

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Маланчук Сергій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Проектування та метрологічний аналіз лабораторної установки для вимірювання вологості повітря

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня С.В. Маланчук

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Піндус Наталія Миколаївна к.т.н.,
доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Віталій ЦИХ

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 152- Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

« » 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Маланчуку Сергію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування та метрологічний аналіз лабораторної установки для вимірювання вологості повітря

керівник роботи Піндус Наталія Миколаївна к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "30" квітня 2025 року № 270/7

2. Строк подання студентом роботи 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічні описи до приладів: психрометр ВИТ-1, аспіраційний психрометр Ассмана, гігрометр точки роси НТ-607, датчик температури та вологості DHT11, датчик вологості ґрунту YL-69

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз методів та приладів для вимірювання вологості

2 Аналіз роботи спроектованої лабораторної установки та проведення за допомогою неї експериментальних досліджень

3. Метрологічний аналіз роботи лабораторної установки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. БР.МТ-05.00.00.001 Джерела похибок засобів вимірювальної техніки для вимірювання вологості

2. БР.МТ-05.00.00.002 Психрометричні таблиці, модельні рівняння їх побудови

3. БР.МТ-05.00.00.003 Результати експериментальних досліджень проведених з використанням психрометра ВИТ-1

4. БР.МТ-05.00.00.004 Результати експериментальних досліджень проведених з використанням аспіраційного психрометра Ассмана

5. БР.МТ-05.00.00.005 Результати експериментальних досліджень проведених з використанням приладу для вимірювання вологості ґрунту

6. БР.МТ-05.00.00.006 Результати експериментальних досліджень проведених з використанням гігрометра точки роси НТ-607

7. БР.МТ-05.00.00.007 Результати експериментальних досліджень проведених з використанням датчику DHT-11 моделі розумного будинку

8. БР.МТ-05.00.00.008 Лабораторна установка для вимірювання вологості

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗНС та БП		
нормо контроль	Лютак З.П., проф. каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання 05.05.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	15.05.2025	
2.	<i>Аналіз методів та приладів для вимірювання вологості</i>	01.06.2025	
3.	<i>Аналіз роботи спроектованої лабораторної установки та проведення за допомогою неї експериментальних досліджень</i>	10.06.2025	
4.	<i>Метрологічний аналіз роботи лабораторної установки</i>	15.06.2025	
5.	<i>Охорона праці</i>	15.06.2025	
6.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	20.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Маланчук С.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Піндус Н.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота: «Проектування та метрологічний аналіз лабораторної установки для вимірювання вологості повітря» Маланчук С.В., ІФНТУНГ, 2025, 74 с., 13 рис., 4 табл., 23 джерел.

Об'єкт дослідження: Методи та засоби вимірювання вологості.

Мета роботи: Створення діючої установки для вивчення методів та приладів вимірювання вологості для студентів спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології».

У бакалаврській роботі, спроектовано лабораторну установку для демонстрації різних методів вимірювання вологості, а саме: психрометричний метод, метод точки роси, електричних методів, для використання яких було розроблено програмний код. Розроблено та впроваджено в навчальний процес з дисципліни «Метрологія і технічні вимірювання в нафтогазовій промисловості» методичні вказівки до лабораторної роботи на базі спроектованої лабораторної установки для вимірювання вологості

ВОЛОГІСТЬ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ, ПСИХРОМЕТР, ҐРУНТ
ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА

ABSTRACT

Bachelor's Thesis: "Design and Metrological Analysis of a Laboratory System for Humidity Measurement" by Malanchuk S.V., IFNTUOG, 2025, 74 pages, 13 figures, 4 tables, 23 references.

Object of research: Methods and instruments for humidity measurement.

Purpose of the thesis: Development of a functional laboratory system for studying humidity measurement methods and instruments for students majoring in specialty 175 "Information and Measurement Technologies."

The bachelor's thesis presents the design of a laboratory system intended to demonstrate various humidity measurement methods, including the psychrometric method, dew point method, and electrical measurement methods, with dedicated software developed for these applications. Methodological guidelines for laboratory exercises based on the designed setup have been created and integrated into the curriculum of the course «Metrology and Technical Measurements in the Oil and Gas Industry».

HUMIDITY, UNCERTAINTY, PSYCHROMETER, SOIL LABORATORY SYSTEM

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ	10
1.1 Електричні сенсори.....	10
1.1.1 Ємнісні електричні гігрометри	12
1.1.2 Прилади електричного опору для вимірювання вологості.....	14
1.2 Психрометричний метод	14
1.2.1 Вимоги щодо використання психрометрів.....	15
1.2.2 Робота вологого термометра.....	16
1.2.3 Процедура проведення спостережень:.....	19
1.2.4 Використання термометрів опору	20
1.2.5 Принцип побудови та використання психрометричних таблиць	22
1.2.6 Аспіраційні психрометри та психрометр Ассмана.....	24
1.2.7 Повірка психрометрів	26
1.3 Конденсаційний метод.....	28
1.4 Спектрометри водяної пари	29
1.5 Механічні методи	30
1.6 Прилади для вимірювання вологості ґрунту	32
1.6.1 Діелектричні вимірювання вологості ґрунту	33
1.7 Висновки до розділу	33
2 АНАЛІЗ РОБОТИ СПРОЄКТОВАНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
2.1 Будова лабораторної установки.....	34
2.2 Процедура проведення спостережень із використанням психрометрів	36
2.3 Аналіз роботи спроектованого приладу для вимірювання вологості ґрунту.....	37
2.3.1 Аналіз технічних характеристик та роботи плати розробки Arduino UNO+WiFi R3.....	38
2.2.3 Опис програмного коду приладу для вимірювання вологості ґрунту	42
2.4 Аналіз роботи моделі розумного будинку.....	43
2.4.1 Світлова сигналізація із використанням NeoPixel.....	43

2.4.2	Будова моделі розумного будинку	44
2.4.3	Опис програмного коду моделі розумного будинку	45
2.5	Гігрометр точки роси типу NaboTest HT-607	45
2.6	Проведення дослідів за під час використання лабораторної установки	46
2.7	Висновки до розділу	48
3	МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ	49
3.1	Джерела похибок.....	49
3.1.1	Джерела похибок ємнісних електричних гігрометрів.....	50
3.1.2	Джерела похибок при використанні психрометрів	50
3.2	Технічні характеристики приладів	52
3.2.1	Технічні характеристики психрометра ВИТ-1.....	52
3.2.2	Технічні характеристики аспіраційного психрометра Ассмана .	52
3.2.3	Технічні характеристики гігрометра точки роси HT-607	53
3.2.4	Технічні характеристики датчика вологості ґрунту YL-69	54
3.2.5	Технічні характеристики датчика температури та вологості DHT11	55
3.3	Проведення експериментальних досліджень	56
3.4	Обробка експериментальних досліджень	56
3.5	Висновки до розділу	59
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	60
4.1	Правове та організаційне забезпечення охорони праці та захисту довкілля в установі.....	60
4.2.	Ідентифікація небезпек і оцінювання пов'язаних з ними ризиків	63
4.3	Забезпечення нормальних умов праці	66
4.3.1	Розрахунок індексу приміщення	67
4.3.2	Розрахунок освітленості	68
4.4	Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях	68
4.5	Висновки до розділу	70
	ВИСНОВОК.....	71
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
	Додаток А.....	75
	Додаток Б	80

ВСТУП

Одним із ключових параметрів, що визначає характеристики навколишнього середовища, є вологість повітря. Від її рівня залежить не лише комфорт людини, але й ефективність багатьох технологічних процесів, зокрема в промисловості, сільському господарстві та науці. Вимірювання вологості — одна з основних задач в атмосферних дослідженнях, екології та фізиці атмосфери. Для досягнення високої точності вимірювань необхідно розробляти та вдосконалювати відповідні лабораторні установки.

Початки досліджень вологості можна віднести до кінця XVII століття, коли вчені почали перші спроби вимірювати вологість повітря. Одним із піонерів у цій галузі був Джон Сеймонд, який у 1670 році вперше описав використання психрометра для визначення вологості повітря. Це пристрій, що складається з двох термометрів, один з яких обгортається у вологу тканину, а інший — залишається сухим, дозволяючи виміряти різницю температур, яка є функцією вологості.

У XIX столітті, з розвитком науки про атмосферу та фізики, були вдосконалені методи і засоби вимірювання вологості. Зокрема, в 1820 році французький вчений Жан-Батист Бельжер розробив перший хімічний метод для вимірювання відносної вологості, який полягав у визначенні зміни ваги солі при поглинанні вологи з повітря (гравіметричний метод). Ці ранні методи вже тоді показали важливість точності в вимірюваннях для різноманітних наукових та інженерних завдань.

З розвитком технологій з'явилися нові прилади, які дозволили значно підвищити точність вимірювань вологості. У 1900-х роках з'явилися електронні психрометри, а згодом — сучасні цифрові прилади, що застосовують різноманітні методи, такі як електричні, оптичні або теплові сенсори. Така еволюція вимірювальних технологій дозволила створити більш компактні, точні та зручні в експлуатації пристрої, що використовуються не лише в лабораторних умовах, але й у польових дослідженнях.

Важливість розробки сучасних лабораторних установок для вимірювання вологості неможливо переоцінити, адже ці установки є основою для проведення високоточних наукових досліджень, розробок нових матеріалів, а також для моніторингу екологічних та кліматичних змін. Вони дозволяють досягти необхідної точності в результатах, що є критичним для галузей, де вологість має визначальний вплив на результат.

У цьому контексті науково-дослідні роботи щодо створення нових методів і пристроїв для вимірювання вологості є надзвичайно актуальними. Розробка нових лабораторних установок передбачає не лише вдосконалення існуючих технічних рішень, але й інтеграцію сучасних технологій, таких як мікроконтролери, датчики та програмне забезпечення для автоматизації вимірювань і обробки результатів. Цей процес, зокрема, включає удосконалення механізмів контролю точності та стабільності вимірювань, що дозволяє підвищити надійність даних.

Розробка та впровадження нових лабораторних установок для вимірювання вологості має важливе значення для навчальних процесів, зокрема для студентів, що вивчають фізику, хімію та інженерні дисципліни. Вони набувають практичних навичок у роботі з високоточними приладами, що є основою для майбутньої кар'єри у наукових та інженерних сферах. Знання в цій галузі є важливим не тільки для розуміння принципів фізики та метрології, але й для розвитку інженерного мислення та здатності до створення нових технічних рішень.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

Будь-який прилад для вимірювання вологості називають гігрометром. Вимірювання вологості та зачасту постійне фіксування її значень, є важливою вимогою в більшості підприємств, системах контролю мікроклімату, напрямках метеорологічної діяльності та у побуті [1].

Вимірювання вологості на поверхні Землі необхідні для метеорологічного аналізу та прогнозування, для вивчення кліматичних змін та для використання в гідрології, агрокультури та природознавства загалом. Вони важливі саме тому, через їх відношення до зміни стану води в атмосфері [1].

Вологість ґрунту є важливим компонентом атмосферного кругообігу води, як у дрібному сільськогосподарському масштабі, так і у великомасштабному моделюванні взаємодії суші та атмосфери. Рослинність та сільськогосподарські культури завжди більше залежать від вологи, доступної на рівні кореневої системи, ніж від кількості опадів. Водний баланс для планування зрошення, а також фактичне планування зрошувальних заходів вимагає місцевої інформації про вологість ґрунту. Знання ступеня зволоженості ґрунту допомагає зрозуміти ініціацію конвекційних явищ та прогнозувати ризик раптових повеней або виникнення туману.

Існує багато методів та приладів для вимірювання вологості, вони розділяються на різні види та підвиди.

1.1 Електричні сенсори

Електричні інструменти для вимірювання відносної вологості використовують зміну в електричних властивостях матеріалу від зміни

водяної пари в повітрі. Для вимірювання відносної вологості матеріалом часто слугує спеціальна полімерна плівка яка покрита електродами. Вимірювана зміна в електричному імпедансі (ємності або опорі) калібрується для індикації відносної вологості. Зазвичай, в даному елементі також вбудований датчик для вимірювання температури [1].

Прикладом такого інструменту для вимірювання відносної вологості є датчик DHT11:

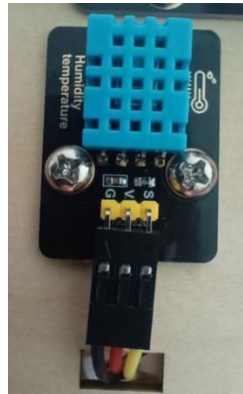


Рисунок 1.1 – Датчик вимірювання відносної вологості та температури DHT11

Матеріали з яких виробляють дані сенсори можуть різнитись, одними з найзручніших у найближчому майбутньому можуть бути надруковані електронні матеріали. Цей клас матеріалів — включаючи органічні напівпровідники, вуглецеві нанотрубки (ВНТ), оксиди металів, двовимірні (2D) матеріали, галогенідні перовскіти та колоїдні квантові точки — можна конструювати для реагування на широкий спектр стимулів для широкого спектру застосувань . Оскільки їх можна формувати в чорнила, ці матеріали дозволяють виготовляти датчики за допомогою недорогих та високопродуктивних методів, таких як друк та покриття. Ці методи характеризуються низьким споживанням енергії та матеріалів, що дозволяє виготовляти датчики зі сприятливим профілем екологічної стійкості. Деякі класи нових друкованих електронних матеріалів також дозволяють виготовляти біорозкладні датчики, пропонуючи таким чином додаткові переваги з точки зору стійкості. Крім того, можливості зондування друкованих електронних матеріалів можна регулювати шляхом модифікації

складу чорнил та параметрів нанесення, що дозволяє налаштовувати датчики для різних застосувань. Друковані електронні матеріали також, як правило, сумісні з виготовленням датчиків на гнучких/розтяжних підкладках, що призводить до створення компактних та легких датчиків, які, отже, широко застосовуються. Важливо, що всі ці особливості контрастують із звичайними технологіями датчиків (наприклад, датчиками на основі кремнію), які мають складне та дороге виробництво, значний вуглецевий слід, обмежені можливості налаштування та жорсткі форм-фактори [3].

Гігрометри відносної вологості на основі сенсорів набирають популярність через можливість дистанційного зчитування показів, та обов'язково застосовуються там, де необхідне пряме зчитування та автоматичне записування відносної вологості [1].

Фіксування показів температури поруч із вологістю, є невід'ємним, оскільки температура має значний вплив на відносну вологість повітря, а також, тому що значення температури використовуються для розрахунку інших величин вологості (таких як точка роси) із використанням відносної вологості. Але при проведенні спостережень необов'язково використовувати вбудований сенсор температури, можна використовувати і окремий прилад для вимірювання температури [1].

1.1.1 Ємнісні електричні гігрометри

Метод ґрунтується на зміні діелектричних властивостей гігроскопічного твердого матеріалу залежно від навколишньої відносної вологості. Для сенсорів підбираються або спеціально розробляються діелектрики. Полімери є найпоширенішими завдяки стабільності, вибірковості та здатності до сорбції води, а також достатнім ємнісним характеристикам. Поглинена вода змінює діелектричні властивості полімеру через великий дипольний момент молекули води.

Сенсор зазвичай створюється на керамічній або скляній підкладці у вигляді тонкоплівкової структури товщиною від кількох нанометрів до мікрметра. Активна частина – полімерна плівка між двома електродами, що утворює конденсатор. Верхній електрод проникний для молекул води, а полімер вбирає вологу пропорційно відносній вологості. Для підвищення стабільності верхній електрод може бути покритий захисним шаром. Електрична ємність забезпечує вимірювання відносної вологості. Типове значення ємності – кілька сотень пікофарад, залежно від розміру електродів і товщини діелектрика. Це визначає робочу частоту вимірювання імпедансу – зазвичай від кількох кілогерц. Щоб уникнути паразитної ємності, сенсор з'єднується з електронікою короткими з'єднаннями, а іноді обробка сигналу вбудовується прямо в зонд. Типова чутливість – 0.5 пФ на 1% RH для приладу на 200 пФ [1].

Щоб уникнути конденсації за умов близьких до 100% RH, виробники передбачають підігрів датчика або усього зонда. Нагрівання контролюється через різницю температур або порогове значення RH. Для точних вимірювань важливо точно знати температуру сенсора та навколишнього повітря. За цими значеннями можна обчислити відносну вологість, або, без знання температури повітря, визначити точку роси [1].

Щоб зменшити хімічне відхилення, сенсор періодично нагрівають до високої температури на короткий час. Недоліком є час простою під час нагрівання.

Такі гігromетри часто використовуються в автоматичних метеостанціях та інших системах без нагляду. Гігromетри слід монтувати в термозахисному кожусі. Необхідно дотримуватися інструкцій виробника щодо монтажу. Захисний фільтр обов'язковий для запобігання забрудненню. Сенсори з електролітом пошкоджуються при контакті з рідиною. Ємнісні датчики можуть частково відновитися після висихання. Однак тривале зволоження викликає відхилення точності результатів вимірювання [1].

1.1.2 Прилади електричного опору для вимірювання вологості

Резистивні прилади для вимірювання вологості використовують хімічно оброблений пластиковий матеріал з електропровідним поверхневим шаром на непровідній підкладці. Поверхневий опір змінюється залежно від кількості поглинутої водяної пари, що визначається відносною вологістю навколишнього середовища. У цьому випадку переважає адсорбція, а не абсорбція, оскільки чутливий до вологості шар обмежується лише поверхнею. Завдяки цьому сенсор такого типу здатен швидко реагувати на зміну вологості повітря [1].

До цього класу сенсорів належать різні електролітичні типи, в яких наявність провідних іонів у гігроскопічному електроліті залежить від кількості адсорбованої водяної пари [1].

Електроліт може мати різну фізичну форму – рідину, гель або іонно-обмінну смолу. Для уникнення поляризації електроліту вимірюється зміна імпедансу при змінному струмі, а не при постійному. Можна використовувати джерело низької частоти, якщо йдеться про вимірювання опору на постійному струмі. У такому разі допускається застосування досить довгих проводів між сенсором і його електронним інтерфейсом [1].

1.2 Психрометричний метод

Психрометр вимірює випарне охолодження вологості поверхні. Охолодження у рівномірному стані пов'язане з парціальним тиском водяної пари та з відносною вологістю [15].

Психрометр складається з двох термометрів, що закріплені один біля одного, чутливий елемент одного з них покритий кожухом (гнітом), для зберігання тонкої плівки води чи льоду, та називається вологим або сублімаційним термометром відповідно. Чутливий елемент другого термометра не покритий кожухом, та має вільний доступ до навколишнього

повітря, і називається сухим термометром. Вимірювання можуть виконуватись при аспірації, або ж при природньому провітрюванні [1].

Завдяки випаровуванню води з вологого термометра, температура виміряна ним, зазвичай нижча ніж температура, що була виміряна сухим термометром. Різниця температур, що виміряна парою термометрів – це показник вологості у повітрі, чим нижча навколишня вологість, тим швидше проходить випаровування, та відповідно більша різниця температур вологого та сухого термометрів [1].

Величина різниці температури вологого термометра – пов'язана з навколишньою вологістю психрометричною формулою. Хоч зараз і проходить заміна психрометрів на гігрометри котрі базуються на електричних сенсорах, на даний час психрометри залишаються для проведення спостережень, а також їх використовують як робочі еталони [1].

1.2.1 Вимоги щодо використання психрометрів

Прилади, що використовуються для психрометричних спостережень, повинні відповідати наступним вимогам:

1. На рівні моря, та в випадку, де термометри які зазвичай використовуються на метеорологічних станціях, швидкість повітря, що проходить попри термометри, повинно бути в межах 2,2 – 10 м/с. Для різних висот, діапазон швидкості повітря потрібно відрегулювати в зворотній пропорції до щільності атмосфери;

2. Вологий та сухий термометри повинні бути захищені від випромінювання, бажано за допомогою щонайменше двох екранів. У психрометрі з примусовою вентиляцією, такому як аспіраційному психрометрі Ассмана, екрани можуть бути з полірованого, нефарбованого металу, відділеного від решти приладу ізоляційним матеріалом. Теплоізоляційний матеріал є принципово кращим і повинен

використовуватися в психрометрах, які покладаються на природну вентиляцію;

3. Якщо психрометр встановлено в жалюзійній будці з примусовою вентиляцією, для обох термометрів слід передбачити окремі вентиляційні канали. Вхід до каналів повинен бути розташований таким чином, щоб забезпечити вимірювання справжньої температури навколишнього середовища, а повітря має виводитися над будкою так, щоб запобігти рециркуляції;

4. Слід докласти найбільших зусиль, щоб запобігти передачі значної кількості тепла від вентиляційного двигуна до термометрів;

5. Резервуар для води та гніт повинні бути розташовані таким чином, щоб вода досягала колби з температурою, близькою до температури вологого термометра, щоб не впливати на температуру сухого термометра [1].

1.2.2 Робота вологого термометра

Вологий термометр зазвичай має бавовняний кожух або подібну тканину, що щільно облягає чутливий елемент для підтримки рівномірного покриття водою, яка подається безпосередньо або за допомогою капілярної подачі з резервуара. Кожух зазвичай має форму втулки, що щільно прилягає до колби і простягається щонайменше на 2 см вгору по штоку термометра, щоб забезпечити розширене охолодження та зменшити теплопровідність штока. Для вологого термометра слід використовувати дистильовану воду. Тканина, яка використовується для покриття вологого термометра, повинна бути тонкою та щільно тканною. Якщо постачальник пропонує гніт, розроблений для розміру термометрів, слід використовувати саме його. Перед встановленням його слід ретельно промити у водному розчині бікарбонату натрію (NaHCO_3) у розведенні 5 г на літр і кілька разів промити в дистильованій воді. Альтернативно, можна прокип'ятити в розведеному

розчині чистого мийного засобу у воді, а потім прокип'ятити в дистильованій воді. Слід бути дуже обережним під час поводження з чистою втулкою або гнітом, щоб запобігти забрудненню від рук, наприклад, використовуючи очищені щипці або чисті пластикові рукавички без залишків [1].

Правильне поводження з вологим термометром є особливо важливим. Будь-яке видиме забруднення кожуху або втулки вологого термометра слід вважати абсолютною ознакою необхідності негайної заміни. В іншому випадку, спостерігачів слід заохочувати змінювати втулку та гніт вологого термометра щонайменше раз на тиждень для всіх психрометрів, які постійно експонуються. У місцях поблизу моря та в індустріальних районах може знадобитися частіша заміна цих елементів. Слід часто перевіряти водопостачання та замінювати або поповнювати його за потребою. В умовах спекотної, сухої погоди може бути вигідно змочувати покриття водою з пористої посудини. Це призведе до попереднього охолодження води за рахунок випаровування з пористої поверхні. Посудина повинна зберігатися в тіні, але не в безпосередній близькості від психрометра [1].

Психрометр важко експлуатувати при температурах нижче нуля, але його все ще використовують у кліматах, де такі температури зустрічаються. Гніт не може транспортувати воду з резервуара до втулки вологого термометра капілярним шляхом, коли кожух замерзлий. У цих умовах слід подбати про утворення лише тонкого шару льоду на втулці. Абсолютною необхідністю є штучна вентиляція термометрів; якщо її немає, керування вологим термометром буде надзвичайно складним. Вологий термометр аспіраційних та обертових психрометрів слід змочувати безпосередньо перед використанням. Вода, наскільки це можливо, повинна мати температуру, близьку до точки замерзання. Якщо в найнижчій частині колби утворюється льодова грудка, її слід занурити у воду на достатній час, щоб розтопити лід [1].

Час, необхідний для досягнення вологим термометром стабільного показу вимірювання після змочування втулки, залежить від швидкості

вентиляції та фактичної температури вологого термометра. Невентильований термометр зазвичай вимагає від 15 до 45 хв, тоді як аспіраційний термометр потребуватиме значно меншого часу. Важливо, щоб утворення нової крижаної плівки на колбі відбувалося в належний час. Якщо годинні спостереження проводяться за допомогою простого психрометра, зазвичай краще формувати нове покриття льоду відразу після кожного спостереження. Якщо спостереження проводяться з довшими інтервалами, спостерігач повинен відвідувати екран достатньо заздалегідь до кожного спостереження, щоб сформувати нову крижану плівку на колбі [1].

Випаровування крижаної плівки між показами можна запобігти або уповільнити, помістивши вологий термометр у невелику скляну трубку, або зупинивши вхідний вентиляційний отвір вологого термометра між періодами вимірювань. Якщо це зробити, температура вологого термометра буде неточною під час цих втручань. (останній варіант не слід використовувати, якщо обставини такі, що вентилятор може перегрітися). Вплив переохолодженої води на вологий термометр можна вирішити двома способами:

1. Використовуючи різні формули або таблиці, коли вологий термометр покритий льодом та переохолодженою водою відповідно. Щоб з'ясувати, яку таблицю слід використовувати, вологого термометра слід торкнутися кристалом снігу, олівцем, голкою або іншим предметом відразу після завершення кожного спостереження. Ступінь блиску на поверхні вологого термометра також корисний для перевірки, чи замерзлий вологий термометр. Якщо температура піднімається до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потім знову починає падати, можна припустити, що вода на вологому термометрі була переохолоджена на момент спостереження;

2. Використовуючи формулу або таблицю, придатну для покритого льодом вологого термометра, та індукуючи замерзання переохолодженої води так само, як для першого методу. Щоб заощадити час та переконатися, що вологий термометр покритий льодом, спостерігач повинен ініціювати

замерзання води під час кожного спостереження якомога швидше після змочування колби. За поведінкою змоченого термометра в точці замерзання зазвичай можна визначити, чи покрита колба льодом, чи переохолодженою водою. Однак рекомендована процедура полягає в тому, щоб ініціювати замерзання води під час кожного спостереження, коли температура вологого термометра вважається нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, незалежно від того, чи спостерігалася поведінка термометра після змочування чи ні.

Хоча перший метод зазвичай найшвидший, він вимагає двох таблиць, і це може викликати деяку плутанину.

1.2.3 Процедура проведення спостережень:

Для проведення спостережень використовуючи психрометричні гігрометри, слід дотримуватись процедур, що використовуються для вимірювання температури, а саме:

1. Покази термометрів слід зчитувати якомога швидше, для уникнення змін температури, що спричинені присутністю спостерігача;
2. Оскільки меніск рідини (або індекс) і шкала термометра не знаходяться в одній площині, необхідно бути обережним, щоб уникнути помилок паралакса. Вони виникнуть, якщо спостерігач не переконається, що пряма лінія від ока до меніска (або індексу) перпендикулярна до штока термометра;
3. Оскільки мінімальна поділка шкали термометрів становить менше ніж одну п'яту градуса, покази з точністю до десятої частки градуса, які є вкрай важливими в психрометрії, необхідно робити шляхом оцінки. Коригування на похибки шкали, якщо такі є, слід застосовувати до показів;
4. Максимальні та мінімальні термометри слід зчитувати та налаштовувати щонайменше двічі на день. Їхні покази слід часто порівнювати з показами звичайного термометра, щоб переконатися у відсутності серйозних помилок [1].

Також, наявні додаткові процедури проведення спостережень при роботі із психрометром:

1. Якщо потрібно замінити втулку вологого термометра, кожух або воду, це слід зробити достатньо заздалегідь до спостереження. Час, необхідний для досягнення правильної температури вологого термометра, залежить від типу психрометра;
2. Покази термометрів слід зчитувати з точністю до 0,1 градуса;
3. Під час проведення спостереження покази двох термометрів слід, наскільки це можливо, знімати одночасно (спочатку зчитування сухого термометра, потім вологого, і нарешті знову сухого є розумним рішенням) і переконатися, що вологий термометр отримує достатню кількість води [1].

1.2.4 Використання термометрів опору

Точні платинові термометри опору широко використовуються замість рідинних термометрів у скляній оболонці, особливо там, де потрібне дистанційне зчитування та безперервні вимірювання. Особливу увагу завжди слід приділяти ефектам самонагрівання в електричних термометрах. Необхідно переконатися, що ці пристрої та пов'язана з ними електроніка відповідають вимогам до продуктивності [1].

Міжнародна температурна шкала 1990 року (МТШ-90) визначає як Міжнародні температури Кельвіна, символ T_{90} , так і Міжнародні температури Цельсія, символ t_{90} [4].

Між потрійною точкою рівноважного водню (13,8033 K) та точкою замерзання срібла (961,78 °C) Міжнародна температурна шкала 1990 року (T90) визначається за допомогою платинових термометрів опору. Ці термометри калібруються у визначених наборах еталонних фіксованих точок і використовують визначені еталонні та відхильні функції для інтерполяції проміжних температур. Жоден окремий платиновий термометр опору не може забезпечити високу точність, або навіть, ймовірно, не буде придатним

для використання, у всьому температурному діапазоні від 13,8033 К до 961,78 °С. Вибір температурного діапазону або діапазонів, для яких може використовуватися певний термометр, зазвичай обмежується його конструкцією [4].

Особливо важливо враховувати відповідні термічні обробки, яких слід дотримуватися кожного разу, коли платиновий термометр опору піддається впливу температури вище приблизно 420 °С. Температури визначаються за співвідношенням опору $R(T_{90})$ при температурі T_{90} та опору $R(273,16 \text{ K})$ при потрібній точці води. Це співвідношення, $W(T_{90})$, визначається як $R(T_{90})/R(273,16 \text{ K})$ [4].

Прийнятний платиновий термометр опору повинен бути виготовлений з чистої, бездеформаційної платини, і він повинен задовольняти принаймні одне з наступних двох співвідношень: $W(29,7646 \text{ °C}) \geq 1,11807$ або $W(-38,8344 \text{ °C}) \leq 0,844235$. Прийнятний платиновий термометр опору, який буде використовуватися до точки замерзання срібла, також повинен задовольняти співвідношення: $W(961,78 \text{ °C}) \geq 4,2844$ [4].

У кожному з діапазонів термометрів опору T_{90} отримується з $W_r(T_{90})$, як це дається відповідною еталонною функцією:

$$\frac{T_{90}}{273,16 \text{ K}} = B_0 + \sum_{i=1}^{12} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right]^i \quad (1.1)$$

$$\frac{T_{90}}{K - 273,15} = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2,64}{1,64} \right]^i \quad (1.2)$$

та відхиленням $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$. У еталонних фіксованих точках це відхилення отримується безпосередньо з калібрування термометра; при проміжних температурах воно отримується за допомогою відповідної функції відхилення:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^3 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \quad (1.3)$$

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (1.4)$$

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660,323^\circ\text{C})]^2 \quad (1.5)$$

Для діапазону від 13,8033 К до 273,16 К визначається специфічна еталонна функція. Також надається обернена функція, еквівалентна первинній функції з точністю до 0,1 мК. Термометр може бути відкалібрований для використання у всьому цьому діапазоні або, використовуючи поступово меншу кількість калібрувальних точок, для діапазонів з нижніми температурними межами 24,5561 К, 54,3584 К та 83,8058 К, причому всі вони мають верхню межу 273,16 К [4].

Для діапазону від 0 °С до 961,78 °С визначається інша еталонна функція. Також надається обернена функція, еквівалентна первинній функції з точністю до 0,13 мК. Термометр може бути відкалібрований для використання у всьому цьому діапазоні або, використовуючи меншу кількість калібрувальних точок, для діапазонів з верхніми межами 660,323 °С, 419,527 °С, 231,928 °С, 156,5985 °С або 29,7646 °С, причому всі вони мають нижню межу 0 °С [4].

Термометр також може бути відкалібрований для використання в діапазоні від 234,3156 К (-38,8344 °С) до 29,7646 °С, з калібруванням, виконаним при цих температурах і при потрійній точці води. Для охоплення цього діапазону потрібні обидві еталонні функції: [4]

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90} / 273,16\text{K}) + 1,5}{1,5} \right]^i \quad (1.6)$$

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90} / \text{K} - 754,15}{481} \right]^i \quad (1.7)$$

1.2.5 Принцип побудови та використання психрометричних таблиць

Зазвичай для визначення тиску водяної пари e' за умов спостереження, та подальшої побудови психрометричної таблиці, приклад якої зображений

на рисунку 1.2, використовують такі напівемпіричні психрометричні формули:

$$e' = e'_w \cdot (p, \cdot t_w) - A_p \cdot (t - t_w) \quad (1.8)$$

$$e' = e'_i \cdot (p, \cdot t_w) - A_p \cdot (t - t_i) \quad (1.9)$$

де:

e'_w – тиск насиченої водяної пари при температурі вологого термометра;

t_w – температура вологого термометра;

p – тиск повітря;

e'_i – тиск насиченої водяної пари при температурі сублимаційного

термометра;

t_i – температура сублимаційного термометра;

A – психрометричний коефіцієнт (або ж психрометрична константа) [1].

Гігрометр ВІТ-1
психрометрична таблиця
швидкість аспірації від 0,5 до 1,0 м/с

Показ, сухого термом °C	Різниця показів термометрів, °C																					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0
Відносна вологість, %																						
5	91	83	75	66	58	50	42	34	26	19												
6	92	84	76	67	60	52	45	37	30	22	15											
7	92	84	77	69	62	54	47	40	33	26	19											
8	92	85	78	70	63	56	49	42	36	29	22	16										
9	93	86	79	71	65	58	51	45	38	32	25	19										
10	93	86	79	73	66	60	53	47	41	34	28	22	16									
11	93	87	80	74	67	61	55	49	43	37	31	26	20									
12	93	87	81	75	69	63	57	51	45	40	34	28	23	18								
13	94	88	82	76	70	64	58	53	47	42	36	31	26	20								
14	94	88	82	76	71	65	60	54	49	44	39	33	28	23	18							
15	94	88	83	77	72	66	61	56	51	46	41	36	31	26	21	18						
16	94	89	83	78	73	68	63	57	52	48	43	38	33	29	24	20						
17	95	89	84	79	74	69	64	59	54	49	45	40	35	31	27	22	19					
18		90	84	79	74	70	65	60	55	51	47	42	37	33	29	24	21	17				
19		90	85	80	75	70	66	61	57	52	48	44	39	35	31	27	23	19				
20		90	85	81	76	71	67	63	58	54	50	45	41	37	33	29	25	22	18			
21		90	85	81	77	72	68	64	59	55	51	47	43	39	35	31	28	24	21	17		
22		91	85	82	77	73	69	64	61	56	52	48	44	41	37	33	30	26	23	19		
23		91	86	82	78	74	70	65	62	58	54	50	46	42	39	35	32	28	25	21	18	
24		91	87	83	78	74	70	66	62	59	55	51	48	44	40	37	33	30	27	24	20	
25		91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52	49	45	42	38	35	32	29	26	22	19

Рисунок 1.2 – Психрометрична таблиця

Температура вологого термометра (t_w) для більшості приладів не ідентична теоретичній термодинамічній температурі вологого термометра, яка залежить лише від p , t та r (коефіцієнта змішування вологості).

Температура, виміряна практичним вологим термометром, також залежить від ряду змінних, на які впливає динаміка теплопередачі через межу розділу рідина/газ (у якій газ повинен бути охарактеризований з точки зору його складових ламінарних і турбулентних шарів). Нерівність термодинамічної та вимірної температур вологого термометра вирішується на практиці шляхом емпіричного визначення психометричного коефіцієнта A [1].

Величина психометричного коефіцієнта A залежить від швидкості вентиляції, температури та типу психометра. Величина A

$$A = 6.62 \cdot 10^{-4} \cdot K^{-1} \quad (1.10)$$

достовірна для швидкостей вентиляції, що перевищують 3 м/с. Залежність величини A від швидкості вентиляції наведено в табл. 1

Таблиця 1 – Залежність величини психометричного коефіцієнта A від швидкості вентиляції

Психометричний коефіцієнт A	13.0	9.0	7.8	6.7
Швидкість вентиляції, м/с	0.12	0.50	1.00	4.00

Загалом, коефіцієнт A залежить від конструкції психометра (зокрема, системи вологого термометра), діаметра термометрів, швидкості повітряного потоку повз вологий термометр (що називається швидкістю вентиляції), а також температури повітря та його вологості.. Значення A не дуже залежить від температури або вологості, і його залежність від цих змінних зазвичай ігнорується. A є меншим, коли вологий термометр покритий льодом, ніж коли він покритий водою [1].

1.2.6 Аспіраційні психометри та психометр Ассмана

Альтернативним приладом до традиційного (ртутного) психометра Ассмана є електричний аспіраційний психометр, що використовує два платинові термометри опору замість двох ртутних термометрів у скляній оболонці. Новіші конструкції аспіраційних психометрів не повністю

відповідають зразку приладів Ассмана і зазвичай включають резервуар, який подає воду до кожуху протягом тривалого періоду. Загалом, будь-які альтернативні конструкції все одно вимагатимуть запобіжних заходів під час експлуатації, подібних до типів Ассмана [1].

Річард Ассман (нім. Richard Assmann, англ. Richard Assmann) з 1887 по 1892 рік, працюючи з конструктором дирижаблів Рудольфом Гансом Барчем фон Зігсфельдом розробив психрометр для точного вимірювання атмосферної вологості та температури. Це був перший прилад котрий зміг забезпечити точні покази температури на аеростатах, оскільки його термометричні елементи були захищені від сонячного випромінювання. Робота психрометра заснована на залежності різниці температур сухого та змоченого термометрів від вологості навколишнього повітря. Вологість повітря визначається за показами сухого і змоченого термометрів за спеціальними психрометричними таблицями або психрометричним графіком, а температура повітря - за показами сухого термометра.

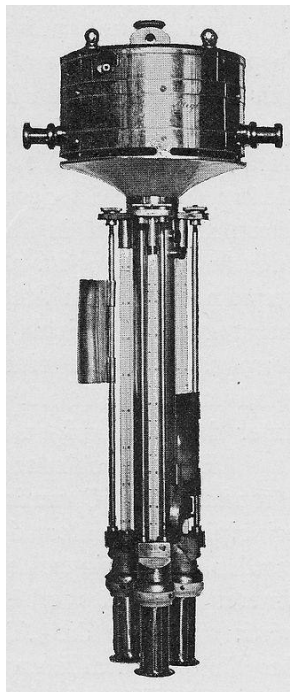


Рисунок 1.3 – Аспіраційний психрометр Ассмана

Психрометр Ассмана складається з двох термометрів, розташованих вертикально поруч у хромованій або нікельованій полірованій металевій рамі, з'єднаних каналами з аспіратором (вентилятором). Аспіратор може

приводитися в рух пружиною або електродвигуном. У традиційній конструкції Ассмана використовувалися ртутні термометри в скляній оболонці, але оновлені конструкції могли б використовувати відповідні охарактеризовані альтернативи (термометри опору або інші типи рідинних термометрів у скляній оболонці) відповідного діаметра та діапазону вимірювання. Один термометр має добре прилягаючий мусліновий кожух, який перед використанням змочується дистильованою водою. Кожух покриває чутливу частину термометра (для рідинного термометра це колба) та певну додаткову довжину штока термометра. Якщо для вологого термометра використовується термометр опору, важливо, щоб кожух покривав і виходив за межі області чутливого елемента; ця область зазвичай не є очевидною при огляді термометра, але ґрунтуватиметься на знанні його внутрішньої структури. Кожен термометр розташований всередині пари коаксіальних металевих трубок, сильно відполірованих всередині та зовні, які захищають колби від зовнішнього теплового випромінювання. Всі трубки термічно ізолювані одна від одної [1].

1.2.7 Повірка психрометрів

Повірювання психрометра має два аспекти: повірка термометрів та повірка всього приладу, що функціонує як гігрометр. Етапи технічного обслуговування (особливо для кожуха та вентилятора) слід виконувати до процедури повірки приладу. Повірку термометрів рекомендується проводити регулярно відповідно до типу та якості термометра, а також ступеня експлуатації або інших навантажень на термометри [1].

Для термометрів опору поправки на калібрування можуть бути застосовані шляхом використання різних коефіцієнтів у формулі для перетворення опору в температуру. Якщо коефіцієнти, специфічні для калібрування, не застосовуються, то процес калібрування використовується для підтвердження точності термометрів у межах заданого допуску. Якщо

термометри не відповідають допуску, їх слід замінити. Для рідинних термометрів у скляній оболонці поправки на калібрування в принципі можуть бути застосовані арифметично; в іншому випадку, знову ж таки, процес калібрування використовується для підтвердження точності термометрів у межах заданого допуску. Якщо термометри не відповідають допуску, їх можна замінити [1].

Після застосування температурної калібрування весь психрометр повіряється як гігрометр, зазвичай відносно еталона за відносною вологістю. Цей еталон може бути еталонним гігрометром точки роси або одним чи кількома еталонними термометрами. Калібрування може проводитися в навколишньому повітрі – або в камері з контрольованою вологістю та температурою для дистанційних психрометрів. Можливість повірки в камері при багаторазових температурах та вологостях настійно рекомендується для психрометрів, що використовують електричні термометри. В ідеалі, якщо повірювання психрометра може бути виконано в діапазоні температур та вологості, можна використовувати результати для оцінки психрометричного коефіцієнта або відповідної функції, специфічної для психрометра. Функція зазвичай є константою плюс другий член, що представляє незначну температурну залежність. Коефіцієнт або функція, отримана в результаті повірки, може замінити значення A в психрометричному рівнянні, якщо це можливо реалізувати (наприклад, у програмному забезпеченні). Цей підхід до реалізації повірювання забезпечує кращу точність, ніж використання узагальненого стандартного психрометричного коефіцієнта [1].

Якщо температурна повірка нехтується до калібрування вологості, нескориговані значення температури зазвичай спричинятимуть більші похибки у значеннях вологості, ніж якщо застосовуються температурні корекції (або допуски дотримані). Тиск зазвичай повідомляється для калібрування психрометрів, оскільки оцінка психрометричного рівняння використовує тиск, і психрометричний ефект має деяку залежність від тиску [1].

1.3 Конденсаційний метод

Температура конденсату водяної пари (точка роси або точка сублімації) поєднана з парціальним тиском води і може бути виміряна використовуючи гігрометр охолодженого дзеркала (конденсаційний гігрометр). Коли вологе повітря охолоджується, зрештою, воно досягає точки насиченості щодо води (або ж сублімації), після чого може утворитись конденсат, як роса або ж іній. Температура цієї точки насиченості називається точкою роси або ж точкою сублімації [1].

Типічний гігрометр охолодженого дзеркала використовує малу дзеркальну поверхню, що охолоджується пристроєм з елементом Пельтьє, для отримання плівки води або ж сублімації. Зазвичай використовується оптичне фіксування конденсованої плівки, для замкнутого кола зворотнього зв'язку, що використовується для контролю температури на межі постійної конденсації. Ця температура вимірюється вбудованим датчиком температури. Зразок повітря, що потрібно виміряти зазвичай відбирається через трубку та проходить через прилад [1].

У побуті конденсаційні гігрометри широко не використовуються, але часто використовуються як еталонні прилади в лабораторіях. Зазвичай використовується електрооптична система для виявлення утворення конденсату та для надання вхідних даних сервосистемі керування для регулювання температури дзеркала. Вузький промінь світла спрямовується на дзеркало під кутом падіння близько 55° . Джерелом світла може бути лампа розжарювання або світлодіод. У простих системах інтенсивність безпосередньо відбитого світла виявляється фотодетектором, який регулює систему охолодження та нагріву за допомогою сервокерування. Дзеркальна відбивна здатність поверхні зменшується зі збільшенням товщини відкладення; охолодження повинно зменшуватися, поки відкладення тонке, зі зменшенням відбивної здатності в діапазоні від 5% до 40%. Більш складні

системи використовують допоміжний фотодетектор, який додатково виявляє світло, розсіяне відкладенням; два детектори здатні до дуже точного керування. Для покращення системи керування може використовуватися друге, неохолоджуване дзеркало [1].

Найбільша точність досягається шляхом контролю температури дзеркала, при якій конденсат ні накопичується, ні розсіюється; однак на практиці сервосистема буде коливатися навколо цієї температури. Час відгуку дзеркала на нагрів і охолодження є критичним щодо амплітуди коливань і повинен становити приблизно 1-2 с. Швидкість повітряного потоку повинна бути достатньо стабільною, і слід уникати різких змін для підтримки стабільного відкладення на дзеркалі. Можливо визначити температуру, при якій відбувається конденсація, з роздільною здатністю 1 мК у деяких випадках, та загальною невизначеністю 0,1 К (при ймовірності охоплення 95%, коефіцієнт охоплення $k = 2$) або більше, залежно від невизначеності калібрування, а також інших факторів [1].

1.4 Спектрометри водяної пари

Молекули води поглинають електромагнітне випромінювання в діапазонах спектральних смуг та на окремих довжинах хвиль, ця властивість може бути використана для отримання значення молекулярної концентрації водяної пари у газі. Цей принцип використовується у різних приладах, що використовують смуги поглинання із різною силою для різних діапазонів вимірювання (сильніше поглинання для нижчих концентрацій) [1].

У спрощеній формі, прилад вимірює передачу (або поглинання) вузькосмугового інфрачервоного випромінювання від джерела з фіксованою інтенсивністю до відкаліброваного детектору, час від часу порівнюючи його з еталонною довжиною хвилі. Деякі прилади, які базуються на цьому принципі, можуть вимірювати діапазони вологості, які можна спостерігати на земному рівні [1].

Для діапазону низьких концентрацій водяної пари, спектрометри поглинання вимірюються поглинання інфрачервоного світла при багаторазовому проходженні через газ в вимірювальному осередку, забезпечуючи довгий оптичний шлях для розширення діапазону до менших значень. Одним із інструментів даного типу є спектрометр із налаштовуваним діодним лазером. Амплітуда поглинання світла залежить від концентрації водяної пари. Спектроскопія затухання в резонансній камері (Cavity ring-down spectroscopy) також використовує інфрачервоне поглинання через на довгому оптичному шляху для вимірювання низьких концентрацій. Імпульс світла проходить через газ в вимірювальній камері. Вимірюється час, за який інтенсивність світла спадає, він пов'язаний із концентрацією водяної пари [1].

Лайман-альфа гігрометри працюють в ультрафіолетовому діапазоні. Ультрафіолетове випромінювання отримане з джерела приладу, поглинається молекулами води з пропорційно концентрації водяної пари. Так звана лінія Лаймана-альфа відповідає випромінюванню або поглинанню, що відбувається під час передачі енергії атому водню. Спектрометри поглинання та прилади Лаймана-альфа використовуються на деяких авіаційних спостереженнях, включаючи вимірювання низьких рівнів води на великій висоті. Такі застосування виграють за рахунок швидкого часу реагування даних приладів [1].

1.5 Механічні методи

Історично, гігрометри використовували зміну розмірів органічних матеріалів, щоб виявляти відносну вологість. Процес сорбції води матеріалом пов'язаний з відотною вологістю, тому що рушійною силою є його хімічний потенціал. Чутливі елементи включали в себе волосся, та знедавна – синтетичні тканини. Зміна довжини чутливого елемента в зв'язку з вологістю підсилюється за допомогою використання важільної системи, переміщаючи

стрілку для того, щоб показати відносну вологість на шкалі, графіку (такому як запис гігрографа), або через перетворювач в електричний вихід, що є менш поширеним способом [1].

Лише волосяні гігрографи залишаються у використанні на даний момент, хоча і вони почали виходити з використання. Волосяний гігрограф використовує пучок волосин, що утримуються під невеликим натягом за допомогою маленької пружини та з'єднані з перовим важелем таким чином, щоб збільшувати зміну довжини пучка. Перо на кінці перового важеля контактує з паперовим бланком, натягнутим навколо металевого циліндра, і реєструє кутове зміщення важеля. Циліндр обертається навколо своєї осі з постійною швидкістю, що визначається механічним годинниковим механізмом. Швидкість обертання зазвичай становить один оберт на тиждень або на день. Бланк має шкалу часу, що простягається по колу циліндра, та шкалу вологості, паралельну осі циліндра. Циліндр зазвичай стоїть вертикально. Механізм, що з'єднує перовий важіль з пучком волосин, може включати спеціально розроблені кулачки, які перетворюють нелінійне подовження волосин у відповідь на зміни вологості в лінійне кутове зміщення важеля [1].

Волосся, що використовується у волосяних гігрографах, може бути із синтетичного волокна. Якщо використовується людське волосся, його зазвичай спочатку обробляють, для покращення як лінійності його відгуку, так і затримки відгуку, хоча це призводить до зниження міцності на розтяг. Перовий важіль та годинниковий механізм зазвичай розміщуються в коробці зі скляними панелями, що дозволяють спостерігати зареєстровану вологість, не порушуючи роботу приладу, та з одним відкритим кінцем, щоб дозволити волосяному елементу бути відкритим у вільному просторі за межами коробки. Бокові стінки коробки відокремлені від суцільної основи, але кінець, протилежний волосяному елементу, прикріплений до неї шарніром. Таке розташування забезпечує вільний доступ до годинникового циліндра та волосяного елемента. Елемент може бути захищений сітчастою кліткою [1].



Рисунок 1.4 – Волосяний гігрометр

1.6 Прилади для вимірювання вологості ґрунту

Методи та прилади, доступні для оцінки стану ґрунтових вод, можна класифікувати трьома способами. По-перше, розрізняють визначення вмісту води та визначення водного потенціалу. По-друге, так званий прямий метод вимагає наявності значної репрезентативної території, з якої можна взяти велику кількість зразків ґрунту для деструктивної оцінки в лабораторії. Непрямі методи використовують прилад, розміщений у ґрунті, для вимірювання деякої властивості ґрунту, пов'язаної з вологістю ґрунту. По-третє, методи можуть бути ранжовані відповідно до експлуатаційної придатності, враховуючи регулярну працю, ступінь залежності від доступності лабораторії, складність операції та надійність результату. Крім того, попередні витрати на придбання обладнання слід порівнювати з подальшими витратами на місцеві рутинні спостереження та обробку даних [1].

Існує п'ять експлуатаційних альтернатив для визначення вмісту води в ґрунті. По-перше, це класичне гравіметричне визначення вологості, яке є простим прямим методом. По-друге, це лізиметрія – неруйнівний варіант гравіметричного вимірювання. Контейнер, заповнений ґрунтом, зважується

або періодично, або безперервно, щоб показати зміни загальної маси в контейнері, які можуть частково або повністю бути зумовлені змінами вологості ґрунту. По-третє, вміст води може бути визначений непрямо різними радіологічними методами, такими як нейтронне розсіювання та гамма-абсорбція. По-четверте, вміст води може бути отриманий з діелектричних властивостей ґрунту, наприклад, за допомогою рефлектометрії в часовій області. Нарешті, вологість ґрунту можна визначити в глобальному масштабі за дистанційно вимірюваними тепловими або відбивними властивостями Землі [1].

1.6.1 Діелектричні вимірювання вологості ґрунту

Коли середовище поміщається в електричне поле конденсатора або хвилеводу, його вплив на електричні сили в цьому полі виражається як співвідношення між силами в середовищі та силами, які існували б у вакуумі. Це співвідношення, що називається діелектричною проникністю або "діелектричною константою", для рідкої води приблизно в 20 разів більше, ніж для середнього сухого ґрунту, тому що молекули води є постійними диполями. Діелектричні властивості льоду та води, пов'язаної з ґрунтовою матрицею, порівнянні з властивостями сухого ґрунту. Тому об'ємний вміст вільної ґрунтової води може бути визначений за діелектричними характеристиками вологого ґрунту за допомогою надійних, швидких, неруйнівних методів вимірювання, без потенційних небезпек, пов'язаних з радіоактивними пристроями. Більше того, такі діелектричні методи можуть бути повністю автоматизовані для збору даних. Наразі два методи, які оцінюють діелектричні властивості ґрунтових вод, є комерційно доступними та широко використовуються, а саме рефлектометрія в часовій області та вимірювання в частотній області [1].

1.7 Висновки до розділу

В першому розділі здійснено порівняльну характеристику будови та принципу роботи методів та приладів для вимірювання вологості, а саме: електричних, психрометричних, конденсаційних, спектрометричних, механічних, діелектричних методів

2 АНАЛІЗ РОБОТИ СПРОЄКТОВАНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Лабораторну установку, що проєктується у межах моєї бакалаврської роботи, планується використовувати в навчальному процесі, зокрема для проведення занять зі здобувачами вищої освіти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» спеціальності 175 «Інформаційно-вимірвальні технології» з дисципліни «Метрологія і технологічні вимірювання в нафтогазовій промисловості».

2.1 Будова лабораторної установки

Лабораторна установка складається з ультразвукового зволожувача повітря від компанії Wild Wind. Об'єм водяного резервуара зволожувача складає 3.5 літра. Вмикання зволожувача здійснюється шляхом його підключення до джерела змінного струму із напругою 220 вольт. При увімкненні приладу, слід виставити регулятор інтенсивності водяної пари на необхідний рівень згідно ходу проведення експерименту, після чого відрегулювати напрямок подачі згенерованої водяної пари у потрібне русло, що виконується відповідними регуляторами на корпусі приладу. Складові ультразвукового зволожувача повітря зображені на рисунку 2.1.

Прилади для вимірювання вологості, а саме психрометр ВИТ-1, із діапазоном вимірювання температур 0-25 °С, аспіраційний психрометр Ассмана із діапазоном вимірювання температури -25-50 °С, гігрометр точки роси Nabotest НТ607, що розташовані по периметру лабораторної установки, також присутній датчик вологості ґрунту УЛ-69, та електричний датчик вологості та температури ДНТ11, що розташований на робочій моделі розумного будинку та в будові спроектованого приладу для вимірювання

вологості ґрунту. Також до установки додаються психрометричні таблиці за допомогою яких визначається відносна вологість. Будова психрометра ВІТ-1 показана на рисунку 2.2



Рисунок 2.1 Складові ультразвукового зволожувача повітря Wild Wind UH-3845: 1 – Регулятори напрямку подачі водяної пари; 2 – резервуар для води; 3 – регулятор інтенсивності водяної пари; 4 – резервуар пароутворення із ультразвуковою мембраною.

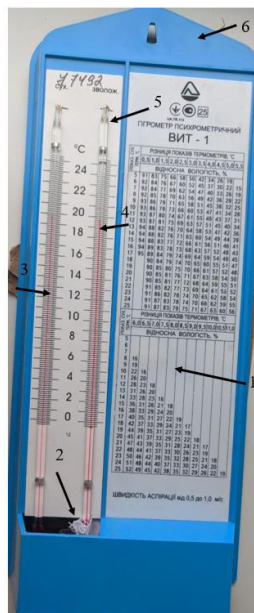


Рисунок 2.2 – Будова психрометра ВІТ-1: 1 – Психрометрична таблиця; 2 – Кожух; 3 – Сухий термометр; 4 – Вологий термометр; 5 – Верхній запасний резервуар термометра; 6 – Корпус.

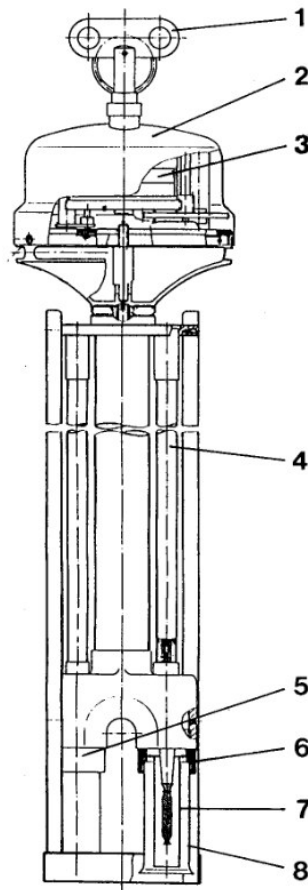


Рисунок 2.3 – Будова аспіраційного психрометра Ассмана: 1 – Заводний ключ, 2 – аспіратор, 3 – пружинний пенал, 4 – спиртові термометри -25/50, 5,6 – ізоляційні елементи, 7 – ізоляційна трубка, 8 – захисна трубка.

2.2 Процедура проведення спостережень із використанням психрометрів

Кожух, який повинен бути вільним від будь яких забруднень, змочується дистильованою водою. Брудні кожухи слід замінити. Слід подбати про те, щоб не утворився водяний місток між кожухом і радіаційним екраном. Прилад зазвичай використовується з термометрами, розташованими вертикально, в ідеалі – встановленими на підставці. Штоки термометрів слід захищати від сонячної радіації, повертаючи прилад так, щоб бічні екрани були розташовані по лінії сонця. Якщо прилад тримають у руці, його слід нахилити так, щоб входні канали відкривалися назустріч вітру, але слід подбати про те, щоб сонячна радіація не потрапляла на колби термометрів.

Захисний екран від вітру необхідний за дуже вітряних умов, коли в іншому випадку впливає обертання аспіратора [1].

Психрометр повинен перебувати у тепловій рівновазі з навколишнім повітрям. При температурі повітря вище 0 °С після періоду аспірації слід провести щонайменше три вимірювання з інтервалом 1 хв. Нижче 0 °С необхідно дочекатися закінчення процесу замерзання та спостерігати, чи є на кожусі вода чи лід. Під час процесів замерзання та танення температура вологого термометра залишається постійною на рівні 0 °С. У випадку зовнішніх вимірювань слід провести кілька вимірювань та взяти середнє значення. Покази термометрів слід зчитувати з роздільною здатністю 0,1 К або краще. Спостереження слід проводити на відкритій місцевості. Прилад або підвішується до затискача, або кріпиться за допомогою кронштейна до тонкого стовпа, або тримається однією рукою на витягнутій руці з вхідними отворами, трохи нахиленими за вітром. Вхідні отвори повинні знаходитися на висоті від 1,25 до 2 м над землею для звичайних вимірювань температури повітря та вологості. Слід бути дуже обережним, щоб запобігти впливу присутності спостерігача або будь-яких інших близьких джерел тепла та водяної пари, таких як вихлопна труба автомобіля, на покази [1].

2.3 Аналіз роботи спроектованого приладу для вимірювання вологості ґрунту

Прилад для вимірювання вологості ґрунту складається із плати розробки Arduino UNO+WiFi R3, та датчика вологості ґрунту YL-69. Компоненти приладу вмонтовані у прозорий корпус з розмірами 195x105x30, живлення до приладу подається через джерело безперебійного живлення постійного струму, що подає струм 3 ампера із напругою 12 вольт. Arduino та подібні плати можуть виконувати всі необхідні функції для проведення дистанційних лабораторних експериментів і є хорошим варіантом платформи завдяки низькій вартості, низькому енергоспоживанню, надійності, хорошій

можливості підключення та дещо обмеженим можливостям обробки даних у порівнянні з платформами на базі ПК.[6] Прилад зображений на рисунку 2.4

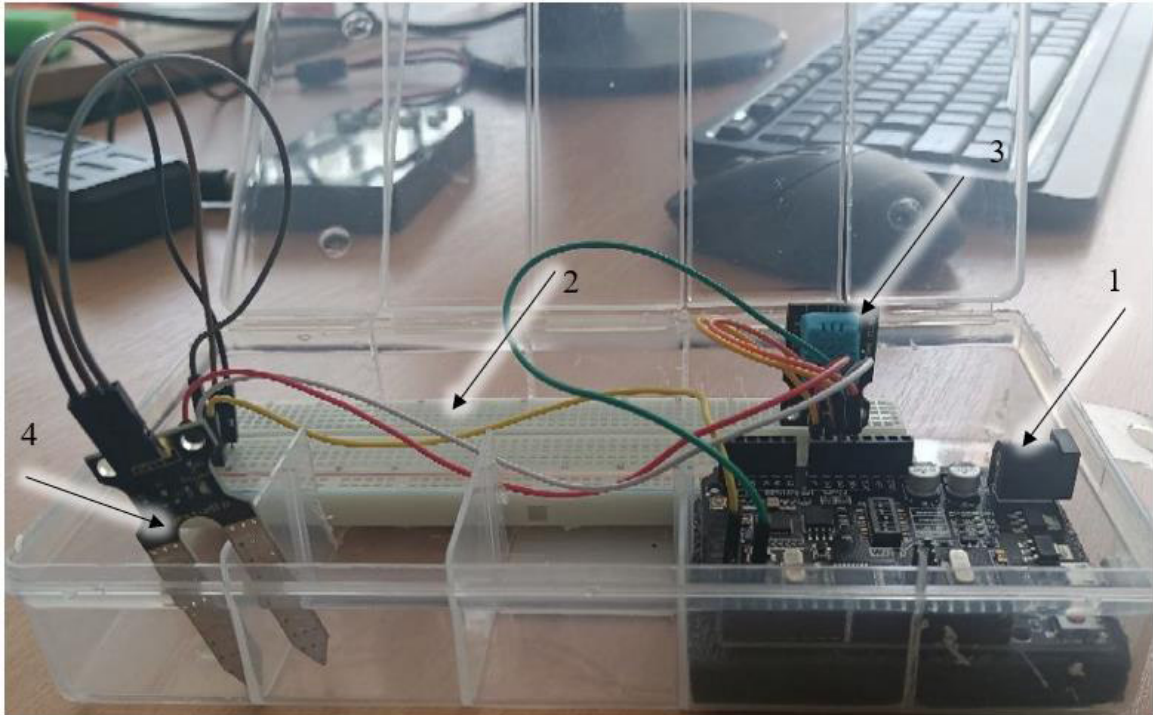


Рисунок 2.4 – прилад для вимірювання вологості ґрунту: 1 – Плата Arduino UNO+WiFi R3; 2 – Монтажна плата; 3 – Датчик відносної вологості та температури DHT11; 4 – Датчик вологості ґрунту YL-69;

2.3.1 Аналіз технічних характеристик та роботи плати розробки Arduino UNO+WiFi R3

Плата розробки Arduino UNO+WiFi R3 – це вдосконалений варіант класичної Arduino UNO, який поєднує мікроконтролер ATmega328P із вбудованим Wi-Fi модулем ESP8266. Така конфігурація дозволяє створювати проекти без необхідності додаткового зовнішнього з'єднання між Arduino та Wi-Fi-модулем [13].

ATmega328P, як основний контролер плати, має 32 КБ флеш-пам'яті (0.5 КБ з яких використовується завантажувачем), 2 КБ оперативної пам'яті (SRAM) та 1 КБ EEPROM для збереження даних. Його можливості цілком відповідають класичній Arduino UNO R3, тому всі наявні бібліотеки та

шилди є сумісними. На платі передбачено 14 цифрових входів/виходів (6 з яких можуть працювати в режимі PWM) та 6 аналогових входів з роздільною здатністю 10 біт. Підтримуються всі основні інтерфейси – UART, SPI та I2C [13].

Модуль ESP8266 відповідає за бездротове з'єднання через стандарт Wi-Fi 802.11 b/g/n. Він може працювати в режимі клієнта (STA), точки доступу (AP) або одночасно в обох. Об'єм його флеш-пам'яті зазвичай становить 8 МБ, хоча конкретне значення залежить від виробника. ESP8266 може функціонувати як окремий контролер, виконуючи власний код, або як Wi-Fi-модуль, що обслуговує основний контролер через UART.

Живлення плати здійснюється через USB-порт (5 В) або через роз'єм VIN із зовнішнім джерелом на 7–12 В. Важливо враховувати, що Wi-Fi модуль є досить енергоємним і може споживати струм до 250 мА, тому джерело живлення має бути стабільним і достатньої потужності. Максимальний струм на цифрових виводах становить 40 мА [13].

На платі встановлено перемикачі у вигляді DIP-перемикачів, які дозволяють обирати режим роботи: програмування або використання ATmega328P, ESP8266 або їх взаємодії. Це забезпечує гнучкість у роботі – залежно від потреб, можна програмувати або один з контролерів, або налагоджувати між ними обмін даними. Наприклад, ESP може збирати або передавати дані по Wi-Fi, а ATmega відповідати за сенсори, дисплеї чи керування пристроями [13].

Щоб здійснити коректне програмування та використання елементів плати Arduino UNO+WiFi R3, необхідно правильно налаштувати положення DIP-перемикачів, які відповідають за з'єднання між контролерами та комп'ютером. Ці перемикачі визначають, який саме модуль (ATmega328P або ESP8266) буде активним у поточному режимі роботи.

Для програмування мікроконтролера ATmega328P слід встановити DIP-перемикачі під номерами 3 і 4 у положення ON, а всі інші (1, 2, 5, 6, 7, 8) залишити у положенні OFF. У такій конфігурації комп'ютер зможе

безпосередньо взаємодіяти з ATmega через USB-порт, що дозволить завантажувати скетчі за допомогою Arduino IDE без перешкод з боку Wi-Fi модуля.

Якщо потрібно програмувати Wi-Fi модуль ESP8266, необхідно перевести перемикачі 5, 6 і 7 у положення ON, а решту перемикачів (1–4 і 8) залишити OFF. У цьому режимі ESP8266 буде з'єднано з USB-інтерфейсом комп'ютера, і можна буде прошивати його або завантажувати скетчі так само, як і для будь-якої ESP-плати, наприклад, «Generic ESP8266 Module», що використовується при програмуванні приладу. У випадку, коли планується використання ESP8266 для зв'язку з ATmega328P у процесі роботи (без програмування), достатньо увімкнути лише перемикачі 5 і 6 (у положення ON), тоді як усі інші повинні бути вимкнені. Це дозволить модулю працювати в режимі звичайного Wi-Fi модуля, що обмінюється даними з основним контролером через UART.

Для одночасного використання обох мікроконтролерів – ATmega328P і ESP8266 – у взаємодії між собою, коли обидва пристрої повинні бути активні, необхідно встановити у положення ON лише перемикачі 1 і 2, а всі інші залишити вимкненими. Така конфігурація забезпечує прямий серійний зв'язок між мікроконтролерами, дозволяючи передавати дані без участі комп'ютера або зовнішніх засобів програмування. Правильне налаштування перемикачів є критично важливим для уникнення конфліктів на послідовній шині та забезпечення стабільної роботи як окремих модулів, так і всієї плати в цілому. Виводи плати розробки Arduino UNO+WiFi R3 зображені на рисунку 2.5.

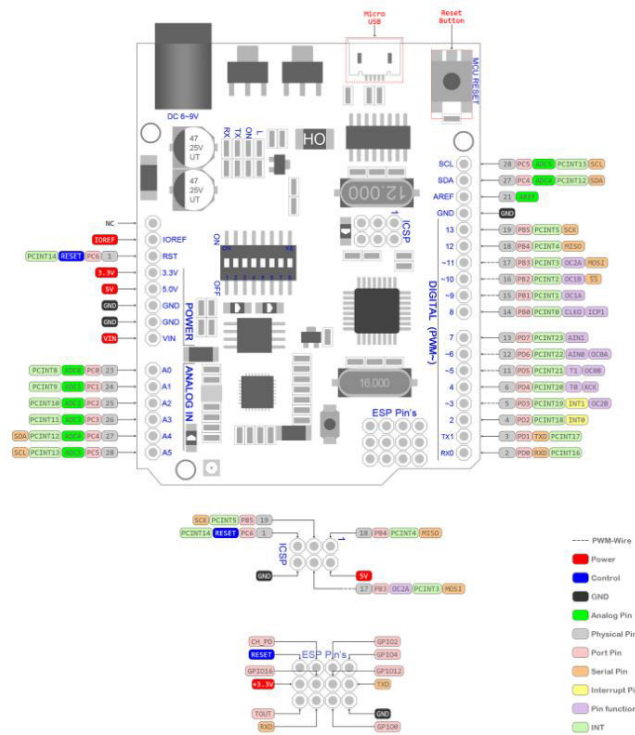


Рисунок 2.5 – Виводи плати Arduino UNO+WiFi R3 [5]

Arduino UNO+WiFi R3 програмується через Arduino IDE. Для роботи з ATmega достатньо обрати плату “Arduino UNO”. Для програмування ESP8266 потрібно змінити налаштування перемикачів і обрати у списку плат, наприклад, “Generic ESP8266 Module”. Через USB-порт і перетворювач CH340G або CP2102 плата легко підключається до комп’ютера, а індикатори живлення та передавання даних (TX/RX) дозволяють контролювати роботу під час розробки.

Завдяки поєднанню класичної Arduino з Wi-Fi функціоналом плата є зручною платформою для реалізації проектів з віддаленим керуванням, передаванням даних у хмару, моніторингом середовища, автоматизацією в будинку та багатьма іншими завданнями. Вона підходить як для початківців, так і для досвідчених розробників, дозволяючи експериментувати як з локальною логікою на ATmega, так і з мережевими можливостями ESP8266 [13].

2.2.3 Опис програмного коду приладу для вимірювання вологості ґрунту

Програмний код для приладу написаний у програмному середовищі Arduino IDE (Integrated Development Environment). Плата повністю програмується мовою C++. Програмне середовище побудоване таким чином, що для роботи з ним не потрібні глибокі знання об'єктно-орієнтованого програмування. На відміну від комп'ютера, мікропроцесор не працює під керуванням операційної системи – він виконує лише одне завдання, завантажене в його пам'ять. Для написання програми користувач може використовувати безкоштовне середовище розробки, доступне на ПК. [7]

Програмний код для приладу представлено в додатку А .

Після програмування модуля ESP8266, увімкнення приладу та подальшого підключення до сервера, ми можемо побачити веб-сторінку, що зображена на рисунку 2.6:

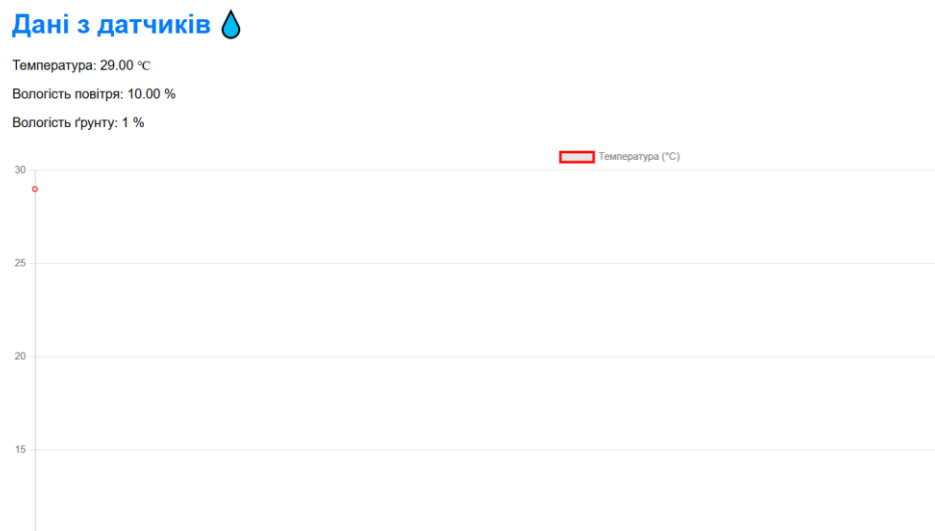


Рисунок 2.6 – Веб-сторінка серверу приладу для вимірювання вологості ґрунту

2.4 Аналіз роботи моделі розумного будинку

У лабораторній установці, модель розумного будинку використовується як засіб для введення джерел похибок, завдяки вбудованому вентилятору, що виконує функцію вентиляції, світлодіодам Adafruit NeoPixel, що завдяки інтенсивності світла можуть створити візуальну похибку, та датчик для вимірювання відносної вологості повітря та температури DHT11.

Модель розумного будинку виконана із використанням МДФ товщиною 2 мм., та зібрана за допомогою додаткових допоміжних кріпильних елементів. Модель розумного будинку працює за допомогою мікроконтролера ESP32 WROOM, що також програмується за допомогою Arduino IDE.

2.4.1 Світлова сигналізація із використанням NeoPixel

Adafruit NeoPixel — це бренд адресованих RGB-світлодіодів, розроблений компанією Adafruit Industries. Кожен світлодіод NeoPixel складається з трьох основних кольорових каналів — червоного (R), зеленого (G) і синього (B). Ці три канали дозволяють змішувати кольори в будь-якому співвідношенні для створення понад 16 мільйонів варіантів кольору. Усі три світлодіоди інтегровані в одному корпусі, часто разом із вбудованим контролером WS2812 або WS2812B, що дозволяє кожному світлодіоду працювати незалежно.

Світлодіоди Adafruit NeoPixels, у поєднанні з простою платою Arduino та кількома рядками коду, здатні створювати широкий спектр умов освітлення – як за кольоровою температурою, так і за рівнем яскравості. Оскільки кожен світлодіод можна керувати окремо, це забезпечує високу гнучкість і дозволяє створити надзвичайно адаптивну систему освітлення [8].

Враховуючи дані фактори, світлодіоди NeoPixel можуть стати хорошим джерелом похибки.

2.4.2 Будова моделі розумного будинку

Модель розумного будинку складається з 9 панелей виготовлених з МДФ. На шести панелях вмонтовані: плата розроблення ESP32 WROOM, датчик водяної пари, жовтий світлодіод, датчик вологості та температури DHT11, два серво-мотори для управління вікном та дверми, зчитувач даних REF ID, дві кнопки для введення паролю або ж здійснення вибору, інфрачервоний датчик руху, LCD екран із модулем розширення виводів I2C, датчиком небезпечних газів MQ-2, пасивною пищалкою, та світлодіодами NeoPixel.



Рисунок 2.7 – Модель розумного будинку

Також для розумного будинку, існує програмне забезпечення для операційних систем IOS та Android, за допомогою котрого з'являється можливість управляти розумним будинком, на рисунку 2.8 зображено інтерфейс програмного забезпечення.

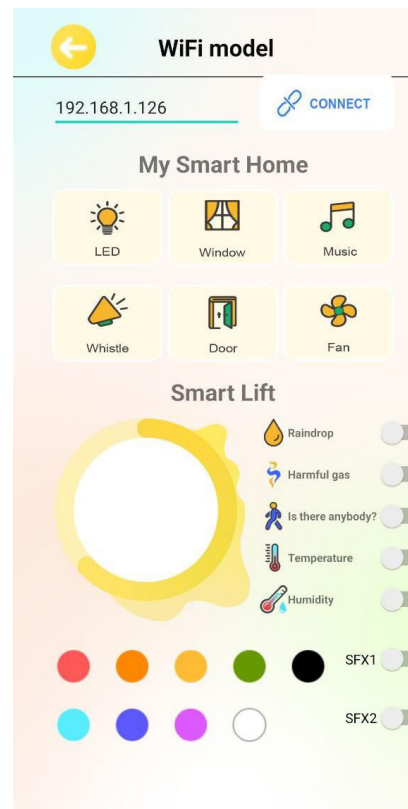


Рисунок 2.8 – Інтерфейс програмного забезпечення для управління моделлю розумного будинку

2.4.3 Опис програмного коду моделі розумного будинку

Опис програмного коду моделі розумного будинку представлено у додатку Б

2.5 Гігрометр точки роси типу NaboTest НТ-607

Гігрометр точки роси NaboTest НТ-607 використовується для вимірювання температури навколишнього середовища, температури вологого термометра, відносної вологості повітря та температури точки роси одночасно. До його функцій також входить:

1. Відображення максимальних та мінімальних даних, що були виміряні за відповідний період часу;

2. Переключення температурних шкал (градуси Цельсія та Фаренгейта);
 3. Режим затримки значень виміряних даних;
 4. Індикатор заряду батарейок;
 5. Автоматичне вимкнення приладу після 30 хвилин бездіяльності.
- Будова гігрометра точки роси NaboTest HT-607 показана на рисунку 2.9



Рисунок 2.9 – Будова гігрометра точки роси NaboTest HT-607

- 1 – Захисна кришка; 2 – сенсор; 3 – дисплей; 4 – кнопка ввімкнення; 5 – перемикач режиму min/max; 6 – перемикач температурної шкали; 7 – перемикач температури вологого термометра та температури точки роси; 8 – режим затримки значень виміряних даних.

2.6 Проведення дослідів за під час використання лабораторної установки

Основною задачею даної лабораторної установки, є ознайомлення з принципом роботи психрометричного методу вимірювання відносної

вологості повітря, діелектричного методу вимірювання вологості ґрунту, електричним методом вимірювання відносної вологості повітря та методом вимірювання температури точки роси, та відповідними приладами, що відтворюють дані методи.

Хід проведення експерименту:

1. Підготуйте психрометр ВІТ-1 та аспіраційний психрометр Ассмана
 - 1.1 Змочіть дистильованою водою кожухи вологих термометрів;
 - 1.2 Заведіть пружинний пенал аспірації психрометра Ассмана за допомогою заводного ключа;
2. Увімкніть гігрометр точки роси НТ-607 та встановіть його у середовище вимірювання;
3. Увімкніть прилад для вимірювання вологості ґрунту та покрийте датчик YL-69 ґрунтом.
4. Увімкніть модель розумного будинку
5. Зачекайте 15-20 хвилин для стабілізації значень приладів;
6. Зчитайте покази виміряні покази приладів
 - 6.1 Запишіть час, в котрий ви почали зчитування показів
 - 6.2 Зчитайте покази сухих термометрів психрометрів;
 - 6.3 Зчитайте покази вологих термометрів психрометрів;
 - 6.4 Зчитайте покази НТ-607;
 - 6.5 Зчитайте покази датчика вологості ґрунту та датчику DHT11;
 - 6.6 Зчитайте покази датчику DHT11, що встановлений на моделі розумного будинку;
7. Запишіть зчитані покази у таблицю 2.1;
8. Наповніть резервуар ультразвукового зволожувача Wild Wind УН-3845 водою;
9. Увімкніть зволожувач, та направте згенеровану водяну пару на прилади;

10. Вимкніть зволожувач
11. Повторіть кроки 5-7, та здійсніть серію з 5 вимірів;
12. Увімкніть вентилятор, що встановлений на моделі розумного будинку;
13. Повторіть кроки 5-7 та здійсніть серію з 5 вимірів;
14. Вимкніть вентилятор;
15. Повторіть кроки 5-7.

Таблиця 2.1 - Таблиця результатів вимірювання

ВИТ-1		Аспіраційний психрометр Ассмана		HT-607			YL-69	DHT-11		DHT-11 моделі розумного будинку		Час, у який було здійснено вимірювання
С,°C	В,°C	С,°C	В,°C	С,°C	RH,%	Td,°C	θ,%	С,°C	RH,%	T,°C	RH,%	t, год,хв.

2.7 Висновки до розділу

У цьому розділі проаналізовано роботу спроектованої лабораторної установки, описано процедуру проведення спостережень із використанням психрометрів та розроблено алгоритм виконання експериментальних досліджень.

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

За результатами проектування лабораторної установки було здійснено серію експериментальних досліджень, та проаналізовано можливі джерела похибок вимірювання вологості повітря, та похибки під час використання установки, можливі джерела похибок наведено нижче:

3.1 Джерела похибок

Похибки при вимірюванні вологості можуть бути спричинені наступними факторами:

1. Модифікація зразка повітря шляхом нагріву, або введенням джерела водяної пари;
2. Забруднення сенсору, до прикладу: землею, впливу хімікатів, розпилом, та іншими джерелами забруднення;
3. Невірно виконана повірка приладу, що включає корекцію тиску, температурний коефіцієнт сенсору та електричний інтерфейс [19];
4. Неналежна обробка фази вода/лід
5. Внутрішні конструктивні недоліки приладів: наприклад, теплопровідність стрижня у психрометрі з вологим термометром;
6. Повільний час реакції приладу, або ж неможливість отримати стабільну рівновагу під час роботи;
7. Неправильний інтервал відбору зразків;
8. Гістерезис – багато інструментів для вимірювання вологості мають різні покази в залежності від того, чи досягається потрібний стан після більш сухого або вологого середовища;
9. Довготривале відхилення в часі повірки, в особливості для електронних засобів вимірювання вологості в середовищах із високою відносною вологістю;

10. Поступове нагрівання датчику вологості до температури, що перевищує температуру повітря, наприклад від нагрівання завдяки сонячному випромінюванню;

11. Похибки при вимірюванні температури, у випадку якщо значення температури використовується при розрахунку інших значень вологості (наприклад вимірювання точки роси використовуючи відносну вологість) [14].

3.1.1 Джерела похибок ємнісних електричних гігрометрів

Джерелом похибки ємнісних електричних гігрометрів може слугувати наступне:

1. Забруднення – пил, солі, хімічні речовини знижують чутливість або викривлюють покази;
2. Гістерезис – покази залежать від попередніх умов (зволоження чи висихання);
3. Довготривале відхилення – особливо за високої вологості; іноді призводить до завищених показників (наприклад, 100% RH замість 95% RH);
4. Випромінювальне нагрівання – сенсор тепліший за повітря, що спричиняє заниження показника RH;
5. Помилки у вимірюванні температури – наприклад, похибка в $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ біля $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ еквівалентна похибці $0,6\%$ RH у розрахунках точки роси.

3.1.2 Джерела похибок при використанні психрометрів

Оскільки психрометричний метод вимірювання температури може використовувати термометри різних типів, джерела похибок вимірювання температури можуть застосовуватись для психрометрів:

1. При використанні термоопорів джерелами похибки можуть слугувати: самонагрів чутливого елемента, недостатня компенсація опору

з'єднувальних проводів, недостатня компенсація нелінійностей датчика або вимірювального приладу, раптові зміни контактного опору перемикачів [14];

2. При використанні рідинних термометрів джерелами похибки можуть бути: зміна об'єму резервуара, капілярний ефект, нерівномірність розширення рідини та скла в межах робочого діапазону, похибка через грубі помилки при зчитуванні показів [14];

3. Похибки пов'язані з вентиляцією: Похибки через недостатню вентиляцію стали більш важливими завдяки використанню невідповідних психрометричних таблиць;

4. Похибки через покриття льодом вологого термометра: Оскільки товстий шар льоду на вологому термометрі збільшить час затримки термометру, від нього потрібно позбутися одразу за допомогою занурення термометра у дистильовану воду;

5. Похибки через забруднення гніту вологого термометра або забрудненої води: Велика похибка може бути спричинена присутністю субстанцій котрі змінюють водяний тиск пари. Вологий термометр та його гніт повинні бути промиті в звичайних інтервалах у дистильованій воді щоб прибрати розчинні домішки. У деяких регіонах ця процедура повинна проводитись частіше, наприклад поблизу моря або в зонах із забрудненим повітрям;

6. Похибки через теплопровідність від ніжки термометра до системи змоченого термометра: Теплопровідність від ніжки термометра до системи змоченого термометра зменшить застій вологого термометра і призведе до визначення надто високої вологості. Цей ефект найбільш помітний при низькій відносній вологості, але може бути ефективно вилучений збільшенням гніту вологого термометра щонайменше 2 сантиметра за межі колби вгору по ніжці термометра [18].

3.2 Технічні характеристики приладів

У приладів котрі використовують в лабораторній установці є відповідні технічні характеристики, що вказані в технічних паспортах на прилад, що складаються підприємствами після виготовлення приладу

3.2.1 Технічні характеристики психрометра ВИТ-1

1. Діапазон вимірювання температури: від 0 до 25 °С;
2. Діапазон визначення відносної вологості: від 20 до 90 %;
3. Температурний діапазон вимірювання відносної вологості: від 5 до 25°С;
4. Ціна поділки шкали термометрів: 0.2 °С;
5. Абсолютна похибка термометрів із врахуванням введення поправок: $\pm 0,2$ °С;
6. Термометрична рідина : тулуол $C_6H_5CH_3$ ароматичний вуглеводень;
7. Габарити : 325x120x50;
8. Маса : 150 г..

3.2.2 Технічні характеристики аспіраційного психрометра Ассмана

1. Діапазон вимірювання температури: від -25 до 50 °С;
2. Діапазон визначення відносної вологості: від 20 до 100 %;
3. Температурний діапазон вимірювання відносної вологості: від 5 до 50°С;
4. Ціна поділки шкали термометрів: 0.1 °С;
5. Абсолютна похибка термометрів із врахуванням введення поправок: $\pm 0,1$ °С;
6. Термометрична рідина : спирт ;

7. Габарити : 105x400;
8. Маса : 1.2 кг..

3.2.3 Технічні характеристики гігрометра точки роси НТ-607

1. Діапазон вимірювання навколишньої температури: від -20 до 60 °С;
2. Інструментальна похибка вимірювання навколишньої температури: $\pm 1^\circ\text{C}$;
3. Додаткова похибка вимірювання навколишньої температури: $\pm 1.5^\circ\text{C}$;
4. Чутливість при вимірюванні навколишньої температури: 0.1°C ;
5. Діапазон визначення відносної вологості: від 0 до 99.9 %;
6. Інструментальна похибка вимірювання відносної вологості: $\pm 3\%$;
7. Додаткова похибка вимірювання навколишньої температури: $\pm 4\%$;
8. Чутливість при вимірюванні відносної вологості: 0.1% ;
9. Діапазон вимірювання температури вологого термометра: від -20 до 60°C ;
10. Інструментальна похибка вимірювання температури вологого термометра: $\pm 1^\circ\text{C}$;
11. Додаткова похибка вимірювання температури вологого термометра: $\pm 1.5^\circ\text{C}$;
12. Чутливість при вимірюванні температури вологого термометра: 0.1°C ;
13. Діапазон вимірювання температури точки роси: від -50 до 60°C ;
14. Інструментальна похибка вимірювання температури точки роси: $\pm 1^\circ\text{C}$;

15. Додаткова похибка вимірювання температури точки роси: ± 1.5 °C;
16. Чутливість при вимірюванні температури точки роси: 0.1 °C;
17. Габарити : 135x55x25;
18. Маса : 150 г..

3.2.4 Технічні характеристики датчика вологості ґрунту YL-69

1. Діапазон вимірювання вологості ґрунту: від 0 до 100 %;
2. Інструментальна похибка вимірювання вологості ґрунту: ± 5 %;
3. Додаткова похибка вимірювання вологості ґрунту: ± 2 %;
4. Чутливість при вимірюванні вологості ґрунту: 1 %;
5. Тип вихідного сигналу: аналоговий та цифровий (через компаратор);
6. Напруга живлення: від 3.3 до 5 В;
7. Струм споживання: до 20 мА;
8. Робоча температура: від 0 до 60 °C;
9. Матеріал щупа: нікельовані електроди;
10. Рекомендована глибина занурення електродів у ґрунт: 4–5 см;
11. Частота оновлення показників: безперервна;
12. Довжина зонда (щупа): приблизно 60 мм;
13. Габарити модуля (з платою): 38x15x7 мм;
14. Маса: 10 г;
15. Термін служби електродів у вологому середовищі: до 6 місяців (залежить від умов експлуатації);
16. Сумісність з мікроконтролерами: Arduino, ESP32, ESP8266 та інші;
17. Регулювання порогу спрацювання цифрового виходу: через змінний резистор на модулі;
18. Інтерфейс підключення: 4-контактний (VCC, GND, A0, D0).

3.2.5 Технічні характеристики датчика температури та вологості DHT11

1. Діапазон вимірювання навколишньої температури: від 0 до 50 °С;
2. Інструментальна похибка вимірювання навколишньої температури: ± 2 °С;
3. Додаткова похибка вимірювання навколишньої температури: ± 1 °С;
4. Чутливість при вимірюванні навколишньої температури: 0.1 °С;
5. Діапазон визначення відносної вологості: від 20 до 90 %;
6. Інструментальна похибка вимірювання відносної вологості: ± 5 %;
7. Додаткова похибка вимірювання відносної вологості: ± 1 %;
8. Чутливість при вимірюванні відносної вологості: 1 %;
9. Діапазон вимірювання температури вологого термометра: не підтримується;
10. Інструментальна похибка вимірювання температури вологого термометра: не застосовується;
11. Додаткова похибка вимірювання температури вологого термометра: не застосовується;
12. Чутливість при вимірюванні температури вологого термометра: не застосовується;
13. Діапазон вимірювання температури точки роси: не підтримується (можна розрахувати окремо);
14. Інструментальна похибка вимірювання температури точки роси: не застосовується;
15. Додаткова похибка вимірювання температури точки роси: не застосовується;
16. Чутливість при вимірюванні температури точки роси: не застосовується;
17. Габарити: 23x12x5 мм;
18. Маса: 2.5 г.

3.3 Проведення експериментальних досліджень

Проведення експериментальних досліджень за допомогою лабораторної установки включає в себе серію багаторазових вимірювань, із використанням аспіраційного психрометра Ассмана як взірцевий прилад для вимірювання відносної вологості повітря.

За результатами вимірювання було здійснено 12 вимірювань впродовж двох годин, результати вимірювань занесені у таблицю 3.1

Таблиця 3.1 - Значення отримані шляхом експериментальних досліджень

ВИТ-1		Аспіраційний психрометр Ассмана		НТ-607			УЛ-69	ДНТ-11		ДНТ-11 моделі розумного будинку		Час, у який було здійснено вимірювання
С,°C	В,°C	С,°C	В,°C	С,°C	RH,%	Td,°C	θ,%	T,°C	RH,%	С,°C	RH,%	t, год.хв.
22.1	20.3	22	20.2	23	85	14.5	73.00	23	37	22	37	9:00
21.1	21.3	20.85	19.95	22	95.1	21.2	74.00	22	41	21.1	41	9:10
21.2	21	20.7	19.5	21.9	95.7	21.3	74.00	22	44	21.4	42	9:20
22	21.1	22.3	20.7	21.4	89.7	19.2	75.00	23	70	22.7	44	9:30
21.9	22	21.7	21	22.3	87	20	75.00	22	66	22.3	48	9:40
21.6	21.8	21.9	21.4	23.1	95.2	22.3	76.00	23	60	22.4	52	9:50
22	21.6	22.2	21.6	22.8	89	20.7	77.00	24	58	22.6	48	10:00
24.3	22.4	24.05	23.6	21.8	79	18.6	77.00	24	60	24.4	48	10:10
25	23.2	25	23.7	21.4	67	16.3	78.00	24	67	25.4	47	10:20
25	23.8	25.3	23.8	21.7	76	17.2	78.00	25	56	25.6	47	10:30
24.7	23.4	24.9	23.2	22	78	18.7	77	25	44	25.1	50	10:40
24	22.7	24.1	22.6	22.5	83.9	20	77	25	44	24.4	52	10:50

3.4 Обробка експериментальних досліджень

Було знайдено розширену невизначеність результатів вимірювання сухих та вологих термометрів психрометра ВИТ-1 та аспіраційного психрометра Ассмана, приладу для вимірювання точки роси НТ-607 приладу для вимірювання вологості ґрунту, та датчика вологості та температури ДНТ11: Порядок проведення розрахунків надано нижче:

Знаходимо середнє значення результатів вимірювань за формулою:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.1)$$

де x_i – виміряне значення;

n – розмір вибірки.

$$\begin{aligned} \bar{X}_{T1_ВИТ-1} &= 22.91; & \bar{X}_{RH_DHT11} &= 53.92; \\ \bar{X}_{T2_ВИТ-1} &= 22.05; & \bar{X}_{T1_HT607} &= 22.16; \\ \bar{X}_{T1_Асн} &= 22.92; & \bar{X}_{RH_HT607} &= 85.05; \\ \bar{X}_{T2_Асн} &= 21.77; & \bar{X}_{Td_HT607} &= 19.17; \\ \bar{X}_{\theta} &= 75.92; & \bar{X}_{T_bud} &= 46.33; \\ \bar{X}_{T_DHT11} &= 23.50; & \bar{X}_{RH_bud} &= 23.28; \end{aligned}$$

Розраховуємо експериментальне стандартне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} S_{T1_ВИТ-1} &= 1.547; & S_{RH_DHT11} &= 11.357; \\ S_{T2_ВИТ-1} &= 1.072; & S_{T1_HT607} &= 0.584; \\ S_{T1_Асн} &= 1.653; & S_{RH_HT607} &= 8.810; \\ S_{T2_Асн} &= 1.560; & S_{Td_HT607} &= 2.269; \\ S_{\theta} &= 1.676; & S_{T_bud} &= 1.6; \\ S_{T_DHT11} &= 1.168; & S_{RH_bud} &= 4.539; \end{aligned}$$

Після чого проводимо розрахунок стандартної невизначеності:

$$u = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}
u_{T1_ВНГ-1} &= 0.446; & u_{RH_DHT11} &= 3.279; \\
u_{T2_ВНГ-1} &= 0.310; & u_{T1_HT607} &= 0.169; \\
u_{T1_Асн.} &= 0.477; & u_{RH_HT607} &= 2.543; \\
u_{T2_Асн.} &= 0.450; & u_{Td_HT607} &= 0.655; \\
u_{\theta} &= 0.484; & u_{T_bud} &= 0.462; \\
u_{T_DHT11} &= 0.337; & u_{RH_bud} &= 1.310;
\end{aligned}$$

Розраховуємо розширену стандартну невизначеність

$$U = u \cdot k, \quad (3.4)$$

де k – коефіцієнт охоплення для нормального закону розподілу з рівнем довіри P .

$$\begin{aligned}
U_{T1_ВНГ-1} &= 0.029; & U_{RH_DHT11} &= 0.210; \\
U_{T2_ВНГ-1} &= 0.020; & U_{T1_HT607} &= 0.011; \\
U_{T1_Асн.} &= 0.031; & U_{RH_HT607} &= 0.163; \\
U_{T2_Асн.} &= 0.029; & U_{Td_HT607} &= 0.042; \\
U_{\theta} &= 0.031; & U_{T_bud} &= 0.030; \\
U_{T_DHT11} &= 0.022; & U_{RH_bud} &= 0.084;
\end{aligned}$$

Записуємо результати вимірювання:

$$X = \bar{X} \pm U, P \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
X_{T1_ВНГ-1} &= 22.91 \pm 0.029, \text{ при } P = 0.95; & X_{RH_DHT11} &= 53.92 \pm 0.210, \text{ при } P = 0.95; \\
X_{T2_ВНГ-1} &= 22.05 \pm 0.020, \text{ при } P = 0.95; & X_{T1_HT607} &= 22.16 \pm 0.011, \text{ при } P = 0.95; \\
X_{T1_Асн.} &= 22.92 \pm 0.031, \text{ при } P = 0.95; & X_{RH_HT607} &= 85.05 \pm 0.163, \text{ при } P = 0.95; \\
X_{T2_Асн.} &= 21.77 \pm 0.029, \text{ при } P = 0.95; & X_{Td_HT607} &= 19.17 \pm 0.042, \text{ при } P = 0.95; \\
X_{\theta} &= 75.92 \pm 0.031, \text{ при } P = 0.95; & X_{T_bud} &= 46.33 \pm 0.030, \text{ при } P = 0.95; \\
X_{T_DHT11} &= 23.50 \pm 0.022, \text{ при } P = 0.95; & X_{RH_bud} &= 23.28 \pm 0.084, \text{ при } P = 0.95;
\end{aligned}$$

Також проведено розрахунок температури точки роси за формулами наведеними нижче:

$$P_s = p_0 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t}{t + b}\right), \quad (3.6)$$

де – P_s – тиск насиченої водяної пари;

a, b - емпіричні константи, отримані шляхом апроксимації експериментальних даних для температур в межах ~ 0 °С до ~ 50 °С, $a = 17,27$; $b = 237,3$;

p_0 - стандартний тиск насиченої водяної пари при 0 °С ~ 610.78 Па

t – температура у градусах Цельсія

$$P_{s_ВИТ-1} = 2793.807$$

$$P_{s_Асн.} = 2795.217$$

$$P_v = U \cdot P_s, \quad (3.7)$$

де – P_v - парціальний тиск водяної пари

$$P_{v_ВИТ-1} = 2528.396$$

$$P_{v_Асн.} = 2528.396$$

$$T_d = \frac{b \cdot \ln\left(\frac{P_v}{P_0}\right)}{a - \ln\left(\frac{P_v}{P_0}\right)}, \quad (3.8)$$

де – T_d – температура точки роси

$$T_{d_ВИТ-1} = 21.270$$

$$T_{d_Асн.} = 21.270$$

3.5 Висновки до розділу

У даному розділі було проведено метрологічний аналіз лабораторної установки шляхом розрахунку розширеної невизначеності, та розрахунку точки роси з використанням формули Магнуса.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Правове та організаційне забезпечення охорони праці та захисту довкілля в установі

Принципи охорони праці є важливим чинником при розробленні різноманітних приладів, пристроїв, установок, оскільки вони використовуються для забезпечення безпеки працівників, здобувачів освіти та інших осіб, що можуть відвідати відповідне підприємство, лабораторію або приміщення.

Забезпечення охорони праці є ключовим моментом для роботи над будь-яким знаряддям, що використовується на підприємстві. Для лабораторної установки, що розроблялась у даній бакалаврській роботі було проаналізовано потенційні ризики безпеки праці та способи їх усунення.

Оскільки застосування розробленої лабораторної установки планується при проведенні занять із здобувачами вищої освіти, при написанні даного розділу використовувалась наступна нормативна документація:

1. Положення «Про організацію роботи з охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу в установах і закладах освіти»;
2. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями;
3. НПАОП 0.00-1.29-97 Правила захисту від статичної електрики;
4. ДСТУ 4297:2004 Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги;
5. НПАОП 73.1-1.06-77 Основні правила безпечної роботи в хімічних лабораторіях;
6. Правила охорони праці під час паяльних робіт, що затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2014 № 118

Згідно положення «Про організацію роботи з охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу в установах і закладах освіти»,
завідувач кафедри

1. є відповідальним за створення безпечних і нешкідливих умов освітнього процесу на кафедрі;
2. вносить питання з охорони праці, безпеки життєдіяльності в освітні програми, методичні рекомендації до лабораторних робіт, курсових та дипломних робіт і проектів;
3. організовує розроблення і періодичний перегляд (один раз на 5 років) інструкцій з охорони праці та інструкцій з безпеки під час проведення навчання, узгоджує їх із службою охорони праці закладу освіти та подає на затвердження керівнику;
4. проводить з кожним працівником кафедри інструктажі з охорони праці, оформляє у журналі відповідно до Типового положення.
5. організовує проведення із студентами інструктажів з охорони праці та безпеки життєдіяльності;
6. забезпечує навчання і перевірку знань з питань охорони праці студентів та працівників, які працюють в умовах підвищеної небезпеки;
7. складає і направляє заявки на спецодяг, спецвзуття та інші засоби індивідуального захисту згідно з Положенням про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям;
8. забезпечує своєчасну явку на періодичний медичний огляд працівників
9. здійснює спільно з представником профспілки контроль за станом охорони праці, безпеки життєдіяльності;
10. бере участь у розробленні окремого розділу з охорони праці, безпеки життєдіяльності колективного договору (угоди);
11. при настанні під час освітнього процесу нещасного випадку вживає заходів, передбачених Положенням про порядок розслідування нещасних випадків [9].

Завідувач кабінету, лабораторії, майстерні, навчально-виробничої майстерні, старший майстер, майстер виробничого навчання:

- 1) є відповідальним за безпечний стан робочих місць, обладнання, приладів, інструментів, інвентарю тощо;
- 2) не допускає до проведення навчальних занять або робіт здобувачів освіти та працівників закладу освіти без передбаченого спецодягу, спецвзуття та інших засобів індивідуального захисту;
- 3) вимагає у встановленому порядку забезпечення спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту здобувачів освіти та працівників закладу освіти згідно з Положенням про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям;
- 4) відповідно до цього Положення розробляє і переглядає (один раз на 5 років) інструкції з безпеки під час проведення навчання в кабінетах, лабораторіях, навчально-виробничих майстернях, навчальних господарствах, спортивних залах тощо;
- 5) дозволяє використання обладнання, встановленого в лабораторіях, кабінетах, навчальних господарствах, цехах, на ділянках, полігонах, що передбачено типовими переліками, затвердженими Міністерством освіти і науки України;
- 6) контролює дотримання безпечних і нешкідливих умов проведення виробничої практики здобувачів освіти на підприємствах, в установах і організаціях, не дозволяє виконання робіт, не передбачених умовами договору;
- 7) проводить інструктажі з охорони праці під час навчально-виробничого процесу;
- 8) проводить інструктажі з безпеки життєдіяльності або контролює їх проведення викладачем, учителем;
- 9) бере участь у розробленні окремого розділу з охорони праці, безпеки життєдіяльності колективного договору (угоди);
- 10) при настанні під час освітнього процесу нещасного випадку вживає заходів, передбачених Положенням про порядок розслідування нещасних випадків [9].

Викладач, учитель, класовод, куратор групи, класний керівник, вихователь:

- 1) є відповідальним за збереження життя і здоров'я здобувачів освіти під час освітнього процесу;
- 2) забезпечує проведення освітнього процесу, що регламентується законодавчими та нормативно-правовими актами з питань охорони праці, безпеки життєдіяльності;
- 3) організовує вивчення здобувачами освіти правил і норм з охорони праці, безпеки життєдіяльності;
- 4) проводить інструктажі із здобувачами освіти
- 5) здійснює контроль за виконанням здобувачами освіти правил (інструкцій) з безпеки;
- 6) проводить профілактичну роботу щодо запобігання травматизму серед здобувачів освіти під час освітнього процесу;
- 7) проводить профілактичну роботу серед здобувачів освіти щодо вимог особистої безпеки у побуті (дії у надзвичайних ситуаціях, дорожній рух, участь у масових заходах, перебування в громадських місцях, на об'єктах мережі торгівлі тощо);
- 8) при настанні під час освітнього процесу нещасного випадку вживає заходів, передбачених Положенням про порядок розслідування нещасних випадків [9].

4.2. Ідентифікація небезпек і оцінювання пов'язаних з ними ризиків

Під час проведення навчальних та дослідницьких робіт, працівники та студенти взаємодіють із не тільки із оточуючими людьми, але й з навколишніми звуковими та зоровими подразниками, температурою, вологістю, вібрацією, інфразвук, електромагнітні поля та випромінювання, які з'являються не тільки від оточення, але й від роботи самої лабораторної установки.

Деякі з вище перелічених факторів можуть створювати шкідливий вплив на працівників та здобувачів, що буде знижувати їх працездатність, такі фактори називають шкідливими, а фактори, котрі можуть призвести до травми, називають небезпечними.

За Державними санітарними нормами та правилами «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» до шкідливих виробничих факторів відносяться:

1. фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання), барометричний тиск, неіонізуючі електромагнітні поля та випромінювання: електростатичні поля, постійні магнітні поля, електричні та магнітні поля промислової частоти (50 Гц), електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, електромагнітні випромінювання оптичного діапазону, зокрема лазерне та ультрафіолетове, іонізуючі випромінювання, виробничий шум, ультразвук, інфразвук, вібрація (локальна, загальна), освітлення: природне (відсутність або недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо), іонізація повітря;

2. хімічні фактори: речовини хімічного походження, деякі речовини біологічної природи, які отримані хімічним синтезом та/або для контролю яких використовуються методи хімічного аналізу, аерозолі фіброгенної дії (пил);

3. біологічні фактори: мікроорганізми - продуценти, живі клітини та спори мікроорганізмів, що містяться в бактеріальних препаратах, патогенні мікроорганізми;

4. фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці - характеристика трудового процесу, що відображає рівень загальних енергозатрат, переважне навантаження на опорно-руховий апарат, серцево-судинну, дихальну та інші системи. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням,

масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі [10].

Результати аналізу Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що поєднані із роботою лабораторної установки наведено у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Джерело небезпеки	Вимірні дані	Характеристика потенційно-небезпечних виробничих факторів та їх допустимі значення
Підвищена вологість повітря	Відносна вологість повітря 57.4%	Оптимальним значенням відносної вологості повітря є 40-60%, в стані простою значення вимірів відносної вологості повітря не сягали вище 58%
ЕОМ: яскравість	Яскравість бліків на екрані відеодисплейного терміналу: 35 кд/м ² Яскравість світлих поверхонь: 190 кд/м ²	Вимірювання бліків на екрані відеодисплейного терміналу складається з виміру яскравості lcd екрану моделі розумного будинку, що виводить статичне зображення, та не перевищує максимальне допустиме значення – 40 кд/м ² ;
ЕОМ: електростатичне поле	0,012 кВ/м	Більшість приладів котрі використані при розроблені лабораторної установки використовують акумуляторні батареї, тому не видають великої

		кількості електростатичного поля, відповідно не перевищують допустиму напруженість поля, що становить 20 кВ/м., Прилади, що використовують живлення з мережі, також не перевищують максимальне допустиме значення.
Необхідність підігріву	Температура нагріву детектор небезпечних газів $t = 40^{\circ}\text{C}$;	Детектор небезпечних газів, що потребує підігріву для своєї роботи, не доходить до потенційно небезпечної зони, якою є діапазон $50-120^{\circ}\text{C}$

4.3 Забезпечення нормальних умов праці

Штучне освітлення за функціональним призначенням поділяється на робоче, аварійне, охоронне, чергове та евакуаційне. А також штучне освітлення поділяється на системи: загальна, місцева, комбінована, рівномірна та локалізована [11].

Для загального штучного освітлення доцільно використовувати розрядні та світлодіодні джерела світла, які за однакової потужності з тепловими джерелами (світлодіодні лампи) мають більшу світлову віддачу та більший термін експлуатації [12].

У приміщеннях житлових будинків, громадських будівель та споруд, адміністративних і побутових будівель підприємств, як правило, застосовують систему загального освітлення. У приміщеннях виробничого характеру, в яких виконується зорова робота I-IV розрядів (ювелірних і гравірувальних робіт, ремонту годинників, телевізорів, радіоапаратури, комп'ютерів, мобільних телефонів, пральних машин, взуття, металовиробів тощо), необхідно застосовувати систему комбінованого освітлення. Для приміщень, які мають зони з різними умовами природного освітлення та

різними режимами роботи, повинне передбачатись окреме управління освітленням таких зон [12].

Розрахунок системи штучного освітлення передбачає або визначення необхідної потужності світлових джерел для досягнення заданого рівня освітленості, або, навпаки, визначення рівня освітленості на контрольованій площині та характеру розподілу яскравості в полі зору за наявними характеристиками джерел світла та схемою розміщення світильників. Щоб провести розрахунок освітленості приміщення, скористаємося методом коефіцієнта використання світлового потоку, який дозволяє врахувати тип світильників, світловий потік ламп, розміри приміщення та характеристики поверхонь.

Розміри приміщення довжина $L = 6$ м., ширина $W = 6$ м, висота $H = 3$ м., площа підлоги 100 м^2

Приміщення пофарбовано у світлий колір: коефіцієнт відбиття $P_{\text{СТЕЛИ}} = 70\%$ $P_{\text{СТІН}} = 50\%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,6$ м. Для освітлення прийнято лампи денного світла TL-D 18W/840 G13 Philips, висота підвісу світильників дорівнює 3 м.

4.3.1 Розрахунок індексу приміщення

Розраховуємо індекс приміщення для визначення того, наскільки ефективно буде використовуватися світловий потік світильників у даному приміщенні:

$$i = \frac{L \cdot W}{H_m \cdot (L + W)} \quad (4.1)$$

За допомогою даної формули, було розраховано індекс приміщення, що дорівнює 1.

За таблицями коефіцієнтів використання для люмінесцентних ламп (прямого світла) та коефіцієнтів відбиття стелі (70%), стін (50%) і значення індексу приміщення $i=1$, беремо приблизне значення - $\eta = 0.35$

4.3.2 Розрахунок освітленості

Значення освітленості від одного світильника можна розрахувати за допомогою наступної формули:

$$E = \frac{F \cdot \eta}{S \cdot k}, \quad (4.2)$$

де – S – площа приміщення

F – загальний світловий потік

k – коефіцієнт запасу, що дорівнює 1,5 із врахуванням старіння ламп, забруднення світильників, та ін.

Отримана освітленість від одного світильника дорівнює 17,5, За формулою, що наведена нижче можемо розрахувати потрібну кількість світильників для досягнення стандартного рівня освітленості у лабораторії:

$$N = \frac{E_{\text{нормоване}} \cdot S \cdot k}{F \cdot \eta} \quad (4.3)$$

За даною формулою рекомендована кількість світильників для досягнення необхідного рівня освітленості дорівнює 28,57

4.4 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях

Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях є пріоритетними аспектами організації роботи навчальної лабораторії, оскільки забезпечують збереження життя і здоров'я здобувачів освіти, викладачів, персоналу, а також збереження матеріальних цінностей та обладнання.

Навчальна лабораторія повинна бути оснащена відповідно до вимог чинного законодавства, що регламентує пожежну безпеку. У приміщенні обов'язково мають бути передбачені план евакуації, засоби для гасіння пожежі, як-от вогнегасники чи пожежні крани, зрозумілі інструкції щодо дій у разі займання, а також чітке позначення напрямків евакуації.

Під час організації лабораторних занять викладач зобов'язаний перед початком роботи провести вступний інструктаж із техніки безпеки, що включає й пожежну безпеку. Факт проведення інструктажу фіксується у відповідному журналі. Під час пояснення правил особливий акцент робиться

на небезпеці, що може виникати під час роботи з електричним обладнанням, горючими або легкозаймистими речовинами, а також із відкритим полум'ям.

У кожній лабораторії обов'язково мають бути встановлені справні вогнегасники відповідного типу, з урахуванням можливих ризиків. Усі, хто перебуває в лабораторії, повинні добре орієнтуватися в розміщенні цих засобів і вміти ними користуватися. Регулярна перевірка технічного стану засобів пожежогасіння здійснюється щонайменше раз на рік. З метою недопущення виникнення пожежі категорично забороняється залишати ввімкнене обладнання без нагляду, використовувати несправні пристрої, а також зберігати легкозаймісті речовини без належного захисту. По завершенні занять уся апаратура повинна бути вимкнена з мережі.

У випадку виникнення займання слід негайно повідомити про це відповідальних осіб і викликати пожежну службу, набравши номер 101. Якщо в лабораторії встановлена система сповіщення про надзвичайні ситуації, її потрібно активувати. Евакуація має здійснюватися за заздалегідь розробленим планом, із наданням допомоги тим, хто її потребує. Якщо є можливість, дозволяється скористатися наявними засобами для гасіння пожежі з метою локалізації загоряння.

У навчальних лабораторіях, де встановлено електронно-обчислювальні машини (ЕОМ), до питань пожежної безпеки висуваються додаткові вимоги. Через інтенсивне використання електроенергії, наявність численного обладнання та великої кількості дротових з'єднань, лабораторії з ЕОМ є підвищеною зоною пожежної небезпеки. Особлива увага приділяється стану електромережі та справності джерел живлення. Усі комп'ютери, монітори, блоки безперебійного живлення та периферійні пристрої повинні бути підключені через сертифіковані стабілізатори напруги або мережеві фільтри. Використання подовжувачів і трійників із пошкодженою ізоляцією або без заземлення категорично забороняється.

Приміщення повинні бути обладнані засобами автоматичного відключення електроживлення у разі виявлення загоряння або задимлення.

Також рекомендовано встановлення систем виявлення короткого замикання та датчиків задимлення. Науково-педагогічні працівники і студенти, які працюють у лабораторії з ЕОМ, повинні бути проінструктовані щодо безпечного користування технікою. Під час інструктажу окремо розглядаються дії у разі виникнення задимлення в системному блоці або перегріву обладнання. У разі виявлення підозрілих ознак – запаху гару, перегріву корпусу, миготіння напруги – роботу необхідно негайно припинити, вимкнути пристрій з мережі та повідомити відповідального за безпеку. Після завершення занять усі ЕОМ мають бути повністю вимкнені, а обладнання – відключене від електромережі. Це не лише зменшує ризик займання, але й сприяє енергоощадженню.

4.5 Висновки до розділу

У цьому розділі розглянуто законодавчі та організаційні вимоги, які забезпечують безпечну роботу лабораторної установки в умовах навчального закладу. Було враховано чинні нормативні акти з охорони праці, а також визначено обов'язки адміністрації, викладачів і технічного персоналу щодо забезпечення безпеки. Проведено аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників, зокрема параметрів мікроклімату, рівня електромагнітного випромінювання, освітлення та вологості. Результати показали, що ці показники відповідають встановленим нормам і не становлять небезпеки для користувачів. Акцент зроблено на створенні комфортних та безпечних умов праці: дотриманні нормативів щодо температурного режиму, освітлення, електробезпеки та ергономіки робочих місць. Це дає змогу гарантувати безпечне середовище для навчання та виконання завдань.

Таким чином, за умови дотримання вимог охорони праці, проведення інструктажу та нагляду відповідальними особами, використання лабораторної установки є безпечним. Проведене дослідження підтвердило відповідність умов експлуатації вимогам чинного законодавства та нормативної документації.

ВИСНОВОК

При виконанні даної бакалаврської роботи, було спроектовано лабораторну установку для демонстрації різних методів вимірювання вологості, а саме: психрометричний метод, метод точки роси, електричних методів, для використання яких було розроблено програмний код.

Розроблено та впроваджено в навчальний процес з дисципліни «Метрологія і технічні вимірювання в нафтогазовій промисловості» методичні вказівки до лабораторної роботи на базі спроектованої лабораторної установки для вимірювання вологості.

Проведено метрологічне дослідження лабораторної установки, та визначено розширену невизначеність результатів багаторазових вимірювань, яка становить:

$$U_{T1_ВИТ-1} = 0.029; U_{RH_DHT11} = 0.210;$$

$$U_{T2_ВИТ-1} = 0.020; U_{T1_HT607} = 0.011;$$

$$U_{T1_Асн.} = 0.031; U_{RH_HT607} = 0.163;$$

$$U_{T2_Асн.} = 0.029; U_{Td_HT607} = 0.042;$$

$$U_{\theta} = 0.031; U_{T_bud} = 0.030;$$

$$U_{T_DHT11} = 0.022; U_{RH_bud} = 0.084;$$

В розділі Охорони праці здійснено розрахунок необхідної кількості світильників, для досягнення оптимального рівня освітленості для роботи із лабораторною установкою.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guide to Instruments and Methods of Observation. – 2021. – Geneva : World Meteorological Organization. – 8th ed. – (WMO-No. 8). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://library.wmo.int/records/item/68695-guide-to-instruments-and-methods-of-observation?offset=8>
2. Bai, Y., & Wang, Y. (2017). *Humidity sensors based on film bulk acoustic resonators*. *Metrologia*, 54(4), 422–437. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa6dd0>
3. Pecunia, V. Roadmap on printable electronic materials for next-generation sensors / V. Pecunia [та ін.] // *Nano Futures*. – 2024. – Vol. 8. – P. 032001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/2399-1984/ad36ff>.
4. Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia* 1990, 27 (1) 3–10. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/1/002>.
5. Pinout Arduino UNO+WiFi R3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mysuploads3.banggood.com/products/20181118/20181118210336Pinout.pdf>
6. Cvjetković V. M., Stanković U. *Arduino based physics and engineering remote laboratory* // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2017. – Т. 545. – С. 560–574. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-50340-0_51.
7. Mihiretie B., Abebe T., & Tadesse T. *Arduino-based remote laboratory for physics education* // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Т. 1076. – № 1. – С. 012026. – DOI: [10.1088/1742-6596/1076/1/012026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1076/1/012026).
8. Dixon, G. Addition of Arduino-controlled Neopixel Array for Improved Lighting as Designed for Addition to Modular Cavity Photoinspection Periscope for Identification of Features Inside SRF Niobium Cavities [Електронний ресурс] / G. Dixon. – 2022. – Режим доступу: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22684.56968/2>

9. Міністерство освіти і науки України. Про затвердження Положення про організацію роботи з охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу в установах і закладах освіти : наказ від 26.12.2017 р. № 1669. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 23.01.2018 р. за № 100/31552. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0100-18#Text>.

10. Міністерство охорони здоров'я України. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» : наказ від 08.04.2014 р. № 248. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 06.05.2014 р. за № 472/25249. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>

11. Кривенко Г. М. Основи охорони праці та безпека життєдіяльності електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=1337>

12. ДБН В.2.5-28:2018 "Природне і штучне освітлення" [Електронний ресурс] : затв. наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 03.10.2018 р. № 264. – Івано-Франківськ : ДП "Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій", 2018. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2

13. Когутяк М.І. Мікроконтролери та програмовані логічні контролери IV електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=1443>

14. Чеховський С.А., Петришин І.С., Піндус Н.М., Ващишак С.П., Кононенко М.А., Романів В.М., Середюк О.Є., Витвицька Л.А. Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості. Навчальний посібник. -Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010 - 534с.

15. Піндус Н.М. Основи метрології. Лекційний потік електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=291>
16. Піндус Н.М. Метрологія та технологічні вимірювання в нафтогазовій промисловості (1, 2 змістовий модуль) електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=366>
17. Піндус Н.М. Метрологія та технологічні вимірювання в нафтогазовій промисловості (3, 4 змістовий модуль) електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=351>
18. Піндус Н.М. Метрологія та технологічні вимірювання в нафтогазовій промисловості (5 змістовий модуль) електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=352>
19. Криницький О.С. Фізичні основи смарт-технологій у вимірювальній техніці електронний курс – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=2190>
20. Кривенко Г. М., Стеліга І. І. Охорона праці: методичні вказівки до виконання розділу дипломної роботи бакалавра. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. – 86 с
21. НПАОП 0.00-1.04-07. «Правила вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання» - Державний комітет України з промислової безпеки охорони праці та гірничого нагляду. - 2008р.
22. Екологічна безпека нафтогазових об'єктів / Говдяк Р.М., Семчук Я.М., Чабанович Л.Б. и др. – 2007. – 554 с.
23. Екологічні ризики, збитки та раціональні межі використання надр в Україні / Довгий С.О., Коржнев М.М., Ляшенко О.І., Яковлев Є.О. 2012. – 316 с.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: «Проектування та метрологічний аналіз лабораторної установки для вимірювання вологості повітря»

Обсяг пояснювальної записки 74 аркуша.

Перелік аркушів графічної частини (аркушів):

Аркуш 1 БР.МТ-05.00.00.001 – Джерела похибок засобів вимірювальної техніки для вимірювання вологості;

Аркуш 2 БР.МТ-05.00.00.002 – Психрометричні таблиці, модельні рівняння їх побудови;

Аркуш 3 БР.МТ-05.00.00.003 – Результати експериментальних досліджень проведених з використанням психрометра ВИТ-1;

Аркуш 4 БР.МТ-05.00.00.004 – Результати експериментальних досліджень проведених з використанням аспіраційного психрометра Ассмана;

Аркуш 5 БР.МТ-05.00.00.005 – Результати експериментальних досліджень проведених з використанням приладу для вимірювання вологості ґрунту;

Аркуш 6 БР.МТ-05.00.00.006 – Результати експериментальних досліджень проведених з використанням гігрометра точки роси НТ-607;

Аркуш 7 БР.МТ-05.00.00.007 – Результати експериментальних досліджень проведених з використанням датчику ДНТ-11 моделі розумного будинку;

Аркуш 8 БР.МТ-05.00.00.008 – Лабораторна установка для вимірювання вологості.

20.06.2025.

Маланчук С.В.

(Підпис)

(П.І.Б.)

Програмний код приладу для вимірювання вологості ґрунту

1. Введення в дію бібліотек для роботи:

```
#include <ESP8266WiFi.h> //Бібліотека для роботи з Wi-Fi на модулі ESP8266;
```

```
#include <NTPClient.h>// Бібліотека для синхронізації часу з NTP-сервером;
```

```
#include <WiFiUdp.h>//Бібліотека для обміну даними через UDP (необхідна для NTPClient);
```

```
#include <DHT.h>// Бібліотека для роботи з датчиком температури та вологості DHT;
```

2. Введення в пам'ять програми назви та паролю Wi-fi мережі для підключення:

```
const char* ssid = "Назва мережі"; //Назва Wi-Fi мережі, що буде в подальшому використовуватись для підключення;
```

```
const char* password = "Пароль мереж";//Пароль Wi-Fi мережі;
```

```
WiFiServer server(80);// Створення серверу на інтернет-порті 80 (HTTP);
```

```
WiFiUDP ntpUDP;// UDP-об'єкт для NTP клієнта;
```

```
NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org", 3600 * 2);// NTP клієнт з сервером pool.ntp.org і часовим зсувом +2 години (7200 секунд);
```

3. Визначення датчиків та пінів, до яких вони підключені:

```
#define DHTPIN 2 // Визначаємо пін, до якого підключено датчик DHT;
```

```
#define DHTTYPE DHT11 //Визначаємо тип датчика — DHT11;
```

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);// Ініціалізація об'єкта для зчитування даних з DHT11;
```

```
#define SOIL_MOISTURE_PIN 0 // Визначаємо аналоговий пін для датчику вимірювання вологості ґрунту;
```

4. Функція підключення до Wi-Fi:

```
void connectToWiFi() {
```

```
WiFi.begin(ssid, password); // Починаємо підключення до Wi-Fi мережі;
```

```
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { // Чекаємо, поки не буде  
здійснено підключення;
```

```
    delay(500); // Затримка для зменшення частоти перевірки успішного  
підключення;
```

```
    }
```

```
    }
```

5. Функція `setup()` – виконується один раз при запуску приладу:

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(115200); // Ініціалізуємо серійний монітор для виводу даних;
```

```
    connectToWiFi(); // Підключення до Wi-Fi;
```

```
    dht.begin(); // Ініціалізація датчика DHT;
```

```
    server.begin(); // Запускаємо сервер;
```

```
    timeClient.begin(); // Запускаємо NTP клієнт;
```

```
    Serial.print("IP сервера: ");
```

```
    Serial.println(WiFi.localIP()); // Виводимо IP-адресу мікроконтролера в  
мережі для подальшого підключення до сервера;
```

```
    }
```

6. Функція `loop()` – виконується постійно, увесь час, поки прилад працює:

```
void loop() {
```

```
    timeClient.update(); // Оновлюємо поточний час з NTP-серверу;
```

```
    WiFiClient client = server.available(); // Чекаємо підключення клієнта до  
серверу;
```

```
    if (client) { // Якщо клієнт підключився;
```

```
        while (!client.available()) delay(1); // Чекаємо, поки клієнт надішле запит;
```

```
        // Зчитуємо дані з датчиків
```

```
        float temperature = dht.readTemperature(); // Зчитуємо температуру
```

```
        float humidity = dht.readHumidity(); // Зчитуємо вологість повітря
```

```
        int soilRaw = analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN); // Зчитуємо сире  
значення з датчика ґрунту
```

```

int soilPercent = map(soilRaw, 0, 1023, 0, 100); // Конвертуємо значення в
%
soilPercent = constrain(soilPercent, 0, 100); // Обмежуємо значення від 0 до
100

// Виведення зчитаних вимірних даних у серійний монітор
Serial.print("Температура: ");
Serial.print(temperature);
Serial.print(" °C| Вологість: ");
Serial.print(humidity);
Serial.print(" %| Вологість ґрунту: ");
Serial.print(soilPercent);
Serial.println(" %");

// Формування HTTP веб-сторінки
String html =
"HTTP/1.1 200 OK\r\nContent-Type: text/html; charset=UTF-8\r\n\r\n" //
HTTP заголовки
//HTML-код вебсторінки з оновленням:
"<!DOCTYPE html><html><head>"
"<title>Дані з датчиків</title>" // Назва сторінки
"<script src='https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js'></script>" // Підключення
Chart.js
"<meta http-equiv='refresh' content='5'>" // Автоматичне оновлення
сторінки кожні 5 сек
"<style>body{font-family:sans-serif;padding:20px;} h1 {color:#007BFF;}
.icon{font-size:50px;color:#007BFF;}</style>"
"</head><body>"
"<h1>Дані з датчиків ⚡</h1>"
//Вивід показів:
"<p>Температура: " + String(temperature) + " °C;</p>"
"<p>Вологість повітря: " + String(humidity) + " %</p>"

```

```

"<p>Вологість ґрунту: " + String(soilPercent) + " %</p>"
//Побудова графіків:
"<canvas id='tempChart'></canvas>"
"<canvas id='humidityChart'></canvas>"
"<canvas id='soilChart'></canvas>"
//JavaScript для графіків:
"<script>"
  "const tempChart = new
Chart(document.getElementById('tempChart'), {type:'line',data: {labels:['Зараз'],dat
atasets:[ {label:'Температура (°C)',data:[" + String(temperature) +
"],borderColor:'red',fill:false } ]},options: { scales: { y: { beginAtZero:true } } } });"
  "const humidityChart = new
Chart(document.getElementById('humidityChart'), {type:'line',data: {labels:['Зараз']
,datasets:[ {label:'Вологість повітря (%)',data:[" + String(humidity) +
"],borderColor:'blue',fill:false } ]},options: { scales: { y: { beginAtZero:true } } } });"
  "const soilChart = new
Chart(document.getElementById('soilChart'), {type:'line',data: {labels:['Зараз'],data
sets:[ {label:'Вологість ґрунту (%)',data:[" + String(soilPercent) +
"],borderColor:'green',fill:false } ]},options: { scales: { y: { beginAtZero:true } } } });"
  "</script>"
  "</body></html>";
  client.print(html);
  client.stop();
}
}

```

Програмний код моделі розумного будинку

1. Введення в дію бібліотек для роботи:

```
#include <WiFi.h> // Wi-Fi з'єднання
#include <ESPmDNS.h> // Підтримка DNS по локальній мережі
#include <WiFiClient.h> // TCP клієнт для обробки HTTP
#include <Adafruit_NeoPixel.h> // Керування NeoPixel світлодіодами
#include <Wire.h> // Протокол I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Бібліотека для LCD дисплею по I2C
#include <ESP32Servo.h> // Бібліотека для керування серво на ESP32
#include <DHT.h> // Підключення датчика температури/вологості DHT11
```

2. Визначення приладів та пінів, до яких вони підключені:

```
#define led_y 12 // Жовтий світлодіод
#define LED_PIN 26 // Пін даних для NeoPixel
#define LED_COUNT 4 // Кількість світлодіодів у стрічці
#define BUZZER_PIN 25 // Пін для пицалки
#define FAN_PIN1 19 // Піни керування вентилятором (1)
#define FAN_PIN2 18 // Піни керування вентилятором (2)
#define GAS_PIN 23 // Газовий сенсор (цифровий вихід)
#define PIR_SENSOR_PIN 14 // PIR-датчик руху
#define RAIN_SENSOR_PIN 34 // Дощовий сенсор (аналоговий)
#define DHT_PIN 17 // Пін для DHT11
```

3. Ініціалізація приладів:

```
DHT dht(DHT_PIN, DHT11); // Ініціалізація DHT11
Servo windowServo, doorServo; // Серво для вікна та дверей
Adafruit_NeoPixel strip(LED_COUNT, LED_PIN, NEO_GRB +
NEO_KHZ800); // Стрічка NeoPixel
LiquidCrystal_I2C mylcd(0x27, 16, 2); // LCD 16x2 з адресою 0x27
```

4. Налаштування Wi-fi:

```
const char* ssid = "Назва Wi-fi мережі"; // Назва Wi-Fi мережі
```

```
const char* password = "Пароль Wi-fi мережі";// Пароль Wi-Fi  
WiFiServer server(80);// Створення серверу на інтернет-порті 80 (HTTP);
```

5. Функція setup() – виконується один раз при запуску приладу:

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200); // Ініціалізація серійного монітора  
  delay(10);  
  mylcd.init(); // Ініціалізація LCD  
  mylcd.backlight();  
  mylcd.setCursor(0, 0);  
  mylcd.print("Connecting...");  
  // Налаштування пінів  
  pinMode(led_y, OUTPUT);  
  pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);  
  pinMode(FAN_PIN1, OUTPUT);  
  pinMode(FAN_PIN2, OUTPUT);  
  pinMode(GAS_PIN, INPUT);  
  pinMode(PIR_SENSOR_PIN, INPUT);  
  // Прив'язка серво до пінів  
  windowServo.attach(32);  
  doorServo.attach(33);  
  // Ініціалізація NeoPixel  
  strip.begin();  
  strip.show(); // Вимикає всі пікселі  
  strip.setBrightness(50);  
  dht.begin(); // Запуск сенсора DHT  
  // Підключення до Wi-Fi  
  WiFi.begin(ssid, password);  
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
    delay(500);  
    Serial.print(".");
```

```
}  
// Виведення IP-адреси на LCD  
mylcd.clear();  
mylcd.setCursor(0, 0);  
mylcd.print("Connected!");  
mylcd.setCursor(0, 1);  
mylcd.print(WiFi.localIP());  
// Запуск сервера  
server.begin();  
}
```

6. Функція loop:

```
void loop() {  
  WiFiClient client = server.available(); // Чекаємо нового клієнта  
  if (!client) return;  
  while (!client.available()) {  
    delay(1);  
  }  
  String req = client.readStringUntil('\r'); // Зчитування першого рядка HTTP-  
запиту  
  client.read(); // Пропуск символу '\n'
```

7. Обробка http-запитів

```
//Світлодіод  
if (req.indexOf("/led/on") != -1) {  
  digitalWrite(led_y, HIGH);  
} else if (req.indexOf("/led/off") != -1) {  
  digitalWrite(led_y, LOW);  
}  
//Вікно  
else if (req.indexOf("/window/on") != -1) {  
  windowServo.write(90); // Відкрити
```

```
} else if (req.indexOf("/window/off") != -1) {  
windowServo.write(0);// Закрити  
}  
//Двері  
else if (req.indexOf("/door/on") != -1) {  
doorServo.write(90); // Відкрити  
} else if (req.indexOf("/door/off") != -1) {  
doorServo.write(0);// Закрити  
}  
//Вентилятор  
else if (req.indexOf("/fan/on") != -1) {  
digitalWrite(FAN_PIN1, HIGH);  
digitalWrite(FAN_PIN2, LOW);  
} else if (req.indexOf("/fan/off") != -1) {  
digitalWrite(FAN_PIN1, LOW);  
digitalWrite(FAN_PIN2, LOW);  
}  
//NeoPixel: зелений  
else if (req.indexOf("/green/on") != -1) {  
colorWipe(strip.Color(0, 255, 0), 50);  
}  
//NeoPixel: червоний  
else if (req.indexOf("/red/on") != -1) {  
colorWipe(strip.Color(255, 0, 0), 50);  
}  
//NeoPixel: синій  
else if (req.indexOf("/blue/on") != -1) {  
colorWipe(strip.Color(0, 0, 255), 50);  
}  
//Пищалка
```

```
else if (req.indexOf("/buzzer/on") != -1) {
digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
} else if (req.indexOf("/buzzer/off") != -1) {
digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
}
//Дощовий сенсор
else if (req.indexOf("/rain/on") != -1) {
int rainValue = analogRead(RAIN_SENSOR_PIN);
client.println(rainValue > 1000 ? "Dry" : "Wet");
}
//Газовий сенсор
else if (req.indexOf("/gas/on") != -1) {
boolean gasVal = digitalRead(GAS_PIN);
client.println(gasVal == 0 ? "Небезпечно" : "Безпечно");
}
//PIR сенсор руху
else if (req.indexOf("/pir/on") != -1) {
boolean pirVal = digitalRead(PIR_SENSOR_PIN);
client.println(pirVal == 1 ? "Рух виявлено!" : "Спокійно");
}
//DHT11: температура
else if (req.indexOf("/temp/on") != -1) {
float temp = dht.readTemperature();
client.println(String(temp));
}
//DHT11: вологість
else if (req.indexOf("/hum/on") != -1) {
float hum = dht.readHumidity();
client.println(String(hum));
}
```

8. Відправлення http-відповіді

```
client.println("HTTP/1.1 200 OK");
client.println("Content-Type: text/html");
client.println("");
client.println("<!DOCTYPE HTML>");
client.println("<html><body><h1>ESP32 IoT OK</h1></body></html>");
delay(1); // Коротка пауза перед закриттям з'єднання
}
```

9. Функція заповнення NeoPixel стрічки кольором

```
void colorWipe(uint32_t color, int wait) {
for (int i = 0; i < strip.numPixels(); i++) {
strip.setPixelColor(i, color);
strip.show();
delay(wait);
}
}
```

Проведення розрахунків у середовищі Matlab

Результати експерименту:

Розмір вибірки n: 12.00

Вимірні значення сухого термометра психрометра ВИТ-1:

22.10; 21.10; 21.20; 22.00; 21.90; 21.60; 22.00; 24.30; 25.00; 25.00; 24.70; 24.00;

Вимірні значення вологого термометра психрометра ВИТ-1:

20.30; 21.30; 21.00; 21.10; 22.00; 21.80; 21.60; 22.40; 23.20; 23.80; 23.40; 22.70;

Вимірні значення сухого термометра психрометра Ассмана:

22.00; 20.85; 20.70; 22.30; 21.70; 21.90; 22.20; 24.05; 25.00; 25.30; 24.90; 24.10;

Вимірні значення вологого термометра психрометра Ассмана:

20.20; 19.95; 19.50; 20.70; 21.00; 21.40; 21.60; 23.60; 23.70; 23.80; 23.20; 22.60;

Вимірні значення вологості ґрунту:

73.00; 74.00; 74.00; 75.00; 75.00; 76.00; 77.00; 77.00; 78.00; 78.00; 77.00; 77.00;

Вимірні значення датчика відносної вологості DHT11:

37.00; 41.00; 44.00; 70.00; 66.00; 60.00; 58.00; 60.00; 67.00; 56.00; 44.00; 44.00;

Вимірні значення датчика температури DHT11:

23.00; 22.00; 22.00; 23.00; 22.00; 23.00; 24.00; 24.00; 24.00; 25.00; 25.00; 25.00;

Вимірні значення температури сухого термометра гігрометра точки роси HT607:

23.00; 22.00; 21.90; 21.40; 22.30; 23.10; 22.80; 21.80; 21.40; 21.70; 22.00; 22.50;

Вимірні значення відносної вологості гігрометра точки роси HT607:

85.00; 95.10; 95.70; 89.70; 87.00; 95.20; 89.00; 79.00; 67.00; 76.00; 78.00; 83.90;

Вимірні значення температури точки роси гігрометра точки роси HT607:

14.50; 21.20; 21.30; 19.20; 20.00; 22.30; 20.70; 18.60; 16.30; 17.20; 18.70; 20.00;

Вимірні значення датчика відносної вологості моделі розумного будинку:

37.00; 41.00; 42.00; 44.00; 48.00; 52.00; 48.00; 48.00; 47.00; 47.00; 50.00; 52.00;

Вимірні значення датчика температури моделі розумного будинку:

22.00; 21.10; 21.40; 22.70; 22.30; 22.40; 22.60; 24.40; 25.40; 25.60; 25.10; 24.40;

Результати обчислень:

Розрахунок середнього значення температури сухого термометра психрометра ВИТ-1: 22.91 °C

Розрахунок середнього значення температури вологого термометра психрометра ВИТ-1: 22.05 °C

Розрахунок середнього значення температури сухого термометра психрометра Ассмана: 22.92 °C

Розрахунок середнього значення температури вологого термометра психрометра Ассмана: 21.77 °C

Розрахунок середнього значення вологості ґрунту приладу для вимірювання вологості ґрунту: 75.92 %

Розрахунок середнього значення відносної вологості датчика вологості DHT11: 53.92 %

Розрахунок середнього значення температури датчика температури DHT11: 23.50 °C

Розрахунок середнього значення температури сухого термометра гігрометра точки роси HT607: 22.16 °C

Розрахунок середнього значення відносної вологості гігрометра точки роси HT607: 85.05 %

Розрахунок середнього значення температури температури точки роси гігрометра точки роси HT607: 19.17 °C

Розрахунок середнього значення відносної вологості датчика вологості моделі розумного будинку: 46.33 %

Розрахунок середнього значення температури датчика температури моделі розумного будинку: 23.28 °C

Розрахунок експериментального стандартного відхилення сухого термометра психрометра ВИТ-1 S: 1.547

Розрахунок експериментального стандартного відхилення вологого термометра психрометра ВИТ-1 S: 1.072

Розрахунок експериментального стандартного відхилення сухого термометра психрометра Ассмана S: 1.653

Розрахунок експериментального стандартного відхилення вологого термометра психрометра Ассмана S: 1.560

Розрахунок експериментального стандартного відхилення приладу для вимірювання вологості ґрунту S: 1.676

Розрахунок експериментального стандартного відхилення датчика вологості DHT11 S: 11.357

Розрахунок експериментального стандартного відхилення датчика температури DHT11 S: 1.168

Розрахунок експериментального стандартного відхилення температури гігрометра точки роси HT607 S: 0.584

Розрахунок експериментального стандартного відхилення відносної вологості гігрометра точки роси HT607 S: 8.810

Розрахунок експериментального стандартного відхилення температури точки роси гігрометра точки роси HT607 S: 2.269

Розрахунок експериментального стандартного відхилення датчика вологості моделі розумного будинку S: 4.539

Розрахунок експериментального стандартного відхилення датчика температури моделі розумного будинку S: 1.600

Розрахунок стандартної невизначеності сухого термометра психрометра ВИТ-1 u: 0.446
Розрахунок стандартної невизначеності вологого термометра психрометра ВИТ-1 u: 0.310
Розрахунок стандартної невизначеності сухого термометра психрометра Ассмана u: 0.477
Розрахунок стандартної невизначеності вологого термометра психрометра Ассмана u: 0.450
Розрахунок стандартної невизначеності приладу для вимірювання вологості ґрунту u: 0.484
Розрахунок стандартної невизначеності датчика вологості DHT11 u: 3.279
Розрахунок стандартної невизначеності датчика температури DHT11 u: 0.337
Розрахунок стандартної невизначеності температури гігрометра точки роси HT607 u: 0.169
Розрахунок стандартної невизначеності відносної вологості гігрометра точки роси HT607 u: 2.543
Розрахунок стандартної невизначеності температури точки роси гігрометра точки роси HT607 u: 0.655
Розрахунок стандартної невизначеності датчика вологості моделі розумного будинку u: 1.310
Розрахунок стандартної невизначеності датчика температури моделі розумного будинку u: 0.462

Розрахунок розширеної невизначеності сухого термометра психрометра ВИТ-1 U: 0.029
Розрахунок розширеної невизначеності вологого термометра психрометра ВИТ-1 U: 0.020
Розрахунок розширеної невизначеності сухого термометра психрометра Ассмана U: 0.031
Розрахунок розширеної невизначеності вологого термометра психрометра Ассмана U: 0.029
Розрахунок розширеної невизначеності приладу для вимірювання вологості ґрунту U: 0.031
Розрахунок розширеної невизначеності датчика вологості DHT11 U: 0.210
Розрахунок розширеної невизначеності датчика температури DHT11 U: 0.022
Розрахунок розширеної невизначеності температури гігрометра точки роси HT607 U: 0.011
Розрахунок розширеної невизначеності відносної вологості гігрометра точки роси HT607 U: 0.163
Розрахунок розширеної невизначеності температури точки роси гігрометра точки роси HT607 U: 0.042
Розрахунок розширеної невизначеності датчика вологості моделі розумного будинку U: 0.084
Розрахунок розширеної невизначеності датчика температури моделі розумного будинку U: 0.030
Відносна вологість повітря, виміряна психрометром ВИТ-1: 90.500
Відносна вологість повітря, виміряна психрометром Ассмана: 89.000
Розрахунок тиску насиченої водяної пари за психрометром ВИТ-1: 2793.807
Розрахунок тиску насиченої водяної пари за психрометром Ассмана: 2795.217
Розрахунок парціального тиску насиченої водяної пари за психрометром ВИТ-1: 2528.396
Розрахунок парціального тиску насиченої водяної пари за психрометром Ассмана: 2528.396
Розрахунок температури точки роси за психрометром ВИТ-1: 21.270
Розрахунок температури точки роси за психрометром Ассмана: 21.270