enclosures*. — Version 5.0 (09/2017). — Дата звернення: 5 листопада 2025 р.

Додаток А

Калібрувальна лабораторія
Calibration laboratory

Протокол калібрування

№ 1 від 27.11.2025 сторінка 1 з 1

Об'єкт калібрування	Шафа сухожарова		
Тип (модель)	Binder FD-56	Серійний номер	20230000011199
Виробник	BINDER GmbH, Germany		
Замовник	Філія "Львівський елеватор" ТОВ "Захід-Агро МХП", 81432, Україна, Львівська обл., Самбірський р-н, с. Воцанці, вул. Центральна, 44		
Місце проведення робіт	Філія "Львівський елеватор" ТОВ "Захід-Агро МХП", 81432, Україна, Львівська обл., Самбірський р-н, с. Воцанці, вул. Центральна, 44		
Метод калібрування	DKD-R 5-7:2018. Calibration of Climatic Chambers		

Умови проведення калібрування

t, °C	19,9±0,2	RH, %	39,5±0,5	p, rPa	984,7
-------	----------	-------	----------	--------	-------

Еталони

Найменування, тип, номер	Інформація щодо калібрування		
Термометри-регистратори DLT-10-2Pt, зав.№240013; № 240014; № 240015; № 240016; № 240019	Сертифікат калібрування №	20250811-002	від 11.08.2025
	виданий	ПП «НВЦОВ ЮГ»	

Допоміжне обладнання

Найменування, тип, номер	Інформація щодо калібрування		
Високоточний термогігрометр і барометр Greisinger GFTB 200, зав.№34906770	Сертифікат калібрування №	UA/36/250207/000294	від 07.02.2025
	виданий	ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"	
	Сертифікат калібрування №	UA/39/250217/0153	від 17.02.2025
	виданий	ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"	
	Сертифікат калібрування №	UA/24/250218/0448	від 18.02.2025
	виданий	ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"	

продовження Додатка А

Результати калібрування

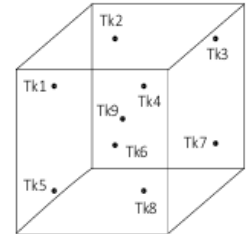
1 Опис, стан об'єкту калібрування

За результатами зовнішнього огляду та опробування стан визнаний задовільним.

2 Визначення основних параметрів

Таблиця 2.1 - Вимірювання температури, °C

Точка калібр.	Виставлене значення темп-ри	Показник	Виміряне значення температури					Середнє значення	Середнє значення виміряне PE	Похибка
			1	2	3	4	5			
80	80	Tind	80	80	80	80	80	80	80,9	0,9
		Tstd1						81,2		
		Tstd2						82,0		
		Tstd3						80,3		
		Tstd4						80,9		
		Tstd5						78,7		
		Tstd6						81,9		
		Tstd7						81,2		
		Tstd8						80,9		
		Tstd9 (Tref)						80,5		
		Twall						81,8		
105	105	Tind	105	105	105	105	105	105	106,2	1,2
		Tstd1						106,8		
		Tstd2						107,7		
		Tstd3						105,5		
		Tstd4						106,3		
		Tstd5						103,2		
		Tstd6						107,5		
		Tstd7						106,6		
		Tstd8						106,3		
		Tstd9 (Tref)						105,7		
		Twall						107,5		
130	130	Tind	130	130	130	130	130	130	131,1	1,1
		Tstd1						132,0		
		Tstd2						133,1		
		Tstd3						130,3		
		Tstd4						131,4		
		Tstd5						127,5		
		Tstd6						132,8		
		Tstd7						131,6		
		Tstd8						131,4		
		Tstd9 (Tref)						129,9		
		Twall						132,9		



Таблиця 2.2 - Розрахунок поправок і невизначеності вимірювання температури, °C

Виставлене значення темп-ри	Розрахунок поправок				Розрахунок невизначеності вимірювань												
	Поправка нестабільності у часі	Поправка непомогності	Поправка ефекту радіації	Поправка ефекту завантаження	Стандартна невизначеність вим-ння PE (тип A)	Стандартна невизначеність вим-ння індикатора (тип A)	Розширена невизначеність PE (U)	Стандартна невизначеність PE	Стандартна невизначеність нестабільності у часі	Стандартна невизначеність непомогності	Стандартна невизначеність ефекту радіації	Стандартна невизначеність ефекту завантаження	Дискретність індикатора камери (d)	Стандартна невизначеність дискретності індикатора	Сумарна стандартна невизначеність	Розширена невизначеність	Розширена невизначеність в опорній точці
80	0,00	1,76	0,14	0	0,0000	0	0,058	0,029	0,00	1,02	0,08	0,00	1	0,288675135	1,0616759	2,12	0,60
105	0,05	2,41	0,20	0	0,0093	0	0,058	0,029	0,03	1,39	0,12	0,00	1	0,288675135	1,424508	2,65	0,58
130	0,52	3,15	0,35	0	0,0560	0	0,058	0,029	0,30	1,82	0,20	0,00	1	0,288675135	1,8755692	3,76	0,84

Калібрувальна лабораторія
Calibration laboratory

Сертифікат калібрування
Calibration certificate

Реєстраційний № 1 від 27.11.2025
Reference number

Сторінка 2 з 3
Page of

Умови проведення калібрування

Calibration conditions

t, °C	19,9±0,2	RH, %	39,5±0,5	p, гПа	984,7
-------	----------	-------	----------	--------	-------

Еталони

Standards

Найменування, тип, номер Name, type, number	Інформація щодо калібрування Information of calibration
Термометри-реєстратори DLT-10-2Pt, зав.№240013; № 240014; № 240015; № 240016; № 240019	Сертифікат калібрування № 20250811-002 від 11.08.2025 виданий ПП «НВЦОВ ЮГ»

Допоміжне обладнання

Auxiliary equipment

Найменування, тип, номер Name, type, number	Інформація щодо калібрування Information of calibration
Високоточний термогігрометр і барометр Greisinger GFTB 200, зав.№34906770	Сертифікат калібрування № UA/36/250207/000294 від 07.02.2025 виданий ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"
	Сертифікат калібрування № UA/39/250217/0153 від 17.02.2025 виданий ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"
	Сертифікат калібрування № UA/24/250218/0448 від 18.02.2025 виданий ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"

Опис, стан об'єкту калібрування

Description and condition of the calibration object

За результатами зовнішнього огляду та опробування стан визнаний задовільним.

Результати калібрування, включаючи невизначеність

Calibration results including uncertainty

1 Результати вимірювання температури, °C

Задане значення температури	Покази еталонного термометра	Покази індикатора прилада, що калібрувався	Відхилення	Розширена невизначеність в корисному об'ємі
80	80,9	80	0,9	2,1
105	106,2	105	1,2	2,8
130	131,1	130	1,1	3,8

2 Просторовий розподіл температури, °C

Задане значення температури	Результат вимірювання температури еталонним термометром									Розширена невизначеність в опорній точці
	1	2	3	4	5	6	7	8	9 ref	
80	81,2	82,0	80,3	80,9	78,7	81,9	81,2	80,9	80,5	0,60
105	106,8	107,7	105,5	106,3	103,2	107,5	106,6	106,3	105,7	0,58
130	132,0	133,1	130,3	131,4	127,5	132,8	131,6	131,4	129,9	0,84

3 Результати для характеристики об'єму за температурою, °C

Задане значення температури	Нестабільність	Негомогенність	Радіаційний ефект
80	0,00	1,76	0,14
105	0,05	2,41	0,20
130	0,52	3,15	0,35

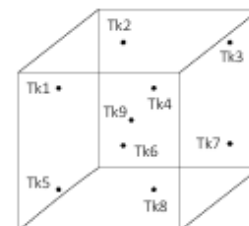


Схема розташування датчиків у робочому об'ємі

продовження Додатка Б

Калібрувальна лабораторія
Calibration laboratory PrJSC

Сертифікат калібрування
Calibration certificate

Реєстраційний № 1 **від** 27.11.2025
Reference number

Сторінка 3 **з** 3
Page of

Розширена невизначеність отримана шляхом множення стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення $k = 2$, що відповідає рівню довіри приблизно 95 % при допущенні нормального закону розподілу. Оцінювання невизначеності проведено у відповідності до EA-4/02 «Виразення невизначеності вимірювання при калібруванні».

The expanded uncertainty is obtained by multiplying the combined standard uncertainty by a coverage factor $k = 2$, that produces an interval having level of confidence is approximately equal 95 % assuming a normal distribution. The evaluation of uncertainty is conducting according to EA-4/02 «Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration».
