

Лекція №. 4 Теплове випромінювання

Сибіль М. Г.

План

1. Поняття теплового випромінювання і його характеристики.
2. Закони теплового випромінювання.
3. Випромінювання реальних тіл і тіла людини.
4. Біологічна і терапевтична дія тепла і холоду.
5. Фізичні основи термографії. Тепловізори.

1. Поняття теплового випромінювання і його характеристики

Теплове випромінювання - це електромагнітне випромінювання, яке виникає за рахунок енергії обертального і коливального руху атомів і молекул у складі речовини. Теплове випромінювання характерне для всіх тіл, які мають температуру, що перевищує температуру абсолютного нуля. Теплове випромінювання тіла людини відноситься до **інфрачервоного діапазону електромагнітних хвиль**. Вперше таке випромінювання було відкрито англійським астрономом **Вільямом Гершелем**. У 1865 англійський фізик **Дж. Максвелл** довів, що **ІЧ** - випромінювання має електромагнітну природу і являє собою хвилі довжиною від 760нм до 1-2мм. Найчастіше весь діапазон **ІЧ** - випромінювання ділять на області: ближню (750нм-2.500нм), середню (2.500нм - 50.000нм) і далекую (50.000нм-2.000.000нм). **Розглянемо випадок, коли тіло А розташоване в порожнині Б, яка обмежена ідеальною відбиваючою непроникною для випромінювання) оболонкою С (рис.1). У результаті багаторазового відбиття від внутрішньої поверхні оболонки випромінювання буде зберігатися в межах дзеркальної порожнини і частково поглинатися тілом А. За таких умов система порожнина Б - тіло А не буде втрачати енергію, а буде лише відбуватися безперервний обмін енергією між тілом А і випромінюванням, яке заповнює порожнину Б.**

Рис.1. Багаторазове відбиття теплових хвиль від

дзеркальних стінок порожнини Б. Якщо розподіл енергії залишається незмінним для кожної довжини хвилі, то стан такої системи буде рівноважним, і випромінювання також буде рівноважним. Єдиним видом рівноважного випромінювання є теплове. Якщо з якоїсь причини рівновага між випромінюванням і тілом зміститься, то починають протікати такі термодинамічні процеси, які повернуть систему в стан рівноваги. Якщо тіло А починає випромінювати більше, ніж поглинає, то тіло починає втрачати внутрішню енергію і температура тіла (як міра внутрішньої енергії) почне падати, що зменшить кількість випромінюваної енергії. Температура тіла падатиме до тих пір, поки кількість випромінюваної енергії не стане рівною кількості енергії, що поглинається тілом. Таким чином, настане рівноважний стан.

Рівноважне теплове випромінювання має такі властивості: однорідне (однакова щільність потоку енергії у всіх точках порожнини), ізотропне (можливі напрями поширення рівноймовірні), неполяризоване (напрямки і значення векторів напруженостей електричного і магнітного полів у всіх точках порожнини змінюються хаотично). Основними кількісними характеристиками теплового випромінювання є:

- **Енергетична світність** - це кількість енергії електромагнітного випромінювання у всьому діапазоні довжин хвиль теплового випромінювання, яке випромінюється тілом у всіх напрямках з одиниці площі поверхні за одиницю часу: $R = E / (S \cdot t)$, [Дж / (м²С)] = [Вт/м²]. Енергетична світність залежить від природи тіла, температури тіла, стану поверхні тіла і довжини хвилі випромінювання.

- **Спектральна густина випромінювальної здатності** - енергетична світність тіла для даних довжин хвиль ($\lambda + d\lambda$) при даній температурі ($T + dT$): $R_{\lambda T} = f(\lambda, T)$.

Енергетична світність тіла в межах якихось довжин хвиль обчислюється інтегруванням $R_{\lambda T} = f(\lambda, T)$ для $T = \text{const}$:

- **Коефіцієнт поглинання** - відношення поглиненої тілом енергії до падаючої енергії. Так, якщо на тіло падає випромінювання потоку $d\Phi_{\text{пад}}$, то одна його частина відбивається від поверхні тіла - $d\Phi_{\text{отр}}$, інша частина проходить в тіло і частково перетворюється в теплоту $d\Phi_{\text{погл}}$, а третя частина після декількох внутрішніх віддзеркалень - проходить через тіло назовні $d\Phi_{\text{пр}}$: $\alpha = d\Phi_{\text{погл}} / d\Phi_{\text{пад}}$.

Коефіцієнт поглинання α залежить від природи поглинаючого тіла, довжини хвилі поглинаємого випромінювання, температури і стану поверхні тіла.

- **Монохроматичний коефіцієнт поглинання** - коефіцієнт поглинання теплового випромінювання даної довжини хвилі при заданій температурі: $\alpha_{\lambda, T} = f(\lambda, T)$ Серед тіл є такі тіла, які можуть поглинати все теплове випромінювання будь-яких довжин хвиль, яке падає на них.

Такі ідеально поглинаючі тіла називаються абсолютно чорними тілами. Для них $\alpha = 1$. Є також сірі тіла, для яких $\alpha < 1$, але однаковий для всіх довжин хвиль інфрачервоного діапазону.

Моделлю АЧТ (абсолютно чорного тіла) є малий отвір порожнини з теплонепроникною оболонкою. Діаметр отвору складає не більше 0,1 діаметра порожнини. При постійній температурі з отвору випромінюється деяка енергія, відповідна енергетичній світності абсолютно чорного тіла. Але АЧТ - це ідеалізація. Але закони теплового випромінювання АЧТ допомагають наблизитися до реальних закономірностей.

2. Закони теплового випромінювання

1. Закон Кірхгофа. Теплове випромінювання є рівноважним - скільки енергії випромінюється тілом, настільки її їм і поглинається. Для трьох тіл, що знаходяться у замкнутій порожнині можна записати:

Зазначене співвідношення буде вірним і тоді, коли одне з тіл буде АЧ:

Так як для АЧТ $\alpha_{\lambda, T}$.

Це закон Кірхгофа: *відношення спектральної щільності енергетичної світності тіла до його монохроматичного коефіцієнта поглинання (при певній температурі і для певної довжини хвилі) не залежить від природи*

тіла і дорівнює для всіх тіл спектральної щільності енергетичної світності при тій же самій температурі і довжині хвилі.

Наслідки із закону Кірхгофа:

1. Спектральна енергетична світність **АЧТ** є універсальною функцією довжини хвилі і температури тіла.
2. Спектральна енергетична світність **АЧТ** найбільша.
3. Спектральна енергетична світність довільного тіла дорівнює добутку його коефіцієнта поглинання на спектральну енергетичну світність абсолютно чорного тіла.
4. Будь-яке тіло при даній температурі випромінює хвилі тієї ж довжини хвилі, яке воно поглинає при даній температурі. Систематичне вивчення спектрів ряду елементів дозволило Кірхгофу і Бунзену встановити однозначний зв'язок між спектрами поглинання і випромінювання газів і індивідуальністю відповідних атомів. Так був запропонований спектральний аналіз, за допомогою якого можна виявити речовини, концентрація яких складає 0,1 нм.

Розподіл спектральної щільності енергетичної світності для абсолютно чорного тіла, сірого тіла, довільного тіла. Остання крива має декілька максимумів і мінімумів, що вказує на вибіркковість випромінювання і поглинання таких тіл.

2. Закон Стефана-Больцмана. У 1879 році австрійські вчені **Йозеф Стефан** (експериментально для довільного тіла) і **Людвіг Больцман** (теоретично для **АЧТ**) встановили, що загальна енергетична світність у всьому діапазоні довжин хвиль пропорційна четвертому ступеню абсолютної температури тіла:

3. Закон Віна.

Німецький фізик **Вільгельм Він** в 1893 році сформулював закон, який визначає положення максимуму спектральної щільності енергетичної світності тіла в спектрі випромінювання **АЧТ** в залежності від температури.

Відповідно до закону, довжина хвилі λ_{\max} , на яку припадає максимум спектральної щільності енергетичної світності **АЧТ**, обернено пропорційна її абсолютній температурі **T**: $\lambda_{\max} = b / T$, де $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постійна Віна.

Таким чином, при збільшенні температури змінюється не тільки повна енергія випромінювання, але й сама форма кривої розподілу спектральної щільності енергетичної світності. Максимум спектральної щільності при збільшенні температури зміщується у бік більш коротких довжин хвиль. Тому **закон Віна називають законом зміщення**.

Закон Віна застосовується в **оптичній пірометрії** – методу визначення температури по спектру випромінювання сильно нагрітих тіл, які віддалені від спостерігача. Саме цим методом вперше була визначена температура Сонця (для 470 нм $T = 6160 \text{ К}$).

Представлені закони не дозволяли теоретично знайти рівняння розподілу спектральної щільності енергетичної світності по довжинах хвиль. Праці **Релея і Джинса**, в яких вчені досліджували спектральний склад випромінювання **АЧТ** на основі законів класичної фізики, привели до принципових труднощів, названих ультрафіолетовою катастрофою. У діапазоні **УФ**-хвиль енергетична світність **АЧТ** повинна була досягати нескінченності, хоча в досліджах вона зменшувалася до нуля. Ці результати суперечили закону збереження енергії.

4. Теорія Планка. Німецький учений в 1900 році висунув гіпотезу про те, що тіла випромінюють не безперервно, а окремими порціями - квантами. Енергія кванта пропорційна частоті випромінювання: $E = h\nu = h \cdot c / \lambda$, де $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постійна Планка.

Керуючись уявленнями про квантове випромінювання **АЧТ**, він отримав рівняння для спектральної щільності енергетичної світності **АЧТ**:

Ця формула знаходиться у відповідності з дослідними даними в усьому інтервалі довжин хвиль при всіх температурах. Сонце - основне джерело теплового випромінювання в природі. Сонячне випромінювання займає

широкий діапазон довжин хвиль: від 0,1 нм до 10м і більше. 99% сонячної енергії припадає на діапазон від 280 до 6000нм. На одиницю площі Земної поверхні припадає в горах від 800 до 1000 Вт/м². До земної поверхні доходить одна двохмільярдна частина тепла - 9,23 Дж/см

На діапазон теплового випромінювання від 6000 до 500000нм доводиться 0,4% енергії Сонця. В атмосфері Землі велика частина ІЧ-випромінювання поглинається молекулами води, кисню, азоту, діоксиду вуглецю. Радіодіапазон теж здебільшого поглинається атмосферою.

Кількість енергії, яку приносять сонячні промені за 1с на площу в 1 кв.м, розташовану за межами земної атмосфери на висоті 82 км перпендикулярно сонячним променям називається сонячною постійною. Вона дорівнює $1,4 \cdot 10^3$ Вт/м².

Спектральний розподіл нормальної щільності потоку сонячного випромінювання збігається з таким для АЧТ при температурі 6000 градусів. Тому Сонце щодо теплового випромінювання - АЧТ.

3. Випромінювання реальних тіл і тіла людини

Теплове випромінювання з поверхні тіла людини грає велику роль в тепловіддачі. Існують такі способи тепловіддачі: теплопровідність (кондукція), конвекція, випромінювання, випаровування. Залежно від умов, в яких виявиться людина, кожен із цих способів може мати домінуюче значення (так, наприклад, при дуже високих температурах середовища провідна роль належить випаровуванню, а в холодній воді - кондукція, причому температура води 15 градусів є смертельним середовищем для оголеної людини, і через 2-4 години настає непритомність і смерть внаслідок переохолодження мозку). Частка випромінювання в загальній тепловіддачі може становити від 75 до 25%. У нормальних умовах близько 50% при фізіологічному спокої. Теплове випромінювання, що відіграє роль в житті живих організмів ділиться на короткохвильове (від 0,3 до 3 мкм) і довгохвильове (від 5 до 100мкм). Джерелом короткохвильового

випромінювання служать Сонце і відкрите полум'я, а живі організми є виключно реципієнтами такого випромінювання. Довгохвильова радіація і випромінюється, і поглинається живими організмами.

Величина **коефіцієнта поглинання** залежить від співвідношення температур середовища і тіла, площі їх взаємодії, орієнтації цих площ, а для короткохвильового випромінювання - від кольору поверхні. Так у негрів відбувається відображення лише 18% короткохвильового випромінювання, тоді як у людей білої раси близько 40% (швидше за все, колір шкіри негрів в еволюції не мав відношення до теплообміну). Для довгохвильового випромінювання коефіцієнт поглинання наближений до 1.

Розрахунок теплообміну випромінюванням - дуже важке завдання. Для реальних тіл використовувати закон **Стефана-Больцмана** не можна, оскільки у них більш складна залежність енергетичної світності від температури. Виявляється, вона залежить від температури, природи тіла, форми тіла і стану його поверхні. Зі зміною температури змінюється коефіцієнт σ і показник ступеня температури. Поверхня тіла людини має складну конфігурацію, людина носить одяг, який змінює випромінювання, на процес впливає поза, в якій знаходиться людина. Для сірого тіла потужність випромінювання у всьому діапазоні визначається за формулою: **$P = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S$** .

Вважаючи, з певними наближеннями, реальні тіла реальні тіла (шкіра людини, тканини одяг) близькими до сірих тіл, можна знайти формулу для обчислення потужності випромінювання реальними тілами при певній температурі: **$P = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S$** .

В умовах різних температур випромінюючого тіла і навколишнього середовища: **$P = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S$**

Існують особливості спектральної щільності енергетичної світності реальних тел: при 310К, що відповідає середній температурі тіла людини, максимум теплового випромінювання доводиться на 9700нм. Будь-яка зміна температури тіла призводить до зміни потужності теплового

випромінювання з поверхні тіла (0,1 градус достатньо). Тому дослідження ділянок шкіри, через ЦНС пов'язаних з певними органами, сприяє виявленню захворювань, в результаті яких температура змінюється досить значно (**термографія зон Захар'їна-Геда**).

Цікавий метод безконтактного масажу біополем людини (**Джуна Давіташвілі**). Потужність теплового випромінювання долоні 0,1 Вт, а теплова чутливість шкіри 0,0001 Вт/см².

Якщо діяти на вищезгадані зони, можна рефлекторно стимулювати роботу цих органів.

4. Біологічна і терапевтична дія тепла і холоду

Тіло людини постійно випромінює і поглинає теплове випромінювання. Цей процес залежить від температур тіла людини і навколишнього середовища. Максимум **ІЧ**- випромінювання тіла людини припадає на 9300нм.

При маленьких і середніх дозах опромінення **ІЧ**- променями посилюються метаболічні процеси і прискорюються ферментативні реакції, процеси регенерації і репарації. В результаті дії **ІЧ**-променів і видимого випромінювання в тканинах утворюються **БАВ** (брадикінін, калідін, гістамін, ацетилхолін, в основному вазомоторні речовини, які грають роль у здійсненні і регуляції місцевого кровотоку).

В результаті дії **ІК**-променів у шкірі активуються терморцептори, інформація від яких надходить в гіпоталамус, в результаті чого розширюються судини шкіри, збільшується обсяг циркулюючої в них крові, посилюється потовиділення. Глибина проникнення **ІЧ**-променів залежить від довжини хвилі, вологості шкіри, наповнення її кров'ю ступеня пігментації і т.і.

На шкірі людини під дією **ІЧ**-променів виникає **червона еритема**.

Застосовується в клінічній практиці для впливу на місцеву і загальну гемодинаміку, посилення потовиділення, розслаблення м'язів, зниження больового відчуття, прискорення розсмоктування гематом, інфільтратів і т.і

В умовах гіпертермії посилюється протипухлинна дія променевої терапії - терморадіотерапії. Основні показання застосування ІК-терапії: гострі негнійні запальні процеси, опіки та обмороження, хронічні запальні процеси, виразки, контрактури, спайки, травми суглобів, зв'язок і м'язів, міозити, міалгії, невралгії. Основні протипоказання: пухлини, гнійні запалення, кровотечі, недостатність кровообігу.

Холод застосовується для зупинки кровотеч, знеболювання, лікування деяких захворювань шкіри.

Загартовування веде до довголіття.

Під дією холоду знижується частота серцевих скорочень, артеріальний тиск, пригнічуються рефлекторні реакції. У певних дозах холод стимулює загоєння опіків, гнійних ран, трофічних виразок, ерозій, кон'юнктивітів.

Кріобіологія - вивчає процеси, які відбуваються в клітинах, тканинах, органах і організмі під дією низьких, нефізіологічних температур.

У медицині використовуються **кріотерапія і гіпертермія**.

Кріотерапія включає методи, засновані на дозованому охолодженні тканин, органів. **Кріохірургія** (частина кріотерапії) використовує локальне заморожування тканин з метою їх видалення (частина мигдалини. Якщо вся - **кріотонзілоектомія**. Можна видаляти пухлини, наприклад, шкіри, шийки матки і т.і.) **Кріоекстракція**, заснована на **кріоадгезії** (прилипанні вологих тіл до замороженого скальпелю) - виділення з органу частини.

При **гіпертермії** можна якийсь час зберегти функції органів. Гіпотермію за допомогою наркозу використовують для збереження функції органів при відсутності кровопостачання, оскільки сповільнюється обмін речовин у тканинах. Тканини стають стійкими до гіпоксії.

Застосовують холодний наркоз. Здійснюють дію тепла за допомогою ламп розжарювання (лампа Мініна, солюкс, ванна світлотеплова, лампа ІК-променів) з використанням фізичних середовищ, що мають високу теплоємність, погану теплопровідність і гарну теплозберігаючу здатність: грязі, парафін, озокерит, нафталін і т.і.

5. Фізичні основи термографії. Тепловізори

Термографія, або тепlobачення - це метод функціональної діагностики, заснований на реєстрації ІЧ- випромінювання тіла людини.

Існує 2 різновиди термографії:

- **Контактна холестерична термографія:** в методі використовуються оптичні властивості холестеричних рідких кристалів (багатокомпонентні суміші складних ефірів та інших похідних холестерину). Такі речовини вибірково відображають різні довжини хвиль, що дає можливим отримувати на плівках цих речовин зображення теплового поля поверхні тіла людини. На плівку направляють потік білого світла. Різні довжини хвиль порізноmu відбиваються від плівки залежно від температури поверхні, на яку нанесений **холестерік**.

Під дією температури холестеріки можуть змінювати колір від червоного до фіолетового. В результаті формується кольорове зображення теплового поля тіла людини, яке легко розшифрувати, знаючи залежність температура-колір. Існують холестеріки, що дозволяють фіксувати різницю температур 0,1 градуси. Так, можна визначити межі запального процесу, вогнища запальної інфільтрації на різних стадіях її розвитку. В онкології термографія дозволяє виявити метастатичні вузли діаметром 1,5-2мм в молочній залозі, шкірі, щитовидній залозі; в ортопедії і травматології оцінити кровопостачання кожного сегмента кінцівки, наприклад, перед ампутацією, випередити глибину опіку і т.і.; в кардіології та ангіології виявити порушення нормального функціонування ССС, порушення кровообігу при вібраційній хворобі, запаленні і закупорки судин, розширення вен і т.і.; в нейрохірургії визначити розташування вогнищ пошкодження провідності нерва, підтвердити місце нейропараліча, викликаного апоплексією; в акушерстві та гінекології визначити вагітність, локалізацію дитячого місця; діагностувати широкий спектр запальних процесів.

- **Телетермографія** - базується на перетворенні інфрачервоного випромінювання тіла людини в електричні сигнали, які реєструються на екрані тепловізора або іншому записуючому пристрої. Метод безконтактний. ІЧ-випромінювання сприймається системою дзеркал, після чого ІЧ-промені направляються на приймач ІЧ-хвиль основну частину якого становить детектор (фотоопір, металевий або напівпровідниковий **болومتر**, термоелемент, фотохімічний індикатор, електронно-оптичний перетворювач, п'єзоелектричні детектори і т.і.).

Електричні сигнали від приймача передаються на підсилювач, а потім - на управляючий пристрій, що служить для переміщення дзеркал (сканування об'єкта), розігрівання точкового джерела світла **ТДС** (пропорційно тепловому випромінюванню), руху фотоплівки. Кожен раз плівка засвічується **ТДС** (точкове джерело світла) відповідно температурі тіла в місці дослідження.

Після керуючого пристрою сигнал може передаватися на комп'ютерну систему з дисплеєм. Це дозволяє запам'ятовувати термограми, обробляти їх за допомогою аналітичних програм. Додаткові можливості надають кольорові тепловізори (близькі по температурі кольору позначити контрастними кольорами), провести ізотерми.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

□ *Литнарівич Р.М.* Фізика з основами геофізики. Курс лекцій. МЕНУ, Рівне, 2007.-78 с.

□ *Литнарівич Р.М.* Фізика з основами геофізики. Лабораторний практикум. Частина 1. МЕНУ, Рівне, 2007.-44с.

□ *Литнарівич Р.М.* Фізика з основами геофізики. Лабораторний практикум. Частина 2. МЕНУ, Рівне, 2008.-48с.