

## **Оптичні методи і засоби в галузі**

# **Теплова природа оптичного випромінювання. Основи пірометрії.**

## Загальні положення

**Будь-яке нагріте тіло випромінює енергію.** Одночасно з випромінюванням кожне тіло поглинає падаюче випромінювання. Тому у природі завжди має місце променистий теплообмін.

**У результаті теплообміну в системі тіл з будь-яких матеріалів незалежно від стану їх поверхні, що мають різні початкові температури та ізольовані від навколишнього простору теплонепроникною оболонкою, протягом певного часу встановлюється рівноважна температурі  $T$ , тобто **теплове випромінювання є рівноважним.****

## Загальні положення

Спектральні випромінюючі властивості тіл можна характеризувати **спектральною густиною енергетичної світності**  $M_{\lambda,T}$  (попереднє позначення  $M_{e,\lambda}$ ), а поглинаючі властивості – **спектральним коефіцієнтом поглинання**  $\alpha_{\lambda,T}$  що показує, яка частина падаючого на поверхню тіла монохроматичного потоку випромінювання при температурі  $T$  і довжині хвилі  $\lambda$  поглинається.

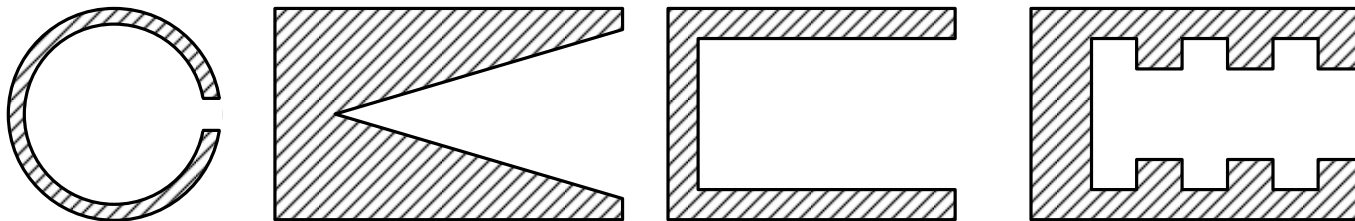
**Поглинаючі властивості тіл тісно пов'язані з випромінюючими властивостями: для кожного температурного випромінювача більша потужність випромінювання супроводжується більшим поглинанням.**

*Приклад:* чорна шорстка поверхня є хорошим поглиначем ( $\alpha_{\lambda,T} > 0,9$ ) і випромінювачем, і навпаки, срібні та алюмінієві дзеркала дуже погано поглинають і випромінюють.

## Загальні положення

**Абсолютно чорне тіло (АЧТ)** – тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання ( $\alpha_{\lambda,T} = 1$ ), і, відповідно, здатне при заданій температурі випромінювати максимальну енергію.

**Для будь-якого реального тіла**  $\alpha_{\lambda,T} < 1$ . Проте можна штучно створити модель АЧТ, наприклад, у вигляді сфери з отвором, конічної чи циліндричної порожнини, зачорнених всередині.



### *Приклади позовжніх перерізів моделей АЧТ*

Якщо нагрівати рівномірно стінки порожнини, її отвір випромінює як АЧТ з площею, рівною площі отвору.

Моделі АЧТ використовують як еталон випромінювачів і повних поглиначів.

## Коефіцієнт теплового випромінювання, закон Кірхгофа

Випромінювання АЧТ підпорядковується ряду законів, які з використанням коригувальних коефіцієнтів використовують для випромінювання реальних (“сірих”) тіл.

**Коефіцієнт теплового випромінювання (КТВ)  $\varepsilon$**  – це відношення:

енергетична світність теплового випромінювача за температури  $T$

-----  
енергетична світність АЧТ за температури  $T$

**Закон Кірхгофа** (встановлює зв'язок між випромінюванням і поглинанням енергії випромінювання будь-якими тілами): **за однакових довжин хвиль та однакових температур у всіх тіл коефіцієнти випромінювання дорівнюють коефіцієнтам поглинання**

$$\varepsilon_{\lambda, T} = \alpha_{\lambda, T}.$$

## Закон Кірхгофа

АБО (по-іншому): **для певної довжини хвилі за даної температури відношення спектральної густини енергетичної світності до спектрального коефіцієнта поглинання є величина стала для будь-яких тіл, незалежно від їх природи та форми**

$$\frac{M'_{\lambda,T}}{\alpha'_{\lambda,T}} = \frac{M''_{\lambda,T}}{\alpha''_{\lambda,T}} = \dots = \frac{M^n_{\lambda,T}}{\alpha^n_{\lambda,T}} = \frac{M^{AЧТ}_{\lambda,T}}{\alpha^{AЧТ}_{\lambda,T}} = const.$$

Оскільки для АЧТ  $\alpha^{AЧТ}_{\lambda,T} = 1$ , звідси спектральна густина енергетичної світності будь-якого тіла:

$$\frac{M_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = M^{AЧТ}_{\lambda,T} \Rightarrow M_{\lambda,T} = \alpha_{\lambda,T} \cdot M^{AЧТ}_{\lambda,T}$$

Фізичний зміст отриманого результату: **чим більший коефіцієнт поглинання тіла, тим кращим випромінювачем воно є.**

## Закон Кірхгофа

Оскільки

$$\alpha_{\lambda,T} < \alpha_{\lambda,T}^{AЧТ} \Rightarrow M_{\lambda,T} < M_{\lambda,T}^{AЧТ},$$

тобто **АЧТ** для даної довжини хвилі та температури має найбільшу **світність**.

**Для інтегрального випромінювання** має місце така форма закону **Кірхгофа**:

$$\frac{M'_e(T)}{\alpha'_e(T)} = \frac{M''_e(T)}{\alpha''_e(T)} = \dots = \frac{M^n_e(T)}{\alpha^n_e(T)} = M_e^{AЧТ}(T).$$

$M_e(T)$  – енергетична світність реального тіла;  
 $M_e^{AЧТ}(T)$  – енергетична світність АЧТ;  
 $\alpha(T)$  – інтегральний коефіцієнт поглинання за температури  $T$ .

## Фундаментальні закони випромінювання

**Закон Планка** (описує розподіл енергії у спектрі випромінювання АЧТ)

$$M_{\lambda, T}^{AЧТ} = \frac{2\pi f^2}{c^2} \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} = \left[ \begin{array}{l} C_1 = 2\pi h c^2 \\ C_2 = hc/k \end{array} \right] = \frac{C_1 \varepsilon}{\lambda^5} \left( e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}$$

$h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  - стала Планка;

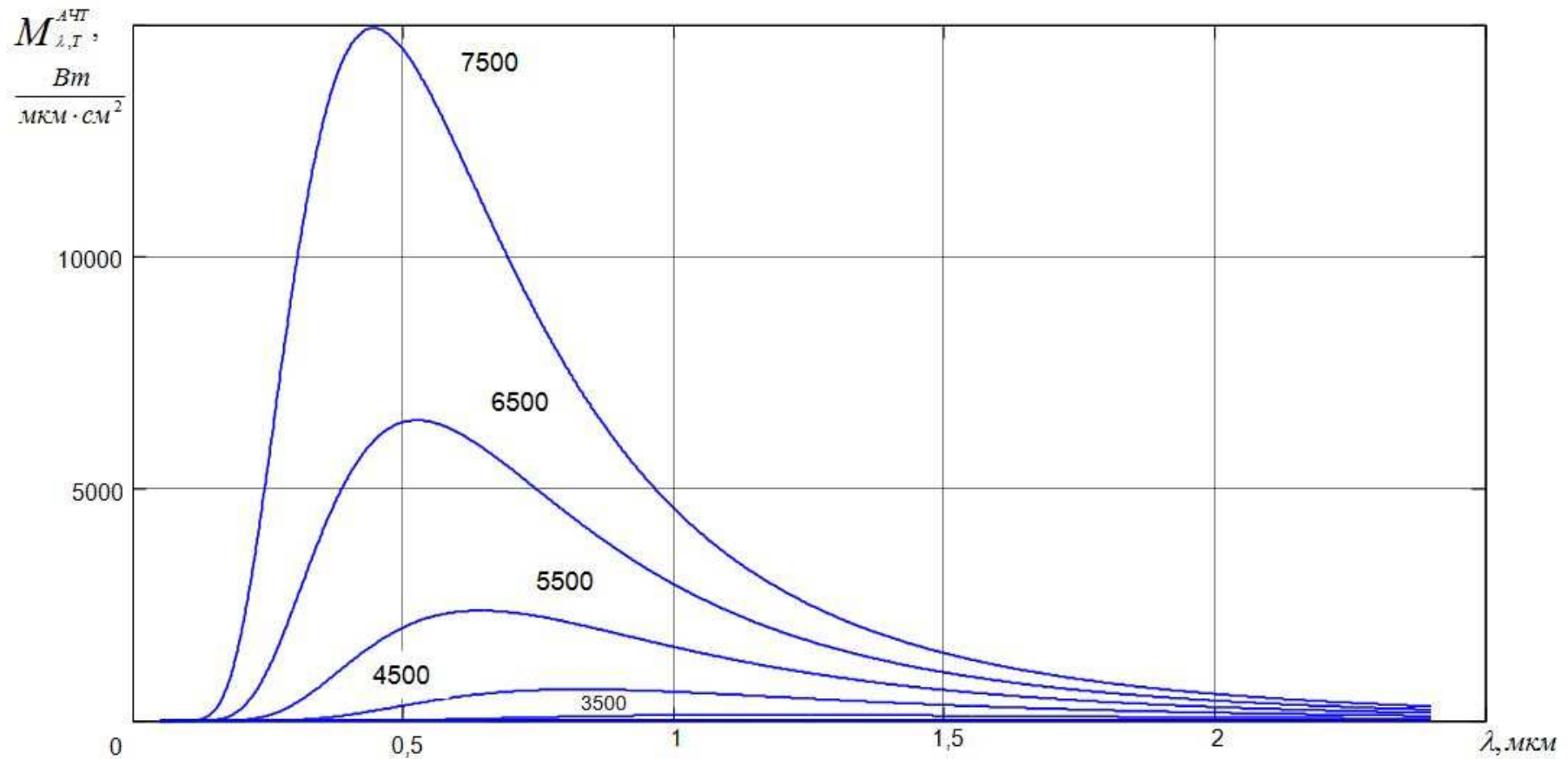
$k = 1,38 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} / \text{град} \text{ К}$  - стала Больцмана;

$C_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$  - перша стала випромінювання;

$C_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  - друга стала випромінювання.



## Фундаментальні закони випромінювання



Залежність спектральної густини енергетичної світності АЧТ від довжини хвилі та температури

## Фундаментальні закони випромінювання

З закону Планка випливає:

- за будь-якої температури АЧТ випромінює весь діапазон довжин хвиль від нуля до  $\infty$ , але у випадку довжин хвиль, досить віддалених від максимуму, спектральна густина енергетичної світності стає дуже малою;
- потужність випромінювання АЧТ зі збільшенням його температури збільшується на всіх довжинах хвиль, причому максимум кривої зміщується в область більших довжин хвиль.

## Фундаментальні закони випромінювання

**Закон Голіцина-Віна** дозволяє визначити довжину хвилі випромінювання АЧТ, якій відповідає максимум кривої  $M_{\lambda,T}$  :

$$\lambda_{\max} [\text{мкм}] = 2898/T [\text{К}].$$

Коментарі:

1) даний результат отримано як розв'язок рівняння  $\frac{\partial M_{\lambda,T}^{AЧТ}}{\partial \lambda} = 0$ .

2) на практиці замість числа 2898 часто використовують число 3000.

З відносною похибкою  $\delta = \exp(-C_2/(\lambda T))$  **закон Планка можна апроксимувати законом Віна:**

$$M_{\lambda,T}^{AЧТ} = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{C_2/(\lambda T)}}.$$

## Фундаментальні закони випромінювання

Закон Віна можна переписати дещо по-іншому.

Для цього використаємо закон Голіціна-Віна у форматі:  $\lambda_{\max} T = C'$ .

Звідси маємо **другий закон Віна**:

$$M_{\lambda, T}^{AЧТ}(\lambda_{\max}) = C'' T^5,$$

де  $C'' = 1,28 \cdot 10^{11} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{К}^5)$ .

Фізичний отриманого результату: **значення максимальної спектральної густини світності АЧТ змінюється пропорційно до п'ятого степеня температури.**

А з похибкою  $\delta = 1 - \left[ \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right)^{-1} \right] T \lambda C_2^{-1}$  закон Планка можна

апроксимувати **формулою Релея-Джинса**:

$$M_{\lambda, T}^{AЧТ} = \frac{C_1}{C_2} \lambda^{-4} T.$$

## Фундаментальні закони випромінювання

Якщо ж проінтегрувати закон Планка по всьому спектру за фіксованого значення температури, то отримується закон Стефана-Больцмана:

$$M_e^{AЧТ} = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T}^{AЧТ} d\lambda = \sigma T^4,$$

$\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана.

**Для реальних випромінювачів:**

$$M_e = \varepsilon_T \sigma T^4,$$

$\varepsilon_T = \frac{M_e}{M_e^{AЧТ}}$  – інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання;

$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{M_{\lambda,T}}{M_{\lambda,T}^{AЧТ}}$  – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання.

## Фундаментальні закони випромінювання

Фізичний зміст отриманого результату: **сумарна енергетична світність АЧТ пропорційна його температурі у четвертому степені.**

Закон Планка у відносних одиницях:

$$y = 142,3x^{-5} \cdot \left[ \exp\left(\frac{4,965}{x}\right) - 1 \right]^{-1},$$

де  $x = \lambda / \lambda_{\max}$  ;  $y = M_{\lambda,T} / M_{\lambda,T \max}$ .

## Фундаментальні закони випромінювання

### Висновки:

- 1) у виразах для відбите тілом випромінювання не враховують;
- 2) всі реальні випромінювачі можна поілити на два типи:
  - тіла із селективним (вибірковим) випромінюванням, тобто випромінювання змінюється зі зміною довжини хвилі. *Приклад:* метали, гази.
  - сірі тіла, для яких у межах обмеженої спектральної ділянки коефіцієнт теплового випромінювання не залежить від довжини хвилі. *Приклад:* графіт, сажа, залізо, різні чорні та інші добре поглинаючя речовини.
- 3) фундаментальні закони випромінювання дозволяють використовувати оптичні методи для безконтактного вимірювання температури АЧТ, а за відомого значення КТВ – і для вимірювання температури будь-якого реального тіла.

**Енергетична, яскравісна та колірна температури.  
Пірометри**



## Загальні положення

Для порівняння випромінювання реальних (нечорних) тіл з випромінюванням АЧТ використовують поняття “еквівалентна температура”.

**Еквівалентна температура** – температура АЧТ, за якої одна з характеристик його випромінювання збігається з відповідною характеристикою випромінювання реального тіла за істинної температури  $T$ .

Залежно від того, які характеристики випромінювання розглядають, розрізняють такі еквівалентні температури:

- радіаційну (енергетичну);
- яскравісну;
- колірну.

## Загальні положення

Пірометричні методи вимірювання температури – це такі методи, які базуються на визначенні теплового випромінювання об'єкта без зміни його температурного поля (це властиво контактним методам вимірювання температури). Розробка чутливих приймачів інфрачервоного випромінювання дозволила застосувати пірометричні методи для вимірювання не лише високих, але й низьких температур. **Прилади для вимірювання температур об'єктів за їхнім тепловим електромагнітним випромінюванням називають пірометри.**

Залежно від вхідної величини **пірометри бувають:**

- **пірометри повного випромінювання (радіаційні пірометри)**, які сприймають повну (інтегральну) енергію випромінювання;
- **пірометри часткового випромінювання (яскравісні пірометри)**, які використовують залежність від температури енергетичної яскравості випромінювання у кінцевому діапазоні довжин хвиль;
- **пірометри спектрального відношення (колірні пірометри)**, у яких використовують залежність від температури відношення двох спектральних густин енергетичних яскравостей на двох чи декількох довжинах хвиль

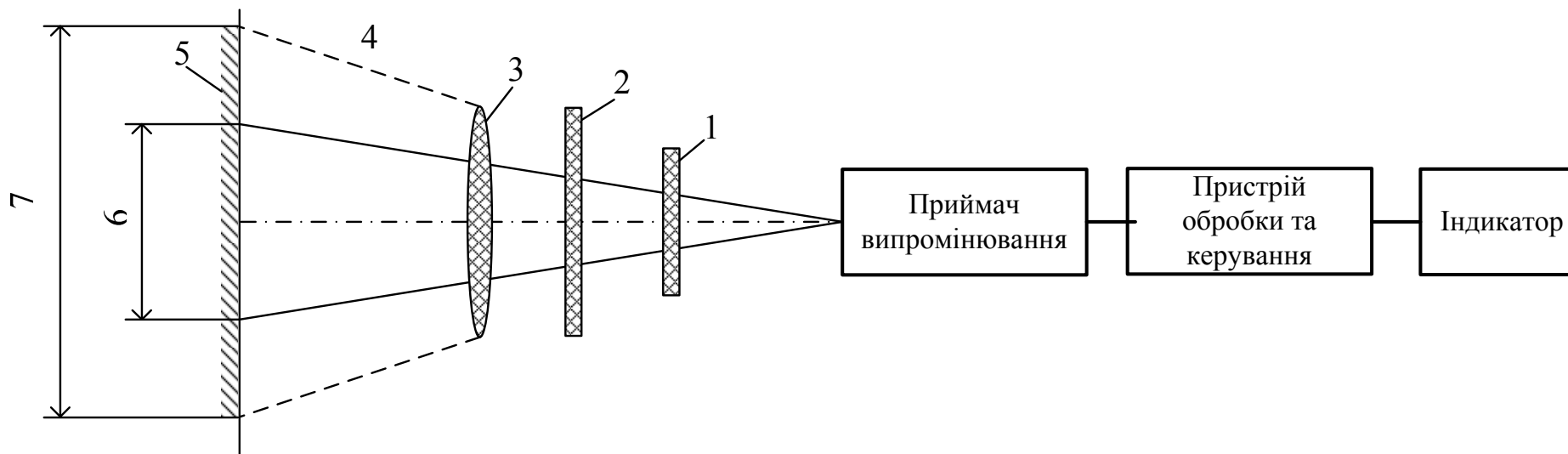
## Загальні положення

Сигнал, який виникає у приймачі пірометра (будь-якого з названих типів), як міра температури об'єкта, визначається:

- температурою об'єкта;
- спектральною характеристикою його випромінювання;
- спектральною чутливістю самого приймача пірометра.

На спектральну характеристику випромінювання впливають спектральні характеристики складових частин пірометра (лінз, дзеркал тощо). Область спектра випромінювання у пірометрах може обмежуватись чи “вирізатись” вбудованими у них селективними фільтрами. У всьому спектральному діапазоні такі пристрої послаблення потоку випромінювання, як обертові призми, діафрагми та сірі дзеркала, поглинають випромінювання об'єкта на деякі постійну величину.

## Загальні положення



### *Структурна схема пірометра рефракторного типу*

*(1 – селективний фільтр; 2 – оптичний атенюатор; 3 – об’єктив; 4 – вказівник візування; 5 – об’єкт вимірювання; 6 – полевимірювання, яке впливає на енергетичну освітленість приймача випромінювання; 7 – поле спостереження)*

## Загальні положення

За допомогою “сірих” клинів та поляризаційних фільтрів випромінювання у пірометрі послаблюється за певним законом. Такі приймачі випромінювання, чорнені термобатареї чи болометри є сірими або чорними приймачами, а їхні вихідні сигнали не залежать від довжини хвилі падаючого потоку випромінювання. фотоелементи та фоторезистори є селективними приймачами та мають спектральну характеристику чутливості, форма та ширина якої визначаються властивостями приймача. Склад та характеристики випромінювання об’єкта змінюються внаслідок відбиттів в оптичних конструкціях пірометрів.

## Радіаційна (енергетична) температура

**Радіаційна (енергетична) температура**  $T_p$  – температура АЧТ, за якої його сумарна (за всім спектром) енергетична яскравість дорівнює сумарній яскравості досліджуваного тіла за істинної температури.

Зв'язок між істинною та радіаційною температурами отримують, використовуючи закон Стефана-Больцмана:

$$\sigma T_p^4 = \varepsilon_T \sigma T^4 \Rightarrow T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}} = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\varepsilon_T}}.$$

Оскільки  $\varepsilon_T < 1$  для реальних тіл, то  $T_p < T$ .

А з урахуванням того, що реальні тіла відрізняються значеннями КТВ, то **радіаційні пірометри потрібно градувати для тих тіл, температуру яких вони вимірюють.**

## Інфрачервоні пірометри



Приклад **медичного** інфрачервоного пірометра

## Інфрачервоні пірометри



Green backlight  
32.0°C~37.3°C

Yellow backlight  
37.4°C~37.9°C

Red backlight  
38.0°C~42.9°C

Приклади застосування **медичного** інфрачервоного пірометра



## Інфрачервоні пірометри



Приклади застосування інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади застосування інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади застосування інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади застосування інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади застосування інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади застосування інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів



## Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів

# Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів  
(на прикладі моделі Mestek IR01D)

## Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади зовнішнього вигляду інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади форм променів лазерних індикаторів  
інфрачервоних пірометрів (**один промінь**)

## Інфрачервоні пірометри



Приклади форм променів лазерних індикаторів  
інфрачервоних пірометрів (**один промінь**)

## Інфрачервоні пірометри



Приклади форм променів лазерних індикаторів  
інфрачервоних пірометрів (**декілька променів в одну точку**)



## Інфрачервоні пірометри



Приклади форм променів лазерних індикаторів  
інфрачервоних пірометрів (**декілька променів у відрізок**)

## Інфрачервоні пірометри



Приклади форм променів лазерних індикаторів  
інфрачервоних пірометрів (**промені у коло**)

## Інфрачервоні пірометри



Приклади форм променів лазерних індикаторів  
інфрачервоних пірометрів (**промені у коло**)

## Інфрачервоні пірометри



Габарити та маса типового інфрачервоного пірометра

## Інфрачервоні пірометри



Приклади екранів індикаторів інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади екранів індикаторів інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади екранів індикаторів інфрачервоних пірометрів

## Інфрачервоні пірометри



Приклади екранів індикаторів інфрачервоних пірометрів



## Інфрачервоні пірометри

Типові **параметри та характеристики** інфрачервоного пірометра:

- Діапазон вимірюваних температур
- Відстань для вимірювань
- **Оптична роздільна здатність D:S**
- Діапазон робочих довжин хвиль
- Фіксований чи змінний (тоді діапазон значень) рівень коефіцієнта теплового випромінювання
- Похибка вимірювання температури
- Роздільна здатність за температурою
- Тривалість вимірювання

## Інфрачервоні пірометри

### Типові **сервісні функції:**

- вмикання/вимикання лазерного індикатора
- вмикання/вимикання підсвічування екрана
- вибір одиниці вимірювання температури
- індикація (світлова та (або) звукова) проблемних ділянок температури (мінімальної, максимальної, середньої (AVG), різницевої (DIF))
- пам'ять вимірювань
- автоматичне вимикання
- функція утримування результату вимірювання на дисплеї (Hold)
- індикація рівня розряду джерела живлення
- роз'єми для підключення до комп'ютера
- наявність контактного датчика температури

## Оптична роздільна здатність

**Оптична роздільна здатність** - це відношення (пропорція) відстані  $D$  до об'єкта, випромінювання якого вимірюють пірометром, до діаметра плями (кола)  $S$  на поверхні цього об'єкта.

Формат позначення роздільної здатності: **D : S (Distance : Spote size)**

**Приклад 1.** Нехай роздільна здатність пірометра 12:1. Тоді, наприклад, на відстані 1 м (100 см) діаметр кола, з якого вимірюють температуру становить  $100 \text{ см}/12=8,3 \text{ см}$ . На відстані 30 см (для цього відношення 12:1) це 2,5 см; на відстані 180 см це 15 см і т.д.

Використовуючи це співвідношення, **можна також оцінити максимальну відстань для ефективного вимірювання температури об'єкта.**

**Приклад 2.** Потрібно оцінити відстань до труби діаметром 5 см. При співвідношенні 12:1 маємо:  $5 \text{ см} * 12 = 60 \text{ см}$ .

## Оптична роздільна здатність

Для зручності пропорцію D:S та допоміжний рисунок розташовують на одній з бічних сторін пірометра.



## Оптична роздільна здатність



## Калібрування пірометрів, тепловізорів



Прилад для калібрування пірометрів, тепловізорів

## Калібрування пірометрів, тепловізорів



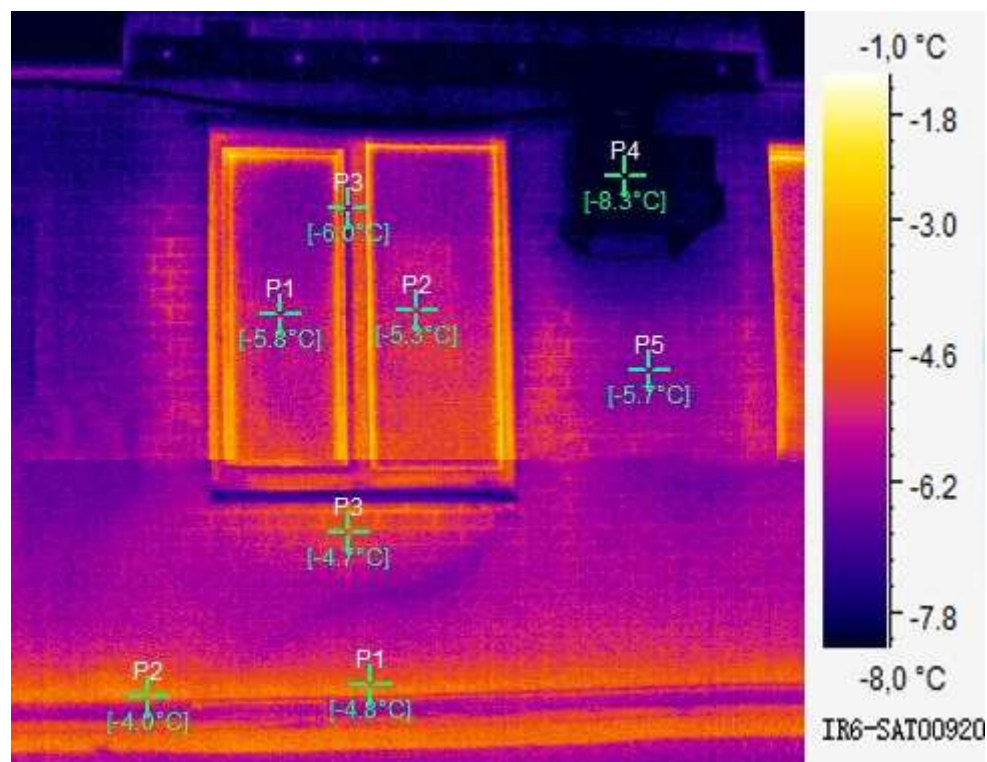
Калібрування пірометра

# **Тепловізори**



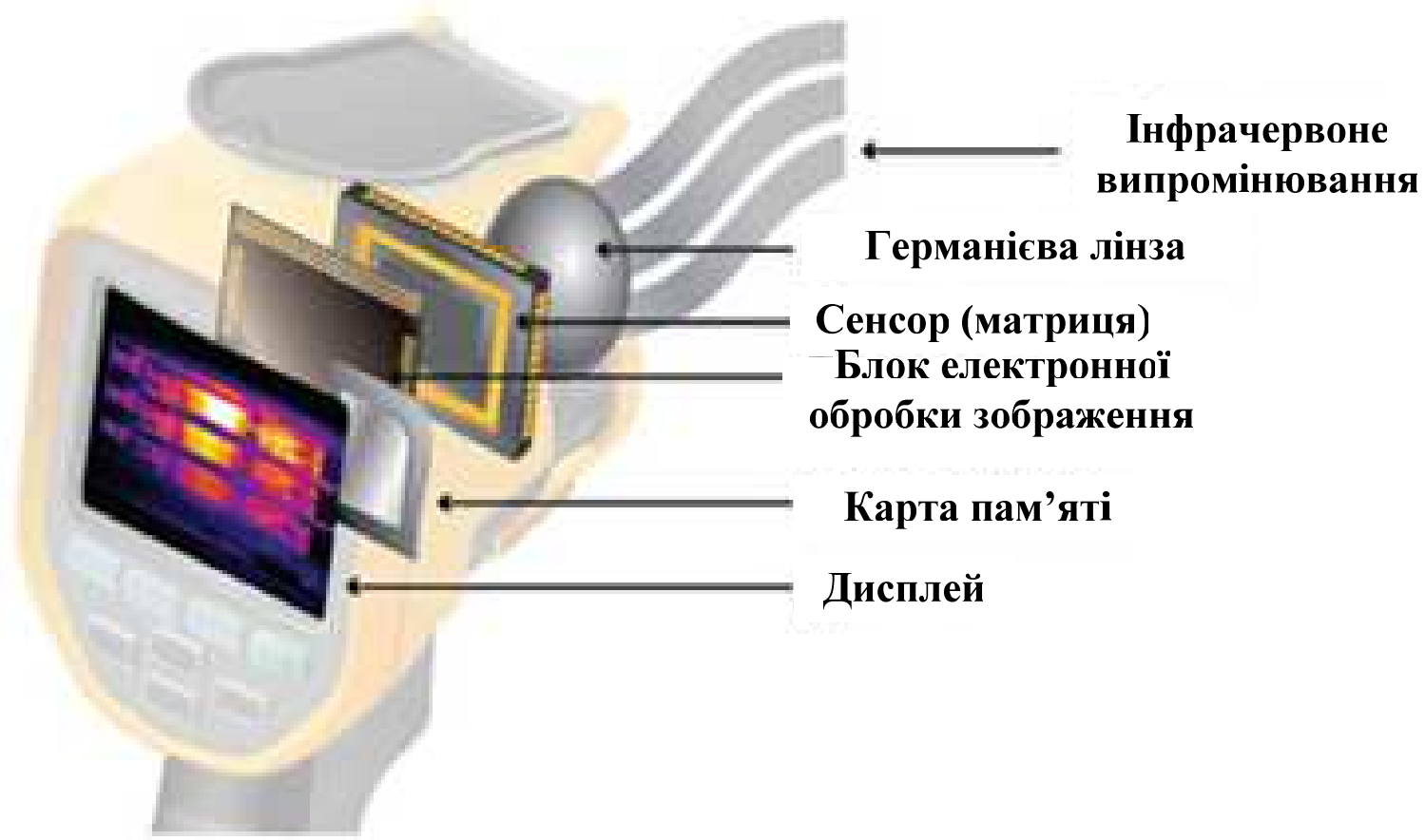
## Тепловізори

Тепловізор – прилад, який реєструє теплове електромагнітне випромінювання об'єктів і переводить його у видиме людським оком зображення, розфарбувавши його у зручні для аналізу умовні кольори (термограму). Для зручності розшифровування термограми поблизу зображення часто розташовують шкалу температур – див. ілюстрацію.



Приклад термограми

## Тепловізори



Будова вимірювального тепловізора

## Будова тепловізорів

Основні елементи тепловізора:

**матриця** (охладжувана, неохолоджувана) – багатоелементний ІЧ-приймач, який приймає теплове випромінювання та перетворює його в електричні сигнали. Розрізняються матриці своїми розмірами, термочутливістю та роздільною здатністю;

**об'єктив** (виконують з германієвої лінзи, оскільки вона прозора для ІЧ випромінювання);

**електронний блок обробки зображення** – переводить електричний сигнал матриці у зображення та розфарбовує його у кольори;

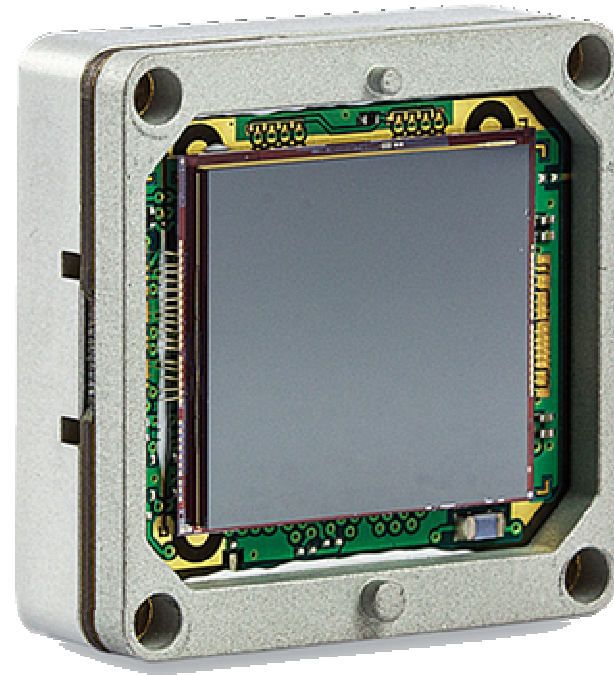
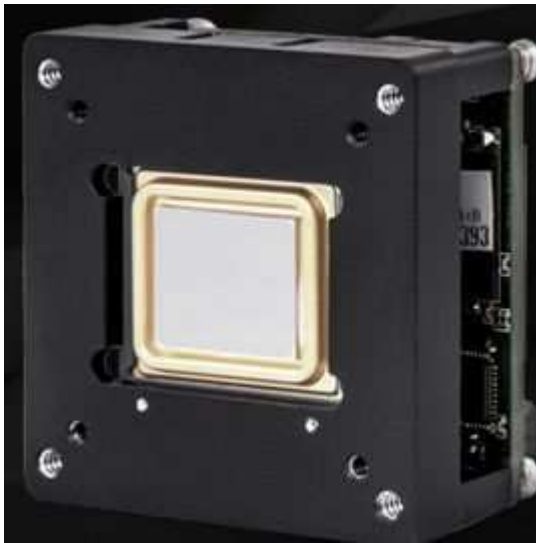
**дисплей** – мініатюрний екран, на який виводять зображення. Чим більша його роздільна здатність, тим чіткішим буде зображення. Зображення може бути кольоровим або мати 256 градацій сірого. Найпоширеніші режими відображення (кольорові палітри): гарячий-чорний; гарячий-білий; гарячий-червоний. Типові режими дисплеїв: повний екран; кадр у кадрі; збільшення та накладання зображень.

## Будова тепловізорів

*Неохолоджувана матриця (мікроболометр)* використовується у переносних тепловізорах. Прилад буде компактним. Миттєво запускаютьсята впевнено виявляють об'єкти при задимленості та опадах завдяки великій довжині хвилі. Проте мають обмежену дільність дії і працюють лише зі світлосильною оптикою.

*Охолоджувана матриця* використовується в основному у стаціонарних тепловізорах. Працюють у короткохвильовому діапазоні та мають підвищену термочутливість (до 20 мК) і збільшену дальність спостереження (до 8-10 км). Проте є масивними, мають тривалий час запуску, обмежений робочий ресурс та велику потужність споживання.

## Будова тепловізорів



Приклади зображень матриць тепловізорів

## Будова тепловізорів

Види тепловізорів за розмірами:

**мініатюрні:** малогабаритні та легкі пристрої, маса яких може бути не більшою ніж 7-10 г.



## Загальні положення

**кишенькові:** клас переносних тепловізорів, випускаються у різних модифікаціях. Наприклад, у вигляді спеціальних насадок чи чохла, які перетворюють смартфон чи планшет у тепловізор.



## Загальні положення

компактні: переносні пристрої для мобільного використання.





## Загальні положення

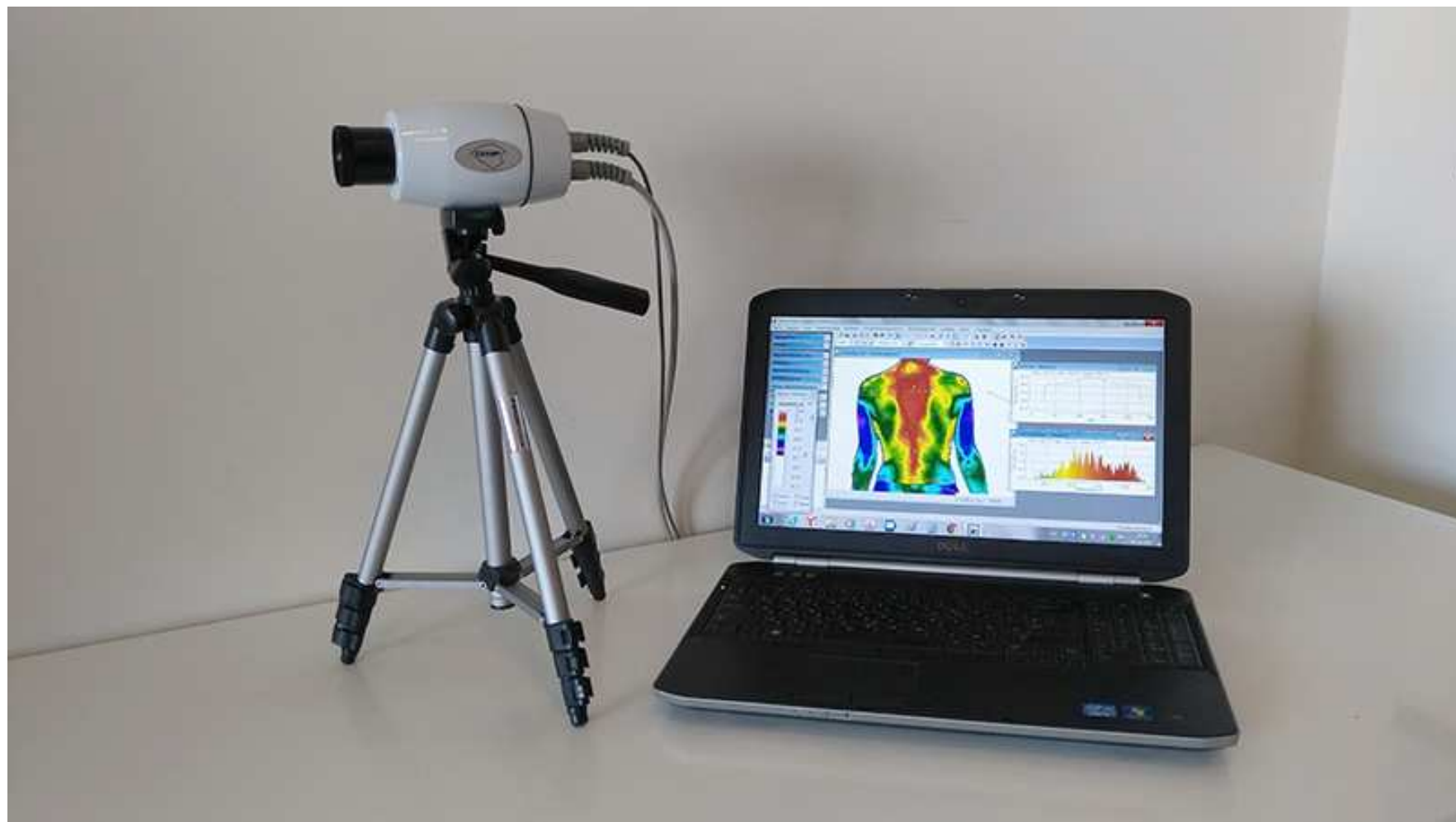
*стаціонарні/перевізні:* категорія тепловізорів, встановлюваних стаціонарно, а також на військовій техніці, повітряних та морських судах.



## Загальні положення



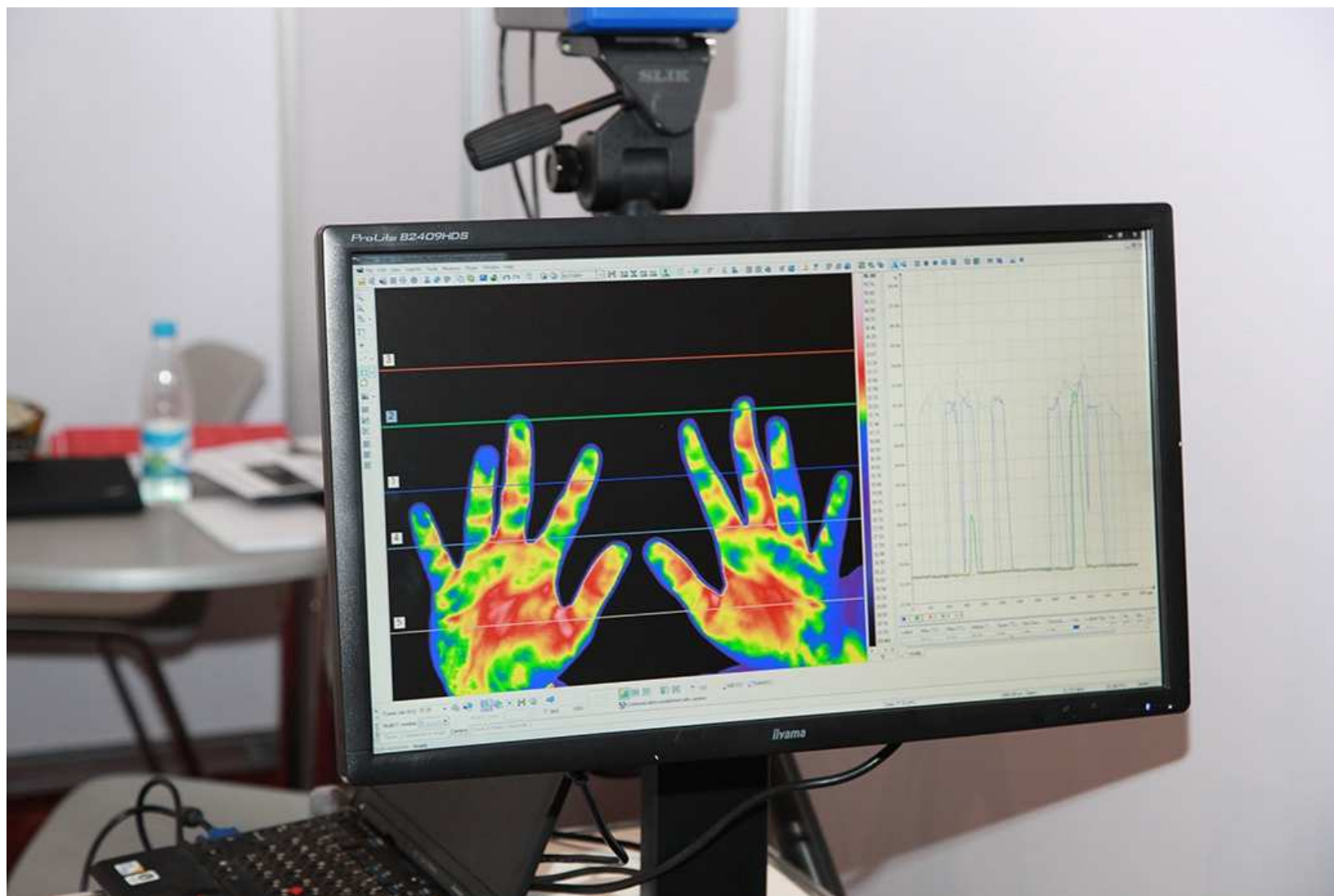
## Загальні положення



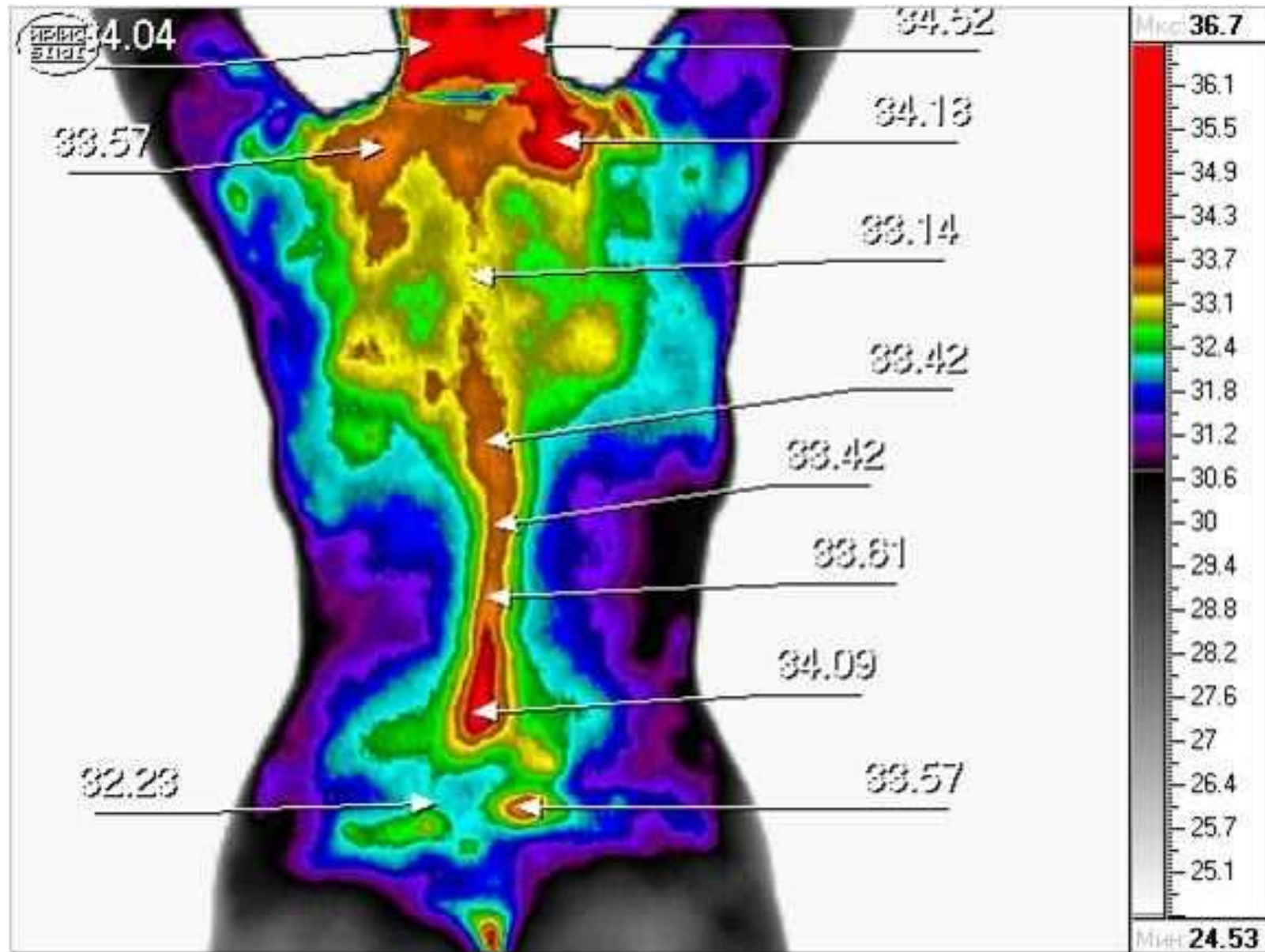
## Загальні положення



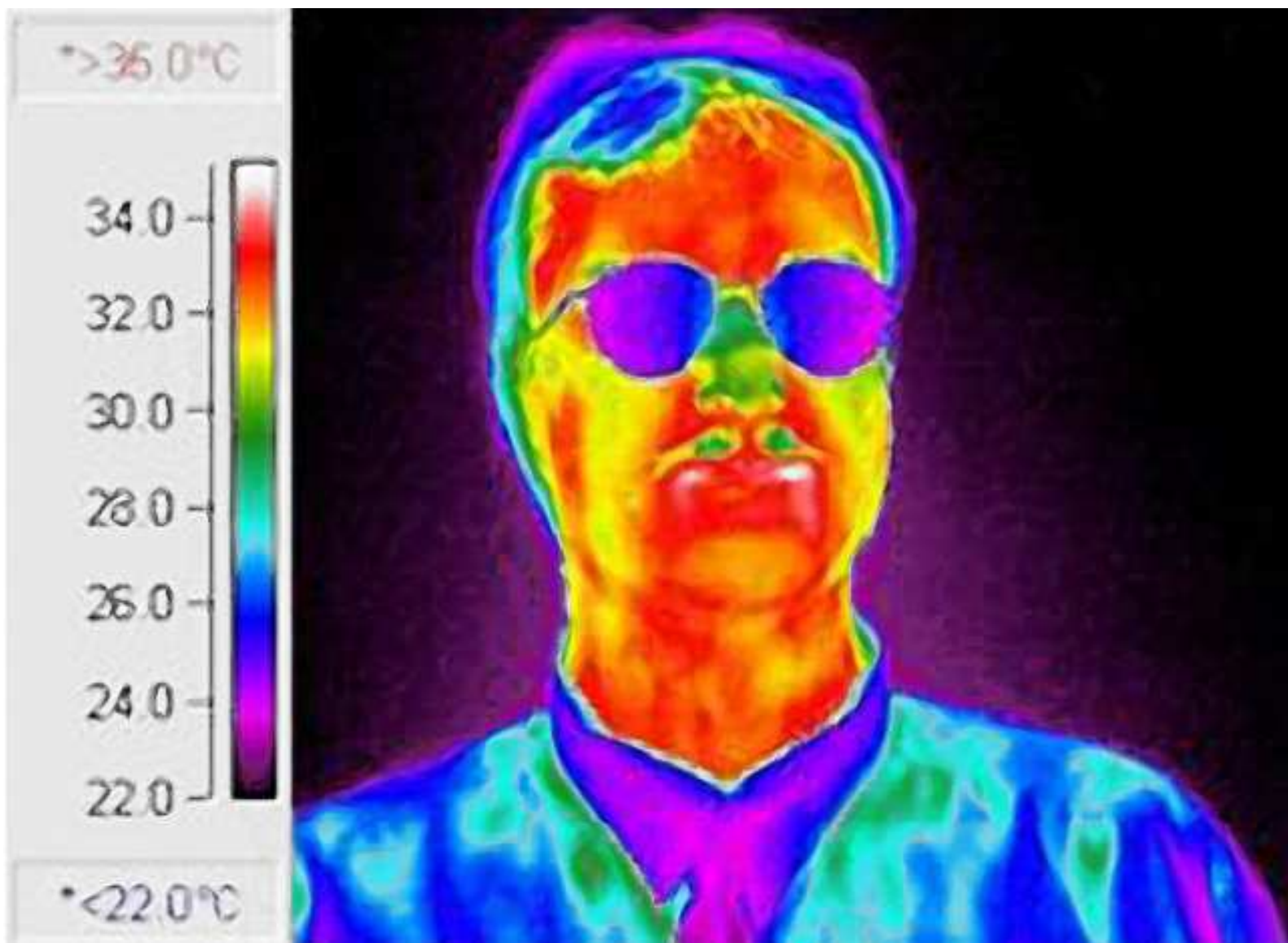
## Загальні положення



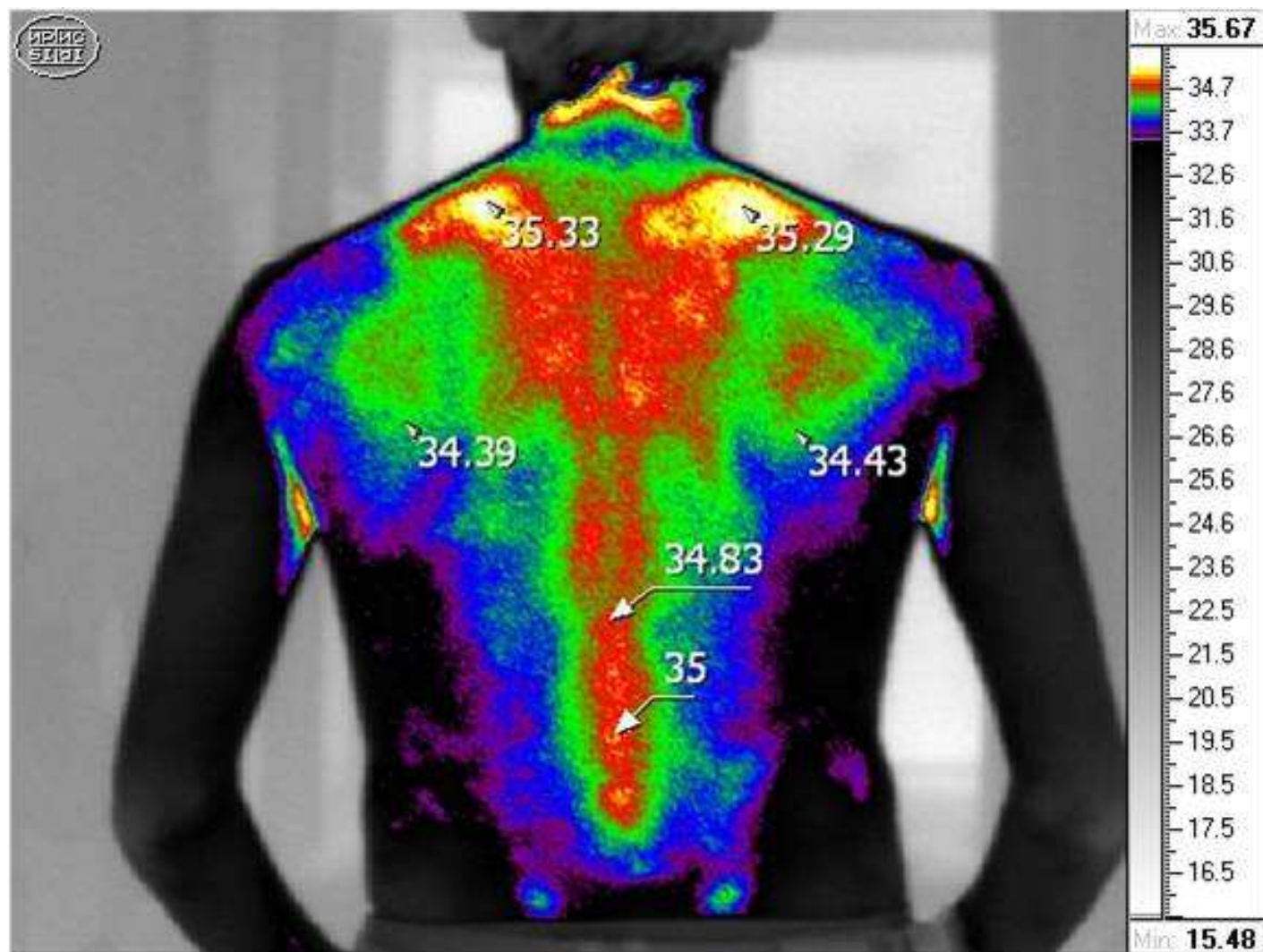
## Загальні положення



## Загальні положення



## Загальні положення





## Загальні положення



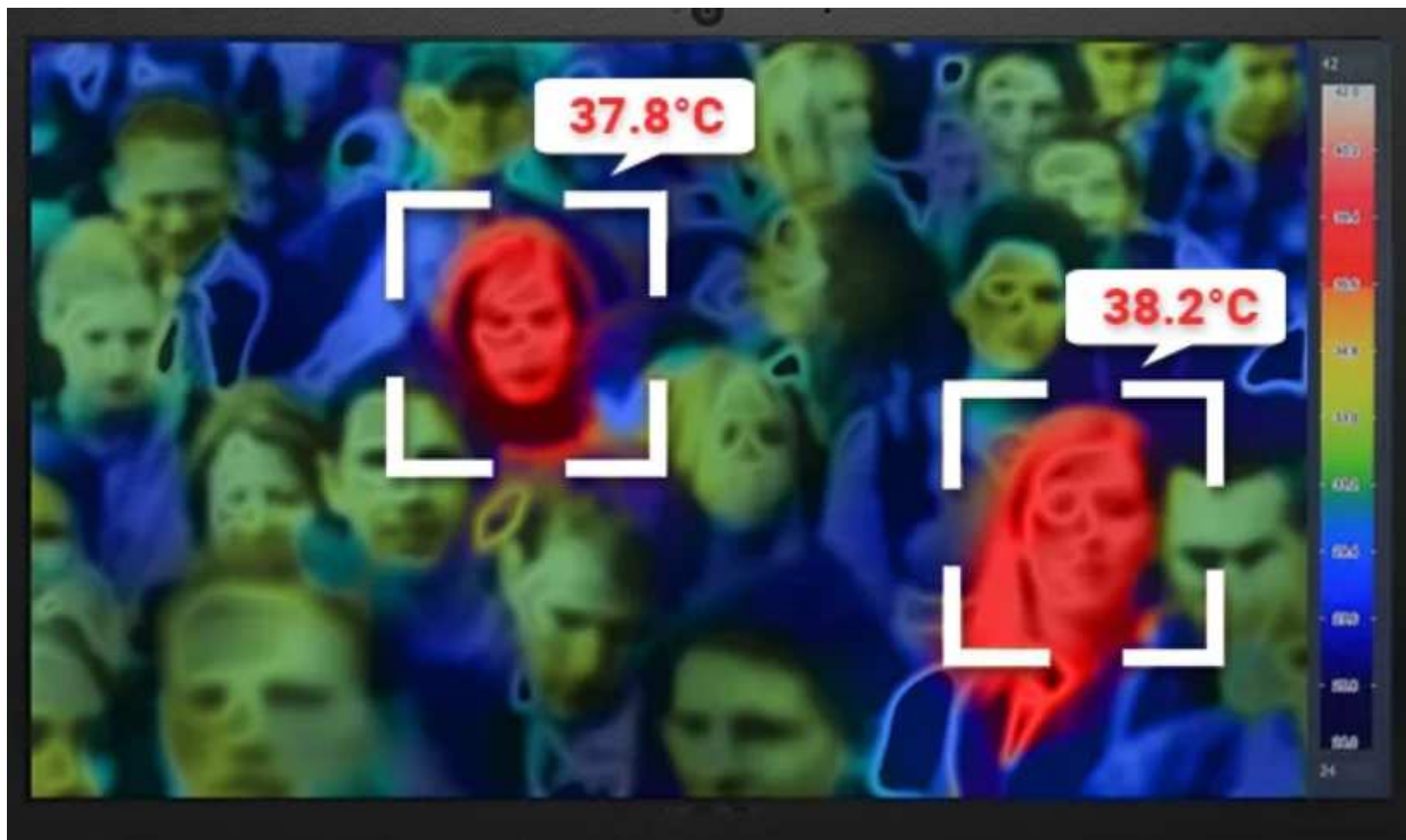
## Загальні положення



## Загальні положення



## Загальні положення

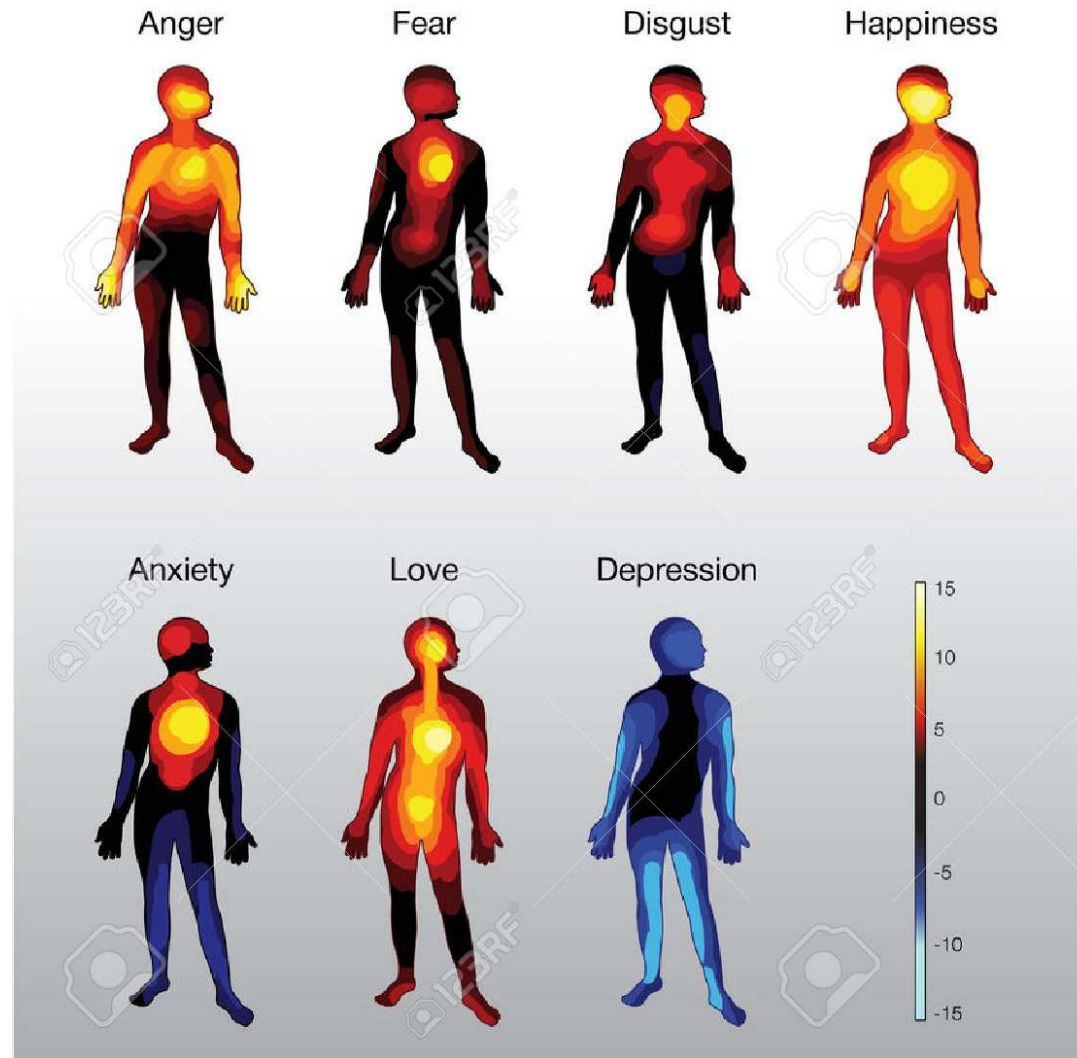


## Загальні положення

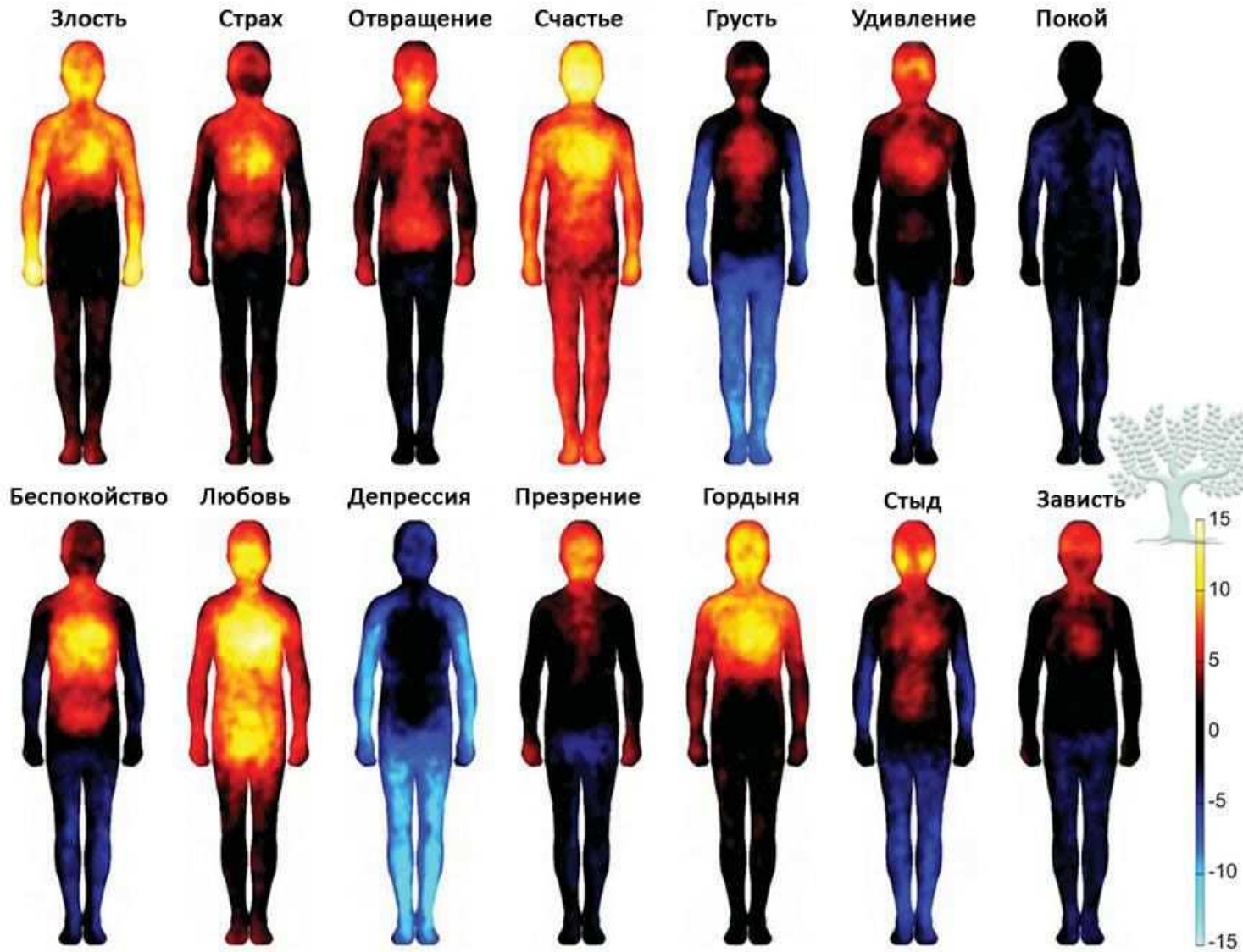


## Загальні положення

How emotions are mapped in the body



# Загальні положення

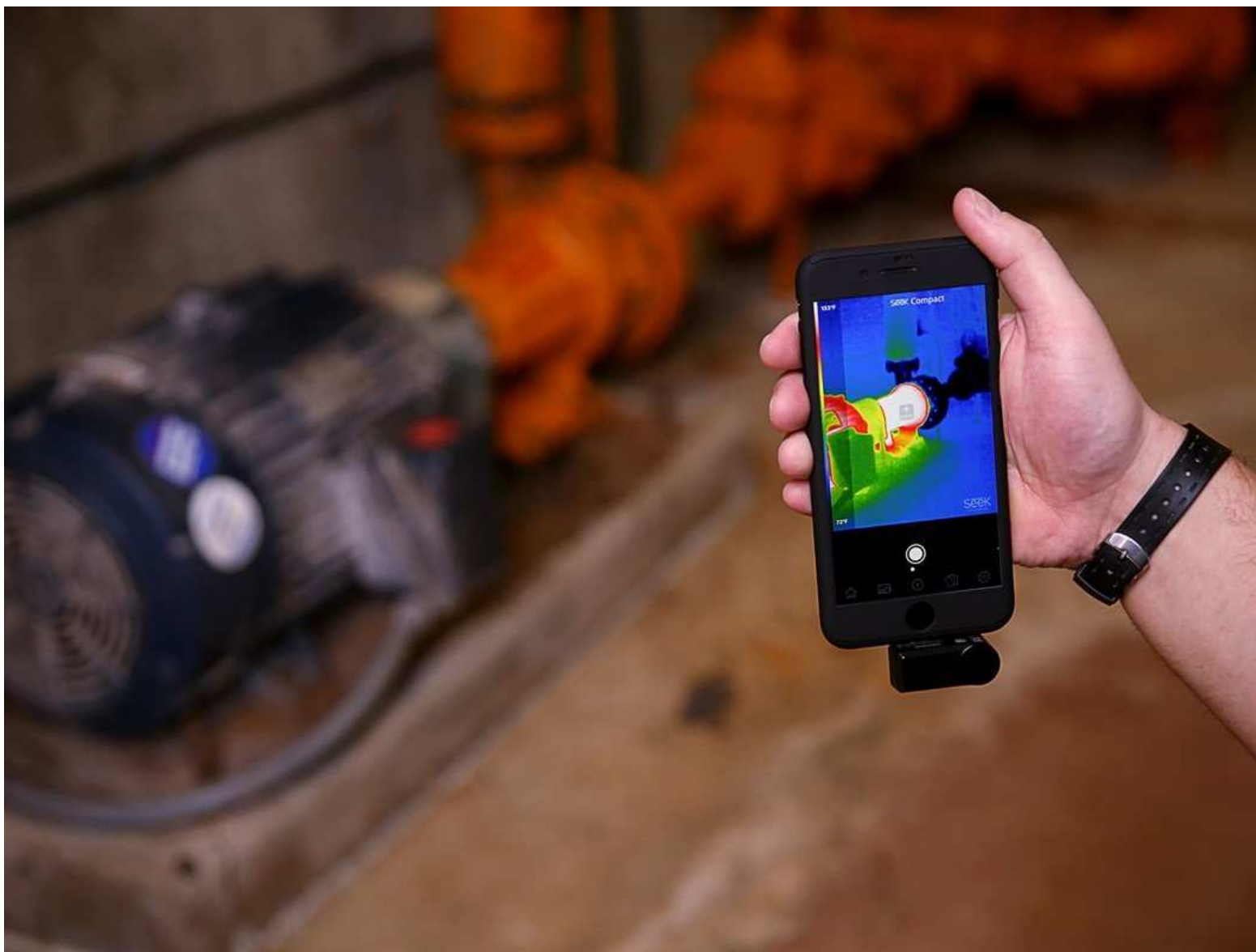


## Загальні положення





## Загальні положення



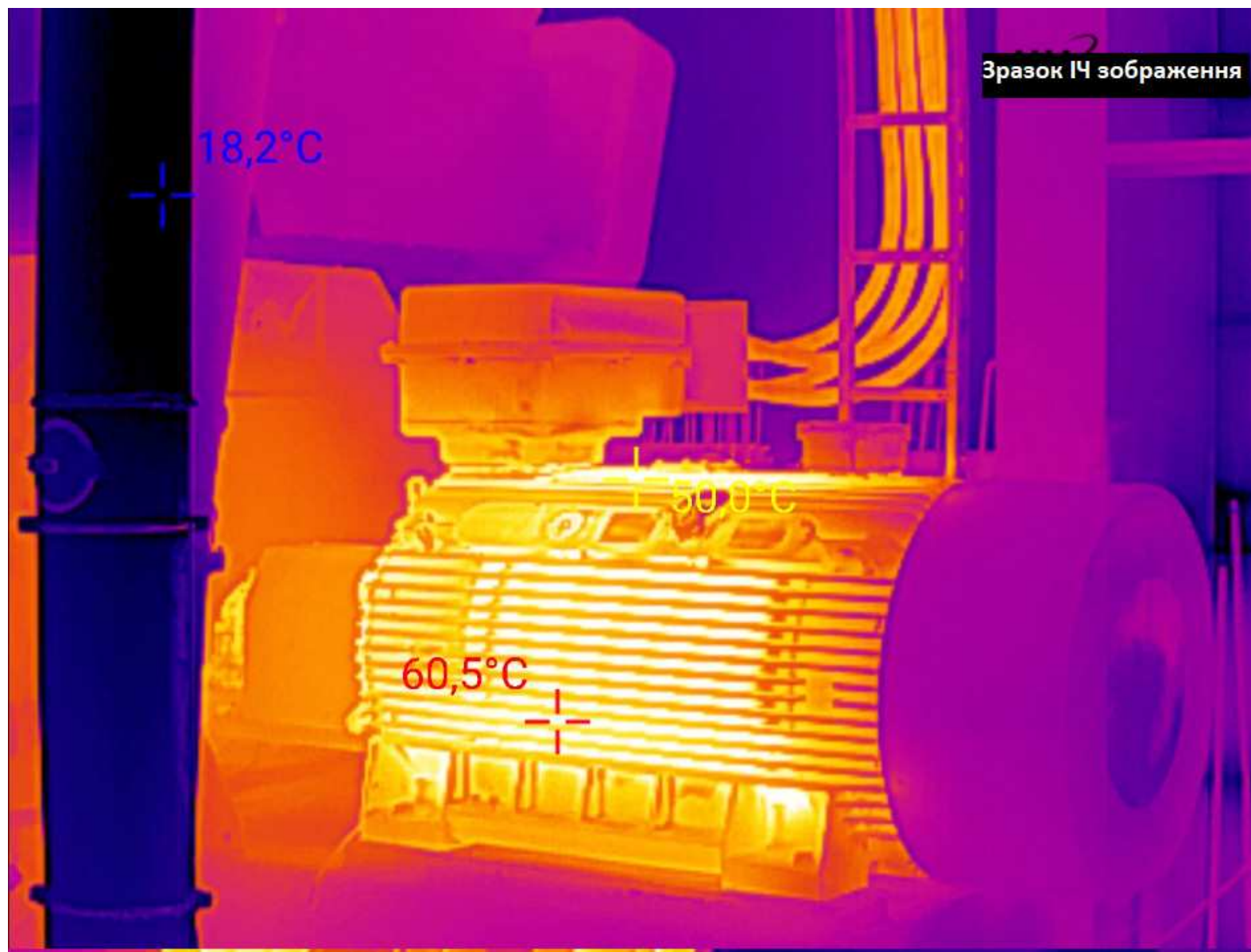




## Загальні положення



## Загальні положення



## Загальні положення



## Загальні положення



## Яскравісна температура

**Яскравісна температура**  $T_L$  ( $Tя$ ) – температура АЧТ, за якої його яскравість у межах вузької ділянки спектра дорівнює яскравості досліджуваного тіла за істинної температури.

Яскравісну температуру визначають у видимій області спектра поблизу 0,655 мкм.

Зв'язок між істинною та яскравісною температурами отримують, використовуючи закон Віна:

$$\frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T_L)} = \epsilon_T \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T)} \Rightarrow \frac{1}{T} = \frac{1}{T_L} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \epsilon_T \Rightarrow$$
$$\Rightarrow T = \frac{C_2}{\lambda} \frac{1}{\frac{C_2}{\lambda T_L} + \ln \epsilon_T}$$

Оскільки  $\epsilon_T < 1$  для реальних тіл, то  $T_L < T$ .



## Яскравісна температура

**Суттєва перевага яскравісних пірометрів – незалежність показів від відстані до випромінюючої поверхні та її розмірів.**

*Приклад:* вимірювання температури зірок.

Яскравісні пірометри забезпечують високу точність вимірювання температури, оскільки яскравість тіла збільшується значно швидше, ніж його температура. Тому при зміні яскравості з похибкою в 1 % забезпечується похибка вимірювання температури не більше 0,1 %.

## Колірна температура

**Колірна температура**  $T_c$  – температура АЧТ, за якої у видимій області спектра відносний розподіл спектральної густини енергетичної яскравості АЧТ і досліджуваного тіла за його істинної температури однаковий, тобто відношення спектральних густин яскравості на двох заданих довжинах хвиль однакове..

Колірну температуру найчастіше визначають на довжинах хвиль 0,655 мкм та 0,467 мкм.

Зв'язок між істинною та яскравісною температурами:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_c} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ln(\varepsilon_{\lambda_1, T} / \varepsilon_{\lambda_2, T})}{C_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \Leftrightarrow \frac{1}{T} = \frac{1}{T_c} + \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1, T} / \varepsilon_{\lambda_2, T})}{C_2 (\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})}$$

## Колірна температура

Покази такого пірометра відповідають дійсній температурі, якщо об'єкт є АЧТ ( $\varepsilon_{\lambda_1, T} = \varepsilon_{\lambda_2, T} = 1$ ) або сірим тілом ( $\varepsilon_{\lambda_1, T} = \varepsilon_{\lambda_2, T}$ ).

Для багатьох тіл при зміні довжини хвилі  $\varepsilon_{\lambda, T} \neq const$ . У металів КТВ зменшується при збільшенні довжини хвилі, у деяких неметалів, навпаки, збільшується. Тому колірна температура може бути більшою, меншою або рівною істинній температурі.

Крім цього, **покази колірних пірометрів принципово не залежать від відстані до об'єкта дослідження, від поглинання випромінювання у середовищі між об'єктом та пірометром, якщо  $\varepsilon_{\lambda_1, T} = \varepsilon_{\lambda_2, T}$ .**

А також для більшості випромінювачів колірна температура ближча до істинної температури, ніж енергетична чи яскравісна.

**Приклад:** для вольфраму при істинній температурі 2800 К:

*яскравісна* температура становить 2515 К;

*енергетична* температура становить 2128 К;

*колірна* температура становить 2874 К.

## Колірна температура

Використовуючи закон Віна:

$$\left. \begin{aligned} M_{\lambda_1, T} &= \varepsilon_{\lambda_1, T} C_1 \lambda_1^{-5} \exp(-C_2 / (\lambda_1 T)) \\ M_{\lambda_2, T} &= \varepsilon_{\lambda_2, T} C_1 \lambda_2^{-5} \exp(-C_2 / (\lambda_2 T)) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left( \frac{M_{\lambda_1, T} \cdot \varepsilon_{\lambda_2, T} \cdot \lambda_1^5}{M_{\lambda_2, T} \cdot \varepsilon_{\lambda_1, T} \cdot \lambda_2^5} \right)}.$$