

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Конспект лекцій
з дисципліни:
«Вимірювальна техніка»
Частина 3

для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія», I
ступеня вищої освіти (бакалавр) освітньої програми
«Енергоефективність та енергозбереження» денної та заочної
форми навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Вимірювальна техніка» Частина 3 для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія», I ступеня вищої освіти (бакалавр), освітньої програми «Енергоефективність та енергозбереження» денної та заочної форми навчання / «Запорізька політехніка» нац. ун-т. Каф. електропостачання промислових підприємств; уклад.: В.Ю. Міщенко. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. 36 с.

Укладачі:

В.Ю. Міщенко, к.т.н., старш.викл.

Рецензент:

Ю.Б. Ліуш, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск:

Шрам О.А., зав. кафедри, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електропостачання промислових
підприємств»
Протокол № 8.
від « 06 » березня 2026р.

Рекомендовано до видання
НМК електротехнічного
факультету
Протокол № 8.
від « 19 » березня 2026р.

ЗМІСТ

9 Вимірювання аеродинамічної енергії.....	141
9.1 Крильчатий анемометр АСО-3.....	143
9.2 Чашковий анемометр МС-13.....	146
9.3 Термоанемометри.....	148
9.4 Термоанемометр KURZ (серія 440).....	149
9.5 Цифровий термоанемометр VELOCICALC PLUS.....	151
10 Вимірювальні прилади сонячної радіації.....	155
10.1 Піргеліометр компенсаційний Онгстрема.....	156
10.2 Геліограф універсальний.....	158
10.3 Термоелектричний актинометр Савінова.....	162
10.4 Піранометр термоелектричний Янишевського.....	165
10.5 Альбедометр термоелектричний.....	169
Перелік джерел посилань.....	173

9 ВИМІРЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Вимірювальне обладнання, яке здійснює безпосереднє вимірювання аеродинамічної потужності, відсутнє, тому аеродинамічна потужність може бути визначена непрямым способом за формулою [2, 5]:

$$P_{\text{аеродин}} = Q \cdot H,$$

де H – тиск, Па;

Q – витрата, м³/хв

Повні тиски в різних перерізах повітропроводу можна визначити шляхом вимірювання статичного тиску, який мало змінюється впродовж перерізу (за допомогою отвору в стінці або трубкою), і, додавши до нього (у нагнітальній частині повітропроводу, а у всмоктувальній - віднявши) динамічний тиск, який обчислюється за середньою швидкістю:

$$H = P_{\text{ст}} \pm v \cdot \frac{\rho}{2},$$

де $P_{\text{ст}}$ – вимірюваний статичний тиск, Па;

v – середня швидкість потоку, м/с;

ρ – густина переміщуваного повітря, кг/м³.

Якщо на розглянутій ділянці повітропроводу є врізаний прилад для вимірювання витрати повітря (ротаметр, звужуючий пристрій), то використовуються показання цього пристрою. На ділянках повітропроводу, де таких вимірювачів немає, об'ємна витрата визначається за середньою швидкістю потоку й геометричними розмірами трубопроводу за формулою:

$$Q = v \cdot F,$$

де v – середня швидкість потоку, м/с;

F – площа поперечного перерізу на вимірюваній ділянці, м².

Отже, для визначення аеродинамічної потужності необхідне застосування таких приладів:

- для вимірювання тиску - рідинні манометри, мікроманометри;
- для відбирання тисків у трубопроводах - пневмометричні трубки;
- для вимірювання швидкості потоку - чашкові й лопасні анемометри, термоанемометри;
- для визначення параметрів навколишнього повітря - барометри (для вимірювання атмосферного тиску), різного роду термометри (для вимірювання температури), психрометри (для визначення вологості повітря).

Необхідно відмітити, що на даний час існують комплексні прилади, які дозволяють проводити вимірювання швидкості, тиску й температури потоку повітря; температури і вологості повітря навколишнього середовища й т. ін.

Вимірювання швидкостей повітряного потоку в окремих його точках або середніх швидкостей у перерізі повітропроводу може здійснюватися непрямым пневмометричним і безпосереднім анемометричним способами.

Пневмометричний спосіб заснований на вимірюванні динамічного тиску потоку повітря й визначенні швидкості потоку за формулою:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{дин}}}{\rho}},$$

де $p_{\text{дин}}$ – вимірюваний динамічний тиск потоку, Па;

ρ – густина переміщуваного повітря, кг/м^3 .

При анемометричному способі в повітропроводі встановлюють вимірювач швидкості - анемометр у вигляді крильчатки малого розміру, яка обертається під дією потоку із частотою пропорційною швидкості потоку.

Замість тіла, що обертається в потоці, застосовують тонкі металеві нитки (у термоанемометрах), які нагріваються електрострумом, або напівпровідникові елементи (у термісторах), у

яких зміни сили струму, електроопору або температури пропорційні швидкості потоку.

9.1 Крильчатий анемометр АСО-3

Крильчатий анемометр АСО-3 (рисунок 9.1) призначений для вимірювання швидкості повітря від 0,2 до 5 м/с, усередненої за певний проміжок часу. Похибка вимірювання залежить від швидкості повітря й визначається за формулою [3]:

$$\Delta v = \pm(0,06 \cdot v + 0,1),$$

де v - середня швидкість вимірюваного потоку, м/с.

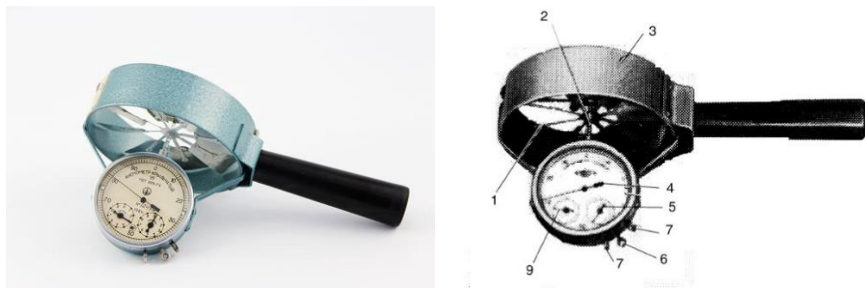


Рисунок 9.1 – Крильчатий анемометр АСО-3

Прилад складається з корпусу обичайки 3, усередині якого розміщена крильчатка 1, насаджена на трубчасту вісь 2. Під дією повітряного потоку крильчатка починає обертатися. Частота обертання залежить від швидкості потоку, що набігає. Частота обертання крильчатки вимірюється лічильним механізмом 4. Лічильний механізм має три стрілки. Циферблат 5 механізму має відповідно три шкали: одиниць, сотень і тисяч.

Обертанням аретира 6 проти годинникової стрілки лічильний механізм вмикається.

У корпус приладу з обох сторін аретира вкручені два вушка 7. Через вушка пропускається шнурок, за допомогою якого вмикається й

вимикається анеометр, піднятий на стійці. Шнурок прив'язується до аретиру.

У ручці приладу є конічний отвір, який служить для сполучення приладу зі стійкою або штангою.

9.2 Чашковий анеометр МС-13

Чашковий анеометр МС-13 (рисунок 9.2) призначений для вимірювання середньої швидкості повітря 1 - 20 м/с за певний проміжок часу. Похибка вимірювання залежить від швидкості повітря й визначається за формулою [3]:

$$\Delta v = \pm(0,06 \cdot v + 0,3)$$

Приймальною частиною анеометра є чотиричашковий метеорологічна млинок 1, насаджена на вал 2.

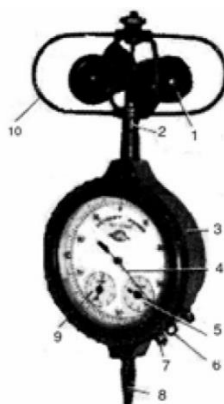


Рисунок 9.2 – Чашковий анеометр МС-13

Обертання вертушки передається валом лічильному механізму 3. Циферблат лічильного механізму має три шкали: одиниць, сотень і тисяч.

Центральна стрілка 4 показує одиниці й десятки, ліва стрілка 9 показує сотні, права стрілка 5 - тисячі обертів вертушки.

Вмикання й вимикання лічильного механізму здійснюється аретиром 6, обертанням його відповідно проти годинникової стрілки або за нею.

У нижній частині приладу є гвинт 8 для закріплення приладу на штанзі або дерев'яній стійці.

У корпусі приладу з обох сторін аретира вкручені два вушка 7, через які пропускається шнурок, за допомогою якого вмикається й вимикається анемометр у випадку закріплення його на стійці.

Вертушка анемометра захищена від механічних ушкоджень хрестовиною із дротяних дужок 10, яка призначена також для закріплення верхнього вала вертушки.

Вимірювання швидкості повітря анемометрами виконується в такій послідовності: перед вимірюванням швидкості повітряного потоку за допомогою аретира вмикають лічильний пристрій і записують початковий показ лічильника. Після цього анемометр вносять у повітряний потік так, щоб вісь крильчатого анемометра розташовувалася паралельно повітряному потоку. Вісь чашкового анемометра повинна бути перпендикулярна напрямку руху повітря. Відхилення осі від зазначених положень не повинно перевищувати 12–15°.

Через 5-10 с після внесення анемометра в потік одночасно вмикають секундомір і лічильний пристрій анемометра. Після 30-100 с механізм і секундомір вмикають і записують результуючий показ лічильника й тривалість вимірювання в секундах. Тривалість відліку менше 30 с не допускається.

Кількість поділок n на 1 с, визначають за формулою:

$$n = \frac{N_2 - N_1}{t},$$

де N_2 , N_1 – відповідно кінцевий та початковий покази лічильного механізму;

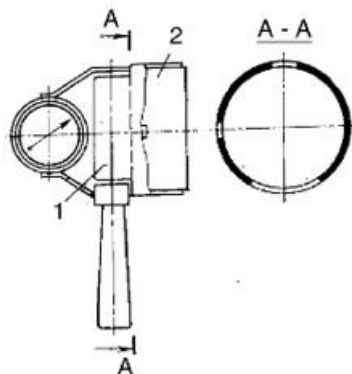
t - час.

Швидкість повітряного потоку визначається за графіком залежності $v = f(n)$, отриманої при таруванні приладу.

Для визначення середнього потоку й витрати повітря (так само, як і під час вимірюванні тисків) за нерівномірного потоку координати точок вимірювання тисків і швидкостей, а також кількість точок

визначається формою й розмірами мірного перерізу за кресленням (рис. 9.4). Максимальне відхилення координат точок вимірювань від зазначених на кресленнях не повинно перевищувати . У кожній точці повинно бути виконано не менше трьох вимірювань $\pm 10\%$

В отворах, закритих решітками, вимірювання виконують анемометрами з насадками, які під час вимірювання щільно прилягають до решітки (рисунок 9.3) [3].



1 – анемометр; 2 – насадка.

Рисунок 9.3 – Крильчатий анемометр з насадкою

Насадки зазвичай виготовляють для чашкових анемометрів з листової сталі або бляхи, а для крильчатих - з відрізків пластмасових труб.

Під час визначення швидкості повітряного потоку (рисунок 9.4) біля решітки для визначення витрати вимірюване значення повинно бути скоректоване поправочним коефіцієнтом, який визначається експериментально й зазвичай дорівнює 0,7-1,0.

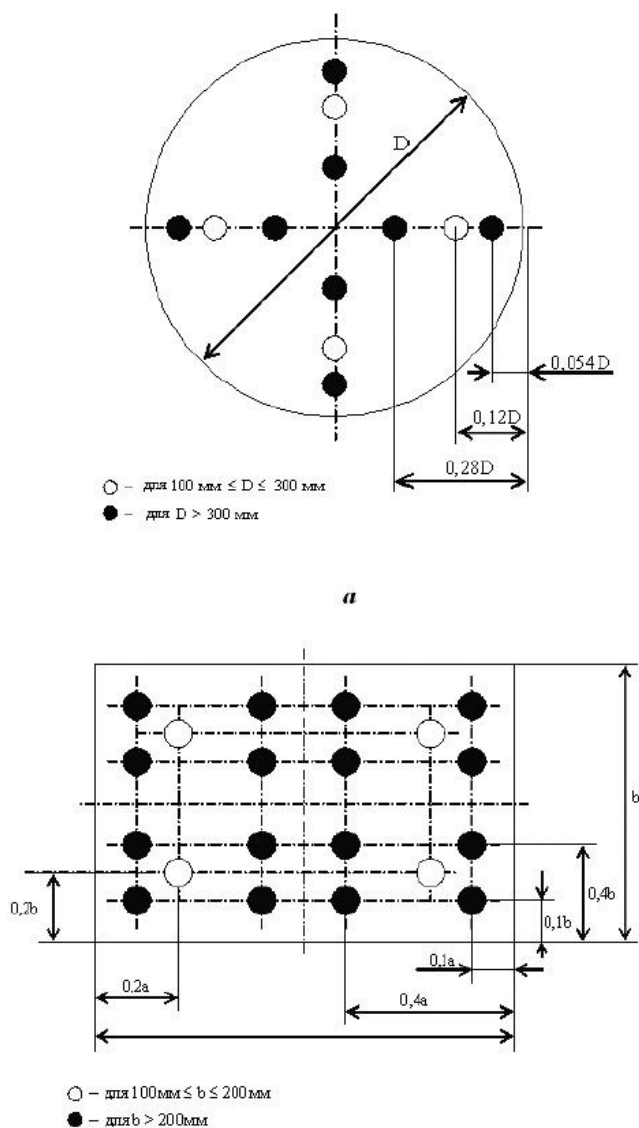


Рисунок 9.4 – Визначення координат точок вимірювань

9.3 Термоанемометри

Термоанемометри - це прилади, призначені для вимірювання швидкості повітряного потоку і його температури.

Термоанемометр конструкції ВНИИГС зображений на рисунку 9.5 [5, 6].

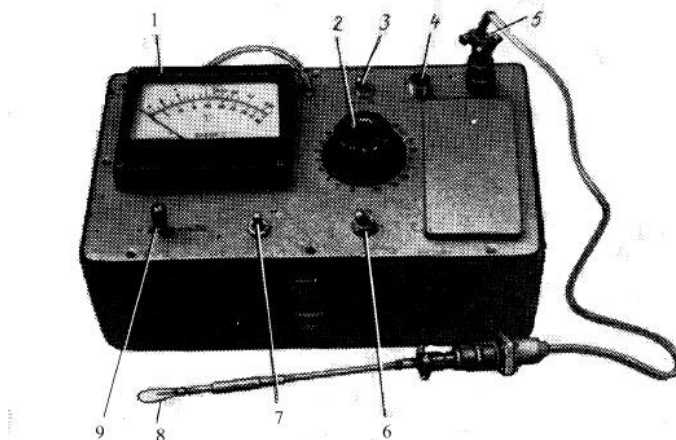


Рисунок 9.5 – Термоанемометр конструкції ВНИИГС

Залежно від моделі прилади можуть вимірювати швидкість повітряного потоку в діапазоні 0,1–5 м/с або 0,1–10 м/с. Діапазон вимірювання температури 0–50 °С. Похибка вимірювання температури не перевищує 1%.

Живлення приладу залежно від моделі може здійснюватися від мережі змінного струму 220 В або батарей.

Температуру й швидкість потоку вимірюють термоанемометрами в такий спосіб.

Прилад встановлюють горизонтально й за допомогою коректора ставлять стрілку гальванометра на нульову поділку шкали. Давач розміщується в місці вимірювання температури й швидкості потоку; роз'єм з'єднувального проводу датчика вставляється в гніздо з позначкою «Давач». Перемикач роду роботи встановлюється в положення «Контроль». Вимикач - в положення «Ввімкнено». За допомогою потенціометра стрілка гальванометра встановлюється в

положення «Температура» і визначається температура потоку за нижньою шкалою гальванометра. Перемикач компенсатора встановлюється в положення, яке відповідає вимірюваній температурі, і перемикач роду робіт переводиться в положення «Швидкість». Після прогрівання давача (приблизно 30 с) визначається швидкість потоку за верхньою шкалою.

9.4 Термоанемометр KURZ (серія 440)

Портативний вимірювач швидкості повітря KURZ серії 440 - зручний у застосуванні високоточний інструмент для вимірювання швидкості повітря, статичного тиску й температури під час нагрівання, вентиляції й кондиціювання повітря (HVAC), промислового водню, для вимірювань під час проведення контролю, професійної безпеки й проведення дослідницьких робіт, працює від батарей.

Портативний вимірювач швидкості повітря KURZ має точність і повторюваність: $\pm 2\%$ для кожної повної шкали режиму й $\pm 0,25\%$ для повної шкали відтворюваності вище широкого температурного режиму від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Термоанемометри серії 440 найпростіші у вживанні, вони мають один зонд і мінімум кнопок.

Всі вимірювачі швидкості повітря KURZ серії 440 забезпечені швидкісним зондом "DuraFlo" довжиною 33 см., переносний екран, що втягується; вимірювач зі зчитувачем; пристрій статичного тиску; жорсткий переносний футляр. Властивості екрана зонда такі, що він може переміщуватися вниз по кабелю зонда, по всій довжині зонда майже до 51 см.

Прилад працює таким чином. Основним чутливим елементом 440-ої серії портативних вимірювачів швидкості повітря є зонд KURZ "DuraFlo". Цей зонд складається із двох сенсорів: швидкості й температури. Сенсор швидкості - це анемометр постійної температури, який вимірює "стандартну" швидкість (переміщення повітря за температури $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску 760мм ртутного стовпчика), реєструючи ефект охолодження під час проходження через нагрітий сенсор потоків, які переміщуються. Сенсор швидкості нагрівається від електричної мережі. Сенсор швидкості нерівний і великий - він зроблений крихкого дроту великого опору, а тому стійкий до пошкоджень і нечутливий до

можливих забруднень. Температура сенсора - буде точно скомпенсована за рахунок коливань температури в широкому діапазоні. Максимальна температура сенсора швидкості лише на 23,89 °C може перевищувати температуру навколишнього середовища.

Зонд використовується, для визначення напряду та вимірювання швидкості повітря у відкритих просторах, трубках і поворотних отворах. Вимірювання статичного тиску здійснюють за допомогою спеціального інструмента. Пристосування для вимірювання тиску має невелику насадку, яку використовують для спрямування повітря на сенсор швидкості зонда. Потік повітря, який генерується статичним тиском, пропорційний його значенню. Вимірюються, як додатні, так і від'ємні значення статичного тиску.

Слід відмітити, що зчитування швидкості з усіх вимірювачів швидкості повітря KURZ відбувається за стандартних умов - 25 °C і 760мм тиску ртутного стовпа, тому здійснюються прямі вимірювання локальних швидкостей повітря. Щоб одержати дійсну швидкість, потрібно здійснити просту корекцію на дійсну густину повітря:

$$V_{act} = V_{ind} \cdot E_s / E_a,$$

де E_s - густина повітря за стандартних умов - 25 °C і 760 мм ртутного стовпчика;

E_a - дійсна густина повітря за місцевих температури й тиску;

V_{act} - дійсна швидкість повітря у метрах за хвилину;

V_{ind} – швидкість, зареєстрована на вимірювачі швидкості повітря KURZ.

Звичайно, ця корекція невелика й нею можна знехтувати. Також, у більшості випадків, необхідна лише швидкість повітряних мас, а густину обчислювати не потрібно.

Вимірювання проводять у такий спосіб. Зонд розташовують поблизу й паралельно поверхні отвору, даючи можливість повітрю проходити перпендикулярно крізь вікно на верхівці зонда. Щоб визначити середнє значення швидкості повітря, ділять отвір на кілька частин, рівних за площею. Зчитують швидкість у центрі кожної частини, а потім усереднюють результати. Якщо переріз відносно плоский, то треба взяти всього кілька площ; якщо перерізи не є однаковими, то треба використати всі (рис. 9.3).

Якщо отвір прикритий решіткою, зонд треба помістити на відстані декількох сантиметрів від решітки для одержання середньої швидкості, як у вищенаведеному випадку.

9.5 Цифровий термоанемометр VELOCICALC PLUS

Цифровий термоанемометр VelociCalc (рисунок 9.6) моделей 8360/8382/8383/8388 вимірює швидкість повітря, температуру, диференціальний тиск і обчислює об'ємні витрати. Крім того деякі моделі обчислюють відносну вологість і точку роси за показами відносної вологості й температури. Прилад VelociCalc Plus може здійснювати індивідуальні вимірювання кожної величини й обчислювати середнє значення кількох вимірювань [5, 6].

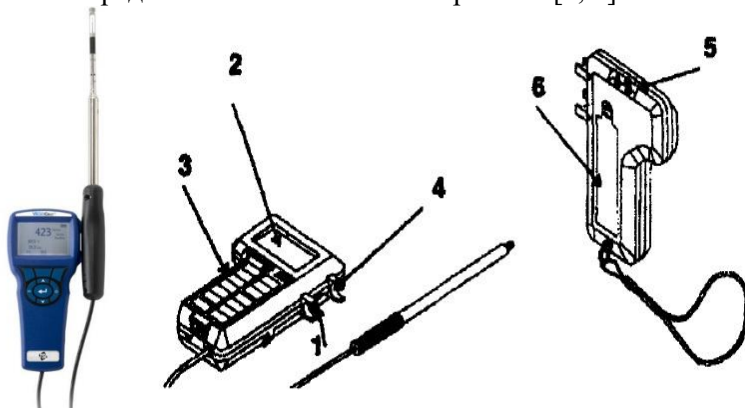


Рисунок 9.6 – Загальний вигляд VELOCICALC

Основним чутливим елементом приладу є зонд. У ньому встановлені чутливі елементи, які вимірюють швидкість, температуру, а також чутливі до вологості.

Щоб розкрити зонд, потрібно, утримуючи ручку в одній руці, натягувати наконечник зонда іншою рукою. Не потрібно тримати кабель при переміщенні зонда, оскільки це заважає зонду переміщуватися.

Щоб втягнути зонд, потрібно тримати ручку в одній руці, а наконечник зонда - в іншій.

Під час використання зонда потрібно впевнитися, що вікно чутливого елемента повністю відкрите, і червона крапка напрямку направлена вгору за потоком.

Температура, яка компенсується по амплітуді температури повітря, від 40 до 150°F (від 5 до 65,56 °C).

Точність приладу 77°F (25°C). Додайте 0,05°F / F(0,03 °C / °C) для зміни температури за приладом.

Точність із зондом в 77°F (25°C). Додайте 0,1 %rh / °F (0...2%rh / °C) для зміни температури за приладом. Включає 1 % гістерезису.

Найбільше значення надлишкового тиску - 300 Дюймів H₂O (75 kPa, 762 мм Hg). Додайте ± 0,02 % / °F (+ 0,03 % / °C) для зміни температури приладу.

Робота з приладом здійснюється таким чином.

Вимірювання швидкості

Щоб почати вимірювання швидкості (VelociCalc автоматично почне вимірювати швидкість), натисніть кнопку VELOCITY. Швидкість буде відображена у футах за хвилину або метрах за секунду залежно від положення вимикача DIP. Потрібно розмістити кінець зонду в місці вимірювання, переконатися, що вікно чутливого елемента повністю відкрите, і червона крапка спрямована вгору.

Вимірювання температури

Щоб зробити вимірювання температури повітря, натисніть кнопку TEMP, прилад покаже значення температури в градусах за Фаренгейтом (F) або в градусах Цельсія (°C), залежно від положення вимикача DIP. Зачекайте приблизно 30 секунд, щоб прилад перейшов у режим вимірювання температури. Це необхідно, оскільки чутливий елемент був нагрітий протягом часу вимірювання швидкості, і деяка теплота впливала на температурно чутливий елемент.

Вимірювання тиску

Щоб виміряти диференціальний тиск, натисніть кнопку PRESSURE. Для вимірювання тиску система трубок повинна бути пов'язана із притискними портами. Коли ця умова виконується, вимірювач показує додатне число.

Вимірювання вологості (лише моделі 8360 і 8388)

Щоб прилад показав значення вологості, натисніть кнопку HUMIDITY. Значення зчитують в одиницях відносної вологості у

відсотках (%RH). Для одержання значення необхідно зачекати деякий час, щоб визначити, чи змінилися умови навколишнього середовища.

Функція точки роси (тільки моделі 8360 і 8388)

Щоб показати температуру точки роси, натисніть кнопку DEW POINT. Точка роси розраховується, використовуючи дані вимірювань відносної вологості й температури. Оскільки точка роси не вимірюється прямо, точність цього обчислення залежить від температури навколишнього повітря й відносної вологості. Значення точки роси буде найточнішим, коли відносна вологість - 50 % і вище (температура точки роси стосується фактичної температури). Це значення буде менш точним, якщо відносна вологість менша 50 % (температура точки роси віддаляється від фактичної температури).

Функція витрати

Термоанемометр VelociCalc може обчислювати витрату, використовуючи відому площу. Прилади 8382/8383/8388 VelociCalc можуть також обчислювати витрату наскрізних дифузорів.

Витрата може бути розрахована для круглого, квадратного або прямокутного каналу. Форму й розміри або площу каналу, для якого вимірюється потік, необхідно ввести.

Вхід у меню для задання форми й розміру

Потрібно натиснути кнопку FLOWRATE, - користувач VelociCalc увійде у меню форми й розміру, якщо це не було зроблено перед ввімкненням приладу. VelociCalc запитає режим форми, по черзі висвічуючи коло й прямокутник (і датчики тиску, якщо вимикач DIP #6 ввімкнений) на дисплеї. Якщо форма й розмір були введені, VelociCalc буде показувати витрату.

Натисніть кнопку SHAPE, щоб вибрати форму області, прямокутну або круглу. Щоразу при натисканні кнопки SHAPE форма буде змінюватися з кола на прямокутник і навпаки. Коли потрібна форма з'являється на дисплеї, натискають кнопку ENTER. При цьому VelociCalc запитує розмір.

Використайте кнопки LARGER і SMALLER, щоб вибрати розмір площі витрати. Оскільки потік циркулює перерізом, VelociCalc буде запитувати про один розмір - діаметр круглої області. Виберіть розмір і введіть дані. Для прямокутної області VelociCalc буде запитувати два розміри. Спочатку введіть горизонтальний розмір і натисніть ENTER, потім - вертикальний і натисніть ENTER. Для вибору бажаної форми

натискають SHAPE. Далі продовжуйте дії, як зазначено вище. Для зміни розміру натисніть LARGER або SMALLER, щоб ввести нові розміри, потім натисніть ENTER, щоб прийняти їх.

Іноді є різниця між температурою точки роси й температурою за вологим термометром (температура точки роси й температура вологої посудини - не одне й те саме).

Стандартна і фактична швидкості

Оскільки теплові, повітряні, швидкісні елементи чутливі до змін густини і швидкості повітря, всі теплові анемометри вказують швидкість за стандартних умов. Для інструментів TSI, стандартні умови визначені як 70° F (21,1 °C) і 14,7 psia (101,4 кПа). Інші виготовлювачі можуть використовувати інші величини.

Стандартна швидкість - швидкість повітря за стандартних умов температури й тиску. Це - найбільш корисний критерій повітряного потоку, оскільки він визначає питому теплоємність повітря.

Фактична швидкість - швидкість, у якій мікроскопічна матеріальна точка переміщувалася б, в повітряному потоці.

У деяких прикладах фактична швидкість повітря вища ніж стандартна. Щоб одержати значення для фактичної швидкості, помножте стандартну швидкість на поправковий коефіцієнт густини.

10 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ

Для вимірювання потоків сонячної радіації використовують *актинометричні прилади*, складовою частиною яких є термоелементи. За їх допомогою енергія випромінювання перетворюється в енергію електричного струму – термострум. Явище термоструму полягає в тому, що в замкненому ланцюзі, утвореному із двох різнорідних провідників, виникає електричний струм, якщо температура місць з'єднань (спаїв) різна. Якщо температури спаїв однакові, то електричний струм у ланцюзі буде відсутній.

Величина електрорушійної сили термоструму пропорційна різниці температур спаїв. З'єднані послідовно термоелементи утворюють термобатарею. У термобатарей усі непарні спаї розташовують так, щоб вони мали однакову температуру, яка відрізняється від температури парних спаїв, розміщених у досліджуваному середовищі. В термоелементах використовують манганін (сплав міді, марганцю і нікелю) та константан (сплав міді і нікелю). Приймачем випромінювання найчастіше використовують затемнені пластинки, що поглинають 94 – 97 % попадаючої радіації на них. Для вимірювання сили термоструму застосовують гальванометр ГСА – 1 із стрілкою. Він дозволяє вимірювати слабкий струм, що виникає в термобатареях актинометричних приладів.

Сучасні актинометричні прилади дозволяють вимірювати сонячну радіацію у значеннях:

- абсолютних (*піргеліометр, геліограф*), тобто пряму сонячну радіацію в теплових одиницях (калоріях) і тривалість сонячного сяйва в годинах;
- відносних (всі інші прилади), тобто лише відносні значення сонячної радіації, які потім необхідно переводити в абсолютні величини.

На метеорологічних станціях застосовують зазвичай, прилади, що дозволяють визначати відносні значення сонячної радіації, які вимірюються в поділах шкали гальванометра. Для одержання абсолютних величин сонячної радіації число поділок гальванометра множать на перевірний множник. Останній визначають шляхом

порівняння показів приладу з показами повіреного еталону (піргеліометра).

10.1 Піргеліометр компенсаційний Онгстрема

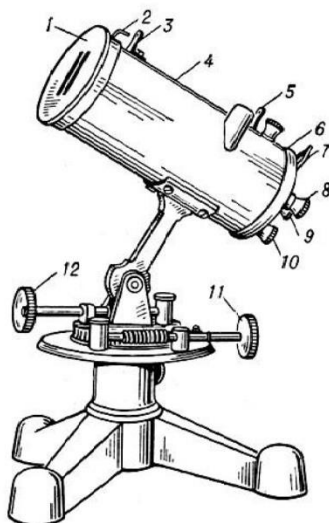
Піргеліометр (від др. – грец. πῦρ (pyr) – вогонь, ἥλιος (hélios) – Сонце і μετρέω (metréo) – вимірюю) – прилад для вимірювання прямої сонячної радіації, що перпендикулярно падає на поверхню Землі (максимально можлива кількість енергії наявна біля поверхні Землі). Абсолютний компенсаційний піргеліометр створив шведський геофізик Кнут Ангстрем у 1896 р., а в 1905 р. Міжнародна метеорологічна конференція запатентувала цей прилад як еталон (рисунок 10.1) [5, 6].



Рисунок 10.1 – Зовнішній вигляд DR01 піргеліометра та піргеліометра фірми Nukseflux

Будова приладу. Піргеліометр поглинає сонячні промені двома однаковими тонкими затемненими манганіновими пластинами, що розміщені в головці приладу 6 (рисунок 10.2). Протилежна, не освітлена радіацією сонця сторона пластин вкрита ізоляційним шаром, поверх якої наклеєні спаї та термоелемент, що складається із пари мідь-константан. Верхні частини пластин з'єднуються з контактами і перемикачем 7, що знаходяться в головці піргеліометра. Ця головка вставляється в трубку 4, в середині якої знаходяться 2–3 діафрагми. Трубка закріплена на штативі, де розміщуються гвинти 11 і 12. Гвинти за допомогою натискача можуть відключатись і трубку можна

повертати вручну. За допомогою пучка сонячного проміння, яке пройшло через отвір в цілику 3 і падає на центр хрестика, що знаходиться в мушці 5, трубка піргеліометра встановлюється віссю на сонце. Трубка налаштовується гвинтом 12 штатива на зміну положення її за висотою, та гвинтом 11 – за азимутом. Спереду трубка закривається кришкою 1, на якій розміщені два щілинних приймальних отвори, розташованих навпроти пластин на відстані 52 мм. Таким чином, кут отвору цього піргеліометра за вертикальним напрямом становить 13° , а за горизонтальним – 5° . Під кришкою встановлений щиток, що обертається на осі, і виступає назовні у вигляді гачка 2. Повертаючи щиток вправо, чи вліво або вперед можна затінити праву або ліву манганінові пластини або освітити їх сонцем.



1 – кришка трубки з щілинними отворами; 2 – гачок щитка; 3 і 5 – цілик і мушка; 4 – трубка приладу; 6 – головка приладу; 7 – перемикач; 8, 9 і 10 – клеми для підключення приладу до гальванометра; 11 і 12 – гвинти для зорієнтування приладу на Сонце.

Рисунок 10.2 – Будова піргеліометра Онгстрема

Принцип дії. Принцип дії заснований на вимірюванні кількості тепла, що утворюється при поглинанні сонячного випромінювання.

Якщо у націленого на сонці піргеліометра освітити обидві пластини, то вони нагріються однаково, оскільки кожна з них отримує однакову кількість тепла, що дорівнює потоку поглинутої радіації. При однакових температурах пластин термопара не дає струму. Якщо одна з пластин нагрівається сонячним випромінюванням, а друга, захищена від нього, нагрівається електричним струмом. Кількість сонячної радіації, поглиненої першою пластиною визначається за значенням струму, що подається на другу пластину для компенсації різниці температур. Отож, коли права пластина залишеться освітленою пучком сонячної радіації, а ліва – затінена щитком, тоді гальванометр покаже термострум. Будемо нагрівати пропусканням електричного струму затінену ліву пластину, причому силу струму підберемо таку, щоб струм через гальванометр знову зник. Тоді температура пластин буде знову однакою, а отже, дорівнюватиме кількості тепла, що отримується обома пластинами за 1 хв. Звідси випливає, що інтенсивність радіації пропорційна квадрату сили струму. Отже, всі величини, що входять у формулу Ленца-Джоуля визначаються в результаті фізичних вимірювань, тобто піргеліометр – прилад, що вимірює абсолютну кількість сонячної радіації.

10.2 Геліограф універсальний

Геліограф [5, 6] призначений для автоматичної реєстрації тривалості сонячного сйива в годинах упродовж дня, тобто коли Сонце не закрите хмарами. Відомі такі системи геліографів: геліограф Перса, геліограф Марвіна, геліограф Величко, проте найзручніший у користуванні універсальний *геліограф Кемпбелла-Стокса ГУ-1* (рисунок 10.3). Геліограф сконструював у 1853 р. Джон Френсіс Кемпбелл. Через декілька років він був дещо модифікований Джорджем Габріелем Стоксом. З першопочаткової ідеї Кемпбелла сфера лежала в дерев'яній чаші та випалювала лінії в ній. Згодом схема була покращена.

Принцип дії. Основу геліографа становить скляна куля 1 (рис. 5), що збирає в своєму фокусі падаючу на неї пряму сонячну радіацію. Куля затиснута між сферичними опорами. На відстані головного фокусу розміщується дугоподібна сферична чаша 2. На внутрішній поверхні останньої є вирізані пази для закладання картонних стрічок. На

стрічках білим кольором нанесені поділки, що відповідають годинам і півгодинам. Сонячні промені, проходячи крізь кулю, заломлюються, збираються у фокусі на стрічці та пропалюють її. Якщо хмари закривають сонце, то пропалювання припиняється. визначають тривалість сонячного саява впродовж дня. Тривалість сонячного саява (в годинах) визначають за довжиною лінії пропаленої стрічки та годинникової розмітки з точністю до 0,1 год. Надалі підраховують суми тривалості саява за день, місяць, рік.



Рисунок 10.3 – Універсальний геліограф Кемпбелла-Стокса ГУ-1 та його кріплення на установці

Будова приладу. Сферична чаша геліографа обертається навколо вертикальної осі, до нижньої частини якого закріплений диск (рисунок 10.4). На диску є отвір, в якому простежуються чотири літери А, Б, В, Г. Під цим диском знаходиться ще один нижній диск, нерухомий відносно верхнього, проте може обертатися навколо горизонтальної осі. Цей же диск нерухомо скріплений зі шкалою 4 на якій показана широта місцевості. Пропалювання на стрічці залежить від географічної широти місцевості. Для цього чашу приладу нахилиють відповідно до географічної широти місця спостереження, яка відраховується на шкалі 4 за індексом показчика 5 і закріплюється гвинтом 6. Згодом кулю

разом із чашою встановлюють в одне із чотирьох положень, які фіксують літерами А, Б, В, Г і закріплюють штифтом 3. При цьому одна із літер диску буде розташована проти покажчика 5.

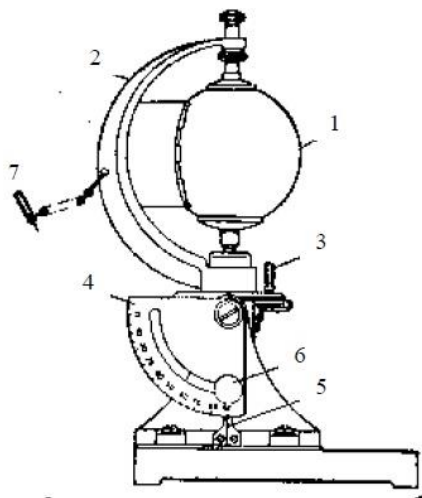


Рисунок 10.4 – Будова геліографа

Установка геліографа. Геліограф на метеорологічному майданчику розміщують так, щоб він не був закритий тінню з інших предметів упродовж дня в усі місяці року, тобто освітлювався Сонцем. Його встановлюють строго горизонтально на стовпі висотою не менше ніж 2 м від підстилаючої поверхні (фото 8). Якщо таке місце відсутнє, то прилад встановлюють на спеціальній вищці або на даху службового приміщення метеорологічної станції. На стовпі закріплюють дошку в горизонтальному положенні, що перевіряється рівнем.

З метою правильності розташування місця пропалення на стрічці необхідно вертикальну та горизонтальну осі розміщувати відносно сторін горизонту світу. В істинний полудень геліограф закріплюють на дошці і встановлюють його за меридіаном відкритою стороною кулі на південь (у положенні Б). Потім прилад повертають так, щоб в істинний полудень фокус був проти полудневої поділки на стрічці. У цьому положенні геліограф закріплюють гвинтами. Після цього прилад встановлюють за географічною широтою місця. Для цього ослаблюють

гвинт 4 і повертають верхню частину приладу до співпадання з установленою широтою.

Враховуючи те, що висота сонця над горизонтом і тривалість дня упродовж року змінюються необхідно вкладати стрічку різної довжини (влітку довшу, взимку коротшу). Для спостереження за геліографом в пази сферичної чашікладають стрічки згідно з порою року. У верхній паз – зимою (з 16 жовтня до кінця лютого), у середній паз – весною і восени (з 1 березня по 15 квітня і з 1 вересня по 15 жовтня), у нижній паз – влітку (з 16 квітня по 31 серпня). Загалом весною та восени використовуються прямі стрічки, зимою й літом – дугоподібні (фото 9).

Стрічки закладають таким чином, щоб середня її поділка точно співпадала з рисою, що знаходиться посередині чашки. Стрічка проколюється спеціальною голкою 7, що забезпечує контроль і фіксацію положення стрічки на чаші. При правильній установці прокол голки припадає на другу часову поділку від середини стрічки [5, 6].

У короткі дні, коли Сонце знаходиться над горизонтом не більше 9 год, стрічку міняють один раз на добу – після заходу Сонця. Куля при цьому повернута на південь (в положенні Б). У цьому випадку чаша 2 встановлюється в положення, яке показане на рис. 5 (на північ), що фіксується конічним штифтом 3. Остання проходить через отвір верхнього диска у південний отвір нижче розташованого диска. Диск ставиться буквою Б проти покажчика. При тривалості дня від 9 до 18 год стрічку міняють двічі на добу: перший раз – після заходу Сонця; другий – о 12 год. При цьому змінюють положення кулі: у вечірню пору при зміні стрічки кулю повертають на схід (у положення А); у полудень – на захід (у положення В). При великій тривалості дня понад 18 год (північніше 60° літом) зміна стрічки і поворот кулі проводиться тричі на добу о 4, 12 і 20 год, причому геліограф ставиться чашою 2 на південь буквою Г до покажчика. При зміні стрічки о 4 год кулю повертають на схід (у положення А), в 12 год – на захід (у положення В) і в 20 год – на північ (у положення Г). При денній зміні стрічок спостерігач затінює кулю.

Стрічки змінюють у всіх випадках, навіть коли на ній відсутня лінія пропалу (в хмарні дні). На звороті стрічки простим олівцем записують назву станції, рік, місяць, число, години і хвилини закладання стрічки в паз, а після зняття – число, години і хвилини.

Під час спостережень за геліографом контролюють його горизонтальність. При правильній установці лінія пропалу на стрічці паралельна зрізам стрічки і обидва кінця лінії в день із ясным сходом і заходом Сонця повинні бути на однаковій відстані від середини лінії.

Необхідно перевіряти правильність установки приладу на полудневій лінії і географічній широті місця, а також утримувати кулю в чистоті. При необхідності її протирають м'якою ганчіркою. Якщо куля покрита інеем або памороззю, ганчірку змочують спиртом або авіаційним бензином.

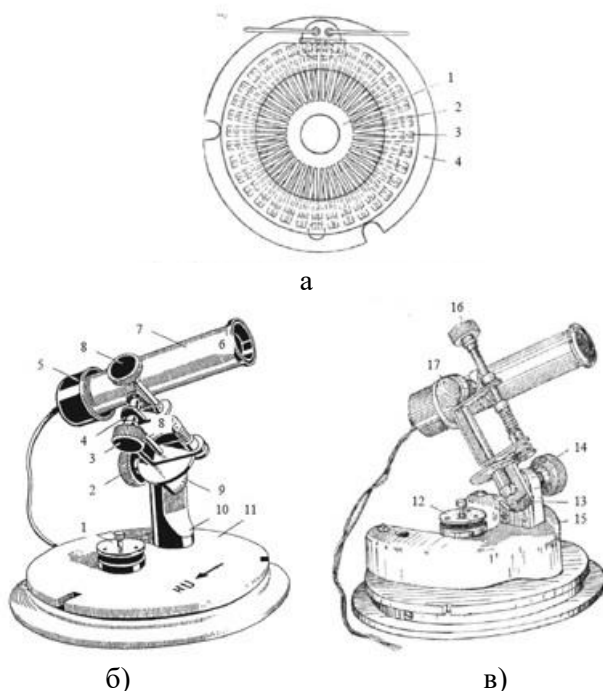
Недолік геліографа полягає в тому, що лінія пропалу на стрічці з'являється при інтенсивності радіації $150 - 250 \text{ Вт/м}^2$. Лінія пропалу починається пізніше сходу Сонця і закінчуються раніше, коли Сонце ще над горизонтом. Тому виміряна тривалість сонячного сйива може бути меншою за фактичну. В гарячі літні дні з мінливою купчастою хмарністю діаметр окремих миттєвих пропалів на стрічці засвідчує перебільшену картину тривалості сйива. До недоліків відносять ще поріг чутливості ($0,25-0,4 \text{ кал/см}^3 \text{ за хв}$), що залежить від кольору скла та матеріалу стрічки, а також від вологості повітря [5, 6].

10.3 Термоелектричний актинометр Савінова

Актинометр – прилад для вимірювання прямої сонячної радіації, що прямовисно поступає на поверхню Землі [5, 6].

Актинометр термоелектричний Савінова–Янишевського є приладом (рис. 6, в), що дає можливість опосередковано визначити кількість прямої сонячної радіації. Значення останньої не отримуються в калоріях, а розраховуються за величиною зафіксованого електричного струму гальванометром, що виник у термопарах під дією сонячної радіації. Отримане значення перемножують на перевідний коефіцієнт гальванометра (0,02 або 0,04).

Будова приладу. Частина актинометра Савінова конструкції Янишевського, що поглинає сонячні промені, складається з тонкого срібного затемненого зі сторони сонця диска 1 (рисунк 10.5 а). З іншого боку диска через паперову ізоляційну прокладку 3 приклеєні центральні (активні) спаї 36 термоелементів 2 з манганіну та константу. Периферійні (пасивні) спаї приклеєні до мідного кільця 4 також через паперову ізоляційну прокладку.



а – срібний затемнений диск актинометра;
 б – будова термоелектричного актинометра АТ-50; в – будова термоелектричного актинометра Савінова конструкції Янишевського.

Рисунок 10.5 – Актинометри

Диск знаходиться в чашці 5, що вмонтовується на трубі (циліндрі) 7 актинометра (рисунок 10.5 б). В тильній частині чашки актинометра знаходяться контактні проводи від термобатареї диску та дроти для з'єднання гальванометра. Всередині труби знаходиться п'ять діафрагм, розміщених в порядку зменшення їх діаметрів від 20 до 10 мм в напрямку диску. Вони захищають термобатарею від впливу розсіяної, відбитої сонячної радіації та впливу вітру. Між спостереженнями труба актинометра закривається кришкою 1, захищаючи диск від забруднення. Вона встановлена на паралактичному штативі 9, 10, який

кріпиться на основі 11. Основа та штатив повинні бути зорієнтовані на північ. Вісь штативу 8 встановлюється гвинтом 6 з нахилом, що дорівнює географічній широті місця, висоті та азимуту Сонця, і закріплюється гвинтом 2.

Принцип дії. Під час вимірювань срібний диск поглинає сонячну радіацію. Внаслідок цього температура диску та центральних спаїв термобатареї зростає. Периферійні спаї мають температуру корпусу, яка близька до температури навколишнього повітря. За різницею температур спаїв в термобатареї виникає термострум, який вимірюється гальванометром.

Установка приладу. Актинометр встановлюють на спеціальній актинометричній підставці метеорологічного майданчика або на горизонтальному майданчику відповідно до широти місця і за напрямом полудневої лінії. Диск повинен бути розташований перпендикулярно до сонячних променів. Для цього трубу 7 приладу гвинтами 3, 6 націлюють на Сонце. Можна обертати гвинт 6 і направляти трубу за Сонцем, коректуючи її нахил на осі 4, відповідно магнітного азимуту. З метою точного націлювання в зовнішній діафрагмі є отвір. Напроти цього отвору в нижній частині труби знаходиться білий екран. За правильної установки приладу сонячне проміння, що проникає через цей отвір, повинно дати світлу пляму (зайчик) в центрі екрана.

Повірка актинометра полягає у визначенні перевідного множника гальванометра, з'єданого з актинометром. Для цього за умов доброї прозорості атмосфери проводять одночасно спостереження прямої сонячної радіації актинометром і піргеліометром або добре провіреним актинометром. Визначивши інтенсивність радіації в кал/см^2 за хв і поділивши її на виправлений відлік за гальванометром, отримуємо перевідний множник гальванометра з актинометром в $\text{кал/см}^2 \cdot \text{хв}$ на 1 поділку. Виписуються три значущі цифри. Повторивши цю перевірку при різних температурах, будують залежність перевідних множників від температури.

Спостереження здійснюються таким чином [1].

1. Націлюють прилад на Сонце при знятій кришці з труби актинометра.

2. Надягають кришку на трубу і через 25 – 30 с виконують відлік нульового положення за гальванометром (n_1^0).

3. Знімають кришку з труби і перевіряють точність націлювання на Сонце.

4. Знімають 3–5 показів гальванометра з інтервалом 25–30 с (n_1 , n_2 , n_3).

5. Повторно одягають кришку на трубу і визначають місце нуля за гальванометром (n_2^0).

6. Визначають температуру гальванометра за його термометром.

Актинограф – прилад для вимірювання безперервної реєстрації інтенсивності прямої сонячної радіації (рисунок 10.6).



Рисунок 10.6 – Актинограф

10.4 Піранометр термоелектричний Янишевського

Піранометр призначений для вимірювання сумарної й розсіяної радіації (рисунок 10.7). Завдяки будові піранометра ним можна вимірювати три потоки сонячної радіації [5, 6]:

а) при відкритому приймачі – сумарну радіацію;

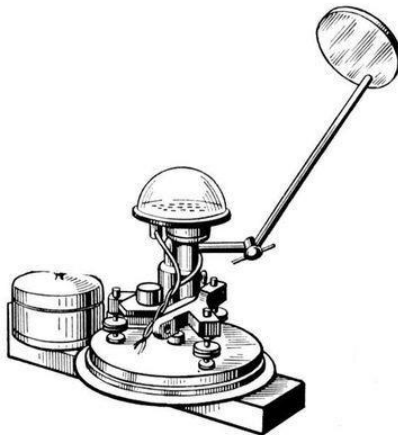
б) при затемненні приймача екраном – розсіяну радіацію;

в) при повороті приймача до ґрунту (універсальний прилад М-80) – відбиту радіацію (рисунок 10.8).

Будова приладу. В цьому приладі приймачем радіації слугує термоелектрична батарея, сформована з манганінових і константанових термоелементів, сполучених послідовно (рисуюнок 10.9). Термобатарея має квадратну форму. Термоелементи батареї утворюють термопари, число яких вибирається залежно від чутливості гальванометра (відповідно 28; 87 або 112). Парні спаї термобатареї покриваються сажею, а непарні – білою магнєзією. Термоелементи згруповані так, що чорні (сажа) і білі (магнєзія) поля чергуються в шаховому порядку і межа фарбування проходить посередині між спаями.



Рисуюнок 10.7 – Піранометри



Рисуюнок 10.8 – Піранометр термоелектричний

Термобатарея захищена від дії інфрачервоної радіації атмосфери, вітру і опадів скляним напівсферичним ковпаком. Скло поглинає

частину короткохвильової радіації з довжиною хвилі 0,3 – 0,4 та 2,5 – 4,0 мкм. Ковпак не вносить суттєвих похибок у вимірювання, бо на цих ділянках спектру інтенсивність прямої й розсіяної радіації дуже мала. Сонячна радіація поглинається сажею значно більше, чим магнезією, тому між спаями виникає різниця температур і збуджується термоелектричний струм, пропорційний падаючій кількості радіації, який вимірюється гальванометром. Довгохвильову радіацію сажа і магнезія поглинають однаково [2].

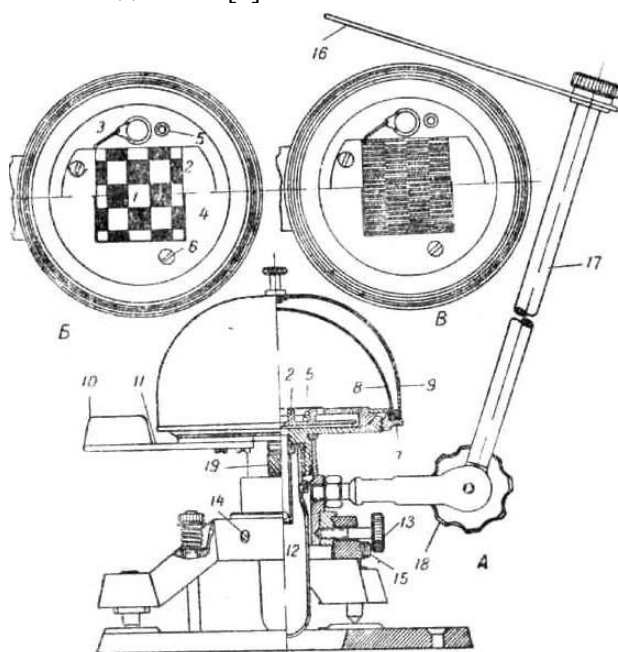


Рисунок 10.9 – Піранометр Янишевського універсальний М-80

Скляний ковпак 8 (рисунок 10.9) одягнутий на корпус, що утримується на металевій підставці. Знизу до корпусу прикріплена сушилка 12. Вона заповнена гігроскопічною речовиною, яка вбирає вологу. Це зберігає внутрішню поверхню скляного ковпака та саму батарею від конденсації водяної пари.

Для вимірювання та реєстрації сумарної радіації піранометр встановлюють горизонтально за рівнем 10 гвинтами 15. З боку труби до горизонтального стержня прикріплена гвинтом 18 легка труба 17, що має великий щиток 16 з діаметром, що відповідає діаметру ковпака. Довжина труби становить 5,7 діаметра щитка, завдяки чому його видно з центра батареї під кутом 10° . Під час затемнення щитком отримують розсіяну радіацію, а без затемнення – сумарну радіацію сонця та неба на горизонтальну поверхню. Рівень з'єднаний з планкою 11.

Крім того, універсальний термоелектричний піранометр М-80 (рис. 7) використовується як *стаціонарний альбедометр* для вимірювання також відбитої радіації.

Установка піранометра. Спостереження або реєстрація сумарної радіації здійснюється на метеорологічних станціях або на відкритій місцевості. Піранометр встановлюють на висоті 1,5 м від земної поверхні. Під час спостережень він спрямовується в бік Сонця однією і тією ж стороною і закріплюється гвинтом 13. Під час реєстрації ця сторона повертається на південь. Гальванометр встановлюють з північної сторони від піранометра. При реєстрації розсіяної радіації застосовується безперервне затінення піранометра тіньовим кільцем (рисунок 10.10).



Рисунок 10.10 – Тіньове кільце з піранометром для реєстрації розсіяної радіації

Спостереження за піранометром здійснюють за середнім сонячним часом [5, 6]. Порядок спостереження такий.

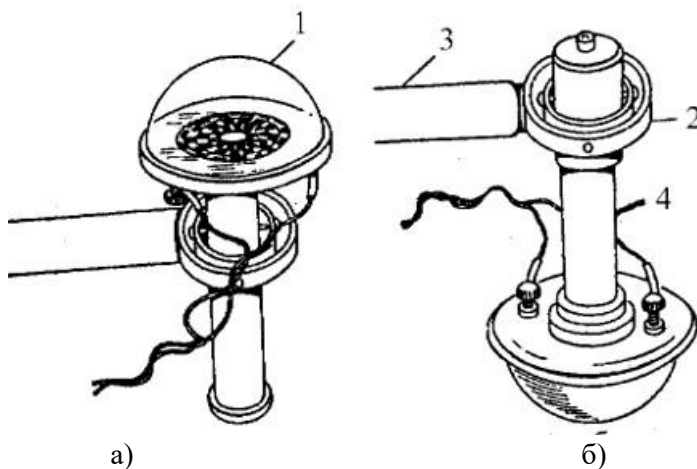
1. Перевіряють установку приладу за рівнем і відносно Сонця.
2. Закріплюють тіньовий щиток.
3. Закривають кришкою термобатарей і при замкнутому ланцюгу піранометра і гальванометра визначають місце нуля гальванометра.
4. Знімають кришку піранометра з термобатарей при тіньовому щитку і визначають відлік гальванометра щодо розсіяної радіації через 25–30 с.
5. Відводять тіньовий щиток і беруть відлік гальванометра за сумарною радіацією через 25 – 30 с.
6. При тіньовому щитку беруть відлік гальванометра щодо розсіяної радіації через 25 – 30 с.
7. Відводять щиток, закривають кришкою термобатарей і повторно визначають місце нуля гальванометра.
8. Визначають температуру гальванометра.
9. Знімають тіньовий щит і піранометр закривають футляром.

10.5 Альбедометр термоелектричний

Термоелектричний альбедометр – універсальний прилад, призначений для вимірювання сумарної, розсіяної й відбитої радіації (рисунок 10.11). За його показниками можна, використовуючи відповідні формули, розрахувати величину прямої та поглинутої радіації, а також альbedo підстилаючої поверхні. Сьогодні на практиці використовують похідні альбедометри (рисунок 10.12), в основі яких є піранометр Ю. Д. Янишевського на трубковій карданній підвісці 2 (рисунок 10.13) [5, 6].

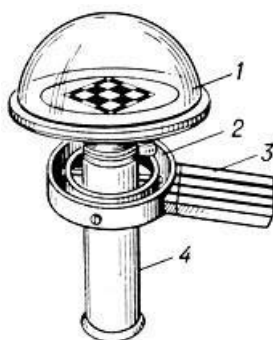


Рисунок 10.11 – Вигляд сучасного альбедометра



а – положення піранометра зверху; б – положення піранометра знизу.

Рисунок 10.12 – Похідні альбедометри



1 – термоелектрична батарея піранометра; 2 – карданна підвіска;
3 – рукоятка; 4 – трубка

Рисунок 10.13 – Альбедометр Янишевського-Білова

Будова приладу. Частиною альбедометра, що поглинає сонячну радіацію є термоелектрична батарея піранометра 1 (рисунок 10.13 та

10.14), прикріплена на втулці 2 до трубки 4 на якій переміщується муфта. Ця муфта коливається на двох штифтах, з'єднаних з рамкою як на осі. На двох інших штифтах разом з віссю, рамка коливається, що перпендикулярна до першої, і з'єднаних з кільцем і рукояткою 3. Всередині трубки 4 на стержні переміщується свинцева вага, яка завжди рухається вниз при повертанні приладу рукояткою 3. Це надає можливість піранометру зайняти горизонтальне положення і бути повернутим вгору (рис. 10, а). Під час повертання рукоятки 3 на 180° піранометр знову займає горизонтальне положення, проте повернутий вниз (рис. 10, б). Клеми піранометра з'єднуються з проводами, що кріпляться до рукоятки. На кінцях трубки підкладена гума для пом'якшення ударів під час повертання приладу [2,3].



Рисунок 10.14 – Термоелектрична батарея піранометра

Спостереження за альбедометром проводяться за середнім сонячним часом у такому порядку [5, 6]:

1. Закривають кришкою термобатарею і при замкнутому ланцюгу альбедометра і гальванометра визначають місце нуля останнього;

2. Знімають кришку з термобатареї, повертають її до земної поверхні і послідовно через 25 – 30 с беруть відлік гальванометра для відбитої радіації;

3. Повертають термобатарею до небесного схилу і послідовно через 25 – 30 с визначають відлік за гальванометром для сумарної радіації;

4. Повертають термобатарею до земної поверхні і послідовно через 25 – 30 с беруть відлік за гальванометром для відбитої радіації;

5. Закривають кришкою термобатарею і повторно відмічають місце нуля гальванометра;
6. Визначають температуру гальванометра.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Шаповаленко О.Г., Бондар В.М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
2. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: навч. посіб. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. 292 с.
3. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств. Київ: Проект «Консультування підприємств щодо енергоефективності», 2020. 279 с.
4. Прокопенко В.В., Закладний О.М., Кульбачний П.В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями: навч. посіб. Київ: Освіта України, 2009. 438 с.
5. Нетробчук І.М. Вимірювання метеорологічних величин : навч. посіб. Луцьк: Вежа-Друк, 2015. 128 с.
6. Клеєвська В.Л., Поліщук О.О. Приземні метеорологічні спостереження: навч. посіб. Харків: Нац. аерокосм. ун-т “Харк. авіац. ін-т”, 2010. 52 с.